



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องสำเร็จรูปที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำที่ผสมกับถั่ว
และไม่ผสมถั่ว

Development of low glycemic index instant rice with and without legumes

ผศ.ดร.นภัสรพี เหลืองสกุล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องสำเร็จรูปที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำที่ผสมกับถั่วและไมผผสมถั่ว
แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดินปีงบประมาณ 2561

ประจำปีงบประมาณ 2561 **จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน** 634,700 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2560 ถึง 30 กันยายน 2561

ชื่อ-สกุล ผศ.ดร.นภัสรพี เหลืองสกุล (หัวหน้าโครงการ) คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ปัจจุบันข้าวกล้องสำเร็จรูปเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากใช้เวลาน้อยลงในการหุง และเพื่อให้ผลิตภัณฑ์นี้เหมาะสมต่อการบริโภคของผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวาน งานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษากระบวนการที่เกี่ยวกับการแปรรูปข้าวกล้องสำเร็จรูปเพื่อลดค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวกล้องสำเร็จรูป ได้แก่ ศึกษาผลของสภาวะในการหุงข้าว การเติมน้ำมันระหว่างการหุง และอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง ค่าดัชนีน้ำตาล สมบัติทางเคมีกายภาพ (สมบัติทางความร้อน ลักษณะโครงสร้างผลึก และสมบัติด้านความหนืด) อัตราการกินตัว และลักษณะพื้นผิวของข้าวกล้องสำเร็จรูป ซึ่งข้าวที่นำมาแปรรูปมีทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเส้าไห้ โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการแปรอุณหภูมิในการหุงข้าว และสัดส่วนของน้ำต่อข้าวสาร เพื่อหาสภาวะของการหุงที่เหมาะสมในการแปรรูปข้าวกล้องสำเร็จรูปลดค่าดัชนีน้ำตาล ซึ่งจะพบว่าการหุงข้าวที่อุณหภูมิต่ำ (82°C) ร่วมกับการใช้น้ำในสัดส่วนสูง (1.9 ของน้ำหนักแห้งของข้าว) จะสามารถลดปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณได้ ในขณะที่ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า และปริมาณสตาร์ชทนย่อยจะเพิ่มสูงขึ้น การใช้อุณหภูมิสูงในการหุงข้าว (90°C) จะทำให้เม็ดสตาร์ชที่เป็นองค์ประกอบภายในข้าวถูกทำลายอย่างมาก ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ลดลง นอกจากนี้การหุงข้าวที่อุณหภูมิสูง หรือการใช้สัดส่วนของน้ำต่อข้าวสารน้อยจะทำให้พื้นผิวของเมล็ดข้าวเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ โดยจากการทดลองนี้พบว่าสภาวะของการหุงข้าวทั้ง 3 ชนิดที่มีความเหมาะสมในการแปรรูปข้าวกล้องสำเร็จรูปลดค่าดัชนีน้ำตาลได้แก่ การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 82°C ร่วมกับสัดส่วนของข้าวสารต่อน้ำเท่ากับ 1.0:1.9 ของน้ำหนักแห้งของข้าว ซึ่งค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูป หอมปทุมกล้องสำเร็จรูป และเส้าไห้กล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่สภาวะนี้จะมีค่าเท่ากับ 77.31 75.87 และ 67.44 ตามลำดับ

สำหรับการศึกษาเรื่องผลของการเติมน้ำมันในระหว่างการหุงข้าว น้ำมันที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันรำข้าว ซึ่งมีการแปรปริมาณน้ำมันได้แก่ร้อยละ 2.5 5 และ 7.5 ของน้ำหนักข้าว จากผลการทดลองพบว่าการเติมน้ำมันลงไปในช่วงขั้นตอนการหุงช่วยลดค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวกล้องสำเร็จรูปได้ เนื่องจากมีการเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันขึ้น โดยจากการ

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนพบ พิกของการแตกสลายโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ข้าวที่ผ่านการหุงร่วมกับน้ำมันยังพบรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบผสมกับแบบวี และการเพิ่มปริมาณน้ำมันจะส่งผลให้ดัชนีของผลึกเพิ่มสูงขึ้นในข้าวหอมมะลิ และข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูป อย่างไรก็ตามการใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 2.5 จะส่งผลให้ข้าวเสาให้ถึงสำเร็จรูปมีดัชนีของผลึกมากที่สุดในส่วนของสมบัติทางด้านความหนืด การเพิ่มขึ้นของโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันจะส่งผลให้ค่า PV ลดลง

เมื่อนำข้าวที่ผ่านการหุงด้วยสภาวะในการให้ความร้อนที่เหมาะสมมาอบแห้ง โดยมีการแปรอุณหภูมิในการอบแห้งได้แก่ 40 50 และ 60°C พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C สามารถลดค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปได้ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิในการอบแห้งที่เปลี่ยนแปลงไปจะไม่มีผลต่อค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวหอมปทุม และข้าวเสาให้ถึงสำเร็จรูป นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งจะทำให้พลังงานในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (ΔH) ของแป้งข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งลักษณะพื้นผิวของข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C จะมีความแน่น และมีรูพรุนเป็นจำนวนน้อย ซึ่งลดความสามารถในการเข้าไปย่อยโดยเอนไซม์ ดังนั้นค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวหอมมะลิที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C จึงมีค่าลดลง

คำสำคัญ : ข้าวถึงสำเร็จรูป สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง ค่าดัชนีน้ำตาล โครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน

Research Title: Development of low glycemic index instant rice with and without legumes

Researcher: Asst. Prof. Dr.Naphatrapi Luangsakul

Faculty: Agro – industry

Department: Food science

ABSTRACT

By its shorter cooking time, instant rice has become more popular. To make it more suitable for diabetics, the processes involved in the production of instant rice were studied. Thus, the objective of this research was to study the effect of cooking condition, oil addition during rice cooking and drying temperature on *in vitro* starch digestibility, GI, some physicochemical properties (thermal properties, X-ray diffraction patterns and pasting properties), rehydration ratio and the microstructure of instant rice. Three Thai rice varieties: Hom Mali (KDML105), Pathumthani Fragrant (PT) and Sao Hai (SH) were produced to obtain instant rice. For optimizing cooking condition, cooking temperature and the ratio of water to rice were varied. Rice cooked at lower temperature (82°C) with higher water ratio (1.9-fold volume of water) caused the decrease in rapidly digestible starch (RDS) content and estimated glycemic index (eGI), while slowly digestible starch (SDS) and resistant starch (RS) contents were increased. Cooking at higher temperature (90°C) caused greater degradation of starch granules, which led to the decrease in peak viscosity (PV). The microstructure of instant rice kernels after cooking at higher temperature or lower ratio of water to rice that showed larger voids on their periphery. The optimal cooking condition for producing lower GI instant rice was cooking at 82°C with 1.9-fold water volume. In addition, eGI of instant rice, which were produced by optimal cooking condition, were 77.31, 75.87 and 67.44 for KDML105, PT and SH, respectively.

For the addition of oil, two type of cooking oil, including coconut oil and rice bran oil at 2.5, 5 and 7.5% (w/w, on the basis of uncooked rice) were added to three Thai rice cultivars during cooking. The addition of oil could reduce GI of instant rice through the formation of amylose-lipid complex. Thermal properties showed amylose-lipid complex dissociation peaks when rice was cooked with oil. In X-ray diffraction patterns, cooked rice with oil showed A+V type crystalline structure. As increasing the amount of oil, the degree of crystallinity of KDML105 and PT instant rice were increased. On the other hand, the highest degree of crystallinity of SH instant rice was found in

2.5% of rice bran oil addition. In pasting properties, the formation of amylose-lipid complexes resulted in a lower PV.

After cooking with optimal cooking condition, rice was dried at 40, 50 and 60°C to a low moisture content. Drying at 50 and 60°C caused lower GI of KDML105 instant rice. However, drying temperature did not impact on GI of PT and SH instant rice. Higher drying temperature caused increase in enthalpy (ΔH) of KDML105 instant rice flour. In addition, drying at 50 and 60°C resulted in less voids and compact surface in KDML105 instant rice, which decreased enzymatic accessibility as well as decreased GI of instant rice.

Keywords : instant rice, *in vitro* starch digestibility, glycemic index, amylose-lipid complex



กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากแหล่งเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2561 นอกจากนี้ขอขอบคุณ Prof. Dr. Anthony Keith Thompson ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการตีพิมพ์งานวิจัยลงในวารสาร

ผศ.ดร.นภัสรพี เหลืองสกุล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ Wong Aung Eng ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	X
สารบัญภาพ	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ข้าว	5
2.1.1 โครงสร้างของข้าว	5
2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว	6
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพในการหุงต้มข้าว	8
2.2.1 ปริมาณอะมิโลส (amylose content)	8
2.2.2 ปริมาณอะมิโลเพกติน (amylopectin content)	10
2.2.3 ความคงตัวของแป้งสุก (gel consistency)	10
2.2.4 อุณหภูมิแป้งสุก (gelatinization temperature)	11
2.2.5 ปริมาณโปรตีน (protein content)	11
2.2.6 กลิ่นหอม (aroma)	11
2.3 ข้าวกึ่งสำเร็จรูป (instant rice)	11
2.3.1 ปัจจัยในการผลิตที่มีผลต่อคุณภาพของข้าวกึ่งสำเร็จรูป	12
2.3.2 กรรมวิธีการแปรรูปข้าวกึ่งสำเร็จรูป	14
2.3.3 ลักษณะของข้าวกึ่งสำเร็จรูปเมื่อเป็นผลิตภัณฑ์แห้ง	16
2.3.4 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ภายหลังการคืนรูป	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การย่อยคาร์โบไฮเดรต	16
2.4.1 ความสามารถในการย่อยของสตาร์ช (starch digestibility)	17
2.4.2 ความสัมพันธ์ของปริมาณแป้งทนย่อยกับค่าดัชนีน้ำตาล	18
2.4.3 กระบวนการแปรรูปที่มีผลต่อความสามารถในการย่อย และค่าดัชนีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์ข้าว	20
2.5 สารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง	25
3.1 วัตถุประสงค์	25
3.2 เครื่องมือ	25
3.3 สารเคมี	26
3.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารในขั้นตอนการหุงข้าวที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ	27
3.5 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีต่อโครงสร้างภายในเมล็ดข้าวถึงสำเร็จรูปสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ	34
3.6 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อโครงสร้างภายในเมล็ดข้าวถึงสำเร็จรูปสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองของแป้งและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ	36
บทที่ 4 การทดลองและวิจารณ์	39
4.1 ผลของอุณหภูมิให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารในขั้นตอนการหุงข้าวที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ	39
4.1.1 ผลของอุณหภูมิให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ	39
4.1.2 ผลของอุณหภูมิให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารที่มีต่อสมบัติด้านความเหนียวของแป้งข้าวถึงสำเร็จรูป	56
4.1.3 ผลของอุณหภูมิให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาคและพื้นผิวของข้าวถึงสำเร็จรูป	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลของชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีต่อ โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวกล้องสำเร็จรูป สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณ	70
4.2.1 ผลของชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งใน หลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณ	70
4.2.2 ผลของชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีต่อสมบัติด้านความหนืดของข้าว กึ่งสำเร็จรูป	74
4.2.3 ผลของชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของข้าว กึ่งสำเร็จรูป	79
4.2.4 ผลของชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีต่อ โครงสร้างผลึกของอนุภาคแป้งข้าว กึ่งสำเร็จรูป	85
4.2.5 ผลของชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีต่อ โครงสร้างทางจุลภาคและพื้นผิวของ ข้าวกึ่งสำเร็จรูป	90
4.3 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อ โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวกล้องสำเร็จรูป สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณ	94
4.3.1 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอด ทดลองและค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณ	95
4.3.2 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อสมบัติด้านความหนืดของข้าว กึ่งสำเร็จรูป	97
4.3.3 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของข้าว กึ่งสำเร็จรูป	99
4.3.4 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่ออัตราการคืนตัวของข้าวกล้องสำเร็จรูป	101
4.3.5 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อ โครงสร้างทางจุลภาคและพื้นผิวของ ข้าวกล้องสำเร็จรูป	102
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	107
5.1 สรุปผลการทดลอง	107
5.2 ข้อเสนอแนะ	108
บทที่ 6 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย	109
บรรณานุกรม	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	116
ภาคผนวก ก	117
ภาคผนวก ข	128
ภาคผนวก ค	146
ภาคผนวก ง	150
ภาคผนวก จ	151
ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย	155



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวเปลือกและส่วนที่ได้จากการขัดสีที่ ความชื้นร้อยละ 14	6
2.2 การแบ่งประเภทของข้าวไทยตามปริมาณอะมิโลส	9
2.3 การแบ่งประเภทข้าวตามค่าความคงตัวของแป้งสุก	10
2.4 รูปแบบของผลิตภัณฑ์ข้าวถึงสำเร็จรูป หรือข้าวหุงสุกเร็ว	12
2.5 ประเภทของสสารที่หน่ย	17
2.6 ประเภทและแหล่งอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI) ในระดับต่าง ๆ	19
3.1 ผลของอุณหภูมิและสัดส่วนของน้ำที่มีต่อเวลาในการหุงข้าวชนิดต่าง ๆ	27
3.2 การวางแผนการทดลองแบบ central composite design (CCD)	33
4.1 สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวหอมมะลิ ถึงสำเร็จรูปที่ได้จากแต่ละหน่วยการทดลอง	40
4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอยสำหรับการแปรรูปข้าวหอมมะลิ ถึงสำเร็จรูป	41
4.3 สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวหอมปทุม ถึงสำเร็จรูปที่ได้จากแต่ละหน่วยการทดลอง	43
4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอยสำหรับการแปรรูปข้าวหอมปทุม ถึงสำเร็จรูป	44
4.5 สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวเสาไห้ถึงสำเร็จรูปที่ได้ จากแต่ละหน่วยการทดลอง	45
4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอยสำหรับการแปรรูปข้าวเสาไห้ ถึงสำเร็จรูป	46
4.7 ค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวถึงสำเร็จรูปทั้งสามชนิดที่ได้จาก การทำนายและได้จากการวิเคราะห์	56
4.8 สมบัติด้านความเหนียวของแป้งข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปที่ได้จากการหุงที่สภาวะต่าง ๆ	57
4.9 สมบัติด้านความเหนียวของแป้งข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูปที่ได้จากการหุงที่สภาวะต่าง ๆ	58
4.10 สมบัติด้านความเหนียวของแป้งข้าวเสาไห้ถึงสำเร็จรูปที่ได้จากการหุงที่สภาวะต่าง ๆ	59
4.11 สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวหอมมะลิ ถึงสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงโดยมีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน	70

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณของข้าวหอมปทุม กึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุง โดยมีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน	72
4.13 สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณของข้าวเสาไห้ กึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุง โดยมีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน	73
4.14 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุง โดยมีการใส่น้ำมัน และไม่ใส่น้ำมัน	75
4.15 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวหอมปทุมกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุง โดยมีการใส่น้ำมัน และไม่ใส่น้ำมัน	76
4.16 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเสาไห้กึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุง โดยมีการใส่น้ำมัน และไม่ใส่น้ำมัน	77
4.17 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุง โดยมีการใส่น้ำมัน และไม่ใส่น้ำมัน	80
4.18 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวหอมปทุมกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุง โดยมีการใส่น้ำมัน และไม่ใส่น้ำมัน	81
4.19 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเสาไห้กึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุง โดยมีการใส่น้ำมัน และไม่ใส่น้ำมัน	82
4.20 รูปแบบโครงสร้างผลึกและดีกรีของผลึก (degree of crystallinity) ของแป้งข้าว กึ่งสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน	89
4.21 สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณของข้าว กึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกัน	95
4.22 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกัน	98
4.23 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกัน	100
4.24 อัตราการคืนตัวของข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกัน	101
ง-1 สมบัติทางความร้อนของข้าวที่ผ่านกระบวนการต่าง ๆ	150

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว	6
2.2 โครงสร้างโมเลกุลของอะมิโลส	7
2.3 โครงสร้างโมเลกุลของอะมิโลเพกติน	8
2.4 โครงสร้างฮีลิกซ์ของอะมิโลส และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและกรดไขมันอิ่มตัว	21
3.1 กระบวนการเตรียมข้าวกล้องสำเร็จรูป	28
4.1 ภาพพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารกับปริมาณสตาร์ชย่อยเร็วของข้าวกล้องสำเร็จรูป	48
4.2 ภาพพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารกับปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้าของข้าวกล้องสำเร็จรูป	50
4.3 ภาพพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารกับปริมาณสตาร์ชทนย่อยของข้าวกล้องสำเร็จรูป	52
4.4 ภาพพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารกับค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวกล้องสำเร็จรูป	54
4.5 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 82°C	61
4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 86°C	62
4.7 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 90°C	63
4.8 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมปทุมกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 82°C	64
4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมปทุมกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 86°C	65
4.10 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมปทุมกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 90°C	66
4.11 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวเสาไห้กล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 82°C	67
4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวเสาไห้กล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 86°C	68
4.13 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวเสาไห้กล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 90°C	69
4.14 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูป	86
4.15 ลักษณะโครงสร้างผลึกของของแป้งข้าวหอมปทุมกล้องสำเร็จรูป	87
4.16 ลักษณะโครงสร้างผลึกของของแป้งข้าวเสาไห้กล้องสำเร็จรูป	88
4.17 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงโดยมีการใส่น้ำมัน	90

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.18 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุง โดยมีการใส่น้ำมัน	91
4.19 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวเส้าให้กิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุง โดยมีการใส่น้ำมัน	92
4.20 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมมะลิกิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้ง ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	103
4.21 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่ อุณหภูมิต่าง ๆ	104
4.22 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวเส้าให้กิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้ง ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	105
จ-1 ลักษณะเมล็ดข้าวหอมมะลิ	151
จ-2 ลักษณะเมล็ดข้าวหอมปทุม	152
จ-3 ลักษณะเมล็ดข้าวเส้าให้	152

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวจัดเป็นอาหารหลักของประชากรในทวีปเอเชีย โดยเป็นอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรต ซึ่งให้พลังงานแก่ร่างกาย ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI) เป็นค่าที่บอกลถึงการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำตาลในเลือดเมื่อมีการบริโภคอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต โดยถ้าอาหารชนิดนั้นสามารถเพิ่มระดับน้ำตาลในเลือดอย่างรวดเร็วจะถูกจัดเป็นอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูง ($GI > 70$) และถ้าอาหารชนิดนั้นสามารถเพิ่มระดับน้ำตาลในเลือดได้อย่างช้า ๆ จะถือว่าอาหารชนิดนั้นเป็นอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ ($GI < 55$) (Jenkins และคณะ 1981) มีการรายงานว่า การบริโภคอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูงจะมีความเสี่ยงทำให้เกิดโรคเบาหวาน โรคหัวใจและหลอดเลือด ไขมันอุดตันในเส้นเลือด และโรคอ้วน (Kaur และคณะ 2016; Nanri และ Mizoue, 2014) ดังนั้นการบริโภคอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำจะส่งผลดีต่อสุขภาพของผู้บริโภค ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีประชากรบริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก โดยพบว่าข้าวที่คนไทยนิยมบริโภค เช่น ข้าวหอมมะลิ จะถูกจัดอยู่ในอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูง เนื่องจากข้าวหอมมะลิมิปริมาณอะมิโลสต่ำ ซึ่งปริมาณอะมิโลสมีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีน้ำตาล โดยข้าวที่มีอะมิโลสต่ำ (12 - 20%) จะมีค่าดัชนีน้ำตาลสูงกว่าข้าวที่มีอะมิโลสสูง (25 - 33%) (Srikaeo และ Sopade, 2010) นอกจากนี้ Zhang และ Hamaker (2009) กล่าวว่าค่าดัชนีน้ำตาลจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการย่อยของสตาร์ช โดยสตาร์ชสามารถแบ่งตามอัตราการย่อยได้เป็น 3 ประเภท คือ สตาร์ชย่อยเร็ว (rapidly digestible starch; RDS) สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (slowly digestible starch; SDS) และสตาร์ชทนย่อย (resistant starch; RS) (Englyst และคณะ 1992) ซึ่งอาหารที่มีสตาร์ชย่อยเร็วในปริมาณมากจะมีค่าดัชนีน้ำตาลสูง เนื่องจากสามารถย่อยกลายเป็นกลูโคสได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า และสตาร์ชทนย่อยจะถูกย่อยได้ยากกว่า ส่งผลให้ระดับน้ำตาลในเลือดเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จึงทำให้ค่าดัชนีน้ำตาลของอาหารลดลง (Chang และคณะ 2014)

ในปัจจุบันสังคมไทยมีชีวิตที่เร่งรีบมากขึ้น อาหารที่ใช้เวลาน้อยในการเตรียมถือว่าเป็นตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในปัจจุบัน ข้าวกึ่งสำเร็จรูป (instant rice) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในเรื่องของความสะดวกสบายในการเตรียม เนื่องจากเพียงแค่เติมน้ำร้อนหรือใส่น้ำลงในข้าวชนิดนี้ และนำเข้าไมโครเวฟตามเวลาที่กำหนดก็จะทำให้ได้ข้าวสวยพร้อมรับประทาน นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการกินรูปข้าวกึ่งสำเร็จรูปยังน้อยกว่าการหุงข้าวโดยใช้หม้อหุงข้าวแบบปกติซึ่งจะตอบโจทย์ของคนที่ไม่มีความสามารถในการเตรียมอาหารมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคัดแปรข้าวให้มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลงสามารถทำได้โดยคัดแปรให้โมเลกุลของแป้งภายในข้าวมีคุณสมบัติในการทนต่อการย่อยของเอนไซม์ในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็กซึ่งจะส่งผลให้ระดับน้ำตาลในเลือดเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อเทียบกับการบริโภคข้าวแบบปกติที่ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ข้าวกึ่งสำเร็จรูปจึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้ในการศึกษาเพื่อลดค่าดัชนีน้ำตาลของข้าว เนื่องจากขั้นตอนต่าง ๆ ในการแปรรูปข้าวกึ่งสำเร็จรูปจะส่งผลต่อโครงสร้างภายในเมล็ดข้าว ซึ่งอาจมีผลในการทนต่อการย่อยของเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหาร นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของโครงสร้างเชิงซ้อนภายในเมล็ดข้าวก็จะส่งผลให้ค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลลดลง เนื่องจากเอนไซม์เข้าไปย่อยได้ยากมากขึ้น (Farooq และคณะ 2018) กระบวนการในการแปรรูปข้าวกึ่งสำเร็จรูปแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การแช่ข้าว (soaking) การให้ความร้อนกับข้าว (cooking) และการอบแห้งข้าวที่ผ่านการให้ความร้อน (drying) เพื่อให้ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 11 – 12 โดย Hsu และคณะ (2015a) กล่าวว่ากระบวนการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูปจะมีผลต่อสมบัติทางการย่อย ซึ่งกระบวนการให้ความร้อน การนำไปแช่เย็น และการอบแห้งก็มีผลต่อสมบัติทางการย่อย และงานวิจัยของ Prasert และ Suwannaporn (2009) พบว่าการแปรรูปข้าวกึ่งสำเร็จรูปจะทำให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน ซึ่งโครงสร้างนี้จะช่วยลดค่าการย่อยของข้าวได้ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของโครงสร้างเชิงซ้อนในระหว่างกระบวนการแปรรูปข้าวกึ่งสำเร็จรูปจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการศึกษา โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเป็นการศึกษาผลของกระบวนการในการแปรรูปข้าวกึ่งสำเร็จรูป ได้แก่ ผลของอุณหภูมิการให้ความร้อน สัดส่วนของน้ำต่อน้ำหนักข้าว ชนิดและปริมาณของน้ำมันที่เติมลงไปในช่วงขั้นตอนการหุงข้าว และผลของอุณหภูมิการอบแห้งข้าวสุกที่จะช่วยทำให้โครงสร้างของข้าวกึ่งสำเร็จรูปทนต่อการย่อยของเอนไซม์ได้ดียิ่งขึ้น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลลดลง ซึ่งผลิตภัณฑ์นี้จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งให้กับผู้บริโภคที่ต้องการบริโภคข้าวที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ หรือในผู้ป่วยโรคเบาหวานที่จำเป็นต้องควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ และสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีปริมาณอะมิโลสต่าง ๆ

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีต่อโครงสร้างภายในเมล็ดข้าวกึ่งสำเร็จรูป สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ และสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีปริมาณอะมิโลสต่าง ๆ

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อโครงสร้างภายในเมล็ดข้าวถึงสำเร็จรูปสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ และสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวถึงสำเร็จรูปที่มีปริมาณอะมิโลสต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปข้าวถึงสำเร็จรูปที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ และสมบัติทางเคมีกายภาพ โดยข้าวที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเสาไห้ โดยจะนำข้าวในแต่ละชนิดมาทำการแปรรูปให้ได้เป็นข้าวถึงสำเร็จรูป ซึ่งขั้นตอนของกระบวนการแปรรูปที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ ขั้นตอนการทำให้ข้าวสุก โดยมีการศึกษาผลของอุณหภูมิและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารที่ใช้ในการหุง ที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ สมบัติด้านความหนืด และพื้นผิวของตัวอย่างโดยการใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยในการทดลองนี้จะมีการออกแบบการทดลองแบบ central composite design (CCD) และมีการนำเสนอข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ออกมาเป็นพื้นผิวตอบสนอง (RSM) นอกจากนี้มีการวิเคราะห์หาอุณหภูมิและสัดส่วนของน้ำในการหุงข้าวที่มีความเหมาะสม เพื่อนำมาแปรรูปข้าวถึงสำเร็จรูปที่มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง

ศึกษาผลของการเติมน้ำมัน 2 ชนิด ได้แก่ น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันรำข้าว ในปริมาณที่แตกต่างกันในขั้นตอนการหุงข้าว ที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ สมบัติด้านความหนืด สมบัติทางความร้อน โครงสร้างผลึกของอนุภาคแป้ง และพื้นผิวของตัวอย่าง โดยในการทดลองนี้จะหาชนิดและปริมาณน้ำมันที่มีความเหมาะสมเพื่อให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันภายในเมล็ดข้าว ได้มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้ข้าวถึงสำเร็จรูปมีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง

ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (40 - 60°C) ที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ สมบัติด้านความหนืด สมบัติทางความร้อน อัตราการคืนตัวของข้าวถึงสำเร็จรูป และพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งการทดลองนี้จะเป็นการหาอุณหภูมิในการอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อให้ข้าวถึงสำเร็จรูปมีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิและสัดส่วนของน้ำต่อข้าวสารในขั้นตอนการหุงที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ สมบัติด้านความหนืด และโครงสร้างพื้นผิวของข้าวถึงสำเร็จรูป โดยมีการแปรอุณหภูมิคือ 82 86 และ 90°C และแปรสัดส่วน

ของน้ำต่อข้าวสาร ได้แก่ 1.0:1.0 1.0:1.45 และ 1.0:1.9 ของน้ำหนักแห้งของข้าว ข้าวถึงสำเร็จรูปที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์โดยไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จากสถานะในการหุงที่แตกต่างกันจะถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง และสมบัติทางเคมีกายภาพ เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการหุงข้าวเพื่อให้ได้ข้าวกึ่งสำเร็จรูปลดค่าดัชนีน้ำตาล

1.4.2 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณน้ำมันที่เติมในขั้นตอนการหุงข้าว ที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ สมบัติด้านความหนืด สมบัติทางความร้อน โครงสร้างผลึกของอนุภาคแป้ง และพื้นผิวของข้าวกึ่งสำเร็จรูป โดยน้ำมันที่ใช้ในการศึกษาคือ น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันรำข้าว ซึ่งมีการแปรปริมาณน้ำมันได้แก่ ร้อยละ 2.5 5 และ 7.5 ของน้ำหนักข้าว

1.4.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งในขั้นตอนแรก ที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ สมบัติด้านความหนืด สมบัติทางความร้อน อัตราการคืนตัวของข้าวกึ่งสำเร็จรูป และพื้นผิวของข้าวกึ่งสำเร็จรูป โดยแปรอุณหภูมิในการอบได้แก่ 40 50 และ 60°C

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงผลของอุณหภูมิในการหุงข้าวและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ และสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีปริมาณอะมิโลสต่าง ๆ

1.5.2 ได้สถานะในการหุงข้าวที่เหมาะสม เพื่อแปรรูปข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง

1.5.3 ทราบถึงผลของชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีต่อโครงสร้างภายในเมล็ดข้าวกึ่งสำเร็จรูป สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ สมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีปริมาณอะมิโลสต่าง ๆ

1.5.4 ได้ชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีความเหมาะสมในการเติมลงไปขั้นตอนการหุงข้าวเพื่อให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันมากที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้ค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวลดลง

1.5.5 ทราบถึงผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อ โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวกึ่งสำเร็จรูป สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ และสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีปริมาณอะมิโลสต่าง ๆ

1.5.6 ได้อุณหภูมิในการอบที่มีความเหมาะสม เพื่อแปรรูปข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง

1.5.7 สามารถลดค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวได้โดยการแปรรูปข้าวให้กลายเป็นข้าวกึ่งสำเร็จรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าว

ข้าวเป็นพืชที่อยู่ในตระกูลหญ้าใบเลี้ยงเดี่ยว ซึ่งจัดอยู่ในจีนัส *Oryza* โดยสามารถเจริญเติบโตได้ดีทั้งในเขตร้อน (tropical zone) และเขตอบอุ่น (temperate zone) ข้าวที่นิยมปลูกเพื่อบริโภคแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ข้าวเอเชีย (*Oryza sativa* Linn) และข้าวแอฟริกา (*Oryza glaberrima* Steud) (อรอนงค์, 2556) คนไทยนิยมบริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก โดยชนิดข้าวที่นิยมปลูกในประเทศไทยคือ *Oryza sativa* Linn. นอกจากการบริโภคภายในประเทศ ข้าวยังเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของไทยซึ่งจะนำรายได้เข้าประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาท (กองวิจัยสินค้าและการตลาด, 2538)

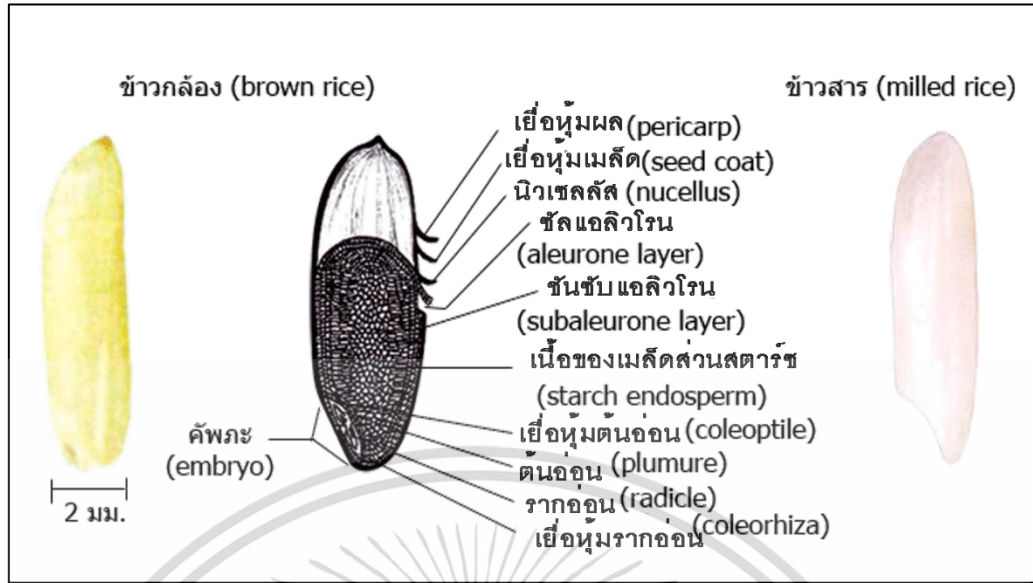
ข้าวเอเชีย (*Oryza sativa* Linn) สามารถแบ่งออกเป็นชนิดย่อย (Sub-species) ได้ออกเป็น 3 กลุ่มได้แก่ จาปอนิกา (Japonica) โดยเมล็ดจะมีลักษณะป้อมสั้น มีปริมาณอะมิโลสต่ำ (ร้อยละ 0-20) และทนต่ออากาศหนาวได้ดี ข้าวชนิดนี้มีถิ่นกำเนิดในเอเชียตะวันออกได้แก่ ประเทศจีน ญี่ปุ่น และเกาหลี กลุ่มที่สองเรียกว่า อินดิกา (Indica) โดยเมล็ดจะมีลักษณะยาวเรียวยาว เจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อน ข้าวชนิดนี้มีถิ่นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และกลุ่มที่สามคือ จาวานิกา (Javanica) โดยเมล็ดจะมีลักษณะใหญ่และป้อม ต้นสูง มีถิ่นกำเนิดอยู่ในเกาะชวา สำหรับประเทศไทยพันธุ์ข้าวที่ทางราชการได้รับรองและแนะนำให้เกษตรกรปลูกอย่างกว้างขวางคือข้าวในกลุ่มอินดิกา (Indica) (บริสุทธิ์, 2537)

2.1.1 โครงสร้างของข้าว

เมล็ดข้าว (ภาพที่ 2.1) ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว หรือที่เรียกว่าแกลบ (hull หรือ husk) และส่วนที่สองคือ ส่วนเนื้อผล (true fruit) หรือ ข้าวกล้อง (brown rice) ซึ่งจะมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้ (Juliano, 1993)

2.1.1.1 แกลบ เป็นส่วนที่ห่อหุ้มอยู่ภายนอก ช่วยป้องกันเมล็ดจากการถูกทำลายจากภายนอก ในส่วนนี้จะประกอบด้วย เปลือกใหญ่ (lemma) เปลือกเล็ก (palea) ขนหาง ข้าวเมล็ด (rachilla) และกลีบรองเมล็ด (sterile lemmas)

2.1.1.2 เนื้อผลหรือข้าวกล้อง ซึ่งจะเป็นส่วนที่บริโภคได้ ในส่วนนี้จะประกอบด้วย เยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด นิวเซลลัส (nucellus) เยื่อชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) ซึ่งส่วนนี้จะประกอบไปด้วย คัพพะ และ เนื้อเมล็ด หรือเนื้อข้าว (endosperm)



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ที่มา : www.ricethailand.go.th/rkb/varieties, 2561

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว

Juliano (1993) ได้ทำการหาปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวเปลือก และส่วนที่ได้จากการขัดสี โดยแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวเปลือกและส่วนที่ได้จากการขัดสีที่ความชื้นร้อยละ 14

ส่วนของข้าว	โปรตีน (กรัม)	ไขมัน (กรัม)	เส้นใย (กรัม)	เถ้า (กรัม)	คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	เส้นใยอาหาร (ก.)	พลังงาน	
							(กิโลจูล)	(กิโลแคลอรี)
ข้าวเปลือก	5.8-7.7	1.5-2.3	7.2-10.4	2.9-5.2	64-73	16.4-19.2	1,580	378
ข้าวกล้อง	7.1-8.3	1.6-2.8	0.6-1	1-1.5	73-87	2.9-3.9	1,520-1,610	363-385
ข้าวสาร	6.3-7.1	0.3-0.5	0.2-0.5	0.3-0.8	77-89	0.7-2.3	1,460-1,560	349-373
รำข้าว	11.3-14.9	15-19.7	7-11.4	6.6-9.9	34-62	24-29	670-1,990	399-476
แกลบ	2.0-2.8	0.3-0.8	34.5-45.9	13.2-21	22-34	66-74	1,110-1,390	265-332

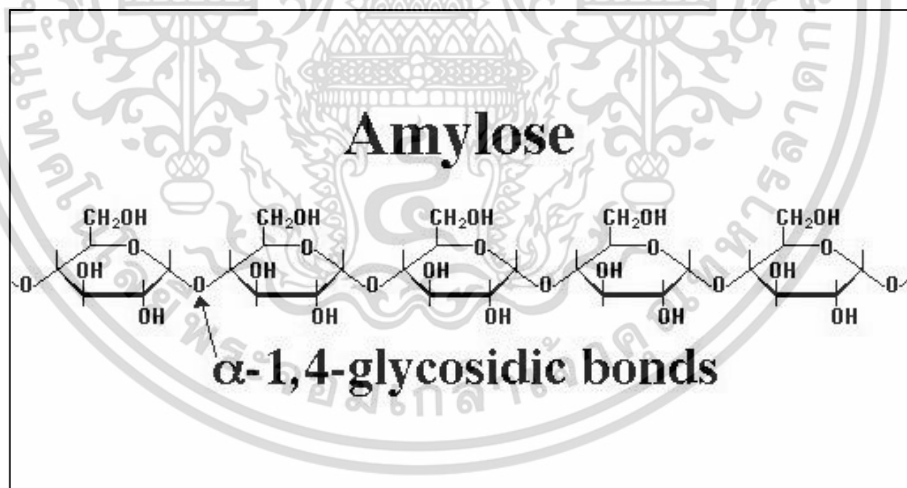
ที่มา: Juliano (1993)

จากตารางที่ 2.1 จะพบว่าข้าวเปลือกจะมีเส้นใย เถ้า และเส้นใยอาหารมากกว่าข้าวกล้อง และข้าวสาร เนื่องจากส่วนเปลือก หรือแกลบจะอุดมไปด้วยองค์ประกอบเหล่านี้ ในส่วนของข้าวสารที่ผ่านการขัดสีจะมีปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า และเส้นใยอาหารลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้อง เนื่องจากองค์ประกอบเหล่านี้พบอยู่ในส่วนของเยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิวเซลลัส เยื่อชั้นแอลิวโรน และคัพภะที่หลุดออกไปในขั้นตอนการขัดสี (Juliano, 1993) ซึ่งเมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบของข้าวในตารางที่ 2.1 จะพบว่าข้าวจะประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งคาร์โบไฮเดรตที่พบในข้าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ สตาร์ช และพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช (อรอนงค์, 2532)

2.1.2.1 สตาร์ช เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบมากที่สุดในข้าว ซึ่งโมเลกุลของสตาร์ชจะรวมตัวกันเป็นเม็ดสตาร์ช (starch granule) มีลักษณะเป็นเม็ดหลายเหลี่ยม ซึ่งจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มภายในอะมิโลพลาสต์ (amyloplast) ซึ่งในแต่ละอะมิโลพลาสต์จะมีเม็ดสตาร์ชเกาะรวมกันอยู่ประมาณ 20 – 60 เม็ด โดยภายในเม็ดสตาร์ชจะประกอบด้วยอะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพกติน (amylopectin) ซึ่งอะมิโลสและอะมิโลเพกตินจะจับและเรียงตัวกันจนแน่นเกิดเป็นเม็ดสตาร์ช (อรอนงค์, 2556)

1) อะมิโลส ประกอบด้วยกลูโคสจับกันด้วยพันธะแอลฟา-1, 4 เกิดเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (linear chains) และมีการจับกันด้วยพันธะแอลฟา-1, 6 เกิดเป็นโซ่กิ่ง (branched chains) ซึ่งจะมีอยู่ประมาณ 3-4 กิ่ง โดยอะมิโลสมีระดับชั้นของพอลิเมอร์โซ่สั้นเฉลี่ย 1,000 – 1,100 และลักษณะของอะมิโลสมีหลายรูปแบบเช่น สายตรง สายพันเป็นเกลียว ทั้งเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) หรือเกลียวม้วนอย่างไม่เจาะจง (random coil)

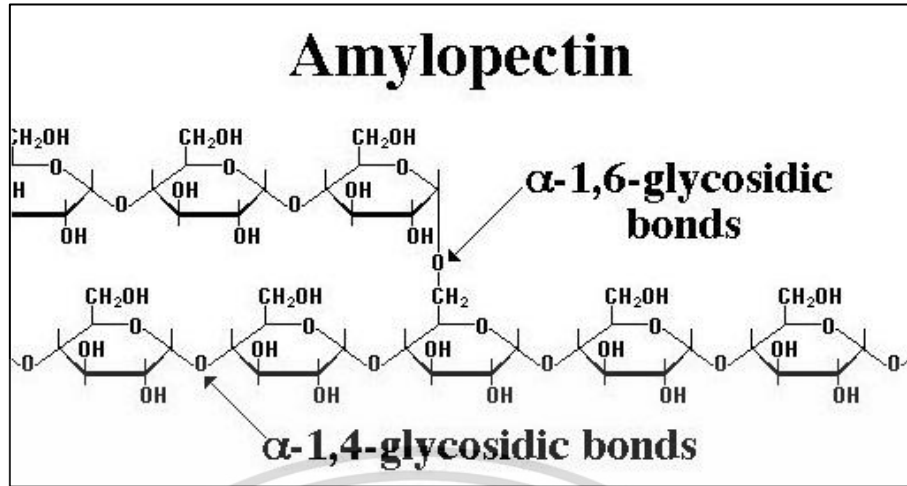


ภาพที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของอะมิโลส

ที่มา: www.smartkitchen.com/resources/amylose

2) อะมิโลเพกติน เป็นพอลิเมอร์ที่มีโซ่กิ่งเป็นแขนง โดยประมาณร้อยละ 96 ต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1, 4 และอีกร้อยละ 4 ต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1, 6 โดยอะมิโลเพกตินมีระดับชั้นของพอลิเมอร์โซ่สั้นเฉลี่ย 4,700 – 18,500 ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ได้มีการสันนิษฐานว่าส่วนที่ทำให้เกิดเป็นโครงร่างเป็นแบบผลึก (crystallinity) นั้นเกิดจากอะมิโลเพกติน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของอะมิโลเพกติน

ที่มา: www.smartkitchen.com/resources/amylopectin, 2561

2.1.2.2 พอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่วิเคราะห์ได้ในรูปเส้นใยอาหาร ซึ่งประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส เพกติน ลิกนิน

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพในการหุงต้มข้าว

คุณภาพในการหุงต้ม หรือคุณภาพของข้าวสุกนั้นจัดเป็นคุณภาพที่ผู้บริโภคใช้ในการตัดสินใจเลือกซื้อข้าว ข้าวบางชนิดมีลักษณะเหนียวนุ่ม หรือบางชนิดแข็งร่วนหุงขึ้นหม้อ ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ลักษณะของข้าวหุงสุกชนิดต่าง ๆ มีความแตกต่างกันได้แก่ (วิภาวี, 2547)

2.2.1 ปริมาณอะมิโลส (amylose content)

อัตราส่วนของอะมิโลสต่ออะมิโลเพกติน (amylose : amylopectin ratio) เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวสุกมีคุณสมบัติแตกต่างกัน โดยข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะดูดน้ำได้ดี และสามารถขยายปริมาตรในระหว่างการหุงต้มได้มากกว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ ซึ่งเมื่อข้าวที่มีอะมิโลสสูงถูกหุงจนสุกจะมีลักษณะที่บวม แข็ง ร่วน และไม่เหนียวติดกัน ดังนั้นปริมาณอะมิโลสจะแปรผันตรงกับการขยายปริมาตรและค่าการดูดน้ำระหว่างการหุงต้ม นอกจากนี้ปริมาณอะมิโลสยังแปรผกผันกับความเหนียวและความนุ่มของข้าวสุก

เนื่องจากปริมาณอะมิโลสในข้าวแต่ละสายพันธุ์มีค่าไม่เท่ากัน งามชื่น (2530) ได้ทำการแบ่งประเภทข้าวไทยตามปริมาณอะมิโลสดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การแบ่งประเภทของข้าวไทยตามปริมาณอะมิโลส

ประเภทข้าว	ปริมาณอะมิโลส	ลักษณะข้าวสุก	ตัวอย่างพันธุ์ข้าวไทย
ข้าวเหนียว	1-2	เหนียวมาก	กข 8
ข้าวอะมิโลสต่ำ	12-20	เหนียว นุ่ม	ข้าวดอกมะลิ 105 กข 15 กข 21
ข้าวอะมิโลสปานกลาง	20-25	นุ่ม ค่อนข้างเหนียว	นางมล เอส-4
ข้าวอะมิโลสปานกลาง ถึงค่อนข้างสูง	25-27	ไม่นุ่ม ไม่แข็ง ค่อนข้างร่วน	ข้าวตาแห้ง 17
ข้าวอะมิโลสสูง	>27	ร่วน แข็ง	เหลืองประทิว 123

ที่มา: งามชื่น (2530)

ปริมาณอะมิโลสมีผลต่อความนุ่มของข้าวสุก จากตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง จะมีลักษณะแข็ง และร่วน เนื่องจากในการหุงข้าว ความร้อนจะส่งผลให้เม็ดแป้งที่อยู่ในข้าวเกิดการบวมพอง สายอะมิโลสที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถผ่านผนังเม็ดแป้งออกมาได้มาก ส่งผลให้ภายในเม็ดแป้งยังคงมีสายอะมิโลสอยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อข้าวสุกเย็นตัวลงจึงเกิดเจลขึ้นภายในเม็ดแป้ง นอกจากนี้ยังมีการเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation) ภายในเม็ดแป้ง อีกทั้งเม็ดแป้งแต่ละเม็ดเป็นอิสระต่อกันเนื่องจากไม่มีสายอะมิโลสหลุดออกมาภายนอก มาเชื่อมกันไว้ จึงส่งผลให้เมื่อทานข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะรู้สึกแข็ง สากลิ้น ในขณะที่ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ จะมีลักษณะนุ่ม และเหนียวมากกว่า เนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการหุงจะทำให้เม็ดแป้งในข้าวบวมพอง สายอะมิโลสที่มีขนาดเล็กกว่าสามารถผ่านผนังเม็ดแป้งออกมาน้ำที่อยู่รอบ ๆ เมล็ดข้าว เมื่อข้าวเย็นตัวลงจะเกิดเจล และเชื่อมเม็ดแป้งให้ติดกัน การเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลให้ปริมาณอะมิโลสที่เหลืออยู่ภายในเม็ดแป้งมีค่าลดลง อัตราส่วนของอะมิโลสเพกตินต่ออะมิโลสสูงขึ้น ส่งผลให้ข้าวสุกที่ได้มีลักษณะเหนียวนุ่ม (Juliano, 1972)

นอกจากปริมาณอะมิโลสจะมีผลต่อคุณภาพของข้าวสุกดังที่กล่าวไปข้างต้นแล้ว คุณภาพของข้าวสุกยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อข้าวเช่นกัน เพื่อให้ได้ข้าวสุกที่มีเนื้อสัมผัสที่ดีที่สุด สัดส่วนของน้ำที่ใช้ในการหุงจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม โดยพิจารณาตามปริมาณอะมิโลสที่เป็นองค์ประกอบของข้าวด้วย ซึ่งถ้าข้าวมีปริมาณอะมิโลสต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 19) ปานกลาง (ร้อยละ 20 - 25) และสูง (ร้อยละ 25 - 34) สัดส่วนของน้ำที่ต้องการในการหุงข้าวจะอยู่ที่ช่วงประมาณ 1.5 - 1.7 1.9 - 2.1 และ 2.0 - 2.3 เท่าโดยน้ำหนักข้าวตามลำดับ (งามชื่น, 2530) โดยข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะสามารถดูดน้ำได้มากในระหว่างการหุง หากใส่น้ำในปริมาณน้อยจะส่งผลให้ข้าวมีลักษณะแข็งกระด้าง ในขณะที่เมื่อใส่น้ำในปริมาณสูงจะช่วยให้ข้าวมีความนุ่มมากขึ้น (งามชื่น,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2545) ในส่วนของข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำจะต้องการน้ำในปริมาณน้อยกว่า ถ้าหากใส่ น้ำในปริมาณมากจะทำให้ข้าวที่ได้มีความแฉะ นอกจากนี้ระยะเวลาในการสุกของข้าวจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณอะมิโลสอีกด้วย โดยข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะใช้เวลาในการหุงนานกว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ เนื่องจากส่วนของอะมิโลสที่เป็นองค์ประกอบในเม็ดแป้งมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์เส้นตรง ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้น้ำเข้าไปได้ยาก (วิภาวี, 2547)

2.2.2 ปริมาณอะมิโลเพกติน (amylopectin content)

อะมิโลเพกตินมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์แบบกิ่ง ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ จึงสามารถดูดน้ำได้ดี ดังนั้นข้าวที่มีปริมาณอะมิโลเพกตินมาก เช่น ข้าวเหนียว สามารถดูดน้ำได้ดี และข้าวสุกที่ได้จะมีความเหนียวมาก

2.2.3 ความคงตัวของแป้งสุก (gel consistency)

แม้ว่าปริมาณอะมิโลสจะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อคุณภาพในการหุงต้ม หรือคุณภาพของข้าวสุก อย่างไรก็ตามข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสเท่ากันอาจมีคุณภาพของข้าวสุกแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติของแป้งสุกมีอัตราสารคืนตัวที่ไม่เท่ากัน จึงส่งผลให้แป้งสุกมีความแข็งและความนุ่มที่แตกต่างกัน ซึ่งในการหาค่าความคงตัวของแป้งสุกสามารถทำได้โดยการต้มแป้งในสารละลายต่างเพื่อให้แป้งใส จากนั้นทำให้เย็นและวัดระยะทางที่แป้งสุกไหลไปเมื่อวางบนพื้นราบ Juliano et al. (1980) ได้แบ่งประเภทข้าวตามค่าความคงตัวของแป้งสุกดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การแบ่งประเภทข้าวตามค่าความคงตัวของแป้งสุก

ประเภทแป้งสุก	ระยะทางที่แป้งไหล (มิลลิเมตร) (แป้ง 100 มิลลิกรัม ใน KOH 2 มิลลิลิตร)
แป้งสุกแข็ง	26-40
แป้งสุกปานกลาง	41-60
แป้งสุกอ่อน	61-100

ที่มา: ดัดแปลงจาก Juliano et al. (1980)

ในการพิจารณาคุณภาพของข้าวสุกโดยใช้ความคงตัวของแป้งสุกนั้น จะต้องพิจารณาข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสอยู่ในประเภทเดียวกัน ซึ่งข้าวที่มีค่าความคงตัวของแป้งสุกอ่อน เมื่อหุงได้เป็นข้าวสุกจะได้ข้าวที่มีลักษณะแข็งกระด้างน้อยกว่าข้าวที่มีค่าความคงตัวของแป้งสุกแข็ง

2.2.4 อุณหภูมิแป้งสุก (gelatinization temperature)

อุณหภูมิแป้งสุกคืออุณหภูมิที่ทำให้แป้งเกิดเป็นเจล (ประมาณ 55 - 79°C) โดยอุณหภูมิแป้งสุกจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับระยะเวลาหุงต้มข้าว ข้าวที่มีอุณหภูมิแป้งสุกสูงจะต้องใช้เวลาการหุงต้มนานกว่าข้าวที่มีอุณหภูมิแป้งสุกต่ำ

2.2.5 ปริมาณโปรตีน (protein content)

ในเมล็ดข้าวจะมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 9.8 ของน้ำหนักข้าว ซึ่งถือว่ามีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับคาร์โบไฮเดรต อย่างไรก็ตามปริมาณโปรตีนก็ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้าวสุกได้เช่นกัน โดยปริมาณโปรตีนจะมีผลต่อการดูดน้ำของข้าวในระหว่างการหุงต้ม ข้าวที่มีโปรตีนสูงจะต้องใช้เวลาในการหุงต้มนานกว่าข้าวที่มีโปรตีนต่ำ เนื่องจากโครงสร้างร่างแหของโปรตีนที่อยู่รอบเม็ดสตาร์ชมีปริมาณมากกว่า ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชดูดน้ำ ได้ยากขึ้น ข้าวจะพองตัวได้น้อย จึงต้องใช้เวลาในการหุงต้ม ในขณะที่ข้าวที่มีโปรตีนต่ำจะสามารถดูดน้ำได้ดีกว่า และเมื่อหุงสุกจะมีลักษณะที่นุ่มและเหนียวมากกว่าข้าวที่มีโปรตีนสูง (Matveev et al., 2000)

2.2.6 กลิ่นหอม (aroma)

กลิ่นหอมจะเป็นลักษณะพิเศษที่เป็นที่นิยมของผู้บริโภค โดยจะพบว่าข้าวทั่วไปมีสารระเหยอยู่หลายชนิด ในพันธุ์ข้าวหอมจะมีสาร 2 - Acetyl - 1 - Pyrroline มากกว่าข้าวทั่วไป ซึ่งข้าวสารหอมพันธุ์ต่าง ๆ จะพบสารนี้ในปริมาณ 0.04 - 0.09 ไมโครกรัมต่อกรัมของข้าวสาร

2.3 ข้าวกึ่งสำเร็จรูป (instant rice)

ข้าวกึ่งสำเร็จรูป (instant rice) หรือ ข้าวหุงสุกเร็ว (quick cooking rice) คือข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการเจลาติไนเซชัน (gelatinization) หลังจากนั้นจะนำข้าวไปทำแห้งเพื่อให้ความชื้นของข้าวลดลงเหลือร้อยละ 11 - 12 (Lee และ Wissgott, 2001) ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวสารให้เป็นข้าวกึ่งสำเร็จรูปนี้จะมีวัตถุประสงค์เพื่ออำนวยความสะดวกให้แก่ผู้บริโภคในการหุงต้ม เนื่องจากผลิตภัณฑ์นี้ใช้เวลาในการหุงต้ม ตลอดจนอำนวยความสะดวกให้กับชาวต่างชาติที่ไม่คุ้นเคยกับการหุงต้มข้าว กระบวนการแปรรูปข้าวกึ่งสำเร็จรูปนั้นมีหลากหลายวิธี โดยจะมีขั้นตอนหลักที่สำคัญได้แก่ การนำข้าวมาแช่น้ำเพื่อให้ข้าวมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และกระบวนการนี้จะช่วยลดระยะเวลาในการหุงข้าว ขั้นตอนที่สองคือ การนำข้าวที่ผ่านการแช่ไปให้ความร้อน เพื่อทำให้ข้าวสุก และขั้นตอนสุดท้ายคือการนำข้าวสุกไปทำแห้งเพื่อให้ข้าวมีความชื้นลดลง และสามารถเก็บเอาไว้ได้นานขึ้น (Wongsa และคณะ 2016) ในการรับประทานข้าวกึ่งสำเร็จรูปจะมีวิธีการเตรียมก่อนบริโภคอยู่หลายวิธีดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 รูปแบบของผลิตภัณฑ์ข้าวกึ่งสำเร็จรูป หรือข้าวหุงสุกเร็ว

รูปแบบ	วิธีการเตรียมก่อนบริโภค	บริษัทผู้ผลิต
ถ้วย	เติมน้ำร้อนหรือน้ำเดือดลงในถ้วยบรรจุข้าวกึ่งสำเร็จรูป และทิ้งให้คืนรูป 1 - 5 นาที	Nissin's Cup Rice
ทิ้งให้คืนรูป	ต้มน้ำเดือด ใส่ข้าวกึ่งสำเร็จรูปและคนให้เข้ากัน ปิดฝาหม้อ ยกจากเตา และทิ้งให้คืนรูป 5 - 7 นาที	Kraft-General Foods' Minute Rice
อุ่นให้คืนรูป	ต้มข้าวกึ่งสำเร็จรูปกับน้ำให้เดือด ลดความร้อนของเตา อุ่น โดยปิดหรือเปิดฝาหม้อข้าวานาน 5 - 10 นาที	Lipton's Rice & Sauce and Uncle Ben's Products
คุ่นและอุ่นให้คืนรูป	คุ่นข้าวกึ่งสำเร็จรูปด้วยไฟอ่อน โดยใส่เนยสด มาร์การีน หรือน้ำมันจนเคลือบข้าวหมด จากนั้นเติมน้ำ ต้มให้เดือด ปิดฝาและอุ่นอีก 10 นาที	Uncle Ben's Suzi Wan Products
ต้มในถุง	ต้มข้าวกึ่งสำเร็จรูป (ที่บรรจุอยู่ในถุงที่มีรูพรุน) ในน้ำเป็นเวลา 10 นาที	Riviana's Success Products
คืนรูปด้วยเตาไมโครเวฟ	ใส่ข้าวกึ่งสำเร็จรูปลงในถ้วยที่มีน้ำในปริมาณที่เหมาะสม ให้ความร้อนในเตาไมโครเวฟเป็นเวลา 5 - 10 นาที	MJB's and Kraft-General Foods' microwave products

ที่มา: Luh et al. (1991)

2.3.1 ปัจจัยในการผลิตที่มีผลต่อคุณภาพของข้าวกึ่งสำเร็จรูป

2.3.1.1 การแช่ วัตถุประสงค์ของการแช่คือเพื่อให้เมล็ดข้าวดูดน้ำ ซึ่งขั้นตอนนี้จะช่วยลดเวลาในการให้ความร้อน โดยเมื่อนำเมล็ดข้าวมาแช่น้ำ ข้าวจะดูดความชื้นจนถึงจุดอิ่มตัว น้ำจะแทรกตัวเข้าสู่ส่วนแบ่งเกิดการจับกันของพันธะไฮโดรเจนภายในช่องว่างของเมล็ดข้าว ส่งผลให้เมล็ดแป้งพองตัวมากขึ้น และมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ความชื้นซึ่งทำให้เมล็ดแป้งพองตัวได้นั้นเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเจลาติไนเซชันได้ นอกจากนี้กระบวนการแช่ข้าวจะช่วยให้เกิดรอยร้าวในเมล็ดข้าว ซึ่งจะเป็นการเร่งขั้นตอนการหุง เนื่องจากความชื้นสามารถซึมผ่านเข้าสู่เมล็ดข้าวได้ดีขึ้น ทำให้ข้าวเกิดเจลาติไนเซชันได้อย่างรวดเร็ว และส่งผลให้ลดเวลาในการทำข้าวสุก อุณหภูมิที่ใช้ในการแช่ข้าวก็มีผลต่อเวลาในการทำข้าวสุก โดยการแช่ข้าวในน้ำที่มีอุณหภูมิสูง ข้าวจะสามารถดูดซึมน้ำได้ดีมากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการแช่ข้าว อย่างไรก็ตามการแช่ข้าวที่อุณหภูมิสูงจะต้องควบคุมอุณหภูมิให้ไม่สูงมากเกินไปจนทำให้เมล็ดแป้งสุก เพราะจะทำให้แป้งบางส่วนละลายออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอุณหภูมิที่ใช้แช่ข้าวอยู่ในช่วง 10 - 100°C ค่าความชื้นของข้าวที่ได้หลังจากการแช่จะมีค่าประมาณร้อยละ 35 - 40 ของน้ำหนักข้าว ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้เกิดเจลลิตินในเซชันในการให้ความร้อนในขั้นตอนต่อไป

2.3.1.2 การให้ความร้อน ในขั้นตอนนี้จะเป็นการให้ความร้อนกับเมล็ดข้าวเพื่อทำให้เกิดการเจลลิตินในเซชัน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้จะเท่ากับหรือสูงกว่าอุณหภูมิแป้งสุก (gelatinization temperature) ข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 65 - 75 ของน้ำหนักข้าว ในการทำให้ข้าวสุกอาจแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ได้แก่

1) การทำข้าวให้สุกในขั้นตอนเดียว จะเป็นการให้ความร้อนแก่ข้าวที่ผ่านการแช่มาก่อนโดยข้าวจะมีความชื้นอย่างน้อยร้อยละ 65 - 75 ก่อนนำไปให้ความร้อน ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำให้ข้าวสุกโดยการต้มข้าวในน้ำเดือดที่ความดันบรรยากาศ หรือการให้ความร้อนแก่ข้าวในหม้อนึ่งความดัน ข้าวที่ได้จะเกิดการเจลลิตินในเซชันอย่างสมบูรณ์

2) การทำให้ข้าวสุกตามลำดับ การให้ความร้อนในลักษณะนี้จะมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมระดับการสุก หรือการเจลลิตินในเซชันให้เป็นไปตามต้องการ โดยจะเพิ่มความชื้นให้กับเมล็ดข้าวให้มีค่าประมาณร้อยละ 35 - 40 ของน้ำหนักข้าว หลังจากนั้นจะนำข้าวไปให้ความร้อนจนเกิดการเจลลิตินในเซชันประมาณร้อยละ 80

2.3.1.3 การทำแห้ง จะเป็นกระบวนการสุดท้ายในการแปรรูปข้าวถึงสำเร็จรูป โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นการลดความชื้นของข้าวที่ผ่านการให้ความร้อน จนมีความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 11 - 12 ของน้ำหนักข้าว ซึ่งเป็นระดับที่สามารถป้องกันการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์จากจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ กระบวนการทำแห้งข้าวถึงสำเร็จรูปสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่

1) การทำแห้งแบบขั้นตอนเดียว จะเป็นการทำแห้งที่ให้ความร้อนเพียงอุณหภูมิเดียว และใช้อุณหภูมิที่ไม่สูงมากประมาณ 70°C แต่จะใช้ระยะเวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมง เครื่องมือที่ใช้ในการอบแห้งอาจจะเป็นตู้อบลมร้อน (hot air oven) (Bhasker et al., 1989)

2) การทำแห้งแบบหลายขั้นตอน การทำแห้งแบบนี้จะประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกจะเป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ภายในระยะเวลาสั้น โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดความชื้นจากบริเวณผิวหน้าให้เร็วกว่าที่ดูดซึมจากข้างใน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดผิวนอกแข็ง หรือที่เรียกว่า case hardening (Sammual, 1991) ซึ่งการเกิดผิวนอกที่แข็งนี้จะช่วยทำให้โครงสร้างของเมล็ดข้าวอยู่ตัว และป้องกันการหดตัว ซึ่งการหดตัวนี้จะทำให้สมบัติการดูดน้ำกลับลดลง อัตราการคั่วจะลดลง นอกจากนี้การทำแห้งในขั้นแรกนี้ยังทำให้ข้าวที่ได้เกิดรูพรุน และมีความพองตัว โดยอุณหภูมิที่ใช้ในขั้นตอนนี้อยู่ในช่วง 200 - 500°C และใช้เวลา 1 - 5 นาที ในส่วนของขั้นตอนที่สองจะเป็นการให้ความร้อนในการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ โดยอยู่ในช่วง 30 - 150°C และใช้เวลา 2 - 4 ชั่วโมง (Luh et al., 1980)

2.3.2 กรรมวิธีการแปรรูปข้าวกล้องสำเร็จรูป

การแปรรูปข้าวเพื่อให้ได้ข้าวกล้องสำเร็จรูปนั้นสามารถทำได้หลายวิธี (อรอนงค์, 2556)

2.3.2.1 กรรมวิธีการแช่น้ำ – ต้ม – ไล่น้ำ – ทำแห้ง โดย Ozai-Durrani (1948) ได้คิดค้นกรรมวิธีนี้เป็นครั้งแรก ซึ่งจะมีขั้นตอนการทำคือ การแช่ข้าวในน้ำที่อุณหภูมิห้อง จนได้ข้าวที่มีความชื้นร้อยละ 30 ของน้ำหนักข้าว จากนั้นนำข้าวที่ผ่านการแช่มาต้มเป็นเวลา 8 - 10 นาที ซึ่งความชื้นของข้าวจะเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 65 - 70 ของน้ำหนักข้าว หลังจากนั้นจะนำข้าวสุกมาล้างด้วยน้ำเย็น สะเด็ดน้ำ นำมาเกลี่ยบนตะแกรงและนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 140°C หลังจากขั้นตอนนี้จะได้ข้าวกล้องสำเร็จรูปที่มีความชื้นร้อยละ 8-14 เพื่อให้ข้าวกล้องสำเร็จรูปมีรูปทรงเป็นจำนวนมาก และสามารถคืนตัวได้อย่างรวดเร็ว ปัจจัยที่สำคัญคืออุณหภูมิในการอบแห้ง โดยอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ต้องสูงเพียงพอที่จะทำให้ความชื้นจากพื้นผิวของเมล็ดข้าวระเหยออกมาได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในเมล็ดข้าวออกสู่บรรยากาศภายนอก นอกจากนี้อาจจะใช้ความร้อนในการอบแห้งเป็นระยะ 2 ครั้งหรือมากกว่า โดยอุณหภูมิในการอบจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเป็นระยะ ซึ่งการทำแบบนี้จะทำให้เมล็ดข้าวหุงสุกมีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า สามารถคืนรูปได้ภายใน 10 – 13 นาที

2.3.2.2 กรรมวิธีการทำให้เมล็ดข้าวพองตัว และเกิดเจลาตินไนซ์ โดยหลักการของการแปรรูปข้าวกล้องสำเร็จรูปแบบนี้คือ การทำให้ข้าวที่ผ่านการเจลาตินไนซ์ชั้นมาทำให้พองโดยการใช้อุณหภูมิร้อนที่อุณหภูมิสูง ข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ได้จะมีขนาดใหญ่กว่าเดิมประมาณ 4 เท่า มีรูปทรงเป็นจำนวนมาก และใช้เวลาในการคืนตัวประมาณ 2 – 3 นาที โดย Robert (1955) ได้มีการแปรรูปข้าวกล้องสำเร็จรูปโดยนำข้าวสารมาแช่น้ำให้ความชื้นของข้าวเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30 จากนั้นนำข้าวที่ผ่านการแช่ไปนึ่งโดยใช้ไอน้ำภายใต้ความดันที่ประมาณ 10 – 15 psi เป็นเวลา 5 - 10 นาที และนำไปทำแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ ต่อมาจะนำข้าวที่ได้จากการทำแห้งไปทำให้พองด้วยไอน้ำ และลมร้อนที่อุณหภูมิ 200 - 260°C ซึ่งอัตราความเร็วลมจากไอน้ำจะต้องมีความเหมาะสมที่จะทำให้เมล็ดข้าวหุงสุกพองขึ้น

2.3.2.3 กรรมวิธีการกดหรืออบข้าวหุงสุก โดยมีขั้นตอนของการแปรรูปคือ การนำข้าวมาแช่น้ำ นึ่งด้วยไอน้ำ หรือทั้งแช่น้ำและนึ่งไอน้ำพร้อมกัน เพื่อให้ข้าวที่ได้มีความชื้นร้อยละ 40 จากนั้นนำข้าวมากดหรืออบให้แบนลงร้อยละ 30 – 80 ของความหนาเดิม และนำข้าวที่ผ่านการกดไปทำแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูง ให้ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 10-14 ของน้ำหนักข้าว ข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ได้จะมีรูปทรงเป็นจำนวนมาก และจะมีอัตราการคืนตัวสูง

2.3.2.4 กรรมวิธีการใช้ความร้อนแห้ง โดยในขั้นตอนการแช่ข้าวกับน้ำจะมีการใช้ความร้อนแห้งมาร่วมด้วย ซึ่งการใช้ความร้อนแห้งจะส่งผลให้เมล็ดข้าวเกิดรอยแตกเล็ก ๆ (fissure)

โดยรอยแตกนี้จะขยายตัวจากภายนอกเข้าสู่ภายในเมล็ดข้าวจนทั่วทั้งเมล็ด ซึ่งรอยแตกเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยให้ความชื้นเข้าสู่เมล็ดข้าวได้ง่ายขึ้น ข้าวจะหุงสุกได้เร็วขึ้น

2.3.2.5 กรรมวิธีคั้นรูปจากเยือกแข็ง โดย Keneaster and Newtin (1957) ได้นำข้าวไปแช่ในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 27°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ข้าวที่ผ่านการแช่จะถูกทำให้สุกด้วยการต้ม หรือนึ่งโดยใช้ไอน้ำ จากนั้นนำข้าวไปแช่แข็งเป็นเวลา 1 - 3 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวกลายเป็นผลึกน้ำแข็ง ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างของสตาร์ชถูกทำลาย เกิดเป็นรูพรุนอยู่ภายในเมล็ดข้าว ข้าวสุกที่ผ่านการแช่แข็งจะถูกนำมาคั้นรูปที่อุณหภูมิห้อง หรือเป่าด้วยลมอุ่นเป็นเวลาประมาณ 5 ชั่วโมง จากนั้นจะนำข้าวมาทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

2.3.2.6 กรรมวิธีการพองตัวจากเครื่องอัดแบบปืน (gun-puffing) ในการทำงานของเครื่องอัดแบบปืนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ใช้ไอน้ำ (steam chamber) โดยเมื่อผ่านวัตถุดิบเข้ามาที่ส่วนนี้จะมีการลดความดันเพื่อที่จะดึงอากาศออกจากส่วนวัตถุดิบก่อน และไอน้ำจะถูกส่งเข้ามาเพื่อทำให้ข้าวเกิดการเจลาติไนซ์ จากนั้นผลิตภัณฑ์จะถูกส่งไปยังส่วนที่เป็นห้องสุญญากาศและเกิดการขยายตัวทันที เนื่องจากความดันลดลงอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์ข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ได้จะมีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นประมาณ 2-3 เท่า ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำได้มากขึ้น ข้าวสามารถดูดซึมน้ำกลับเข้าไปได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ได้มาจากวิธีการนี้จะใช้ระยะเวลาในการคั้นรูปสั้น

2.3.2.7 กรรมวิธีการทำแห้งเยือกแข็ง โดยจะมีวิธีการคือนำข้าวมาให้ความร้อนจนสุก จากนั้นทำให้เย็นแบบเยือกแข็งด้วยเครื่องแบบแผ่นสัมผัสความเย็นในตู้ที่ควบคุมสภาพสุญญากาศ หรือสัมผัสกับสารให้ความเย็นโดยตรง เช่น ไนโตรเจนเหลว ข้าวสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งจะถูกนำไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) จนข้าวกึ่งสำเร็จรูปมีความชื้นร้อยละ 10 - 20 จากนั้นจะนำข้าวมาทำแห้งต่อด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 150 - 315°C เพื่อทำให้ข้าวมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ลดระยะเวลาในการคั้นรูป

2.3.2.8 กรรมวิธีการใช้พลังงานไมโครเวฟ โดย Huxsoll and Morgan (1968) ได้มีการให้ความร้อนกับข้าวโดยใช้พลังงานไมโครเวฟแทนการใช้ความร้อนปกติในขั้นตอนการหุงข้าว จากนั้นนำข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนมาทำแห้งด้วยลมร้อนจนข้าวมีความชื้นน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 15 และใช้พลังงานไมโครเวฟให้ความร้อนกับเมล็ดข้าวต่อเพื่อให้เมล็ดข้าวร้าว และพองตัวขึ้น ซึ่งจะทำให้ข้าวกึ่งสำเร็จรูปสามารถคั้นรูปได้ภายในเวลา 5 นาที

2.3.2.9 การรวมกรรมวิธีที่กล่าวมาแล้วมากกว่า 2 วิธี โดยจะเป็นการนำกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นมาผสมผสานกัน เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อวัตถุดิบ และได้ข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีลักษณะตามที่ต้องการ เช่น การใช้สารเคมีร่วมกับการระเหยน้ำแข็งในภาวะแช่เยือกแข็ง โดย

สารเคมีที่มีการนำมาใช้เช่น การใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์ เอนไซม์เฮมิเซลลูโลส สารประกอบ เอสเทอร์ของกรดไขมัน เป็นต้น

จากกรรมวิธีการแปรรูปข้าวกล้องสำเร็จรูปตั้งที่กล่าวมาจะพบว่าในแต่ละกรรมวิธีจะมี ขั้นตอนการผลิตและหลักการที่แตกต่างกันออกไป โดยขั้นตอนในการแปรรูปข้าวกล้องสำเร็จรูปที่สำคัญประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การทำให้ข้าวเกิดเจลลาติโนเซชันเพื่อทำให้ข้าวสุก และการทำแห้งข้าวสุก เพื่อลดความชื้นของข้าวกล้องสำเร็จรูปให้ต่ำลง และทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ภายในเมล็ดข้าว ซึ่งจะพบว่ากระบวนการอื่น ๆ เช่น การแช่น้ำ การใช้แรงกด การใช้สารเคมี หรือ การใช้ความดันต่างก็เป็นขั้นตอนที่ช่วยให้ข้าวเกิดเจลลาติโนเซชันได้ดียิ่งขึ้น

2.3.3 ลักษณะของข้าวกล้องสำเร็จรูปเมื่อเป็นผลิตภัณฑ์แห้ง

2.3.3.1 ผลิตภัณฑ์ควรแห้ง มีลักษณะร่วน และแยกตัวออกจากกัน

2.3.3.2 รูปร่างเมล็ดสมบูรณ์ ไม่แตกหัก และมีสีที่สุบรี โภคยอมรับ

2.3.3.3 มีค่า bulk density ต่ำ ซึ่งจะสะท้อนถึงความมีรูพรุนมากภายในเมล็ดข้าว ทำให้ข้าวสามารถดูดน้ำกลับได้ง่าย และใช้เวลาในการคืนรูปอย่างรวดเร็ว โดยระยะเวลาในการคืนรูปข้าวกล้องสำเร็จรูปควรใช้เวลาสั้นประมาณ 5 – 15 นาที

2.3.4 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ภายหลังการคืนรูป

2.3.4.1 ข้าวที่คืนรูปแล้วจะมีลักษณะทางเนื้อสัมผัส สี และกลิ่นใกล้เคียงกับข้าวที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีธรรมดา

2.3.4.2 มีคุณค่าทางอาหารเหมาะสม

2.3.4.3 มีค่า bulk volume ประมาณ 1.5 - 3.0 เท่าของผลิตภัณฑ์ก่อนคืนรูป

2.4 การย่อยคาร์โบไฮเดรต

ข้าวกล้องสำเร็จรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก โดยชนิดของคาร์โบไฮเดรตที่มีอยู่มากในข้าวก็คือ แป้ง หรือสตาร์ช ซึ่งการบริโภคคาร์โบไฮเดรตในกลุ่มนี้จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำตาลในเลือด และมีผลต่อสุขภาพของมนุษย์ การย่อยของคาร์โบไฮเดรตจะเริ่มตั้งแต่อาหารเข้าสู่ปาก ฟันจะทำหน้าที่บดอาหารให้มีขนาดเล็กลง อีกทั้งในน้ำลายมีเอนไซม์ซาลิวารีอะมิเลส (salivary amylase) หรือแอลฟาอะมิเลส (alpha-amylase) ซึ่งทำหน้าที่ในการย่อยแป้งให้กลายเป็นเดกซ์ทริน (dextrin) หลังจากนั้นอาหารจะถูกกลืนผ่านหลอดอาหารและไปยังกระเพาะอาหาร ในส่วนนี้จะไม่เอนไซม์ที่ใช้ย่อยคาร์โบไฮเดรต ดังนั้นการย่อยคาร์โบไฮเดรตจะหยุดลงชั่วคราว จากนั้นอาหารจะผ่านเข้าไปในส่วนที่เป็นลำไส้เล็ก ในส่วนนี้คาร์โบไฮเดรตจะถูกย่อยอีกครั้ง โดยเอนไซม์จากผนังลำไส้เล็กและตับอ่อนจนได้เป็นโมโนแซ็กคาไรด์ ซึ่งจะถูกลดซึมผ่านผนังลำไส้เล็กเข้าไปในระบบไหลเวียนของเลือด กาแลกโตส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และพรุกโตสจะถูกเปลี่ยนเป็นกลูโคสโดยเอนไซม์ของตับ ดังนั้นเลือดที่ไหลออกจากตับจะมีเพียงกลูโคส ซึ่งกลูโคสจะถูกส่งไปยังเซลล์ต่าง ๆ ทั่วทั้งร่างกายเพื่อให้เซลล์นั้นนำกลูโคสไปใช้เป็นพลังงาน (รัชดา, 2558)

2.4.1 ความสามารถในการย่อยของสตาร์ช (starch digestibility)

Englyst และคณะ (1992) ได้ทำการแบ่งประเภทของสตาร์ชตามอัตราการย่อยออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ สตาร์ชย่อยเร็ว (rapidly digestible starch, RDS) สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (slowly digestible starch, SDS) และสตาร์ชทนย่อย (resistant starch, RS) โครงสร้างหลักของสตาร์ชย่อยเร็วจะเป็นส่วนอสัณฐาน (amorphous) ดังนั้นจึงถูกเอนไซม์เข้าไปย่อยได้ง่าย การบริโภคอาหารประเภทแป้งที่มีสัดส่วนของสตาร์ชย่อยเร็วในปริมาณมากจะส่งผลให้มีระดับน้ำตาลกลูโคสและระดับอินซูลินในกระแสเลือดสูงอย่างรวดเร็ว ในส่วนของสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้าจะเป็นสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ยากกว่า ซึ่งอาจเนื่องมาจากมีโครงสร้างที่แข็งแรงมากกว่า สตาร์ชชนิดนี้จะถูกย่อยอย่างช้า ๆ และทำให้ระดับน้ำตาลกลูโคสในเลือดค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และคงที่ ซึ่งลดโอกาสเสี่ยงที่จะเป็นโรคเรื้อรังต่าง ๆ เช่น โรคอ้วน โรคเบาหวาน เป็นต้น (ชาลินี, 2556) สตาร์ชประเภทสุดท้ายคือ สตาร์ชทนย่อย สตาร์ชชนิดนี้จะไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ และไม่ถูกดูดซึมผ่านลำไส้เล็กของมนุษย์ สตาร์ชชนิดนี้จะถูกจุลินทรีย์ประจำถิ่นในลำไส้ใหญ่เล็กใช้เป็นสารอาหารในการเจริญเติบโต จึงจัดได้ว่าเป็นพรีไบโอติก (prebiotic) โดยทั่วไปสามารถแบ่งประเภทของสตาร์ชทนย่อยได้ออกเป็น 5 ประเภท ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ประเภทของสตาร์ชทนย่อย (resistant starch, RS)

ประเภทของแป้ง	ลักษณะของแป้ง	แหล่งของแป้ง
ประเภทที่ 1 (RS ₁)	สตาร์ชที่มีลักษณะทางกายภาพขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ (physically inaccessible)	เมล็ดธัญพืชที่ผ่านการบดเพียงบางส่วน พืชตระกูลถั่ว (legumes)
ประเภทที่ 2 (RS ₂)	สตาร์ชแป้งดิบที่ทนต่อการทำงานของเอนไซม์ แป้งที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำให้สุก (raw or ungelatinized starch)	สตาร์ชกล้วยดิบ สตาร์ชมันฝรั่งดิบ และสตาร์ชอะมิโลสสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ประเภทของสตาร์ชทนย่อย (resistant starch, RS) (ต่อ)

ประเภทของแป้ง	ลักษณะของแป้ง	แหล่งของแป้ง
ประเภทที่ 3 (RS ₃)	สตาร์ชที่คืนตัว (retrograded starch)	อาหารที่ให้ความร้อนจนเกิดเจลาตินไนซ์ ซึ่งเมื่อถูกทำให้เย็นตัวลง จะเกิดการจัดเรียงตัวของอะมิโลสใหม่ กลายเป็นผลึกที่ละลายน้ำได้น้อยลง เช่น เปลือกขนมปัง คอร์นเฟลกส์
ประเภทที่ 4 (RS ₄)	สตาร์ชที่มีโครงสร้างเกิดจากการตัดแปรรูปโดยใช้สารเคมีในการเชื่อมขวาง (crosslinked starch)	สตาร์ชฮีเทอร์ สตาร์ชเอสเทอร์ และสตาร์ชครอสลิงค์
ประเภทที่ 5 (RS ₅)	สตาร์ชที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน (amylose-lipid complex)	สตาร์ชที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน

ที่มา: Sajilata et al. (2006)

ยุทธนา (2561) ได้กล่าวถึงคุณประโยชน์ของสตาร์ชทนย่อย โดยอาหารที่มีสัดส่วนของสตาร์ชทนย่อยในปริมาณมากจะมีอัตราการย่อยต่ำ ซึ่งสามารถลดค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI) ของอาหารได้ นอกจากนี้สตาร์ชทนย่อยจะถูกจัดเป็นใยอาหาร (dietary fiber) ซึ่งจะส่งผลดีต่อลำไส้ใหญ่ โดยจะป้องกันการเกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ และยังช่วยลดคอเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ในเลือดได้อีกด้วย นอกจากนี้ประโยชน์ในเชิงสุขภาพจะพบว่าสตาร์ชทนย่อยยังมีประโยชน์ในการนำไปปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น การช่วยปรับปรุงการขยายตัวในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอัดฟอง เช่น อาหารเข้าที่ทำจากรั้วพืช นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัส ปริมาตร และกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ขนมอบที่มีใยอาหารสูง เช่น ขนมปัง และคุกกี้ เป็นต้น

2.4.2 ความสัมพันธ์ของปริมาณแป้งทนย่อยกับค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI)

ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI) คือดัชนีที่ใช้ชี้วัดคุณภาพของอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต โดยอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตเข้าสู่ระบบการย่อย และดูดซึมของร่างกาย อาหารชนิดนั้นสามารถเพิ่มระดับน้ำตาลในเลือดได้มากหรือน้อยเพียงใดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง เช่น ขนมปังขาว ซึ่งจะมีค่าดัชนีน้ำตาลเท่ากับ 100 ในการรับประทานอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูง จะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำตาลกลูโคสในกระแสเลือดอย่างรวดเร็ว ในขณะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรับประทานอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำจะมีน้ำตาลกลูโคสเข้าสู่กระแสเลือดอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ ทำให้ร่างกายสามารถควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดให้อยู่ในเกณฑ์ปกติได้ง่าย (จิรนาถ, 2553)

โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลุ่มของอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักตามค่าดัชนีน้ำตาลออกเป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ประเภทและแหล่งอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI) ในระดับต่าง ๆ

อาหาร	แหล่งอาหาร	ค่าดัชนีน้ำตาล (GI)
อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ (low GI food)	ถั่วชนิดต่างๆ ผัก ธัญพืชที่มีน้ำตาลต่ำ โยเกิร์ตไขมันต่ำ และไม้วาน เกรฟฟรุต แอปเปิ้ล มะเขือเทศ	≤ 55
อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลปานกลาง (medium GI food)	อาหารประเภทเส้น ถั่วคั่ว มันเทศ ข้าวโพด หวาน ข้าวโพดคั่ว โฮลวีต ข้าวกล้อง	56 - 69
อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูง (high GI food)	ขนมปังขาว คอร์นเฟลกส์ ข้าวเม็ล็ดสั้น มัน ฝรั่งอบ มันฝรั่งทอด ไอศกรีม ผลไม้อบแห้ง ผลไม้ที่มีรสหวาน	≥ 70

ที่มา: วิชา (2549)

ค่าดัชนีน้ำตาลของอาหารชนิดต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ องค์ประกอบของแป้ง (ปริมาณอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และปริมาณสตาร์ชทนย่อย) โครงสร้างของสตาร์ช สัดส่วนและชนิดของน้ำตาล ขนาดของอนุภาค กระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหาร และส่วนประกอบอื่น ๆ ที่มีอยู่ในอาหาร เช่น โปรตีน ไขมัน ใยอาหาร เป็นต้น (ยุทธนา, 2561)

วิชา (2549) ได้มีการรายงานว่าค่าดัชนีน้ำตาลจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับปริมาณสตาร์ชทนย่อย โดยสตาร์ชทนย่อยสามารถลดอัตราการย่อย ลดการตอบสนองต่อระดับน้ำตาลและระดับฮอร์โมนอินซูลินในกระแสเลือดได้ ดังนั้นอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำจะมีปริมาณสตาร์ชทนย่อยสูง การรับประทานอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำจะส่งผลดีต่อสุขภาพ ช่วยลดความเสี่ยงต่อการเป็นโรคหัวใจ และโรคเบาหวาน สามารถควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด และระดับคลอเลสเตอรอล นอกจากนี้การบริโภคอาหารประเภทนี้จะทำให้รู้สึกอิ่มได้นานกว่า ซึ่งประโยชน์ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะมีความสอดคล้องกับคุณประโยชน์ของการบริโภคอาหารที่มีปริมาณสตาร์ชทนย่อยสูง

2.4.3 กระบวนการแปรรูปที่มีผลต่อความสามารถในการย่อย และค่าดัชนีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์ข้าว

ความสามารถในการย่อย (starch digestibility) และค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI) ของข้าวชนิดต่าง ๆ จะมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบภายในข้าว หรือโครงสร้างสตาร์ชมีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามกระบวนการแปรรูปที่แตกต่างกันก็จะส่งผลให้ความสามารถในการย่อย และค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวชนิดเดียวกันมีความแตกต่างกันเช่นกัน โดย Kaur และคณะ (2016) และ Sopade (2017) ได้ทำการรวบรวมกระบวนการในแปรรูปข้าวที่ส่งผลต่อค่าดัชนีน้ำตาลของข้าว ได้แก่

2.4.3.1 กระบวนการแช่ การแช่ข้าวในน้ำจะทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัว และเกิดเจลาติไนเซชันได้ดีขึ้น ซึ่งกระบวนการนี้จะส่งผลต่อการย่อย โดยจะทำให้เอนไซม์สามารถย่อยข้าวได้ง่ายขึ้น ค่าดัชนีน้ำตาลจึงเพิ่มขึ้น

2.4.3.2 กระบวนการให้ความร้อน การให้ความร้อนแก่ข้าวจะส่งผลให้ข้าวเกิดการเจลาติไนซ์ เอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยได้ง่ายขึ้น จึงทำให้ค่าดัชนีน้ำตาลเพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนจะส่งผลให้ข้าวเกิดการเจลาติไนซ์อย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้ข้าวมีค่าดัชนีน้ำตาลเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ หรือการให้ความร้อนในระยะเวลาสั้น ๆ โดยระดับในการเกิดเจลาติไนเซชัน (degree of gelatinization) จะมีผลต่อค่าดัชนีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีระดับการเกิดเจลาติไนเซชันต่ำ จะมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำเช่นกัน นอกจากอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ให้ความร้อนจะมีผลต่อระดับในการเกิดเจลาติไนเซชัน และค่าดัชนีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์ข้าว สัดส่วนของน้ำที่ใช้ในระหว่างการให้ความร้อนก็มีผลต่อระดับการเกิดเจลาติไนเซชัน และค่าดัชนีน้ำตาลเช่นกัน โดยการใช้ปริมาณมากในระหว่างการให้ความร้อนจะส่งผลให้ระดับการเกิดเจลาติไนเซชันเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นค่าดัชนีน้ำตาลจะเพิ่มขึ้น (Kaur และคณะ 2016)

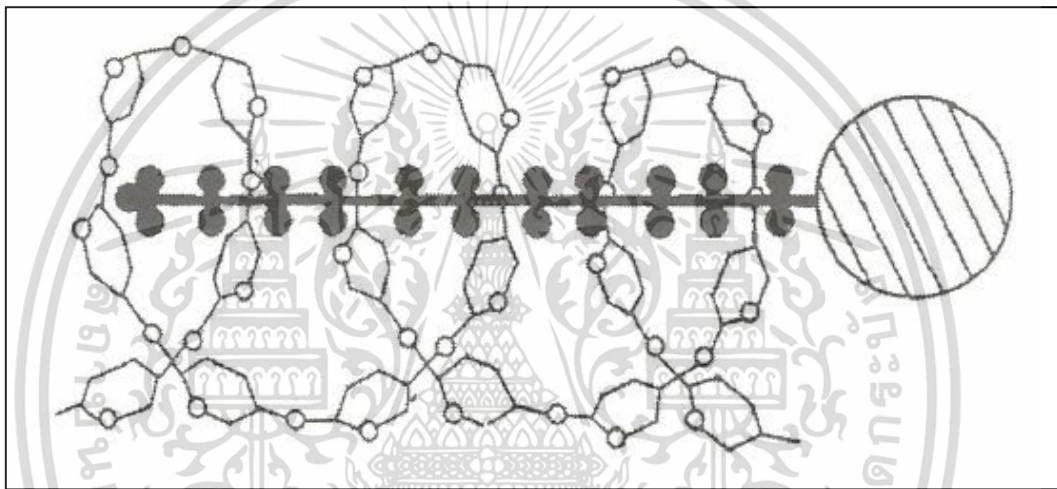
2.4.3.3 กระบวนการแช่เย็น กระบวนการแช่เย็นจะช่วยลดค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวสุก ลดลง เนื่องจากมีการเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation) ในระหว่างการแช่เย็น โดยข้าวที่ผ่านหุงหรือการเจลาติไนซ์จะมีโครงสร้างภายในอย่างไม่เป็นระเบียบ การนำข้าวสุกมาแช่เย็นจะทำให้โครงสร้างภายในจัดเรียงตัวใหม่อย่างเป็นระเบียบ และมีความแข็งแรง หรือที่เรียกว่าการเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation) ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้ปริมาณสตาร์ชทนย่อยเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเอนไซม์จะสามารถย่อยได้น้อยลง ค่าดัชนีน้ำตาลจึงลดลง

2.4.3.4 กระบวนการทำแห้ง โดย Hsu และคณะ (2015a) ได้ทำแห้งข้าวที่ผ่านการหุงสุกโดยใช้อุณหภูมิต่ำ (50°C) ซึ่งพบว่าการทำแห้งข้าวที่มีความชื้นสูงโดยใช้อุณหภูมิต่ำจะช่วยให้

โครงสร้างภายในของข้าวเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่มีความแน่น และแข็งแรง ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการเกิดแอนนิลลิง (annealing) โดยกระบวนการนี้จะทำให้ค่าดัชนีน้ำตาลลดลง

2.5 สารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน

โมเลกุลของอะมิโลสที่เป็นฮีลิกซ์จะมีรูปร่างเป็นทอกลวง ซึ่งภายในทอกลวงมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ ในขณะที่ภายนอกทอกลวงจะชอบน้ำเนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิล ดังนั้นหมู่แอลคิลของกรดไขมันอิสระเช่น หมู่ $C_{17}H_{35}$ ของกรดไขมันสเตียริก ($C_{18}:0$) สามารถเข้าไปอยู่ภายในฮีลิกซ์ของอะมิโลสได้ตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างฮีลิกซ์ของอะมิโลส และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและกรดไขมันอิ่มตัว

ที่มา: Hosney, 1994

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันมีรายงานไว้ดังนี้ (วรรณ, 2551)

- กรดไขมันอิ่มตัว (มีคาร์บอน 12-20 อะตอม) เกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีที่สุด
- กรดไขมันไม่อิ่มตัว (C_{18}) ชนิด cis- ไม่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้
- กรดไขมันไม่อิ่มตัว (C_{18}) ชนิด trans- สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิภาวี (2547) ได้เปรียบเทียบคุณภาพของข้าวถึงสำเร็จรูปที่ได้จากกระบวนการอบแห้ง 3 วิธี ซึ่งพบว่าการอบแห้งข้าวด้วยไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ โดยใช้เวลาในการหุงข้าว 8 นาที และอบแห้งที่ความดัน -700 มิลลิเมตรปรอท ข้าวที่ได้หลังจากการคั่วรูปจะมีสมบัติใกล้เคียงกับข้าวหุงสุกโดยทั่วไปมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ozai-Durrani (1948) ได้ศึกษาค้นกรรมวิธีการแปรรูปข้าวกล้องสำเร็จรูปเป็นครั้งแรกโดยมีขั้นตอนคือ นำข้าวสารมาแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนข้าวสารมีความชื้นเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 30 จากนั้นต้มข้าว นาน 8 - 10 นาที โดยข้าวสุกจะมีความชื้นเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 65 - 70 จากนั้นพักให้เย็น เกลี่ยข้าวหุงสุกบนตระแกรงเพื่ออบแห้งในตู้อบลมร้อน โดยใช้อุณหภูมิ 140°C ความเร็วลมเท่ากับ 200 ฟุต/นาที เพื่อให้ข้าวสุกนั้นแห้งและมีความชื้นเหลือร้อยละ 8 - 14

Kaur et al. (2000) ได้ทำการศึกษาผลของเวลาในการให้ความร้อน สัตว์ส่วนและชนิดของกรดไขมันที่มีผลต่อการเกิดโครงสร้าง amylose - lipid complex ภายในแป้งข้าว โดยในการศึกษานี้จะมีการใส่กรดไขมันชนิดต่าง ๆ ได้แก่ กรดไมริสติก (C14:0) กรดปาล์มิติก (C16:0) และกรดสเตียริก (C18:0) ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยจะนำแป้งข้าวที่ใส่กรดไขมันชนิดต่าง ๆ ไปให้ความร้อนที่ 95°C เป็นเวลา 30, 60 และ 90 นาที และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของกรดไขมันให้มากขึ้น การเกิดโครงสร้าง amylose - lipid complex ภายในแป้งข้าวก็จะเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการละลายน้ำของแป้งข้าวลดลง ซึ่งจะพบว่ากรดไมริสติกจะทำให้เกิดโครงสร้าง amylose - lipid complex มากที่สุด นอกจากนี้เวลาในการให้ความร้อนก็มีผลต่อการเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนนี้เช่นกัน นั่นคือเมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนก็จะทำให้เกิดโครงสร้าง amylose - lipid complex ภายในแป้งข้าวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งคุณสมบัติของ โครงสร้าง amylose - lipid complex ที่เกิดขึ้นภายในแป้งข้าวจะทำให้แป้งข้าวถูกย่อยโดยเอนไซม์ได้ยากขึ้น

Luangmalawat และคณะ (2008) ได้ศึกษาถึงอุณหภูมิในการทำแห้งข้าวกล้องสำเร็จรูปโดยใช้ตู้อบลมร้อนที่จะส่งผลต่อคุณภาพของข้าวกล้องสำเร็จรูป ซึ่งพบว่าอุณหภูมิการอบจะมีผลต่อสีของข้าวกล้องสำเร็จรูป โดยเมื่อใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้สีของข้าวหลังจากการอบมีความเหลืองมากขึ้น แต่จะไม่มีผลชัดเจนกับการหดตัวของเมล็ดข้าว และความสามารถในการคืนตัวของข้าวกล้องสำเร็จรูป ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำแห้งข้าวกล้องสำเร็จรูปที่งานวิจัยนี้แนะนำคืออุณหภูมิต่ำกว่า 100°C

Prasert และ Suwannaporn (2009) ได้ศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูป ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา คือ ปริมาณความชื้นของข้าวก่อนการให้ความร้อน ความดันในระหว่างการให้ความร้อน และอุณหภูมิการอบ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อคุณภาพทางกายภาพ และทางเคมีทางกายภาพของข้าวกล้องสำเร็จรูป โดยพบว่าความแข็งของข้าวที่ผ่านการคืนรูปจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นของข้าวและเพิ่มความดันในระหว่างการให้ความร้อน นอกจากนี้จะมีแค่ความดันและปริมาณความชื้นเท่านั้นที่มีผลต่อความหนาแน่นของเมล็ดข้าว และอัตราการคืนตัว เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้ไปช่วยเพิ่มความเป็นรูพรุนภายในเมล็ดข้าว นอกจากนี้ยังพบว่าในการแปรรูปข้าวกล้องสำเร็จรูปจะทำให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันขึ้นภายในเมล็ดข้าว ซึ่งโครงสร้างเชิงซ้อนนี้สามารถตรวจพบได้จากการปรากฏรูปแบบผลึกแบบ V-type ในการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer

Srikaeo และ Sopade (2010) ได้ทำการศึกษาถึงสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองของโจ๊กกึ่งสำเร็จรูปยี่ห้อต่าง ๆ ในประเทศไทย โดยพบว่าโจ๊กกึ่งสำเร็จรูปส่วนใหญ่ที่มีในท้องตลาดของประเทศไทยจะมีค่าดัชนีน้ำตาลสูง โดยมีค่าประมาณ 68 - 97 ซึ่งค่าดัชนีน้ำตาลที่สูงนี้มาจากการเจลาติไนซ์ข้าวอย่างสมบูรณ์ การเจลาติไนซ์อย่างสมบูรณ์โดยปราศจากการรีโทรเกรเดชันหรือการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ภายในโมเลกุลจะส่งผลให้ข้าวที่นำมาวิเคราะห์มีค่าดัชนีน้ำตาลสูง

Rewthong และคณะ (2011) ศึกษาผลกระทบของกระบวนการต่าง ๆ นั่นคือ การให้ความร้อนการอบแห้ง และขั้นตอน pretreatment ประกอบไปด้วยการแช่เย็น แช่แข็ง ล้างด้วยน้ำเย็น และน้ำที่อุณหภูมิห้อง ที่จะส่งผลต่อโครงสร้างภายในของข้าว ลักษณะทางเนื้อสัมผัส และคุณสมบัติการย่อยของข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูป โดยจากการศึกษาจะพบว่าการนำข้าวสุกไปแช่แข็งก่อนการทำแห้งจะให้ข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีลักษณะทางเนื้อสัมผัสและค่าดัชนีน้ำตาลใกล้เคียงกับข้าวหุงสุกแบบปกติมากที่สุด นอกจากนี้การแช่เย็นข้าวก่อนนำไปทำแห้งจะส่งผลให้เนื้อสัมผัสของข้าวมีความแข็งมากกว่า อีกทั้งยังส่งผลให้ค่าดัชนีน้ำตาลสูงกว่าข้าวหุงสุกแบบปกติอีกด้วย

Hsu และคณะ (2015a) ได้ศึกษาถึงผลของกระบวนการให้ความร้อน การรีโทรเกรเดชัน และการอบแห้งที่มีต่อความสามารถทางการย่อยในหลอดทดลอง (*in vitro* starch digestibility) ของข้าวกึ่งสำเร็จรูป โดยวัตถุประสงค์ในการศึกษาคือเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปข้าวกึ่งสำเร็จรูปเพื่อที่จะลดปริมาณการย่อยคาร์โบไฮเดรตในข้าวกึ่งสำเร็จรูป โดยพันธุ์ข้าวที่ใช้ในการศึกษาคือ ข้าวอะมิโลสต่ำสายพันธุ์จาโปนิกา ข้าวอะมิโลสต่ำสายพันธุ์อินดิกา และข้าวอะมิโลสสูงสายพันธุ์อินดิกา ซึ่งในการศึกษานี้จะนำข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์มาแปรรูปเป็นข้าวกึ่งสำเร็จรูปโดยมีการแปรสภาวะการหุง และเวลาที่ใช้ในการแช่เย็น หรือรีโทรเกรเดชัน และหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยพบว่าสภาวะในการหุงข้าวที่เหมาะสมที่สุดคือใช้อุณหภูมิ 86°C เวลา 28 นาที ซึ่งมีการใช้สัดส่วนของข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ในสภาวะนี้จะสามารถลดปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) และเพิ่มปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (SDS) เมื่อเทียบกับข้าวที่หุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวแบบปกติ นอกจากนี้ยังพบว่าการรีโทรเกรเดชันกับการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะมีผลร่วมกันในการลดปริมาณสตาร์ชย่อยเร็วในข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่คั้นรูปแล้ว

Ashwar et al. (2016) ศึกษาการเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในแป้งข้าวโดยใช้วิธี autoclaving – retrogradation โดยประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือ autoclave ซึ่งเป็นการเจลาติไนซ์แป้งทำให้เม็ดแป้งแตกส่งผลให้สายอะมิโลสที่อยู่ภายในเม็ดแป้งออกมาภายนอก ขั้นตอนที่สองคือ retrogradation โดยขั้นตอนนี้จะก่อให้เกิดการจับ และรวมตัวกันของสายอะมิโลสในรูปแบบใหม่ โดยจะเกิดการเรียงตัวแบบขดเกลียวม้วนอย่างแน่นหนา ซึ่งส่งผลให้เอนไซม์เข้ามาย่อยโครงสร้างได้ยากขึ้น แป้งข้าวจึงมีความต้านทานต่อการย่อยมากขึ้น ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถเพิ่มปริมาณแป้งทนย่อยในแป้งข้าวได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังพบว่าประสิทธิภาพของการดูดซึมน้ำของแป้งข้าวที่ผ่านวิธีการนี้จะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสตาร์ช ถูกเจลาติไนซ์โดยวิธี autoclave และยังพบว่าแป้งที่ผ่านวิธีการนี้จะมีประสิทธิภาพในการดูดซึมน้ำมันเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดโครงสร้าง amylose – lipid complex ภายในแป้ง ที่ผ่านวิธีการ autoclaving – retrogradation

Farooq และคณะ (2018) ศึกษาการเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันภายใน สตาร์ชข้าวเมื่อให้ความร้อนสตาร์ชข้าวร่วมกับการเติมน้ำมันปาล์ม โดยพบการเกิดโครงสร้าง เชิงซ้อน เนื่องจากพบฟิสิกของการสลายโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันเมื่อทำการ วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermal properties) โดยพิกที่พบจะมีค่า $T_p < 100^{\circ}\text{C}$ ซึ่งถือว่าเป็น การสลายโครงสร้างเชิงซ้อนแบบไม่เป็นระเบียบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ

- 3.1.1 ข้าวหอมมะลิตราช้างสยาม ซื้อมาจากตลาดไท ประเทศไทย
- 3.1.2 ข้าวหอมปทุมตราหมีแพนด้า ซื้อมาจากตลาดไท ประเทศไทย
- 3.1.3 ข้าวเสาไห้ตราบัวชมพู ซื้อมาจากตลาดไท ประเทศไทย
- 3.1.4 น้ำมันมะพร้าวตราเนเชอเรล ซื้อมาจากห้างเทสโก้ โลตัส ประเทศไทย
- 3.1.5 น้ำมันรำข้าวตราลิง ซื้อมาจากห้างเทสโก้ โลตัส ประเทศไทย

3.2 เครื่องมือ

- 3.2.1 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) รุ่น WNB14 ผลิตโดยบริษัท Memmert ประเทศเยอรมนี
- 3.2.2 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (shaker water bath) รุ่น SV1422 ผลิตโดยบริษัท Memmert ประเทศเยอรมนี
- 3.2.3 ตู้อบแบบถาด (tray dryer) ผลิตโดยบริษัท Progress ประเทศไทย
- 3.2.4 ตู้อบลมร้อน (hot air oven) รุ่น UNB 400 ผลิตโดยบริษัท Memmert ประเทศเยอรมนี
- 3.2.5 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง รุ่น PA4102 ผลิตโดยบริษัท Ohaus ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.6 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น MS204S ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.2.7 เครื่องโฮโมจีไนซ์ (homogenizer) รุ่น T25 digital ultra turrax ผลิตโดยบริษัท Ika ประเทศเยอรมนี
- 3.2.8 เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) รุ่น Z 206A ผลิตโดยบริษัท Hermle ประเทศเยอรมนี
- 3.2.9 UV-VIS Spectrophotometer รุ่น UV-1800 ผลิตโดยบริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.10 Micro-pipettors และ Tips ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.2.11 เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น SP-2100 ผลิตโดยบริษัท Suntex ประเทศไทย
- 3.2.12 เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer) รุ่น MS7-H550-Pro ผลิตโดยบริษัท Scilogex ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.13 เครื่องเขย่าสาร (vortex mixer) รุ่น G560E ผลิตโดยบริษัท Scientific industries ประเทศสหรัฐอเมริกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.14 เครื่องวิเคราะห์ความหนืดของแป้ง (rapid visco analyser, RVA) รุ่น RVA-4 ผลิตโดยบริษัท Newport scientific ประเทศออสเตรเลีย

3.2.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM-6610LV ผลิตโดยบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น

3.2.16 เครื่องทำแห้งตัวอย่าง ณ จุดวิกฤต (critical point dryer) รุ่น EM CPD 300 ผลิตโดยบริษัท Leica ประเทศออสเตรเลีย

3.2.17 เครื่องเคลือบทอง รุ่น SCD 040 ผลิตโดยบริษัท Balzers ประเทศเยอรมนี

3.2.18 เครื่อง Differential Scanning Colorimeter รุ่น DSC 1 ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

3.2.19 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffractometer) รุ่น AXS model D8 discover ผลิตโดยบริษัท Bruker ประเทศเยอรมนี

3.2.20 โถดูดความชื้น (desiccator)

3.2.21 เครื่องบด (pin mill) รุ่น ZM200 ผลิตโดยบริษัท Retsch ประเทศเยอรมนี

3.2.22 เครื่องแยกขนาด รุ่น AS200 ผลิตโดยบริษัท Retsch ประเทศเยอรมนี

3.2.23 เครื่องทำน้ำร้อน รุ่น EEK1303W ผลิตโดยบริษัท Electrolux ประเทศสวีเดน

3.2.24 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3.2.25 หม้อหุงข้าว รุ่น KS-19ET ผลิตโดยบริษัท Federal electric ประเทศไทย

3.2.26 เครื่องบดกระเทียม

3.2.27 เครื่องบดแห้ง รุ่น SG-10HK ผลิตโดยบริษัท Cuisinart ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3 สารเคมี

3.3.1 glacial acetic acid บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย

3.3.2 maleic acid บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย

3.3.3 sodium hydroxide (NaOH) บริษัท Carlo Erba Reagents ประเทศอิตาลี

3.3.4 calcium chloride dihydrate ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี

3.3.5 sodium azide บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี

3.3.6 potassium hydroxide (KOH) บริษัท Ajax Finechem ประเทศนิวซีแลนด์

3.3.7 absolute ethanol บริษัท RCI Labscan ประเทศไทย

3.3.8 amylose จากมันฝรั่ง บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี

3.3.9 ชุดทดสอบปริมาณสตาร์ชทนย่อย (resistant starch K-RSTAR 10.15) บริษัท Megazyme ประเทศไอร์แลนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

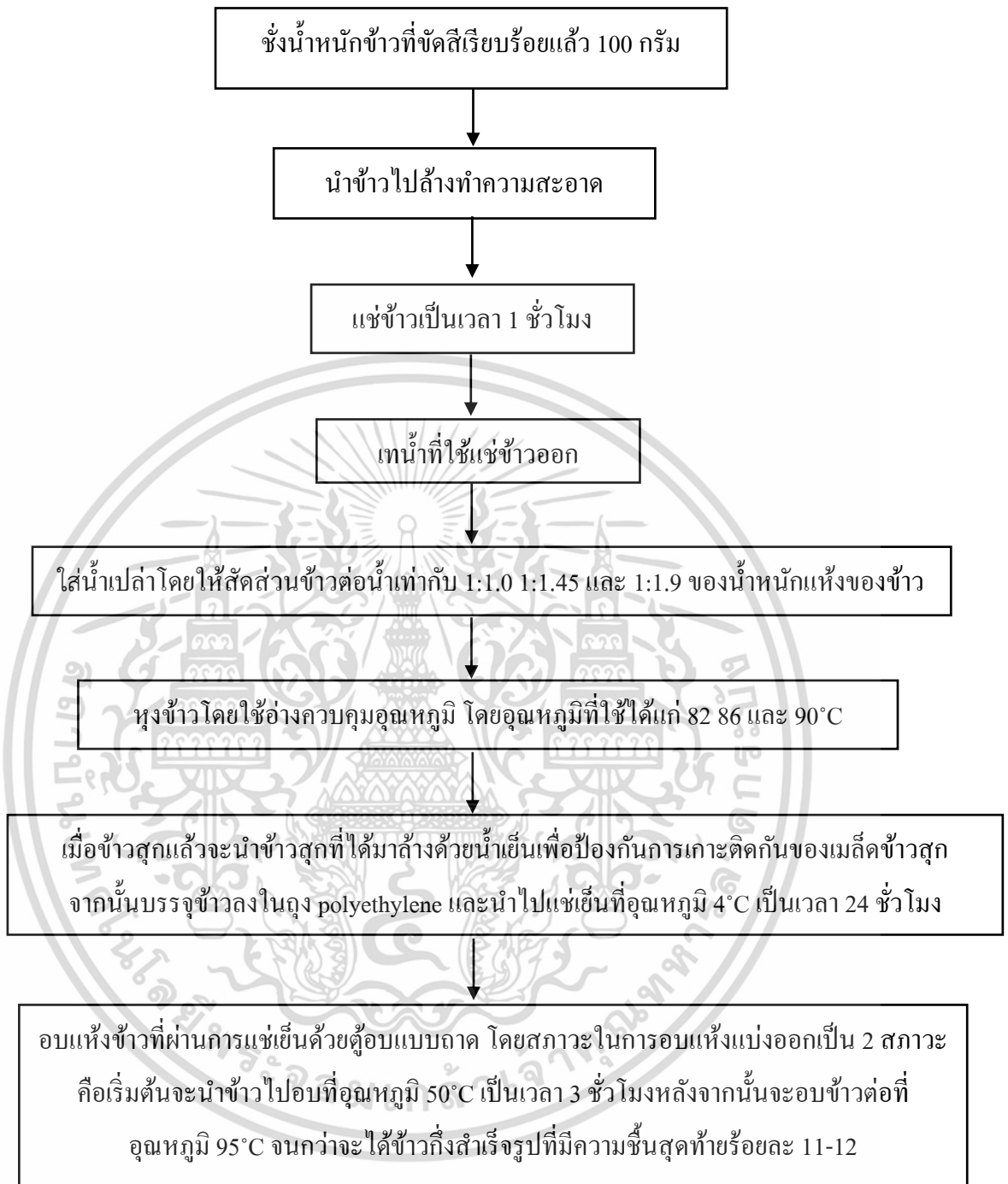
3.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิการให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารในขั้นตอนการหุงข้าวที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ

พันธุ์ข้าวที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเส้าไห้ ซึ่งมีปริมาณอะมิโลสที่แตกต่างกันดังแสดงในภาคผนวก จ กระบวนการเตรียมข้าวกล้องสำเร็จรูปได้ดัดแปลงวิธีการของ Hsu และคณะ (2015a) โดยนำข้าวสารมาล้างทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มาจากข้าวสาร จากนั้นแช่ข้าวในน้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้เมล็ดข้าวดูดความชื้นเข้าไปก่อนที่จะนำไปทำให้สุก (gelatinization) ด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ซึ่งจะมีการแปรอุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อนได้แก่ 82 86 และ 90°C นอกจากนี้ยังมีการแปรสัดส่วนของข้าวสารต่อน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการหุงด้วยคือ 1.0:1.0 1.0:1.45 และ 1.0:1.9 ของน้ำหนักแห้งของข้าว เวลาที่ใช้ในแต่ละสภาวะของการหุงจะเป็นเวลาที่น้อยที่สุดที่ทำให้ข้าวสุก โดยเลือกมาจากการไม่มีแกนแข็งตรงกลางเมล็ดเมื่อกดเมล็ดข้าว 10 เมล็ดด้วยกระจกสไลด์ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการหุงข้าวได้แสดงอยู่ในตารางที่ 3.1 เมื่อให้ความร้อนจนข้าวสุกแล้ว จะนำข้าวสุกที่ได้มาทำการล้างด้วยน้ำเย็นเพื่อป้องกันการเกาะติดกันของเมล็ดข้าว จากนั้นบรรจุข้าวสุกลงไปในถุงพลาสติก PE และนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาการแช่เย็นแล้วจะนำข้าวที่ได้มาอบแห้ง 2 ขั้นตอนคือ 50°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงจากนั้นนำไปอบแห้งที่ 95°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ได้ข้าวกล้องสำเร็จรูปที่มีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 11-12 โดยขั้นตอนในการเตรียมข้าวกล้องสำเร็จรูปแสดงอยู่ในรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลของอุณหภูมิและสัดส่วนของน้ำที่มีต่อเวลาในการหุงข้าวชนิดต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนน้ำต่อ		เวลาในการหุง (นาที)		
	ข้าวสาร	ข้าวหอมมะลิ	ข้าวหอมปทุม	ข้าวเส้าไห้	
82	1.0	35	37	40	
	1.45	30	32	35	
	1.9	24	27	30	
86	1.0	25	28	31	
	1.45	21	24	26	
	1.9	18	21	23	
90	1.0	19	22	24	
	1.45	17	19	21	
	1.9	14	16	19	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 กระบวนการเตรียมข้าวถึงสำเร็จรูป

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Hsu และคณะ (2015)

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง (*in vitro* starch digestibility) และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (estimate glycemic index)

นำตัวอย่างข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงด้วยสภาวะต่าง ๆ มาคืนรูปโดยการเติมน้ำร้อนปริมาตร 250 มิลลิลิตรลงในข้าวกล้องสำเร็จรูป 5 กรัม และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นเทน้ำที่ใช้คืนรูปออกจนหมด นำข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูปแล้วมาบดโดยใช้เครื่องบดกระเทียม ตัวอย่างข้าวจะถูกกดผ่านรูของเครื่องบดกระเทียมทั้งหมด 3 ครั้งเพื่อลดขนาดตัวอย่างให้ได้ประมาณ 0.5 - 1 มิลลิเมตร ก่อนที่จะนำตัวอย่างไปวิเคราะห์สมบัติการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณดังข้อที่ 3.4.2

3.4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง (*in vitro* starch digestibility)

การวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองของข้าวกล้องสำเร็จรูปใช้วิธีการ AACC method 32-40.01 (AACC, 2000) โดยชั่งตัวอย่างข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูป 0.5 กรัม ใส่ในหลอดหมุนเหวี่ยงขนาด 15 มิลลิลิตร จากนั้นใส่สารละลายผสมของเอนไซม์ pancreatic α -amylase (10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) และ amyloglucosidase (3.3 ยูนิตต่อมิลลิลิตร) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร และทำการบ่มที่ 37°C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่มีการเขย่าอย่างต่อเนื่อง โดยในการหาปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (rapidly digestible starch, RDS) ใช้เวลาในการบ่ม 20 นาที ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (slowly digestible starch, SDS) ใช้เวลาในการบ่ม 20-120 นาที (Englyst และคณะ 1992) ปริมาณสตาร์ชทนย่อย (resistant starch, RS) ใช้เวลาในการบ่ม 16 ชั่วโมง

ในการวิเคราะห์หาปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (SDS) หลังจากครบเวลาในการบ่มตัวอย่างแล้วจะเติมเอทานอล (ร้อยละ 99) ปริมาตร 4 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลองเพื่อหยุดปฏิกิริยาการย่อย จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,500 กรัม เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นเทส่วนใสใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และล้างตะกอนอีกครั้งโดยการเติมเอทานอล (ร้อยละ 50) ปริมาตร 8 มิลลิลิตร นำไปหมุนเหวี่ยงอีกครั้งเป็นเวลา 10 นาที เทส่วนใสรวมเข้ากับส่วนใสในครั้งแรกและปรับปริมาตรให้ได้เท่ากับ 100 มิลลิลิตรโดยใช้ สารละลายโซเดียมอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 4.5 จากนั้นดูดสารละลายของตัวอย่างมาปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลองและเติมสารละลายเอนไซม์ amyloglucosidase (300 ยูนิตต่อมิลลิลิตร) ปริมาตร 10 ไมโครลิตร บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 50°C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเติมสารละลาย glucose oxidase-peroxidase (GOPOD reagent) ปริมาตร 3 มิลลิลิตรและบ่มที่อุณหภูมิ 50°C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 20 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตรและคำนวณหาปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) และปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (SDS) ได้ตามสมการที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ปริมาณการย่อยของสตาร์ช (ร้อยละ)} = \Delta E \times (F/W) \times 90 \quad (3.1)$$

เมื่อ ΔE = ค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

F = ค่า factor ของการเปลี่ยนแปลงหน่วยเป็น ไมโครกรัมของกลูโคสในสารละลาย
GOPOD Reagent

W = น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (มิลลิกรัม) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (มิลลิกรัม)} = \text{น้ำหนักตัวอย่าง} \times \frac{(100 - \text{ปริมาณความชื้น})}{100} \quad (3.2)$$

ปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) คือปริมาณการย่อยของสตาร์ชที่เวลา 20 นาที และปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (SDS) คือปริมาณการย่อยของสตาร์ชที่เวลา 20-120 นาที

ในกรณีของการวิเคราะห์หาปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) ตัวอย่างจะถูกบ่มเอาไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่มีการเขย่าตลอดเป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำหลอดทดลองมาเติมด้วยเอทานอล (ร้อยละ 99) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,500 กรัม เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนใสออก จากนั้นล้างตะกอนอีกรอบด้วยการเติมเอทานอล (ร้อยละ 50) ปริมาตร 8 มิลลิลิตร และนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,500 กรัม เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนใสส่วนที่สองออกให้คงเหลือแต่ตะกอน จากนั้นคว่ำหลอดลงบนกระดาษที่สามารถดูดซับความชื้นเพื่อซับส่วนใสออกให้หมด เติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ลงในส่วนที่เป็นตะกอน นำหลอดตัวอย่างไปแช่ในอ่างที่มีน้ำเย็นและทำการกวนตัวอย่างเป็นเวลา 20 นาทีเพื่อสกัดสตาร์ชทนย่อยให้ออกมา จากนั้นเติมสารละลายไซเดียมอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 3.8 ปริมาตร 8 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลองและคนตัวอย่างให้เข้ากัน เติมเอนไซม์ amyloglucosidase (3300 หน่วยต่อมิลลิลิตร) ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรลงไปทันที ผสมให้เข้ากันและนำไปบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C เป็นเวลา 30 นาที นำหลอดทดลองไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,500 กรัม เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นดูดตัวอย่างขึ้นมาปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรใส่ในหลอดทดลอง และเติมสารละลาย GOPOD reagent ปริมาตร 3 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 50°C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 20 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร และคำนวณหาปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) ได้ดังสมการที่ 3.3

$$\text{ปริมาณสตาร์ชทนย่อย (ร้อยละ)} = \Delta E \times (F/W) \times 9.27 \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ΔE = ค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

F = ค่า factor ของการเปลี่ยนแปลงหน่วยเป็น ไมโครกรัมของกลูโคสใน

สารละลาย GOPOD Reagent

W = น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (มิลลิกรัม) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

3.4.3 การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (estimate glycemic index)

การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (estimate glycemic index, eGI) จะมีขั้นตอนการวิเคราะห์เหมือนการวิเคราะห์ประมาณสตาวิชย่อยเร็ว (RDS) ในข้อที่ 3.4.2 อย่างไรก็ตามเวลาบ่มตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนแปลง โดยใช้เวลาในการบ่ม 30 60 90 120 150 และ 180 นาที (Goñi และคณะ 1997) สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก3 ในส่วนของการคำนวณหาค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (eGI) สามารถคำนวณได้โดยหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการย่อยของสตาวิชกับเวลา (30-180.นาที) โดยแสดงผลออกมาเป็นกราฟ ซึ่งจะได้ค่า C_{∞} , C และ t นำมาแทนในสมการที่ 3.4 เพื่อหาค่า k

$$C = C_{\infty} (1 - e^{-kt}) \quad (3.4)$$

เมื่อ C = ปริมาณการย่อยของสตาวิชที่เวลา t

C_{∞} = ค่าสมมูลของปริมาณการย่อยของสตาวิช

k = ค่าคงที่ของจลนศาสตร์

t = เวลา (นาที)

จากนั้นนำค่า k มาแทนในสมการที่ 3.5 เพื่อใช้คำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของการย่อย (AUC)

$$AUC = C_{\infty} (t_f - t_0) - (C_{\infty} / k) [1 - \exp[-k(t_f - t_0)]] \quad (3.5)$$

เมื่อ C_{∞} = ค่าสมมูลของปริมาณการย่อยของสตาวิช

t_f = เวลาสุดท้าย (180 นาที)

t_0 = เวลาเริ่มต้น (0 นาที)

k = ค่าคงที่ของจลนศาสตร์ (ได้จากสมการที่ 3.4)

ในการหาค่าดัชนีการย่อย (hydrolysis index, HI) สามารถหาได้จากการนำพื้นที่ใต้กราฟการย่อยของตัวอย่างหารด้วยพื้นที่ใต้กราฟการย่อยของตัวอย่างอ้างอิง (ขนมปังขาว) โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.6

$$HI = (\text{AUC ของตัวอย่าง} / \text{AUC ของตัวอย่างอ้างอิง}) \times 100 \quad (3.6)$$

จากนั้นสามารถหาค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (eGI) ของตัวอย่างได้โดยใช้สมการของ Goñi และคณะ (1997) ดังสมการที่ 3.7

$$GI = 39.71 + (0.549 \times HI) \quad (3.7)$$

เมื่อ HI = ค่าดัชนีการย่อยสามารถหาได้จากสมการที่ 3.6

3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูป (pasting properties)

ในการวิเคราะห์สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูปนั้นจะใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดของแป้ง (rapid visco analyser, RVA) โดยนำแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูปไปบดให้เป็นแป้งโดยใช้เครื่องบด pin mill และนำแป้งไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 160 ไมครอน แป้งจากแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูปจะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติทางด้านความหนืดโดยชั่งตัวอย่างปริมาณ 3.5 กรัมใส่ลงในกระบอกอะลูมิเนียม จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 25 ± 0.1 มิลลิลิตร ใช้ใบพัดกวนให้ตัวอย่างกระจายตัวก่อนนำกระบอกอะลูมิเนียมใส่ในเครื่องวิเคราะห์ความหนืด โดยตั้งโปรแกรมเครื่องให้คงอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50°C เป็นเวลา 1 นาที และค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิจนถึง 95°C โดยใช้เวลา 3.42 นาที และคงอุณหภูมิที่ 95°C เป็นเวลา 2.30 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิจนถึง 50°C โดยใช้เวลา 3.48 นาที และคงอุณหภูมิที่ 50°C เป็นเวลา 3 นาที รวมเวลาวิเคราะห์ทั้งหมด 13 นาที (ภาคผนวก ก4) บันทึกค่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (peak time) ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) ค่าการแตกสลายของเม็ดแป้ง (breakdown) ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าการคืนตัว (setback) โดยรายงานค่าต่างๆ ในหน่วยเซนติพอยซ์ (cP)

3.4.5 การส่องดูพื้นผิวของตัวอย่างโดยการใช้อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

ทำการคืนรูปตัวอย่างข้าวกล้องสำเร็จรูปโดยการเติมน้ำร้อนปริมาณ 250 มิลลิลิตรลงในแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูป 5 กรัม และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นเทน้ำที่ใช้คืนรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกจนหมด นำเมล็ดข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการคั้นรูปมาคั้นน้ำออกโดยใช้เอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งจะเริ่มจากแช่ตัวอย่างเมล็ดข้าวลงในเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ตามด้วยร้อยละ 50 70 90 และ 100 โดยจะใช้เวลาแช่ทั้งหมด 30 นาทีในแต่ละความเข้มข้น และที่ความเข้มข้นร้อยละ 100 จะทำการแช่ตัวอย่างทั้งหมด 3 ครั้ง (Rewthong และคณะ 2011) ตัวอย่างที่ผ่านการแช่เอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 100 จะถูกนำมาทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งตัวอย่าง ณ จุดวิกฤต (critical point dryer) (ภาคผนวก ก7) จากนั้นนำตัวอย่างแห้งมาติดลงบน stub และทำการเคลือบตัวอย่างด้วยทองคำ โครงสร้างพื้นผิวของเมล็ดข้าวกล้องสำเร็จรูปทั้งตามยาวและตัดขวางจะถูกส่องโดยใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.4.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ในการทดลองนี้จะใช้การออกแบบการทดลองแบบ central composite design (CCD) ซึ่งมีการนำเสนอข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ออกมาเป็นพื้นที่ผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) โดยใช้โปรแกรม design expert software version 7.0.0 โดยปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาคืออุณหภูมิที่ใช้ในการหุง (X1) และ สัดส่วนของน้ำต่อข้าวสาร (X2) ซึ่งแต่ละปัจจัยจะมีการแปรเป็น 3 ระดับคือ -1 (ค่าต่ำสุด) 0 (จุดกึ่งกลาง) และ +1 (ค่าสูงสุด) โดยแผนการทดลองนี้จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด 13 การทดลองซึ่งมีการทดลองซ้ำที่จุดกึ่งกลาง 5 จุดดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การวางแผนการทดลองแบบ central composite design (CCD)

การทดลอง	อุณหภูมิในการหุงข้าว (X1) (°C)	สัดส่วนน้ำต่อข้าวสาร (X2) (°C)
1	82 (-1)	1.0 (-1)
2	90 (1)	1.0 (-1)
3	82 (-1)	1.9 (1)
4	90 (1)	1.9 (1)
5	82 (-1)	1.45 (0)
6	90 (1)	1.45 (0)
7	86 (0)	1.0 (-1)
8	86 (0)	1.9 (1)
9	86 (0)	1.45 (0)
10	86 (0)	1.45 (0)
11	86 (0)	1.45 (0)
12	86 (0)	1.45 (0)
13	86 (0)	1.45 (0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนที่คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ในเชิงพาณิชย์ด้วยประการทั้งปวง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรตามที่ศึกษาในการทดลองนี้ได้แก่ ปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) ปริมาณสตาร์ชที่ถูกล่อยได้ช้า (SDS) ปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (eGI) ซึ่งข้อมูลทั้งหมดจะถูกวิเคราะห์ได้ออกมาเป็นสมการพหุนามกำลังสอง (second-order polynomial model) ดังแสดงในสมการที่ 3.8

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad (3.8)$$

เมื่อ Y คือ ตัวแปรตาม (dependent variable) β คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) ของตัวแปร X ซึ่ง X คือ ตัวแปรอิสระ (independent variable) โดยสมการที่สามารถอธิบายได้นั้นจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R^2) สูงเข้าใกล้ 1 และ lack of fit ของสมการจะต้องไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) และในส่วนของ การหาจุดที่เหมาะสมของการทดลอง (optimization) จะทำการเลือกสภาวะที่หุงข้าวแล้วส่งผลให้ข้าวกึ่งสำเร็จรูปมีค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลน้อยที่สุด โดยสภาวะการหุงที่เหมาะสมจะพิจารณาจากค่า desirability ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 อย่างไรก็ตามจะต้องทำการทดลองหุงข้าวในสภาวะที่เหมาะสมและทำการวิเคราะห์อีกครั้งเพื่อเป็นการทวนสอบ (validation) ว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่สมการทำนายหรือไม่

ในส่วนของ การวิเคราะห์สมบัติด้านความหนืดจะมีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ (SPSS 16.0)

3.5 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีต่อโครงสร้างภายในเมล็ดข้าวกึ่งสำเร็จรูปสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ

พันธุ์ข้าวที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเส้าไห้ ซึ่งมีปริมาณอะมิโลสที่แตกต่างกันดังแสดงในภาคผนวก จ กระบวนการเตรียมข้าวกึ่งสำเร็จรูปได้ดัดแปลงวิธีการของ Hsu และคณะ (2015a) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยในการศึกษานี้จะมีการเติมน้ำมัน 2 ชนิดคือ น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันรำข้าว ซึ่งมีการแปรปริมาณน้ำมันได้แก่ร้อยละ 2.5 และ 7.5 ของน้ำหนักข้าว น้ำมันที่ใช้ในการศึกษาจะเติมลงไปใต้น้ำที่ใช้สำหรับหุงข้าว โดยปริมาณน้ำที่ใช้คือปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อที่ 3.4 จากนั้นใช้เครื่องโฮมจิในชัตน้ำกับน้ำมันให้กลายเป็นอิมัลชัน และนำส่วนผสมของน้ำกับน้ำมันใส่ลงไปในข้าวที่ผ่านการแช่มาแล้วเรียบร้อยแล้ว ข้าวและส่วนผสมของน้ำกับน้ำมันจะถูกให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิที่ใช้คืออุณหภูมิที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อที่ 3.4 เมื่อให้ความร้อนจนข้าวสุกแล้วจะนำข้าวสุกที่ได้มาบรรจุลงไปในถุงพลาสติก PE และนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาการแช่เย็นแล้วจะนำข้าวที่ได้มาอบให้แห้งโดยใช้อุณหภูมิ 2 ระดับคือ 50°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงจากนั้นนำไปอบแห้งที่ 95°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ได้ข้าวถึงสำเร็จรูปที่มีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 11 - 12

3.5.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง (*in vitro* starch digestibility) และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (estimate glycemic index)

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังข้อที่ 3.4.1

3.5.2 การวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง (*in vitro* starch digestibility)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ดังข้อที่ 3.4.2

3.5.3 การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (estimate glycemic index)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ดังข้อที่ 3.4.3

3.5.4 การวิเคราะห์สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวถึงสำเร็จรูป (pasting properties)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ดังข้อที่ 3.4.4

3.5.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermal properties)

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermal properties) ของตัวอย่างข้าวถึงสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงร่วมกับน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันรำข้าวในปริมาณที่แตกต่างกันด้วยเครื่อง differential Scanning Colorimeter (DSC) ทำได้โดยนำแป้งข้าวถึงสำเร็จรูปปริมาณ 3 มิลลิกรัมของน้ำหนักแห้งไปใส่ลงในถาดบรรจุตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ (aluminum pan) จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน (DI) ปริมาตร 9 ไมโครลิตร และปิดฝาถาดบรรจุตัวอย่างให้สนิท วางถาดบรรจุตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องข้ามคืนเพื่อให้ความชื้นภายในมีความสมดุล จากนั้นให้ความร้อนตัวอย่างโดยการวางถาดบรรจุตัวอย่างลงในเครื่อง DSC ในส่วนของที่วางตัวอย่าง และวางถาดเปล่าอีกด้านหนึ่งเพื่อเป็นถาดอ้างอิง (reference pan) ถาดทั้งสองจะถูกให้ความร้อนโดยมีการเพิ่มอุณหภูมิจาก 20°C จนถึง 120°C ซึ่งมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 10°C ต่อนาที โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาทีไนเซชัน (onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลาทีไนเซชัน (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลาทีไนเซชัน (conclusion temperature, T_c) และพลังงานในการเกิดเจลาทีไนเซชัน (enthalpy, ΔH)

3.5.6 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคแป้งด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction)

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์คือแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูป โดยนำแป้งใส่ลงในแผ่นบรรจุตัวอย่างและเกลี่ยตัวอย่างให้เรียบและเสมอกับขอบแผ่นบรรจุ จากนั้นนำแผ่นบรรจุตัวอย่างวางที่ตำแหน่งตัวอย่างของเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) โดยกำหนดสถานะในการทดสอบคือใช้ target เป็นทองแดง (Cu) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 40 กิโลโวลต์ และใช้กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ เริ่มทำการสแกนที่ 2θ ตั้งแต่ $5-40^\circ$ ด้วยอัตราเร็ว 2° ต่อนาที (ดัดแปลงจากวิธีของ Rewthong และคณะ (2011)) (ภาคผนวก ก6) บันทึกรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และคำนวณดีกรีของผลึก (degree of crystallinity) ได้ตามสมการที่ 3.9

$$\text{ดีกรีของผลึก (ร้อยละ)} = 100 \times A_c / (A_c + A_a) \quad (3.9)$$

เมื่อ A_c = พื้นที่ใต้พีคของส่วนที่เป็นผลึก

A_a = พื้นที่ใต้พีคของส่วนที่เป็นอสัณฐาน

3.5.7 การส่องดูพื้นผิวของตัวอย่างโดยใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการส่องดูพื้นผิวของตัวอย่างแสดงในข้อที่ 3.4.5

3.5.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ (SPSS 16.0)

3.6 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อโครงสร้างภายในเมล็ดข้าวกล้องสำเร็จรูป สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ

พันธุ์ข้าวที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเส้าไห้ ซึ่งมีปริมาณอะมิโลสที่แตกต่างกันดังแสดงในภาคผนวก จ กระบวนการเตรียมข้าวกล้องสำเร็จรูปได้ดัดแปลงวิธีการของ Hsu และคณะ (2015a) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยในการศึกษานี้จะเป็นการศึกษาอุณหภูมิการอบแห้งข้าวที่ผ่านการแช่เย็น ซึ่งจะมีการแปรอุณหภูมิของการอบแห้งในขั้นตอนแรกคือ 40°C 50°C และ 60°C โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งของขั้นตอนนี้คือ 3 ชั่วโมง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำไปอบแห้งที่ 95°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ได้ข้าวกล้องสำเร็จรูปที่มีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 11 - 12

3.6.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง (*in vitro* starch digestibility) และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (estimate glycemic index)

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังข้อที่ 3.4.1

3.6.2 การวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลอง (*in vitro* starch digestibility)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ดังข้อที่ 3.4.2

3.6.3 การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (estimate glycemic index)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ดังข้อที่ 3.4.3

3.6.3 การวิเคราะห์สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูป (pasting properties)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ดังข้อที่ 3.4.4

3.6.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermal properties)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ดังข้อที่ 3.5.5

3.6.5 วิเคราะห์อัตราการคืนตัวของข้าวกล้องสำเร็จรูป

นำตัวอย่างข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ มาคืนรูป โดยการเติมน้ำร้อนปริมาตร 250 มิลลิลิตรลงในข้าวกล้องสำเร็จรูป 5 กรัม และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที ดังข้อที่ 3.4.1 หลังจากครบเวลาในการคืนรูปจะเทน้ำออกทั้งหมดโดยใช้เวลาในการเทน้ำออก 5 นาที และทำการชั่งน้ำหนักข้าวที่ได้หลังจากการคืนตัว โดยอัตราการคืนตัวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.10

$$\text{อัตราการคืนตัว} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวกล้องสำเร็จรูปหลังคืนตัว}}{\text{น้ำหนักข้าวกล้องสำเร็จรูปก่อนคืนตัว}} \quad (3.10)$$

3.6.6 การส่องดูพื้นผิวของตัวอย่างโดยการใช้อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการส่องดูพื้นผิวของตัวอย่างแสดงในข้อที่ 3.4.5

3.6.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ (SPSS 16.0)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลของอุณหภูมิการให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารในขั้นตอนการหุงข้าวที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ

ในการศึกษาผลของอุณหภูมิการให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารจะมีการแปรอุณหภูมิ 3 ระดับคือ 82°C 86°C และ 90°C รวมทั้งแปรสัดส่วนของน้ำต่อข้าวสาร 3 ระดับคือ 1.0:1.0 1.45:1.0 และ 1.9:1.0 ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะแสดงในข้อที่ 4.1.1-4.1.3

4.1.1 ผลของอุณหภูมิการให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิการให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารที่มีต่อสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองของข้าวกล้องสำเร็จรูป 3 ชนิด ได้แก่ ข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเสาไห้ โดยมีการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการแปรรูปข้าวกล้องสำเร็จรูปด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) แบบ Central composite design (CCD) โดยจะเลือกอุณหภูมิในการให้ความร้อน และสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารในขั้นตอนการหุง เพื่อแปรรูปข้าวกล้องสำเร็จรูปที่มีค่าการย่อยในหลอดทดลอง และค่าดัชนีน้ำตาลน้อยที่สุด ในการออกแบบการทดลองจะได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 4.3 และ 4.5

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปที่ได้จากแต่ละหน่วยการทดลอง

การทดลอง	อุณหภูมิการให้ความร้อน (°C)	สัดส่วนน้ำต่อข้าวสาร	ปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (ร้อยละ)	ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (ร้อยละ)	ปริมาณสตาร์ชทนย่อย (ร้อยละ)	ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ
1	82	1.0	52.21	16.84	0.90	83.96
2	90	1.0	57.02	13.42	0.86	86.38
3	82	1.9	46.93	20.09	1.13	77.31
4	90	1.9	54.18	14.56	0.94	84.96
5	82	1.45	52.14	17.58	0.99	82.35
6	90	1.45	54.39	14.44	0.89	85.71
7	86	1.0	57.03	13.31	0.83	86.38
8	86	1.9	53.06	16.56	0.98	84.92
9	86	1.45	54.61	16.05	0.91	85.91
10	86	1.45	54.22	16.67	0.89	85.40
11	86	1.45	55.97	15.97	0.90	85.23
12	86	1.45	56.63	14.97	0.85	86.14
13	86	1.45	53.29	16.26	0.96	84.95

จากข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปที่ได้จากการผลิตในสภาวะต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1 สามารถนำมาสร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance; ANOVA) ของสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (SDS) ปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (eGI) ของข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปโดยแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่าค่า P-value ของสมการถดถอยเท่ากับ 0.007 0.0016 0.0014 และ 0.0006 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด (0.05) นั่นหมายถึงสมการที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถนำมาใช้อธิบายได้ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของทั้ง 4 สมการมีค่าสูงเข้าใกล้ 1 และค่า P-value ของความสมบูรณ์ของรูปแบบจำลอง (Lack of fit) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ซึ่งหมายความว่ารูปแบบจำลองการถดถอยมีความสมบูรณ์กับข้อมูล มีความเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยู่ได้เห็นใบใช้ประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อการนำมาอธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลและสามารถนำไปหาสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปข้าวกล้องสำเร็จรูปเพื่อลดค่าดัชนีน้ำตาล และเมื่อพิจารณาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับสมบัติการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ พบว่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารมีผลต่อสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ผลของอิทธิพลร่วม (interaction) ระหว่างปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาทั้งสองปัจจัยยังมีผลต่อปริมาณสตาร์ชทนย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอยสำหรับการแปรรูปข้าวหอมมะลิ กึ่งสำเร็จรูป

สัมประสิทธิ์การถดถอย	สตาร์ชที่ถูกย่อยได้			ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ
	สตาร์ชย่อยเร็ว	ช้า	สตาร์ชทนย่อย	
B_0	-900.741	308.586	20.143	-785.510
B_1	22.207**	-6.931***	-0.467**	20.786***
B_2	-29.669**	34.299**	1.819***	-60.851**
B_{12}	0.339	-0.293	-0.021*	0.726*
B_{11}	-0.129*	0.040	0.002*	-0.124**
B_{22}	-1.363	-2.161	0.049	-1.775
R^2	0.8581	0.9090	0.9115	0.9331
P-value	0.007**	0.0016**	0.0014**	0.0006***
Lack of fit	0.496	0.2953	0.9839	0.0698

หมายเหตุ: * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$)

*** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$)

จากตารางที่ 4.2 สามารถนำมาแสดงเป็นสมการถดถอยรูปแบบจำลองเชิงเส้นโค้ง (quadratic model) และเชิงเส้นตรง (linear model) ดังสมการที่ 4.1 – 4.4 โดยเป็นสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารกับปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (SDS) ปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (eGI) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y_{RDS} = -900.74 + 22.21X_1 - 29.67X_2 - 0.13X_1^2 \quad (4.1)$$

$$Y_{SDS} = 308.59 - 6.93X_1 + 34.30X_2 \quad (4.2)$$

$$Y_{RS} = 20.14 - 0.47X_1 + 1.82X_2 - 0.02X_1X_2 + 0.002X_1^2 \quad (4.3)$$

$$Y_{eGI} = -785.51 + 20.79X_1 - 60.85X_2 + 0.73X_1X_2 - 0.12X_1^2 \quad (4.4)$$

เมื่อ Y = ปริมาณการย่อยสลายในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ

X_1 = อุณหภูมิในการให้ความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

X_2 = สัดส่วนน้ำต่อข้าวสาร

นอกจากข้าวหอมมะลิที่นำมาใช้ในการศึกษา ในงานวิจัยนี้ยังได้มีการศึกษาข้าวอีก 2 ชนิดที่มีความนิยมรับประทานในประเทศไทยคือ ข้าวหอมปทุม และ ข้าวเส้าไห้ โดยตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูปที่ได้จากการผลิตในสภาวะที่กำหนด ซึ่งสามารถนำข้อมูลข้างต้นไปสร้างสมการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ใช้ในการศึกษากับสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ และวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของสมการถดถอย ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของ ข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูปที่ได้จากแต่ละหน่วยการทดลอง

การทดลอง	อุณหภูมิการให้ความร้อน (°C)	สัดส่วนน้ำต่อข้าวสาร	ปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (ร้อยละ)	ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (ร้อยละ)	ปริมาณสตาร์ชที่ย่อย (ร้อยละ)	ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ
1	82	1.0	51.57	14.2	1.26	81.09
2	90	1.0	53.45	13.85	0.81	82.36
3	82	1.9	43.34	20.09	1.73	75.87
4	90	1.9	48.89	15.86	1.00	80.11
5	82	1.45	49.83	15.89	1.18	80.86
6	90	1.45	50.61	14.32	0.88	82.06
7	86	1.0	56.42	13.30	0.75	83.89
8	86	1.9	46.58	15.96	1.29	79.28
9	86	1.45	49.32	15.91	0.84	79.66
10	86	1.45	52.20	15.65	0.80	80.23
11	86	1.45	49.92	15.16	1.01	79.67
12	86	1.45	51.48	14.85	0.91	81.14
13	86	1.45	49.76	14.42	1.05	79.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอยสำหรับการแปรรูปข้าวหอมปทุม
กิ่งสำเร็จรูป

สัมประสิทธิ์ การถดถอย	สตาร์ชย่อยเร็ว	สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ ช้า	สตาร์ชทนย่อย	ค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณ
B ₀	-465.987	249.086	68.090	59.378
B ₁	12.712*	-6.068*	-1.540**	0.962*
B ₂	-53.084***	48.275***	1.888**	-40.033**
B ₁₂	0.510	-0.539*	-0.039	0.413
B ₁₁	-0.076	0.038	0.008 [#]	-0.007
B ₂₂	0.299	0.683	0.656 [#]	0.029
R ²	0.8719	0.8922	0.8960	0.7843
P-value	0.0050**	0.0028**	0.0025**	0.0275*
Lack of fit	0.2545	0.2507	0.3782	0.0541

หมายเหตุ: [#] มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.1$)

* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$)

*** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$)

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่า P-value ของสมการถดถอยมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด นั่นหมายความว่าสมการถดถอยสามารถนำมาอธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลได้อีก ทั้งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของสมการมีค่าสูงเข้าใกล้ 1 และค่า P-value ของความสมบูรณ์ของรูปแบบจำลอง (lack of fit) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ซึ่งจากตารางที่ 4.4 สามารถนำมาแสดงเป็นสมการถดถอยรูปแบบจำลองเชิงเส้นตรง (linear model) และ two factor interaction model ดังสมการที่ 4.5 - 4.8

$$Y_{RDS} = -465.99 + 12.71X_1 - 53.08X_2 \quad (4.5)$$

$$Y_{SDS} = 249.09 - 6.07X_1 + 48.27X_2 - 0.54X_1X_2 \quad (4.6)$$

$$Y_{RS} = 68.09 - 1.54X_1 + 1.89X_2 \quad (4.7)$$

$$Y_{eGI} = 59.38 + 0.96X_1 - 40.03X_2 \quad (4.8)$$

เมื่อ $Y =$ ปริมาณการย่อยสตาร์ชในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาล
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ข้อมูลให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X_1 = อุณหภูมิในการให้ความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

X_2 = สัดส่วนน้ำต่อข้าวสาร

จากตารางที่ 4.4 และสมการถดถอยข้างต้นพบว่า อุณหภูมิในการให้ความร้อนและ สัดส่วนของน้ำต่อข้าวสารที่ใช้ในระหว่างขั้นตอนการหุงมีผลต่อสมบัติทางการย่อยในหลอด ทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวเสกให้ กิ่งสำเร็จรูปที่ได้จากแต่ละหน่วยการทดลอง

การทดลอง	อุณหภูมิการให้ความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	สัดส่วนน้ำต่อข้าวสาร	ปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (ร้อยละ)	ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (ร้อยละ)	ปริมาณสตาร์ชที่ย่อย (ร้อยละ)	ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ
1	82	1.0	33.82	18.54	3.53	70.32
2	90	1.0	38.71	15.47	3.55	72.55
3	82	1.9	29.51	23.03	5.55	67.44
4	90	1.9	32.44	18.99	4.03	70.62
5	82	1.45	31.17	18.75	3.66	70.29
6	90	1.45	34.69	17.38	3.85	71.48
7	86	1.0	39.77	14.85	2.96	72.91
8	86	1.9	32.86	18.01	4.02	71.31
9	86	1.45	35.28	16.84	3.95	71.52
10	86	1.45	35.12	16.63	3.70	71.52
11	86	1.45	35.54	16.38	3.49	71.76
12	86	1.45	35.83	16.12	3.00	71.90
13	86	1.45	36.04	16.00	2.95	72.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอยสำหรับการแปรรูปข้าวเส้าให้
กึ่งสำเร็จรูป

สัมประสิทธิ์ การถดถอย	สตาร์ชย่อยเร็ว	สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ ช้า	สตาร์ชทนย่อย	ค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณ
B ₀	-1252.816	1003.484	213.128	-590.174
B ₁	29.4882 ^{***}	-22.826 ^{**}	-5.121	15.349 ^{**}
B ₂	6.585 ^{***}	8.940 ^{***}	16.345 ^{**}	-10.929 ^{**}
B ₁₂	-0.272 [#]	-0.135	-0.214 [#]	0.132
B ₁₁	-0.166 ^{***}	0.132 ^{***}	0.031 [#]	-0.089 ^{**}
B ₂₂	3.568 [*]	2.339	1.161	-0.963
R ²	0.9841	0.9461	0.7882	0.8983
P-value	< 0.0001 ^{***}	0.0003 ^{***}	0.0259 [*]	0.0023 ^{**}
Lack of fit	0.2367	0.0501	0.6112	0.233

หมายเหตุ: # มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.1$)

* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$)

*** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$)

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวเส้าให้
กึ่งสำเร็จรูปที่ได้จากการผลิตในสภาวะที่กำหนด โดยสามารถนำข้อมูลข้างต้นไปสร้างสมการถดถอย
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาล
โดยประมาณ และวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของสมการถดถอย โดยผลการวิเคราะห์แสดง
ในตารางที่ 4.6

จากตารางที่ 4.6 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอยพบว่าค่า P-
value ของสมการถดถอยมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
(R²) ของสมการทั้ง 4 สมการมีค่าสูงเข้าใกล้ 1 และค่า P-value ของความสมบูรณ์ของรูปแบบจำลอง
(lack of fit) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ดังนั้นสมการถดถอยที่ได้
จากการวิเคราะห์มีความเหมาะสมที่จะนำมาหาสภาวะการหุงที่เหมาะสมในขั้นตอนการผลิตข้าว
กึ่งสำเร็จรูปเพื่อลดค่าดัชนีน้ำตาลในขั้นต่อไป ซึ่งจากตารางที่ 4.6 สามารถนำมาแสดงเป็นสมการ
ถดถอยรูปแบบจำลองเชิงเส้น โค้ง (quadratic model) และเชิงเส้นตรง (linear model) ดังแสดงใน
สมการที่ 4.9 – 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y_{RDS} = -1252.82 + 29.49X_1 + 6.59X_2 - 0.17X_1^2 + 3.57X_2^2 \quad (4.9)$$

$$Y_{SDS} = 1003.48 - 22.83X_1 + 8.94X_2 + 0.13X_1^2 \quad (4.10)$$

$$Y_{RS} = 213.13 + 16.34X_2 \quad (4.11)$$

$$Y_{eGI} = -590.17 + 15.35X_1 - 10.93X_2 - 0.09X_1^2 \quad (4.12)$$

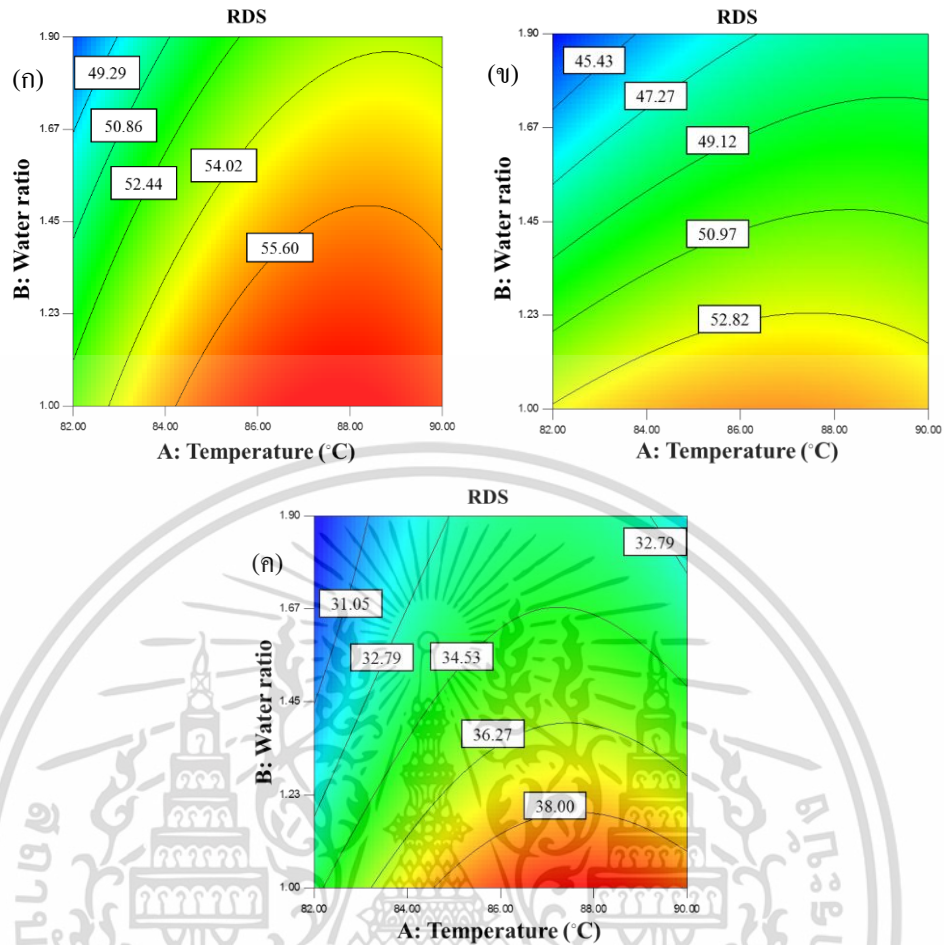
เมื่อ Y = ปริมาณการย่อยสลายในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาล

X_1 = อุณหภูมิในการให้ความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

X_2 = สัดส่วนน้ำต่อข้าวสาร

จากตารางที่ 4.6 และสมการการถดถอยข้างต้นพบว่า อุณหภูมิในการให้ความร้อน และสัดส่วนของน้ำต่อข้าวสารที่ใช้ในระหว่างขั้นตอนการหุงมีผลต่อปริมาณสลายย่อยเร็ว (RDS) ปริมาณสลายที่ถูกละลายได้ช้า (SDS) และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (eGI) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีเพียงปริมาณสลายย่อย (RS) ที่สัดส่วนของน้ำต่อข้าวสารส่งผลเพียงปัจจัยเดียว

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อนและสัดส่วนของน้ำต่อข้าวสารกับสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวทั้งสามชนิดสามารถนำมาแสดงเป็นภาพพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ดังภาพที่ 4.1-4.4

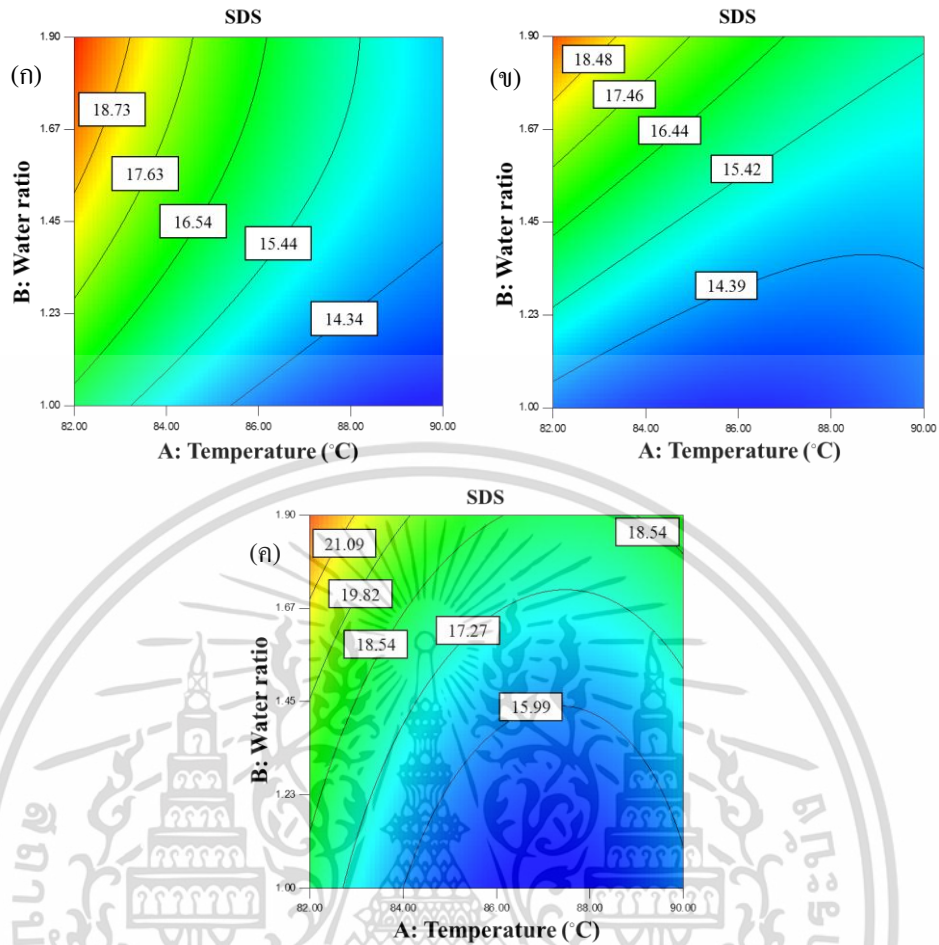


ภาพที่ 4.1 ภาพพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อน (A) และสัดส่วนน้ำต่อข้าวสาร (B) กับปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) ของข้าวหอมมะลิกิ่งสำเร็จรูป (ก) และ ข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูป (ข) และ ข้าวเสาไห้กิ่งสำเร็จรูป (ค)

จากภาพที่ 4.1 แสดงภาพพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อน และสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารต่อปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) ของข้าวกิ่งสำเร็จรูปทั้งสามชนิด ซึ่งพบว่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนและสัดส่วนของน้ำมีผลต่อปริมาณสตาร์ชย่อยเร็วในข้าวกิ่งสำเร็จรูปทั้ง 3 ชนิด โดยสตาร์ชย่อยเร็วมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนและลดสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารในขั้นตอนการหุงข้าวทั้ง 3 ชนิด จากการศึกษาของ Hsu และคณะ (2015a) พบว่าการให้ความร้อนข้าวที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ค่าการย่อยของข้าวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการเจลาติไนซ์ (gelatinize) ของสตาร์ช โมเลกุลสายสตาร์ชหลุดออกมาภายนอกโครงสร้างเม็ดแป้งได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้เอนไซม์เข้าไปย่อยได้ง่ายมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีส่วนต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว กระบวนการเจลาติไนเซชัน (gelatinization) เกิดจากส่วนผสมของเม็ดแป้งกับน้ำได้รับความร้อน เม็ดแป้งดูดซึมน้ำเข้ามามากขึ้นเนื่องจากความร้อนจะทำให้พันธะไฮโดรเจนคลายตัวลงและสายสตาร์ชสามารถจับกับน้ำได้ดีขึ้นจนเม็ดแป้งเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโนสขนาดเล็กจะกระจุกกระจายออกมาภายนอก เม็ดแป้ง การเกิดเจลลิตินในซังของแป้งส่งผลให้หมู่ไฮดรอกซิลของสายสตาร์ชสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ดีขึ้น อีกทั้งยังส่งผลต่อการถูกย่อยโดยเอนไซม์ได้ดีกว่าเดิม (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2550) การลดสัดส่วนของน้ำลงก็ส่งผลให้สตาร์ชย่อยเร็วมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเมื่อลดปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการหุงข้าวในขั้นตอนการแปรรูปข้าวถึงสำเร็จรูป ส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการหุงมากขึ้นที่จะทำให้ข้าวนั้นสุกอย่างสมบูรณ์ ซึ่งการใช้เวลาในการให้ความร้อนที่นานมากขึ้นส่งผลให้เม็ดแป้งที่เป็นองค์ประกอบภายในข้าวถูกทำลายมากขึ้น และทำให้สายสตาร์ชที่อยู่ภายในเม็ดแป้งหลุดออกมาภายนอกโครงสร้างมากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้เอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยได้ง่ายขึ้นและทำให้สตาร์ชย่อยเร็วมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Kaur และคณะ (2016) ที่มีการรายงานว่า การหุงต้มข้าวในเวลานานจะทำให้ค่าดัชนีน้ำตาลและค่าการย่อยเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากเมื่อใช้เวลาในการหุงต้มนานส่งผลให้เมล็ดข้าวมีความบวมพองเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างภายในถูกทำลายซึ่งง่ายต่อการเข้าไปย่อยโดยเอนไซม์ จึงส่งผลให้ค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจากภาพที่ 4.1 จึงสรุปได้ว่าการแปรรูปข้าวถึงสำเร็จรูปโดยใช้สภาวะการหุงที่อุณหภูมิสูง (86-89°C) ร่วมกับการใช้น้ำในปริมาณน้อย (1.0) จะส่งผลให้สตาร์ชย่อยเร็วมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น โดยข้าวทั้ง 3 ชนิดมีผลสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน



ภาพที่ 4.2 ภาพพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อน (A) และสัดส่วนน้ำต่อข้าวสาร (B) กับปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ซ้ำ (SDS) ของข้าวหอมมะลิ กิ่งสำเร็จรูป (ก) และ ข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูป (ข) และ ข้าวเส้าไห้กิ่งสำเร็จรูป (ค)

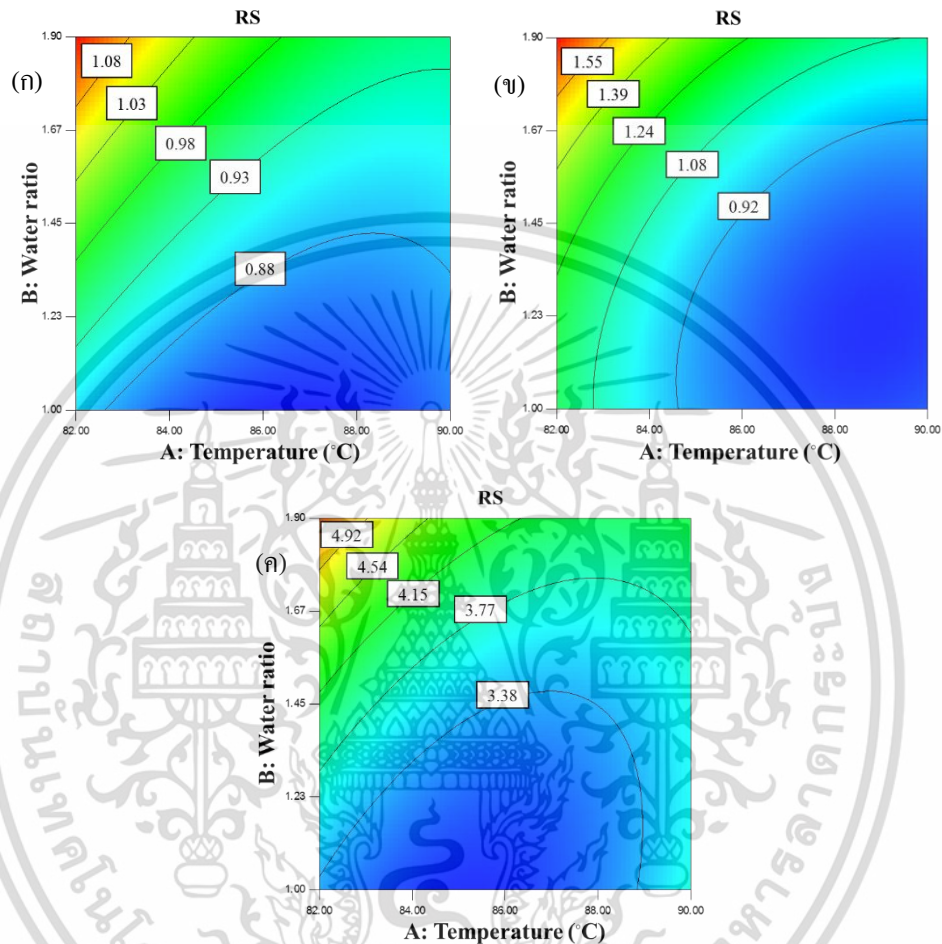
จากภาพที่ 4.2 แสดงแผนภาพพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อน และสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารกับปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ซ้ำ (SDS) ของข้าว กิ่งสำเร็จรูปทั้ง 3 ชนิด โดยพบว่าสภาวะในการหุงข้าวที่มีสัดส่วนของน้ำน้อยและใช้อุณหภูมิสูงจะ ส่งผลให้สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ซ้ำมีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะการหุงข้าวที่ใช้สัดส่วนของน้ำสูง และอุณหภูมิต่ำ ซึ่งการลดลงของปริมาณ สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ซ้ำจะมีความสอดคล้องกับปริมาณ สตาร์ชย่อยเร็วที่เพิ่มสูงขึ้น การให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (82°C) และสัดส่วนของน้ำสูง (1.9) จะ ส่งผลให้สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ซ้ำมีปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากการให้ความร้อนแก่เมล็ดข้าวที่ อุณหภูมิต่ำ จะทำให้ลดอัตราการแพร่ของน้ำเข้าไปยังเม็ดแป้ง ซึ่งส่งผลให้เม็ดแป้งภายในข้าว นั้น พองตัวแต่ยังไม่ถูกทำลาย (Briffaz และคณะ 2012; Hsu และคณะ 2015a) ซึ่งส่งผลให้เอนไซม์เข้าไป ย่อยได้ยากขึ้น ดังนั้นสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ซ้ำจึงมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการหุงที่อุณหภูมิต่ำ ในทางตรงกันข้ามเมื่อมีการใช้อุณหภูมิสูง เม็ดแป้งจะพองตัวและแตกได้ง่ายกว่า เมื่อเม็ดแป้ง เอนไซม์นี้เป็นเอนไซม์ที่สว่นไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยนาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกทำลาย สายสตาร์ชจะหลุดออกมาภายนอก ส่งผลให้พื้นผิวด้านนอกของเมล็ดข้าวเกิดรูพรุน ขนาดใหญ่ขึ้นและมีจำนวนมากขึ้น (Rewthong และคณะ 2011) ซึ่งจะเอื้อต่อการเข้าไปย่อยโดย เอนไซม์และทำให้เกิดการย่อยที่ดีขึ้น ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้จึงลดลงและกลายเป็นสตาร์ช ที่ถูกย่อยอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการให้ความร้อนที่เท่ากันแต่สัดส่วนของน้ำ เพิ่มสูงขึ้น จะพบว่าสตาร์ชที่ถูกย่อยได้มีปริมาณมากขึ้น (ภาพที่ 4.2) เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนที่ อุณหภูมิเดียวกัน การเพิ่มสัดส่วนของน้ำจะส่งผลให้เวลาในการหุงต้มลดลง ซึ่งการให้ความร้อนใน เวลาที่น้อยลงนี้จะทำให้เม็ดแป้งที่อยู่ภายในข้าวยังคงสมบูรณ์และไม่ถูกทำลาย ส่งผลให้ค่าการย่อย ลดลง และสตาร์ชที่ถูกย่อยได้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น (Kaur และคณะ 2016)

ในกระบวนการแปรรูปข้าวกล้องสำเร็จรูปในงานวิจัยนี้ นอกจากกระบวนการเจลาติไนซ์ ข้าวให้สุกโดยการหุงต้มแล้ว ยังมีอีกกระบวนการหนึ่งที่สำคัญนั่นคือการนำข้าวที่ผ่านการเจลาติไนซ์ ไปแช่เย็น เพื่อทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของสายสตาร์ชภายใน โมเลกุลแป้งขึ้นมาใหม่ ซึ่ง กระบวนการนี้เรียกว่าการเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation) โดย Chung และคณะ (2006) และ Park และคณะ (2009) รายงานว่าการเกิดรีโทรกราเดชันส่งผลให้ค่าการย่อยหรือค่าดัชนีน้ำตาลของ แป้งลดลง เนื่องมาจากกระบวนการนี้จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโครงสร้างขึ้นมาใหม่ โดยมีความ แน่นเพิ่มมากขึ้นและเกิดเป็นผลึกแบบสมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ ซึ่งการเกิดผลึกแบบไม่ สมบูรณ์หรือการจัดเรียงตัวใหม่ของสายอะมิโลเพกตินจะทำให้สตาร์ชที่ถูกย่อยได้มีปริมาณเพิ่ม มากขึ้น (Hsu และคณะ 2015b) ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ของข้าว กล้องสำเร็จรูปที่แปรรูปโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำและใช้สัดส่วนของน้ำมากอาจเนื่องมาจากมี การจัดเรียงโครงสร้างของสายสตาร์ชภายในเม็ดแป้งขึ้นมาใหม่จากการบวนการรีโทรกราเดชันร่วม ด้วย

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาข้าวกล้องสำเร็จรูปที่มีการหุงที่อุณหภูมิ 82°C และสัดส่วนของน้ำ เท่ากับ 1.9 จะพบว่าการหุงที่สภาวะนี้จะส่งผลให้มีปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้มากที่สุดคือมี ปริมาณร้อยละ 20.09 20.09 และ 23.03 ของน้ำหนักข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูป ข้าวหอมปทุม กล้องสำเร็จรูป และข้าวเส้าให้กล้องสำเร็จรูปตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ของข้าว หอมมะลิกล้องสำเร็จรูป และข้าวหอมปทุมกล้องสำเร็จรูปที่ได้จากการหุงในสภาวะนี้มีค่าไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ในขณะที่ข้าวเส้าให้กล้องสำเร็จรูปจะมีปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อย ได้มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวอีก 2 ชนิด เนื่องมาจาก ความแตกต่างของปริมาณอะมิโลสของข้าวแต่ละชนิด โดยข้าวเส้าให้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณ อะมิโลสเท่ากับ 21.35 กรัมต่อ 100 กรัมของตัวอย่าง ซึ่งจะมีค่ามากกว่าข้าวหอมมะลิและข้าว หอมปทุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณอะมิโลสเท่ากับ 14.38 และ 17.26 กรัมต่อ 100 กรัมของ ตัวอย่างตามลำดับ (ภาคผนวก จ) โดยข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีความสามารถในการทนต่อ

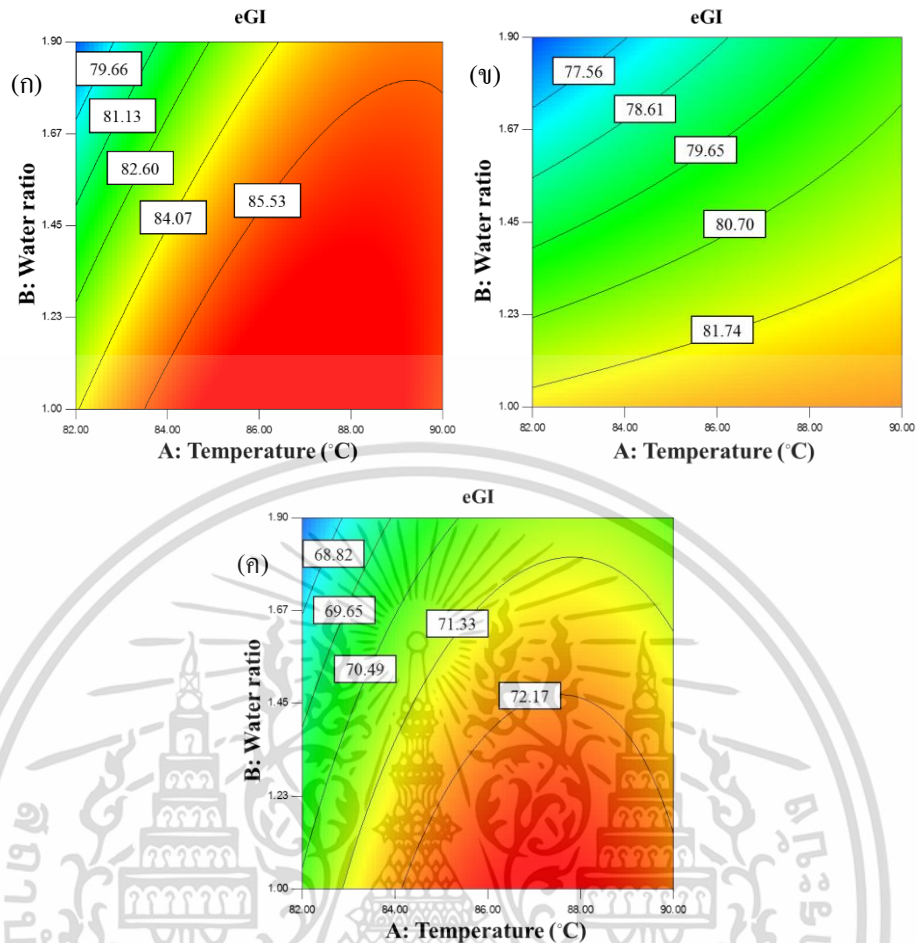
การย่อยโดยเอนไซม์ได้ดีกว่าข้าวที่มีอะมิโลสต่ำ ซึ่ง Hu และคณะ (2004) รายงานว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีปริมาณสตาร์ชทนย่อยสูง ดังนั้นข้าวเสาไห้ถึงสำเร็จรูปจึงมีปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า และปริมาณสตาร์ชทนย่อยมากกว่าข้าวอีก 2 ชนิด



ภาพที่ 4.3 ภาพพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อน (A) และสัดส่วนน้ำต่อข้าวสาร (B) กับปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) ของข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูป (ก) และ ข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูป (ข) และ ข้าวเสาไห้ถึงสำเร็จรูป (ค)

จากภาพที่ 4.3 แสดงภาพพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อน และสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารกับปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) ของข้าวถึงสำเร็จรูปทั้ง 3 ชนิด โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อน และลดสัดส่วนของน้ำลงจะส่งผลให้สตาร์ชทนย่อยมีปริมาณลดลง ซึ่งการลดลงของปริมาณสตาร์ชทนย่อยมีความสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า โดย Zhang และ Hamaker (2009) ได้ทำการรายงานปริมาณสตาร์ชทนย่อยและปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้าจะแปรผกผันกับปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอยที่แสดงในตารางที่ 4.2.4.4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 4.6 พบว่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนจะส่งผลต่อปริมาณสารที่ทนย่อยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในข้าวหอมมะลิและข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูปเท่านั้น ในทางกลับกันสัดส่วนของน้ำต่อข้าวสารจะส่งผลต่อปริมาณสารที่ทนย่อยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในข้าวทั้ง 3 ชนิด เมื่อมีการให้ความร้อนในอุณหภูมิสูงขึ้นและลดสัดส่วนของน้ำจะส่งผลต่อเม็ดแป้งในข้าว โดยเม็ดแป้งจะพองและแตกอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้สตาร์ชที่ถูกย่อยได้อย่างรวดเร็วมีปริมาณเพิ่มขึ้น อีกทั้งสตาร์ชที่ทนย่อยจะมีปริมาณลดลงดังแสดงในภาพที่ 4.3 นอกจากนี้ในขั้นตอนการผลิตข้าวถึงสำเร็จรูปของงานวิจัยนี้จะมีการนำข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้เกิดการรีโทรกราเดชัน โดยสามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermal properties) ของข้าวถึงสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงและนำไปแช่เย็น (ตารางที่ ค-1 ในภาคผนวก ค) ซึ่งพบว่าเกิด endothermic peak ขึ้นในข้าวสุกที่ผ่านการแช่เย็น ในขณะที่ไม่พบ peak ใด ๆ ในข้าวที่ผ่านการหุงสุกเพียงขั้นตอนเดียว โดย endothermic peak ที่เกิดขึ้นจะหมายถึงการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานแบบดูดความร้อนที่จะนำไปสลายโครงสร้างสตาร์ชที่จัดเรียงตัวกันใหม่ในระหว่างการแช่เย็น จากการรายงานของ Park และคณะ (2009) และ Wani และคณะ (2012) ที่กล่าวไว้ว่าการจัดเรียงตัวใหม่ของสายสตาร์ชกลายเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้น มีลักษณะเป็นผลึกอย่างสมบูรณ์ในกระบวนการเกิดรีโทรกราเดชันนั้น จะทำให้สามารถทนต่อการย่อยโดยเอนไซม์ได้ดียิ่งขึ้น และมีความสัมพันธ์กับปริมาณสารที่ทนย่อย โดยสามารถจัดกลุ่มสารที่ทนย่อยที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรีโทรกราเดชันได้โดยอยู่ในประเภทที่ 3 (RS_3) (Haralampu, 2000) ดังนั้นสารที่ทนย่อยของข้าวถึงสำเร็จรูปอาจเกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของสายสตาร์ชกลายเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงมากขึ้นในระหว่างการแช่เย็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการหุงข้าวที่อุณหภูมิ 82°C ร่วมกับการใช้น้ำต่อข้าวสารในสัดส่วน 1.9:1.0 ซึ่งจะพบว่ามีปริมาณสารที่ทนย่อยมากที่สุดคือร้อยละ 1.13 1.73 และ 5.55 ของน้ำหนักข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูป ข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูป และข้าวเสาไห้ถึงสำเร็จรูปตามลำดับ (ตารางที่ 4.1 4.3 และ 4.5)



ภาพที่ 4.4 ภาพพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อน (A) และสัดส่วนน้ำต่อข้าวสาร (B) กับค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (eGI) ของข้าวหอมมะลิ กิ่งสำเร็จรูป (ก) และ ข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูป (ข) และ ข้าวเส้าไห้กิ่งสำเร็จรูป (ค)

ภาพที่ 4.4 แสดงภาพพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อน (A) และสัดส่วนน้ำต่อข้าวสาร (B) กับค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (eGI) ของข้าวชนิดต่าง ๆ จากการพิจารณาข้าวทั้ง 3 ชนิดจะพบว่าค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวกิ่งสำเร็จรูปมีค่าลดลงเมื่อหุงข้าวที่อุณหภูมิต่ำและมีปริมาณของน้ำมากขึ้น ซึ่งค่าดัชนีน้ำตาลจะมีความสัมพันธ์กับสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง โดยสารถย่อยเร็วสามารถถูกย่อยได้ง่ายโดยเอนไซม์ ซึ่งส่งผลให้ค่าดัชนีน้ำตาลเพิ่มสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามสารถที่ถูกย่อยได้ช้าจะถูกย่อยได้ยากกว่า กลูโคสที่ได้จากการย่อยจะถูกปล่อยออกมาอย่างช้า ๆ ซึ่งส่งผลให้มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง (Lehmann และ Robin, 2007)

นอกจากนี้ข้าวกิ่งสำเร็จรูปที่ได้จากการหุงที่อุณหภูมิ 82°C ร่วมกับการใช้น้ำต่อข้าวสารในสัดส่วน 1.9:1.0 จะมีค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการหุงที่สภาวะอื่น โดยมีค่าเท่ากับ 77.31 75.87 และ 67.44 ในข้าวหอมมะลิกิ่งสำเร็จรูป ข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูป และ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้าวเสาให้กึ่งสำเร็จรูป ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1 4.3 และ 4.5) ซึ่งการหุงข้าวที่สภาวะดังกล่าวจะส่งผลให้เมล็ดข้าวยังคงมีความสมบูรณ์ มีความเสียหายและรอยแตกน้อยกว่าการหุงที่สภาวะอื่น ๆ ซึ่งจะลดความสามารถในการเข้าถึงของเอนไซม์ และส่งผลให้มีสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า และปริมาณสตาร์ชทนย่อยเพิ่มมากขึ้น ปริมาณอะมิโลสของข้าวก็มีผลต่อค่าดัชนีน้ำตาลเช่นกัน โดยข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ (Miller และคณะ 1992) ดังนั้นข้าวเสาให้กึ่งสำเร็จรูปจะมีค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณต่ำกว่าข้าวหอมปทุมและข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูป (ภาพที่ 4.4) เนื่องจากข้าวเสาให้มีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าข้าวหอมปทุมและข้าวหอมมะลิ

ในการวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมของการทดลอง (optimization) เพื่อเลือกสภาวะในการหุงข้าวแล้วส่งผลให้ข้าวกึ่งสำเร็จรูปมีปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณน้อยที่สุด อีกทั้งมีปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า และปริมาณสตาร์ชทนย่อยมากที่สุด โดยจากการวิเคราะห์พบว่าสภาวะที่มีความเหมาะสมในการหุงข้าวทั้งสามชนิดคือ การใช้อุณหภูมิ 82°C ร่วมกับการใช้น้ำต่อข้าวสารในสัดส่วน 1.0:1.9 ของน้ำหนักแห้งของข้าว โดยที่สภาวะนี้จะมีค่า desirability เข้าใกล้ 1 มากที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะอื่น ๆ นั้นหมายถึงสภาวะการหุงนี้มีความเหมาะสมมากที่สุดที่จะนำมาแปรรูปข้าวกึ่งสำเร็จรูปลดค่าดัชนีน้ำตาล ซึ่งค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ผลิตจากสภาวะการหุงที่เหมาะสมนี้จะถูกโปรแกรมทำนายขึ้น โดยแสดงในตารางที่ 4.7 อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการทดสอบว่าสภาวะการหุงข้าวที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายสามารถนำมาผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูปลดค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลได้จริง จะทำได้โดยทดลองผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูปโดยหุงข้าวในสภาวะที่เหมาะสม (82°C และสัดส่วนของน้ำ 1.9) ขึ้นอีกครั้ง จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์) และนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) หรือไม่ ซึ่งการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์และค่าที่ได้จากการทำนายจะแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวกล้องสำเร็จรูปทั้งสามชนิดที่ได้จากการทำนายและได้จากการวิเคราะห์

ค่าการ	ข้าวหอมมะลิ		ข้าวหอมปทุม		ข้าวเส้าไห้	
	ค่าจากการทำนาย	ค่าจากการวิเคราะห์ ^A	ค่าจากการทำนาย	ค่าจากการวิเคราะห์ ^A	ค่าจากการทำนาย	ค่าจากการวิเคราะห์ ^A
ย่อย						
RDS	47.710	47.613 ± 0.40 ^{ns}	43.577	43.457 ± 0.33 ^{ns}	29.316	29.605 ± 0.42 ^{ns}
SDS	19.825	19.597 ± 0.42 ^{ns}	19.503	19.181 ± 0.33 ^{ns}	22.369	22.106 ± 0.37 ^{ns}
RS	1.124	1.129 ± 0.18 ^{ns}	1.704	1.717 ± 0.03 ^{ns}	5.303	5.315 ± 0.04 ^{ns}
eGI	78.191	78.029 ± 0.46 ^{ns}	76.520	76.632 ± 0.06 ^{ns}	67.980	67.895 ± 0.12 ^{ns}

หมายเหตุ: ^A ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{ns} ค่าที่อยู่ในแนวอนเดียวกันในข้าวชนิดเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

RDS หมายถึง สตาร์ชย่อยเร็ว

SDS หมายถึง สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า

RS หมายถึง สตาร์ชทนย่อย

eGI หมายถึง ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ

จากตารางที่ 4.7 จะพบว่าค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้าวกล้องสำเร็จรูปที่แปรรูปจากการหุงที่สภาวะเหมาะสมจะมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนาย นั่นหมายความว่าสภาวะการหุงที่เหมาะสม (82°C และสัดส่วนของน้ำ 1.9) สามารถนำไปผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูปที่มีค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลลดลง

4.1.2 ผลของอุณหภูมิการให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารที่มีต่อสมบัติด้านความเหนียวของแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูป

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิการให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารที่มีต่อสมบัติด้านความเหนียวของแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูป 3 ชนิด ได้แก่ ข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเส้าไห้ พบว่าสภาวะการหุงที่แตกต่างกันจะส่งผลให้มีสมบัติด้านความเหนียวของแป้งที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.8 4.9 และ 4.10 โดยความเหนียวของแป้งข้าวสามารถบอกได้ถึงความเสี่ยงของเม็ดแป้งเนื่องจากการให้ความร้อนในระหว่างการหุง

ตารางที่ 4.8 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปที่ได้จากการหุงที่สภาวะต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนน้ำต่อข้าว	PV (cP)	TV (cP)	BD (cP)	FV (cP)	SB (cP)	PT (°C)
82	1.0	5730.0 ± 199.4 ^{cd}	4609.5 ± 118.1 ^{bc}	1120.5 ± 81.3 ^d	7192.0 ± 84.9 ^{bc}	2582.5 ± 33.2 ^a	81.58 ± 1.03 ^a
	1.45	5904.0 ± 69.3 ^d	4585.0 ± 31.1 ^{abc}	1319.0 ± 38.2 ^f	7149.5 ± 50.2 ^{ab}	2564.5 ± 19.1 ^a	81.10 ± 0.49 ^a
	1.9	5723.5 ± 20.5 ^{cd}	4504.5 ± 41.7 ^{ab}	1219.0 ± 21.2 ^e	7077.0 ± 21.2 ^a	2572.5 ± 20.5 ^a	83.93 ± 1.17 ^a
86	1.0	5621.0 ± 24.0 ^c	4689.0 ± 41.0 ^c	932.0 ± 16.9 ^c	7349.0 ± 11.3 ^c	2660.0 ± 29.7 ^b	86.33 ± 0.04 ^a
	1.45	5674.5 ± 92.6 ^c	4579.0 ± 57.9 ^{abc}	1095.5 ± 34.6 ^d	7279.5 ± 67.2 ^{cde}	2700.5 ± 9.2 ^{bc}	84.73 ± 0.11 ^a
	1.9	5725.5 ± 19.1 ^{cd}	4602.0 ± 7.1 ^{bc}	1123.5 ± 12.0 ^d	7258.0 ± 14.1 ^{cde}	2656.0 ± 7.1 ^b	83.25 ± 4.24 ^a
90	1.0	5328.0 ± 14.1 ^a	4611.5 ± 2.1 ^{bc}	716.5 ± 16.3 ^a	7303.5 ± 17.7 ^{de}	2692.0 ± 15.5 ^{bc}	84.40 ± 3.00 ^a
	1.45	5526.0 ± 65.1 ^{bc}	4702.5 ± 16.3 ^c	823.5 ± 48.8 ^b	7463.0 ± 0.0 ^f	2760.5 ± 16.2 ^d	83.90 ± 2.26 ^a
	1.9	5398.5 ± 54.4 ^{ab}	4475.5 ± 20.5 ^a	923.0 ± 33.9 ^c	7203.0 ± 15.5 ^{bcd}	2727.5 ± 4.9 ^{cd}	83.58 ± 1.59 ^a

หมายเหตุ: ^{a-c} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

PV หมายถึง ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity)

TV หมายถึง ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity)

BD หมายถึง ค่าการแตกสลายของเม็ดแป้ง (breakdown)

FV หมายถึง ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity)

SB หมายถึง ค่าการคืนตัว (setback)

PT หมายถึง อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature)

ตารางที่ 4.9 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูปที่ได้จากการหุงที่สภาวะต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนน้ำต่อข้าว	PV (cP)	TV (cP)	BD (cP)	FV (cP)	SB (cP)	PT (°C)
82	1.0	3522.5 ± 105.4 ^{bcd}	3154.0 ± 67.9 ^{abc}	368.5 ± 37.5 ^{ab}	5586.5 ± 118.1 ^a	2432.5 ± 50.2 ^a	85.10 ± 0.49 ^b
	1.45	3762.5 ± 140.7 ^c	3162.0 ± 90.5 ^{abc}	600.5 ± 50.2 ^b	5677.5 ± 112.4 ^{ab}	2515.5 ± 21.9 ^{ab}	84.35 ± 0.64 ^b
	1.9	4034.5 ± 72.8 ^f	3453.5 ± 44.5 ^{cd}	581.0 ± 28.3 ^b	6049.5 ± 55.9 ^c	2596.0 ± 11.3 ^{bc}	80.65 ± 0.00 ^a
86	1.0	3617.5 ± 12.0 ^{cde}	3353.5 ± 7.8 ^{bcd}	264.0 ± 4.2 ^a	5887.0 ± 25.5 ^{bc}	2533.5 ± 17.7 ^{ab}	87.13 ± 0.11 ^b
	1.45	3387.5 ± 109.6 ^{ab}	3211.5 ± 61.5 ^{abcd}	176.0 ± 48.1 ^a	5703.5 ± 108.2 ^{ab}	2492.0 ± 46.7 ^{ab}	86.30 ± 2.26 ^b
	1.9	3692.0 ± 60.8 ^{de}	3492.0 ± 32.5 ^d	200.0 ± 28.3 ^a	6299.0 ± 14.1 ^d	2807.0 ± 18.4 ^d	87.23 ± 0.04 ^b
90	1.0	3276.5 ± 120.9 ^a	3119.5 ± 150.6 ^{ab}	157.0 ± 29.7 ^a	5853.5 ± 152.0 ^{bc}	2734.0 ± 1.4 ^{cd}	86.30 ± 1.13 ^b
	1.45	3556.0 ± 58.0 ^{bcd}	3383.0 ± 39.6 ^{bcd}	173.0 ± 18.4 ^a	6032.0 ± 72.1 ^c	2649.0 ± 32.5 ^{bc}	85.13 ± 2.86 ^b
	1.9	3447.5 ± 20.5 ^{abc}	2926.0 ± 326.7 ^a	521.5 ± 306.2 ^b	5571.5 ± 154.9 ^a	2645.5 ± 171.8 ^{bc}	84.03 ± 0.04 ^b

หมายเหตุ: ^{a-f} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

PV หมายถึง ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity)

TV หมายถึง ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity)

BD หมายถึง ค่าการแตกสลายของเม็ดแป้ง (breakdown)

FV หมายถึง ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity)

SB หมายถึง ค่าการคืนตัว (setback)

PT หมายถึง อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature)

ตารางที่ 4.10 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวสาลีให้ถึงสำเร็จรูปที่ได้จากการหุงที่สภาวะต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนน้ำต่อข้าว	PV (cP)	TV (cP)	BD (cP)	FV (cP)	SB (cP)	PT (°C)
82	1.0	591.5 ± 24.7 ^d	467.0 ± 32.5 ^c	124.5 ± 7.8 ^{cd}	809.5 ± 46.0 ^d	342.5 ± 13.4 ^d	94.78 ± 0.53 ^b
	1.45	542.0 ± 35.4 ^{cd}	415.5 ± 27.6 ^c	126.5 ± 7.8 ^{cd}	756.0 ± 45.3 ^{cd}	340.5 ± 17.7 ^d	94.40 ± 0.00 ^b
	1.9	796.0 ± 18.4 ^c	655.0 ± 11.3 ^d	141.0 ± 7.1 ^d	1123.5 ± 19.1 ^c	468.5 ± 7.8 ^c	92.45 ± 0.64 ^b
86	1.0	399.5 ± 44.5 ^b	318.0 ± 46.7 ^b	81.5 ± 2.1 ^{ab}	487.0 ± 59.4 ^b	169.0 ± 12.7 ^b	95.10 ± 0.14 ^b
	1.45	526.5 ± 0.7 ^c	434.0 ± 4.2 ^c	92.5 ± 4.9 ^b	691.5 ± 6.4 ^c	257.5 ± 10.6 ^c	94.98 ± 0.11 ^b
	1.9	533.5 ± 12.0 ^c	417.5 ± 3.5 ^c	116.0 ± 8.5 ^c	682.0 ± 29.7 ^c	264.5 ± 26.2 ^c	91.08 ± 5.69 ^b
90	1.0	309.5 ± 6.4 ^a	243.0 ± 1.4 ^a	66.5 ± 7.8 ^a	367.0 ± 11.3 ^a	124.0 ± 9.9 ^a	95.00 ± 0.00 ^b
	1.45	360.0 ± 9.9 ^{ab}	277.0 ± 16.9 ^{ab}	83.0 ± 7.1 ^{ab}	436.0 ± 18.4 ^{ab}	159.0 ± 1.4 ^b	94.98 ± 0.04 ^b
	1.9	351.0 ± 4.2 ^{ab}	279.5 ± 6.4 ^{ab}	71.5 ± 10.6 ^a	433.5 ± 2.1 ^{ab}	154.0 ± 4.2 ^{ab}	83.18 ± 1.17 ^a

หมายเหตุ: ^{a-c} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

PV หมายถึง ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity)

TV หมายถึง ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity)

BD หมายถึง ค่าการแตกสลายของเม็ดแป้ง (breakdown)

FV หมายถึง ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity)

SB หมายถึง ค่าการคืนตัว (setback)

PT หมายถึง อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature)

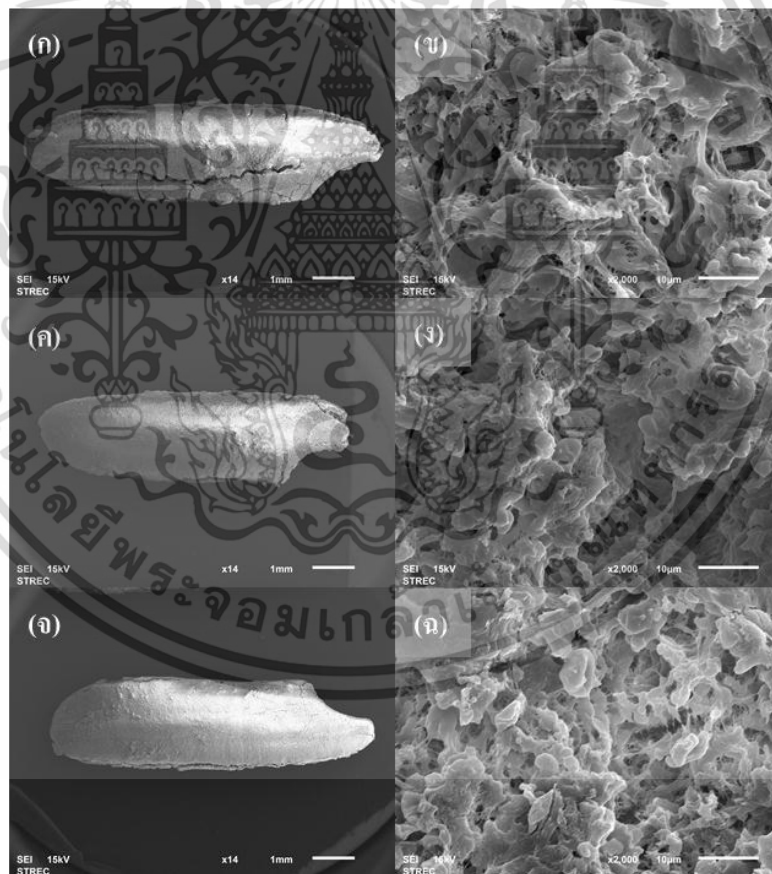
จากตารางที่ 4.8 4.9 และ 4.10 ซึ่งแสดงสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวหอมมะลิ กึ่งสำเร็จรูป ข้าวหอมปทุม กึ่งสำเร็จรูป และข้าวเสาไห้ กึ่งสำเร็จรูปตามลำดับ พบว่าสถานะของ การหุงข้าวที่แตกต่างกันจะส่งผลให้มีความหนืดสูงสุด (PV) ค่าความหนืดต่ำสุด (TV) ค่าการแตกสลายของเม็ดแป้ง (BD) ค่าความหนืดสุดท้าย (FV) และ ค่าการคืนตัว (SB) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามมีเพียงอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (PT) ของข้าวหอมมะลิ กึ่งสำเร็จรูปเท่านั้นที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เมื่อทำการหุงในสถานะที่ แตกต่างกัน โดยที่ระดับน้ำเดียวกัน การเพิ่มอุณหภูมิในการหุงข้าวจะส่งผลให้ค่า PV ของแป้งข้าว ทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มลดลง ซึ่งการหุงข้าวที่อุณหภูมิ 90°C และใช้สัดส่วนของน้ำเท่ากับ 1.0 จะ ส่งผลให้แป้งข้าวหอมมะลิ หอมปทุม และเสาไห้ กึ่งสำเร็จรูปมีค่า PV ต่ำที่สุดคือเท่ากับ 5328 3276.5 และ 309.5 cP ตามลำดับ นอกจากนี้ค่า BD มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการหุงข้าว หอมมะลิและข้าวเสาไห้ โดยค่า BD ของแป้งข้าว กึ่งสำเร็จรูปทั้ง 3 ชนิดมีค่าต่ำที่สุดเมื่อทำการหุง ข้าวที่อุณหภูมิ 90°C และใช้สัดส่วนของน้ำเท่ากับ 1.0 เช่นกัน ซึ่งการลดลงของค่า PV และ BD เมื่อ ทำการเพิ่มอุณหภูมิในการหุง (90°C) อาจเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นส่วนผลึกในเม็ดแป้งถูก ทำลายโดยความร้อนสูงดังงานวิจัยของ Lee และคณะ (2005) และ Wang และคณะ (2017) นอกจากนี้งานวิจัยของ Hagenimana และคณะ (2006) ยังสนับสนุนอีกว่า การลดลงของค่า PV สะท้อนถึงการเจลาติไนซ์ของแป้งที่เพิ่มมากขึ้น เม็ดแป้งมีความเสียหายที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการ หุงข้าวที่อุณหภูมิสูง (90°C) จะส่งผลให้เม็ดแป้งเกิดการเจลาติไนซ์ และมีความเสียหายมากกว่าการ หุงข้าวที่อุณหภูมิต่ำกว่า (82°C) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณน้ำน้อย (สัดส่วน 1.0) ซึ่งข้าวทั้ง 3 ชนิด จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ความเสียหายของเม็ดแป้งที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการ หุงนี้จะเชื่อมโยงกับสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณ ซึ่งจะ พบว่าค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อแป้งเจลาติไนซ์ และเกิดความเสียหาย เนื่องจากเอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยได้อย่างง่ายดาย ดังนั้นจึงสอดคล้องกับภาพที่ 4.1-4.4 ที่พบว่าการหุงข้าวที่อุณหภูมิสูง (90°C) จะส่งผลให้ข้าว กึ่งสำเร็จรูปมีปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว และ ค่าดัชนีน้ำตาลสูงขึ้น และมีปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า และปริมาณสตาร์ชที่ย่อยลดลง

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบสมบัติด้านความหนืดระหว่างข้าวแต่ละชนิดในตารางที่ 4.8 - 4.10 จะพบว่าข้าวในแต่ละชนิดจะมีสมบัติด้านความหนืดที่แตกต่างกันเนื่องจากความแตกต่างของปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพกตินที่เป็นองค์ประกอบของเม็ดแป้งในข้าว โดย อะมิโลสจะทำให้โครงสร้างร่างแหภายในเม็ดแป้งนั้นแข็งแรง และเกิดการพองตัวต่ำ ในขณะที่ อะมิโลเพกตินสามารถจับกับน้ำได้ดีมากกว่า และทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้ดีกว่า ซึ่งจะส่งผลให้มีความหนืดสูงกว่า มีค่า PV มากกว่า (Chung และคณะ 2011) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่า PV และ BD ของ แป้งเสาไห้ กึ่งสำเร็จรูปจะมีค่าน้อยกว่าข้าวหอมมะลิ กึ่งสำเร็จรูปเนื่องจากข้าวเสาไห้มีปริมาณ

อะมิโลสสูงกว่าข้าวหอมมะลิ ซึ่งอะมิโลสที่มีอยู่นี้จะป้องกันการพองตัวของเม็ดแป้ง และทำให้เม็ดแป้งนั้นแข็งแรง ค่า PV และ BD จึงต่ำกว่า (ตารางที่ 4.8 และ 4.10)

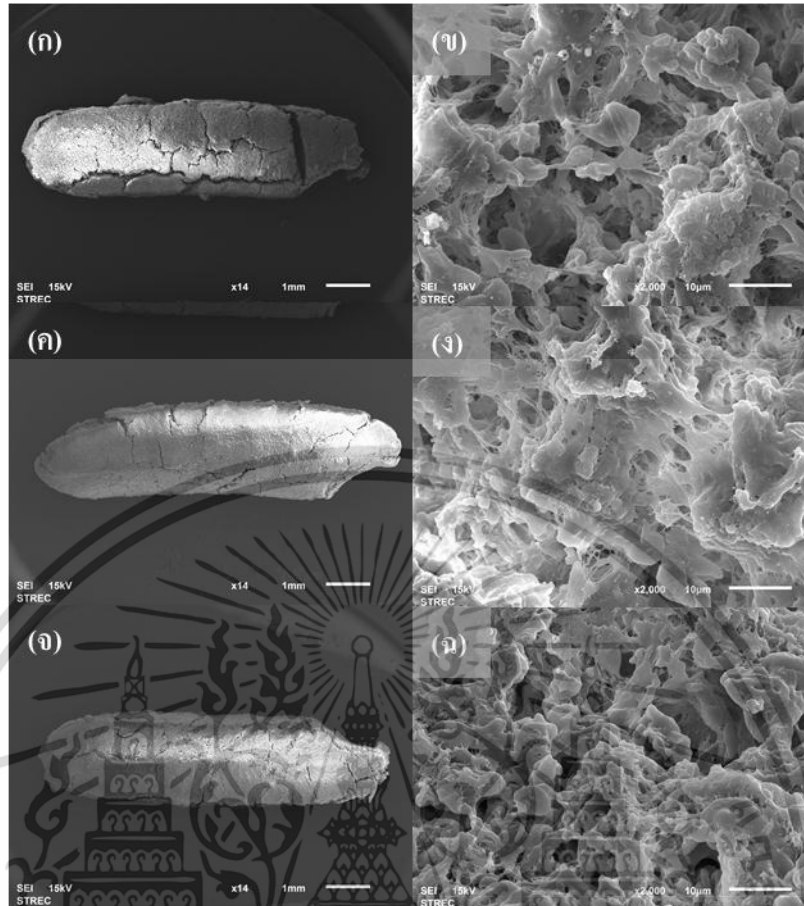
4.1.3 ผลของอุณหภูมิการให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาคและพื้นผิวของข้าวกล้องสำเร็จรูป

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิการให้ความร้อนและสัดส่วนน้ำต่อข้าวสารที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาคและพื้นผิวของข้าวกล้องสำเร็จรูป 3 ชนิด ได้แก่ ข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเส้าให้ พบว่าสภาวะการหุงที่แตกต่างกันจะส่งผลให้พื้นผิว และลักษณะของเมล็ดข้าวแตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4.5-4.13 โดยโครงสร้างและพื้นผิวของเมล็ดข้าวสามารถบอกได้ถึง ความเสียหายของข้าวจากการให้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งสามารถเชื่อมโยงถึงค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณของข้าวกล้องสำเร็จรูปได้



ภาพที่ 4.5 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 82°C ด้วยสัดส่วนน้ำเท่ากับ 1.0 (ก, ข) 1.45 (ค, ง) และ 1.9 (จ, ฉ) โดยประกอบด้วยภาพกำลังขยาย 14 เท่า (ก, ค, จ) และ กำลังขยาย 2000 เท่า (ข, ง, ฉ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

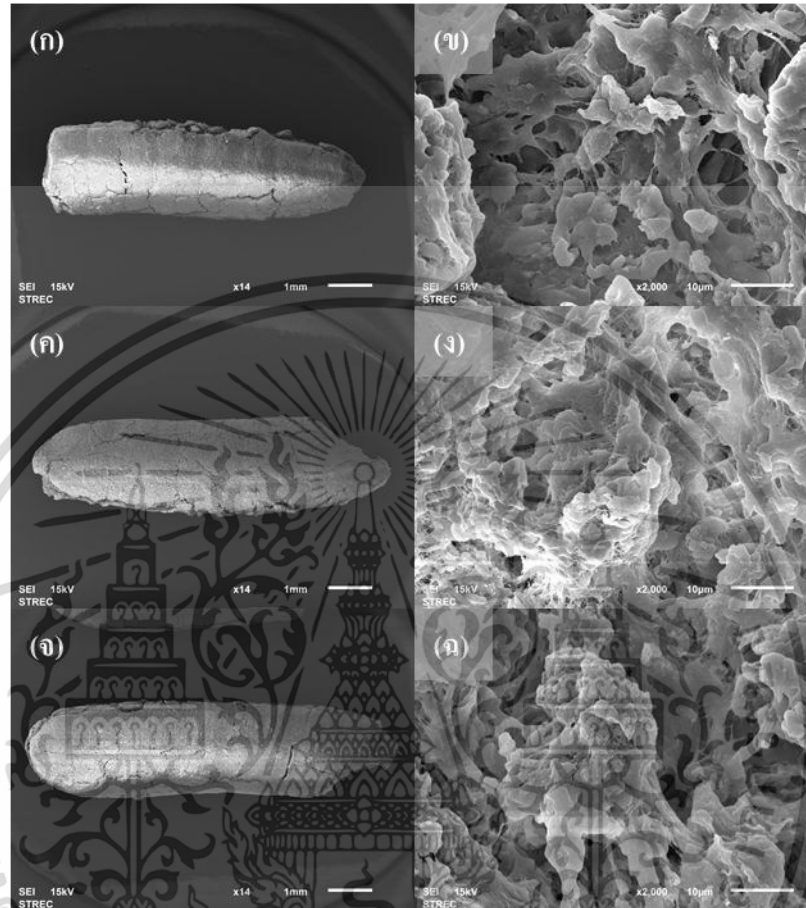


ภาพที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมมะลิที่สำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 86°C ด้วยสัดส่วนน้ำเท่ากับ 1.0 (ก, ข) 1.45 (ค, ง) และ 1.9 (จ, ฉ) โดยประกอบด้วยภาพกำลังขยาย 14 เท่า (ก, ค, จ) และ กำลังขยาย 2000 เท่า (ข, ง, ฉ)

จากภาพที่ 4.5 แสดงภาพของเมล็ดข้าวและพื้นผิวของเมล็ดข้าวหอมมะลิที่สำเร็จรูปที่ได้จากการหุงที่อุณหภูมิ 82°C ที่สัดส่วนของน้ำ 3 ระดับ โดยจะพบว่าที่สัดส่วนของน้ำต่ำ (1.0) เมล็ดข้าวจะมีรอยแตกขนาดใหญ่มาก (ภาพที่ 4.5ก) เมื่อเทียบกับการหุงที่ระดับน้ำมากกว่า โดยเมล็ดข้าวจะยังคงมีความสมบูรณ์ และมีรอยแตกที่ผิวน้อยมาก (ภาพที่ 4.5ค, จ) เมื่อเพิ่มกำลังขยายเพื่อส่องดูลักษณะพื้นผิวภายนอกของเมล็ดข้าวจะพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนน้ำจะส่งผลให้ผิวภายนอกของเมล็ดข้าวมีความแน่น และมีรูพรุนขนาดเล็กกว่า (ภาพที่ 4.5ฉ) ซึ่งลักษณะของเมล็ดข้าวที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 86°C (ภาพที่ 4.6) จะให้ผลไปในทิศทางเดียวกับการหุงที่ 82°C โดยที่สัดส่วนของน้ำน้อยจะส่งผลให้เมล็ดข้าวมีรอยแตกขนาดใหญ่ที่ผิว (ภาพที่ 4.6ก) และมีรูพรุนขนาดใหญ่ (ภาพที่ 4.6ข) ในการทดลองนี้การหุงข้าวที่สัดส่วนของน้ำน้อยจะใช้เวลาในการหุงนานกว่า ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของเม็ดแป้งถูกทำลายมากกว่า เนื่องจากสายสตาร์ชหลุดออกมามาก (Kaur และคณะ 2016) โดย Hsu และคณะ (2015a) รายงานว่าการหลุดออกของสายสตาร์ชในระหว่างการหุงจะส่งผลให้เกิดรูพรุนที่ผิวของเมล็ดข้าวเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นรูพรุนขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นบนผิวของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมล็ดข้าวที่ผ่านการหุงที่สัดส่วนของน้ำน้อยอาจเกิดมาจากการเพิ่มขึ้นของสายตารัศที่หลุดออก จากเม็ดแป้ง ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นจะทำให้ค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลเพิ่มสูงขึ้น

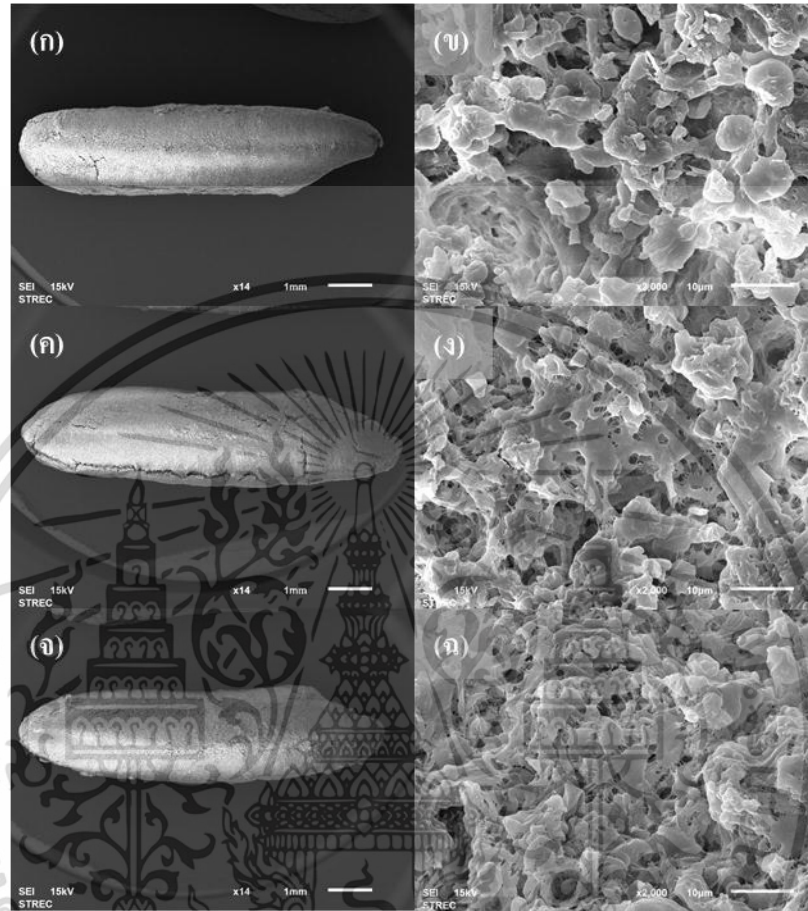


ภาพที่ 4.7 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมมะลิที่สำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 90°C ด้วยสัดส่วนน้ำเท่ากับ 1.0 (ก, ข) 1.45 (ค, ง) และ 1.9 (จ, ฉ) โดยประกอบด้วยภาพกำลังขยาย 14 เท่า (ก, ค, จ) และ กำลังขยาย 2000 เท่า (ข, ง, ฉ)

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการหุงเป็น 90°C จะพบว่าที่สัดส่วนของน้ำต่ำ (1.0) เมล็ดข้าวจะมีรอยแตกมากกว่า (ภาพที่ 4.7ก) เมื่อเปรียบเทียบกับ การหุงที่สัดส่วนน้ำอื่น ๆ (1.45 และ 1.9) (ภาพที่ 4.7 ค, จ) ซึ่งลักษณะของเมล็ดข้าวจะมีความสอดคล้องกับการหุงที่อุณหภูมิต่าง ๆ (82 และ 86°C) และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิการหุงเมื่อทำการหุงที่สัดส่วนน้ำเดียวกันคือเท่ากับ 1.0 จะพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจะส่งผลให้เมล็ดข้าวมีรอยแตกขนาดใหญ่ และมีปริมาณมากขึ้น โดยเมล็ดข้าวที่สำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 86°C จะมีลักษณะเสียหายมากที่สุด โดยมีรอยแตกขนาดใหญ่ และมีรูพรุนขนาดใหญ่ที่ผิวของเมล็ดข้าว การเพิ่มอุณหภูมิในการหุงที่สูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำที่อยู่ภายในข้าวสูงมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ผิวของเมล็ดข้าวเกิดรอยแตกและมีรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

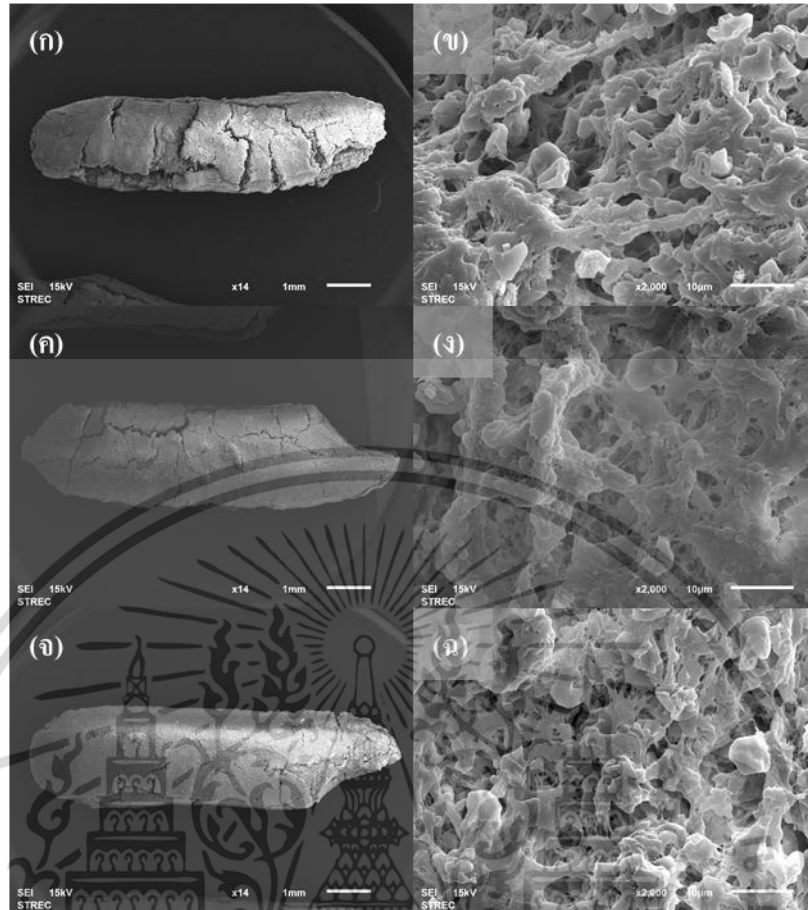
ที่ใหญ่มากขึ้น โดยรอยแตกและรูพรุนที่เกิดขึ้นจะช่วยให้เอนไซม์สามารถเข้ามาย่อยได้ง่ายมากขึ้น และส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาล (Singh และคณะ 2010)



ภาพที่ 4.8 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 82°C ด้วยสัดส่วนน้ำเท่ากับ 1.0 (ก, ข) 1.45 (ค, ง) และ 1.9 (จ, ฉ) โดยประกอบด้วยภาพกำลังขยาย 14 เท่า (ก, ค, จ) และ กำลังขยาย 2000 เท่า (ข, ง, ฉ)

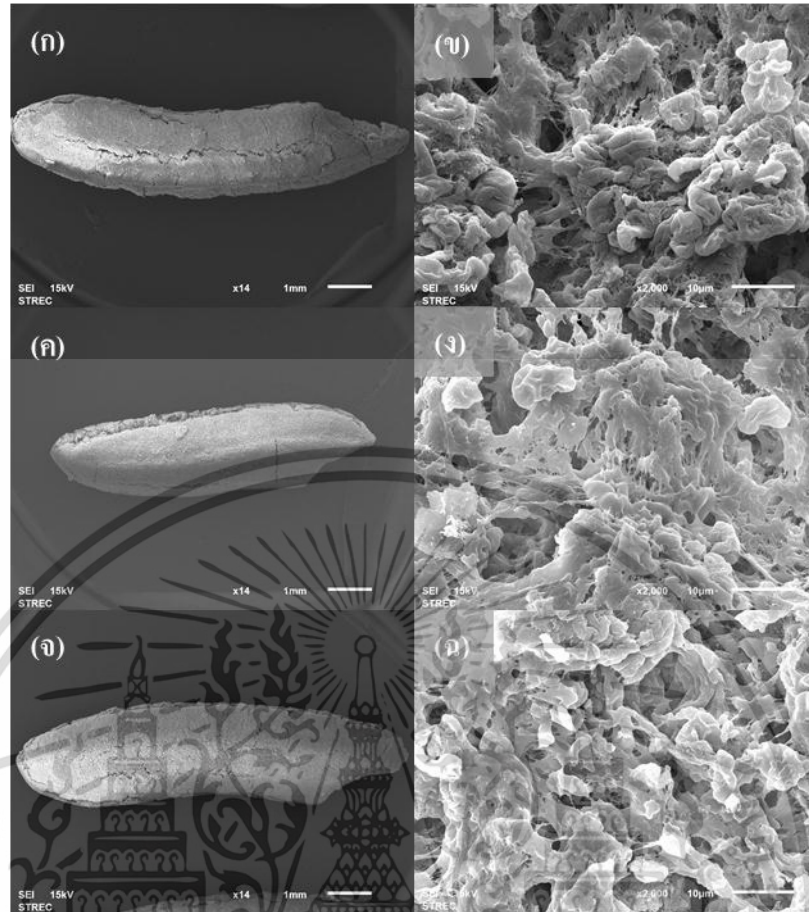
ภาพที่ 4.8 แสดงภาพเมล็ดข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 82°C ในสัดส่วนของน้ำที่แตกต่างกัน โดยจะพบว่า การหุงที่อุณหภูมินี้จะส่งผลให้เมล็ดข้าวหอมปทุมมีความสมบูรณ์ และเกิดความเสียหายน้อยมาก จากงานวิจัยของ Hsu และคณะ (2015a) รายงานว่าการให้ความร้อนกับข้าวที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยให้ข้าวเกิดความเสียหายน้อยกว่า ซึ่งจะส่งผลให้ข้าวทนต่อการย่อยเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้จะพบว่าสภาวะการให้ความร้อนที่ 82°C และที่สัดส่วนของน้ำ 1.9 จะส่งผลให้เมล็ดข้าวมีความสมบูรณ์มากที่สุด (ภาพที่ 4.8จ) และที่พื้นผิวของเมล็ดข้าวมีลักษณะเรียบมากกว่าการหุงที่สัดส่วนของน้ำอื่น ๆ (ภาพที่ 4.8ฉ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



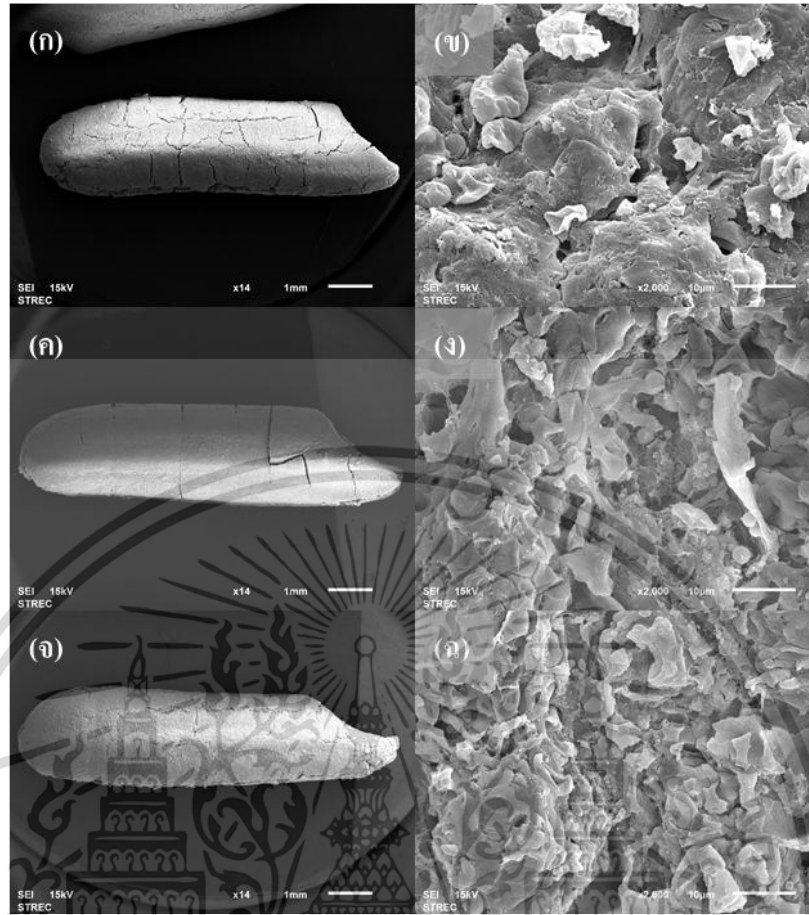
ภาพที่ 4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 86°C ด้วยสัดส่วนน้ำเท่ากับ 1.0 (ก, ข) 1.45 (ค, ง) และ 1.9 (จ, ฉ) โดยประกอบด้วยภาพกำลังขยาย 14 เท่า (ก, ค, จ) และ กำลังขยาย 2000 เท่า (ข, ง, ฉ)

ภาพที่ 4.9 แสดงภาพเมล็ดข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 86°C ในสัดส่วนของน้ำที่แตกต่างกัน ซึ่งจะพบว่าที่สัดส่วนของน้ำเท่ากับ 1.0 (ภาพที่ 4.9ก) เมล็ดข้าวจะมีรอยแตกขนาดใหญ่ และมีความเสียหายมากกว่าการหุงที่สัดส่วนน้ำอื่น ๆ ซึ่งจะเหมือนกับข้าวหอมมะลิ (ภาพที่ 4.6ก) นอกจากนี้เมื่อเพิ่มสัดส่วนของน้ำจะพบว่าเมล็ดข้าวมีรอยแตกลดลง และสามารถเชื่อมโยงกับสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลได้ว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนน้ำในการหุงจะส่งผลให้สตาร์ชย่อยเร็ว และค่าดัชนีน้ำตาลลดลง เนื่องจากเมล็ดข้าวมีความสมบูรณ์ทำให้เอนไซม์เข้าไปย่อยได้ยากมากขึ้น



ภาพที่ 4.10 โครงสร้างทางจุลภาคของเม็ล็ดข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 90°C ด้วยสัดส่วนน้ำเท่ากับ 1.0 (ก, ข) 1.45 (ค, ง) และ 1.9 (จ, ฉ) โดยประกอบด้วยภาพกำลังขยาย 14 เท่า (ก, ค, จ) และ กำลังขยาย 2000 เท่า (ข, ง, ฉ)

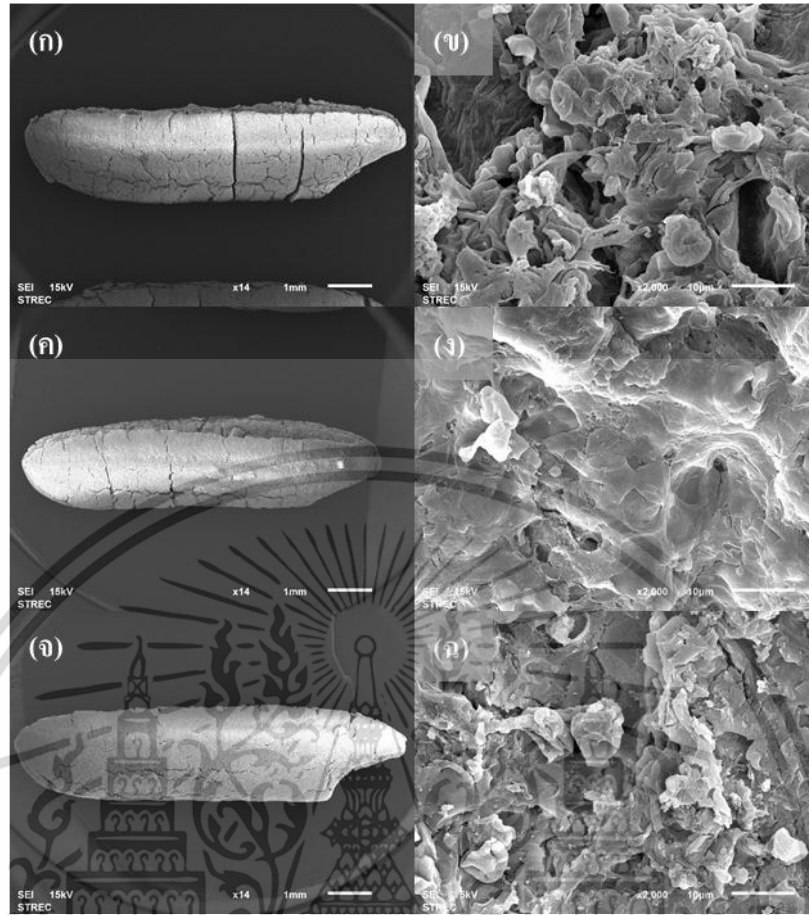
ภาพที่ 4.10 แสดงภาพเม็ล็ดข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 90°C ในสัดส่วนของน้ำที่แตกต่างกัน โดยจะพบว่า การหุงข้าวที่สัดส่วนของน้ำเท่ากับ 1.0 (ภาพที่ 4.10ก) เม็ล็ดข้าวจะมีรอยแตกตามแนวยาว และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเพื่อดูลักษณะพื้นผิวของเม็ล็ดข้าวพบว่าที่สัดส่วนของน้ำเท่ากับ 1.0 (ภาพที่ 4.10ข) จะพบรูพรุนขนาดใหญ่ และพื้นผิวมีลักษณะขรุขระมากกว่าการหุงข้าวโดยใช้สัดส่วนน้ำเท่ากับ 1.45 และ 1.9 (ภาพที่ 4.10ง, ฉ)



ภาพที่ 4.11 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวเผาให้กิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 82°C ด้วยสัดส่วนน้ำเท่ากับ 1.0 (ก, ข) 1.45 (ค, ง) และ 1.9 (จ, ฉ) โดยประกอบด้วยภาพกำลังขยาย 14 เท่า (ก, ค, จ) และ กำลังขยาย 2000 เท่า (ข, ง, ฉ)

ภาพที่ 4.11 แสดงภาพเมล็ดข้าวเผาให้กิ่งสำเร็จรูปซึ่งได้จากการหุงที่อุณหภูมิ 82°C ทั้งแบบเต็มเมล็ด (ภาพที่ 4.11ก, ค, จ) และพื้นผิวของเมล็ด (ภาพที่ 4.11ข, ง, ฉ) โดยพบว่า การหุงที่สัดส่วนของน้ำต่ำ (1.0) จะพบรอยแตกของเมล็ดข้าวมากกว่าการหุงที่สัดส่วนน้ำสูง (1.9) และผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการหุงที่อุณหภูมิ 86°C (ภาพที่ 4.12) โดยจะพบว่า การหุงที่สัดส่วนน้ำเท่ากับ 1.0 (ภาพที่ 4.12ก) พบรอยแตกขนาดใหญ่ที่ผิวของเมล็ดข้าว อีกทั้งเมื่อเพิ่มกำลังขยายจะพบว่าพื้นผิวของข้าวที่หุงด้วยสภาวะนี้ (ภาพที่ 4.12ข) มีความขรุขระ และมีรูพรุนขนาดใหญ่ โดยจากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณที่แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าสภาวะการหุงข้าวเผาให้ที่อุณหภูมิ 86°C และสัดส่วนน้ำเท่ากับ 1.0 จะมีค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณสูงที่สุด ซึ่งอาจเนื่องมาจากความเสียหายมากของเมล็ดข้าวที่ช่วยเพิ่มการเข้าถึงของเอนไซม์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



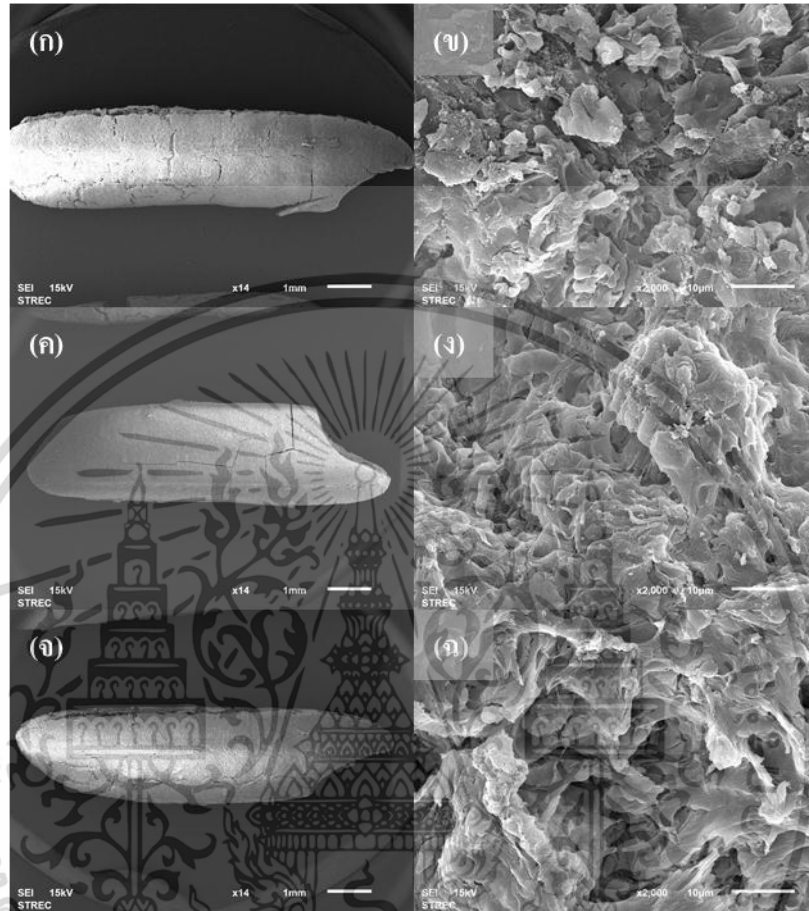
ภาพที่ 4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวเผาให้กิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 86°C ด้วยสัดส่วนน้ำเท่ากับ 1.0 (ก, ข) 1.45 (ค, ง) และ 1.9 (จ, ฉ) โดยประกอบด้วยภาพกำลังขยาย 14 เท่า (ก, ค, จ) และ กำลังขยาย 2000 เท่า (ข, ง, ฉ)

ภาพที่ 4.13 แสดงภาพเมล็ดข้าวเผาให้กิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 90°C ทั้งแบบเต็มเมล็ด (ภาพที่ 4.13ก, ค, จ) และพื้นผิวของเมล็ด (ภาพที่ 4.13ข, ง, ฉ) โดยจะพบว่าเมล็ดข้าวมีรอยแตกที่ผิวน้อยกว่าการหุงที่อุณหภูมิ 86°C (ภาพที่ 4.12) อาจเนื่องมาจากการหุงที่อุณหภูมิ 90°C ใช้เวลาในการให้ความร้อนน้อยกว่าอุณหภูมิ 86°C ซึ่งจะส่งผลให้สายสตาρχหลุดออกมาน้อยกว่า และมีความเสียหายน้อยกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวเผาให้กิ่งสำเร็จรูป (ตารางที่ 4.5) พบว่าค่าดัชนีน้ำตาลจะมีความใกล้เคียงกันระหว่างการหุงข้าวที่อุณหภูมิ 86°C และ 90°C

จากการส่องดูโครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวกิ่งสำเร็จรูปทั้ง 3 พันธุ์ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการหุงจะส่งผลให้ข้าวเกิดความเสียหาย และมีรอยแตกขนาดใหญ่ อีกทั้งการลดสัดส่วนของน้ำลางก็จะส่งผลต่อลักษณะและพื้นผิวของข้าวเช่นกัน โดยเมล็ดข้าวมีความเสียหายมาก พื้นผิวมีรูพรุนขนาดใหญ่ และมีลักษณะขรุขระ ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถ

ในการเข้าถึงโดยเอนไซม์ และทำให้ค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณเพิ่มสูงขึ้น
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่สภาวะต่าง ๆ จะมีลักษณะไปในแนวทางเดียวกันเมื่อเทียบกันระหว่างชนิดของข้าว



ภาพที่ 4.13 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวเสาไห้ที่สำเร็จรูปที่ผ่านการหุงที่อุณหภูมิ 90°C ด้วยสัดส่วนน้ำเท่ากับ 1.0 (ก, ข) 1.45 (ค, ง) และ 1.9 (จ, ฉ) โดยประกอบด้วยภาพกำลังขยาย 14 เท่า (ก, ค, จ) และ กำลังขยาย 2000 เท่า (ข, ง, ฉ)

จากการทดลองหาสภาวะการหุงที่เหมาะสมเพื่อลดค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวกล้องสำเร็จรูปทั้ง 3 ชนิดได้แก่ ข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเสาไห้ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 82°C ร่วมกับน้ำที่สัดส่วน 1.9 ของน้ำหนักแห้งของข้าว โดยการหุงที่สภาวะนี้จะทำให้เมล็ดข้าว รวมถึงเม็ดแป้งที่อยู่ในข้าวเกิดความเสียหายน้อยกว่าที่สภาวะอื่น ๆ โดยสามารถดูได้จากสมบัติด้านความหนืด และลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าว ซึ่งความสมบูรณ์ของเมล็ดข้าวจะช่วยให้ข้าวทนต่อการย่อยได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นจึงได้เลือกการหุงที่สภาวะเหมาะสมนี้ไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลของชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีต่อโครงสร้างภายในเมล็ดข้าวถึงสำเร็จรูป สมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ

ในการศึกษานี้จะเป็นการศึกษาชนิดและปริมาณของน้ำมันที่ใช้ในระหว่างการหุงข้าวเพื่อแปรรูปเป็นข้าวถึงสำเร็จรูปที่มีค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณลดลง โดยน้ำมันที่ใช้ในการศึกษามีทั้งหมด 2 ชนิดได้แก่ น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันรำข้าว ซึ่งจะทำการแปรปริมาณน้ำมันทั้งหมด 3 ระดับคือ ร้อยละ 2.5 5 และ 7.5 ของน้ำหนักข้าว ข้าวที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย ข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเสาไห้ โดยข้าวถึงสำเร็จรูปที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ สมบัติด้านความหนืด สมบัติทางความร้อน วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคแป้ง และส่องดูโครงสร้างทางจุลภาคและพื้นผิวของเมล็ดข้าวดังแสดงในข้อที่ 4.2.1 – 4.2.5

4.2.1 ผลของชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ

จากการศึกษาผลของชนิดและปริมาณน้ำมันที่มีต่อปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า ปริมาณสตาร์ชทนย่อย และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเสาไห้ถึงสำเร็จรูป พบว่าชนิดและปริมาณน้ำมันที่ใส่ในขั้นตอนการหุงมีผลต่อปริมาณสตาร์ชชนิดต่าง ๆ และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณดังแสดงในตารางที่ 4.11 - 4.13

ตารางที่ 4.11 สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงโดยมีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน

ชนิดน้ำมัน	ปริมาณ (ร้อยละ)	สตาร์ชย่อยเร็ว (ร้อยละ)	สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (ร้อยละ)	สตาร์ชทนย่อย (ร้อยละ)	ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ
มะพร้าว	2.5	48.21 ± 1.95 ^a	25.02 ± 2.06 ^a	0.99 ± 0.08 ^a	77.74 ± 0.76 ^b
	5.0	49.75 ± 0.82 ^a	27.05 ± 1.10 ^{ab}	1.22 ± 0.17 ^b	77.64 ± 1.12 ^b
	7.5	52.10 ± 1.50 ^b	25.42 ± 1.37 ^a	0.94 ± 0.14 ^a	77.79 ± 2.58 ^b
รำข้าว	2.5	49.82 ± 0.66 ^a	27.51 ± 1.24 ^{ab}	0.89 ± 0.10 ^a	78.26 ± 1.69 ^b
	5.0	51.99 ± 1.33 ^b	26.57 ± 1.83 ^{ab}	0.93 ± 0.08 ^a	78.33 ± 0.84 ^b
	7.5	49.35 ± 0.74 ^a	28.57 ± 1.75 ^b	1.04 ± 0.22 ^{ab}	75.50 ± 1.16 ^a
ไม่ใส่น้ำมัน (ควบคุม)		50.13 ± 1.14 ^a	25.32 ± 1.23 ^a	0.84 ± 0.11 ^a	78.22 ± 0.40 ^b

หมายเหตุ: ^{a-b} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p < 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.11 พบว่าเมื่อทำการหุงข้าวหอมมะลิร่วมกับน้ำมันชนิดต่าง ๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ซ้ำมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยการหุงด้วยน้ำมันรำข้าวร้อยละ 7.5 ของน้ำหนักข้าวจะทำให้มีปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ซ้ำมากที่สุดคือร้อยละ 28.57 ของน้ำหนักข้าวตัวอย่าง นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการใส่น้ำมันในระหว่างการหุงจะช่วยเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อยในข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูป โดยการหุงด้วยน้ำมันมะพร้าวร้อยละ 5 ของน้ำหนักข้าว และน้ำมันรำข้าวร้อยละ 7.5 ของน้ำหนักข้าวจะสามารถเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อยได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวถึงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเติมน้ำมัน อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแต่ก็จะพบว่าปริมาณสตาร์ชทนย่อยเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้จะพบว่าปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างข้าวถึงสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน ในขณะที่เมื่อพิจารณาค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวถึงสำเร็จรูปที่มีการเติมน้ำมันและไม่เติมน้ำมันจะพบว่ามีเพียงการเติมน้ำมันรำข้าวร้อยละ 7.5 ของน้ำหนักข้าวเท่านั้นที่สามารถลดค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวถึงสำเร็จรูปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยจากการทดลองของ Ai และคณะ (2013) พบว่าการให้ความร้อนแปรร่วมกับน้ำมันข้าวโพดสามารถลดค่าการย่อยของแป้งได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากเกิดการจับกันระหว่างอะมิโลสและไขมันเกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการลดความสามารถในการเข้าถึงโดยเอนไซม์ ค่าการย่อยจึงลดต่ำลง

เมื่อพิจารณาชนิดและปริมาณของน้ำมันที่สามารถลดค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปได้ดีที่สุด จะพบว่าการหุงข้าวร่วมกับน้ำมันรำข้าวร้อยละ 7.5 ของน้ำหนักข้าวสามารถลดค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณได้มากที่สุด โดยข้าวถึงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเติมน้ำมันจะมีค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณเท่ากับ 78.22 และการเติมน้ำมันรำข้าวร้อยละ 7.5 ของน้ำหนักข้าวจะมีค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณเท่ากับ 75.50 (ตารางที่ 4.11) ซึ่งค่าดัชนีน้ำตาลที่ลดลงจะสอดคล้องกับปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ซ้ำ และปริมาณสตาร์ชทนย่อยที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจะพบว่าปริมาณสตาร์ชทั้งสองชนิดจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของเมล็ดข้าวมีความซับซ้อน ซึ่งจะส่งผลให้ไขมันเข้าไปจับกับอะมิโลสที่อยู่ภายในได้ยากมากขึ้น จึงทำให้ลดการเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน (amylose-lipid complex) และส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ซ้ำ และปริมาณสตาร์ชทนย่อยได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fardet และคณะ (1999) ที่ได้กล่าวว่า สตาร์ชที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนจะไม่สามารถจับกับไขมันได้ เนื่องจากไฟเบอร์ที่มีอยู่จะเป็นตัวกีดกันไม่ให้เกิดการจับกันเพื่อเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน

ตารางที่ 4.12 สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวหอมปทุม กึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงโดยมีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน

ชนิดน้ำมัน	ปริมาณ (ร้อยละ)	สตาร์ชย่อยเร็ว (ร้อยละ)	สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (ร้อยละ)	สตาร์ชทนย่อย (ร้อยละ)	ค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณ
มะพร้าว	2.5	42.78 ± 2.86 ^{abc}	37.40 ± 2.25 ^{bc}	1.88 ± 0.07 ^a	75.02 ± 1.05 ^c
	5.0	43.05 ± 1.34 ^{abc}	38.75 ± 1.63 ^{bcd}	1.80 ± 0.11 ^a	73.89 ± 0.93 ^{bc}
	7.5	40.90 ± 0.51 ^a	37.04 ± 0.74 ^b	1.87 ± 0.13 ^a	72.31 ± 1.30 ^{ab}
รำข้าว	2.5	41.86 ± 1.27 ^{ab}	39.44 ± 1.71 ^{cd}	1.81 ± 0.20 ^a	74.82 ± 1.81 ^c
	5.0	41.50 ± 0.78 ^{ab}	40.16 ± 0.98 ^d	2.43 ± 0.12 ^b	72.08 ± 0.38 ^a
	7.5	43.79 ± 1.28 ^{bc}	38.56 ± 0.85 ^{bcd}	1.81 ± 0.14 ^a	74.98 ± 1.03 ^c
ไม่ใส่น้ำมัน (ควบคุม)		44.83 ± 1.65 ^c	33.11 ± 1.08 ^a	1.71 ± 0.38 ^a	76.79 ± 0.16 ^d

หมายเหตุ: ^{a-d} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.12 พบว่าเมื่อทำการหุงข้าวหอมปทุมร่วมกับน้ำมันชนิดต่าง ๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้ามีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ไม่มีการใส่น้ำมัน (ตัวอย่างควบคุม) ในขณะที่การใส่น้ำมันในขั้นตอนการหุงจะส่งผลให้ปริมาณสตาร์ชย่อยเร็วของข้าวกึ่งสำเร็จรูปมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยผลการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Farooq และคณะ (2018) ที่ได้รายงานว่าการให้ความร้อนกับสตาร์ชข้าวร่วมกับการเติม น้ำมันปาล์มจะส่งผลให้ปริมาณสตาร์ชย่อยเร็วลดลง เนื่องจากมีการเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของ อะมิโลสและไขมัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสตาร์ชทนย่อยจะพบว่ามีการหุงข้าวร่วมกับ น้ำมันรำข้าวร้อยละ 5 ของน้ำหนักข้าวเท่านั้นที่สามารถเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งจะพบว่าค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อทำการหุงที่สภาวะนี้เช่นกันคือมีค่าเท่ากับ 72.08 ค่าดัชนีน้ำตาลจะมีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับปริมาณ สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า และปริมาณสตาร์ชทนย่อย โดยสตาร์ชทั้งสองชนิดนี้จะทำให้ค่าดัชนีน้ำตาลลดลง เนื่องจากย่อยได้ยากและทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดเพิ่มสูงขึ้นอย่างช้า ๆ (Sopade, 2017)

ตารางที่ 4.13 สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวเส้าให้
กึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงโดยมีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน

ชนิดน้ำมัน	ปริมาณ (ร้อยละ)	สตาร์ชย่อยเร็ว (ร้อยละ)	สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (ร้อยละ)	สตาร์ชทนย่อย (ร้อยละ)	ค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณ
มะพร้าว	2.5	31.66 ± 0.65 ^c	43.01 ± 1.39 ^{cd}	4.92 ± 0.53 ^{ab}	63.95 ± 0.75 ^{ab}
	5.0	29.04 ± 0.46 ^a	41.19 ± 2.12 ^c	4.91 ± 0.70 ^{ab}	64.70 ± 0.34 ^b
	7.5	30.11 ± 0.78 ^b	41.50 ± 0.76 ^{cd}	5.23 ± 0.74 ^{bc}	64.63 ± 0.24 ^b
รำข้าว	2.5	30.73 ± 0.38 ^{bc}	43.28 ± 0.55 ^d	5.94 ± 1.43 ^c	63.18 ± 0.46 ^a
	5.0	31.23 ± 0.35 ^c	41.56 ± 0.87 ^{cd}	4.35 ± 0.42 ^{ab}	64.06 ± 0.87 ^b
	7.5	31.64 ± 0.87 ^c	37.33 ± 1.04 ^b	4.50 ± 0.34 ^{ab}	66.42 ± 0.37 ^c
ไม่ใส่น้ำมัน (ควบคุม)		30.98 ± 0.71 ^{bc}	35.47 ± 1.30 ^a	3.88 ± 0.72 ^a	67.61 ± 0.48 ^d

หมายเหตุ: ^{a-d} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.13 พบว่าเมื่อทำการหุงข้าวเส้าให้ร่วมกับน้ำมันชนิดต่าง ๆ ในปริมาณที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ไม่มีการใส่น้ำมัน และปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้าจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อลดปริมาณน้ำมัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันรำข้าว อย่างไรก็ตามปริมาณสตาร์ชย่อยเร็วจะไม่เปลี่ยนแปลงมากเมื่อมีการใส่น้ำมันในระหว่างการทำข้าว นอกจากนี้ปริมาณสตาร์ชทนย่อยของข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยการหุงข้าวร่วมกับน้ำมันรำข้าวร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักข้าวจะส่งผลให้ข้าวเส้าให้กึ่งสำเร็จรูปมีปริมาณสตาร์ชทนย่อยมากที่สุดคือร้อยละ 5.94 ของน้ำหนักข้าวตัวอย่าง จากผลการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าการใส่น้ำมันลงไปบนขั้นตอนการหุงข้าวจะส่งผลให้ค่าการย่อยลดลง ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Annor และคณะ (2015) ที่พบว่าการเติมกรดไขมันจะช่วยลดค่าการย่อยของสตาร์ชได้ โดยจะส่งผลให้ปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว และปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้าลดลง ในขณะที่ปริมาณสตาร์ชทนย่อยจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการลดลงของค่าการย่อยจะขึ้นอยู่กับปริมาณกรดไขมันที่เติมลงไป โดยการเติมกรดไขมันในปริมาณที่มากขึ้นจะช่วยลดปริมาณสตาร์ชย่อยเร็วได้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งช่วยเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อยให้มากขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้จะพบว่าปริมาณสตาร์ชทนย่อยจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีการใส่น้ำมันในปริมาณน้อย (ร้อยละ 2.5) อาจเนื่องมาเมื่อใส่น้ำมันในปริมาณมาก น้ำมันจะไปเคลือบที่ผิวของเมล็ดข้าว ซึ่งจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลให้น้ำมันบางส่วนไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปภายในเมล็ดข้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ และอาจทำให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันลดลง นอกจากนี้ Tang และ Copeland (2007) ยังรายงานอีกว่าปริมาณไขมันที่มากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการจับกันเองมากกว่าที่จะจับกับอะมิโลสเพื่อสร้างโครงสร้างเชิงซ้อน ดังนั้นจึงอาจจะส่งผลต่อการย่อยของข้าวได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวถึงสำเร็จรูปที่ไม่มีการใส่น้ำมันจะพบว่ามีความสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังนั้นการเติมน้ำมันจะช่วยลดค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวเส้าให้ถึงสำเร็จรูปได้ ซึ่งปริมาณของน้ำมันก็จะมีผลต่อค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ โดยการลดปริมาณน้ำมันจะทำให้ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณมีแนวโน้มลดลง การใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักข้าว จะส่งผลให้ข้าวเส้าให้ถึงสำเร็จรูปมีค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากผลการทดลองการใส่น้ำมันชนิดต่าง ๆ ในปริมาณที่แตกต่างกันในระหว่างการหุงข้าวทั้ง 3 ชนิด พบว่าน้ำมันรำข้าวจะลดค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณในข้าวถึงสำเร็จรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด เนื่องจากในน้ำมันรำข้าวประกอบด้วยกรดโอเลอิก (C18:1) และกรดลิโนเลอิก (C18:2) ซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่เป็นจำนวนมากกว่าน้ำมันมะพร้าว โดยมีการรายงานว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัวลงในแป้งจะช่วยลดค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลได้ดีกว่าการเติมกรดไขมันอิ่มตัว (Annor และคณะ 2015)

4.2.2 ผลของชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีต่อสมบัติด้านความเหนียวของข้าวถึงสำเร็จรูป

จากการศึกษาผลของชนิดและปริมาณน้ำมันที่มีต่อค่าความเหนียวสูงสุด (PV) ค่าความเหนียวต่ำสุด (TV) ค่าการแตกสลายของเม็ดแป้ง (BD) ค่าความเหนียวสุดท้าย (FV) ค่าการคืนตัว (SB) และอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความเหนียว (PT) ของแป้งข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเส้าให้ถึงสำเร็จรูป พบว่าชนิดและปริมาณน้ำมันที่ใส่ในขั้นตอนการหุงมีผลต่อสมบัติด้านความเหนียว ดังแสดงในตารางที่ 4.14-4.16 โดยความเหนียวที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถเชื่อมโยงถึงการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันได้

ตารางที่ 4.14 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงโดยมีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน

ชนิดน้ำมัน	ปริมาณ (ร้อยละ)	PV (cP)	TV (cP)	BD (cP)	FV (cP)	SB (cP)	PT (°C)
มะพร้าว	2.5	5689.5 ± 142.1 ^c	4117.0 ± 38.2 ^{abc}	1572.5 ± 103.9 ^{cd}	7061.5 ± 294.9 ^{bc}	2944.5 ± 256.7 ^b	79.1 ± 0.0 ^{ab}
	5.0	5183.0 ± 223.4 ^{ab}	3946.5 ± 113.8 ^a	1236.5 ± 337.3 ^{ab}	6588.5 ± 120.9 ^a	2642.0 ± 234.8 ^a	79.4 ± 0.7 ^{ab}
	7.5	5523.0 ± 155.6 ^{cd}	4026.5 ± 13.4 ^{abc}	1496.5 ± 142.1 ^{bc}	6772.5 ± 61.5 ^{ab}	2746.0 ± 48.1 ^{ab}	78.3 ± 1.1 ^{ab}
รำข้าว	2.5	6220.0 ± 70.7 ^d	4442.5 ± 67.2 ^d	1777.5 ± 3.5 ^{cd}	7202.5 ± 53.0 ^c	2760.0 ± 14.1 ^{ab}	74.3 ± 2.3 ^a
	5.0	5019.5 ± 20.5 ^a	3996.5 ± 61.5 ^{ab}	1023.0 ± 41.0 ^a	6803.5 ± 48.8 ^{ab}	2807.0 ± 12.7 ^{ab}	79.9 ± 0.0 ^b
	7.5	5212.0 ± 125.9 ^{ab}	4285.0 ± 106.1 ^{bcd}	927.0 ± 19.8 ^a	7090.5 ± 147.8 ^{bc}	2805.5 ± 41.7 ^{ab}	79.9 ± 1.2 ^b
ไม่ใส่น้ำมัน (ควบคุม)		5533.0 ± 221.3 ^{cd}	4338.0 ± 195.5 ^{cd}	1195.0 ± 56.2 ^{ab}	6948.0 ± 150.3 ^{bc}	2610.0 ± 46.0 ^a	80.7 ± 3.8 ^b

หมายเหตุ: ^{a-d} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

PV หมายถึง ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity)

TV หมายถึง ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity)

BD หมายถึง ค่าการแตกสลายของเม็ดแป้ง (breakdown)

FV หมายถึง ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity)

SB หมายถึง ค่าการคืนตัว (setback)

PT หมายถึง อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature)

ตารางที่ 4.15 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงโดยมีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน

ชนิดน้ำมัน	ปริมาณ (ร้อยละ)	PV (cP)	TV (cP)	BD (cP)	FV (cP)	SB (cP)	PT (°C)
มะพร้าว	2.5	4286.0 ± 132.9 ^{abc}	3345.0 ± 171.1 ^a	941.0 ± 38.2 ^c	5977.0 ± 48.1 ^b	2632.0 ± 219.2 ^c	81.1 ± 0.6 ^d
	5.0	3994.0 ± 287.1 ^a	3419.0 ± 319.6 ^a	575.0 ± 32.5 ^a	5613.0 ± 87.7 ^a	2194.0 ± 231.9 ^{ab}	80.6 ± 1.0 ^{cd}
	7.5	4235.5 ± 4.9 ^{abc}	3622.5 ± 7.8 ^a	613.0 ± 12.7 ^a	5633.0 ± 19.8 ^a	2010.5 ± 27.6 ^a	80.4 ± 0.8 ^{cd}
รำข้าว	2.5	5309.5 ± 96.9 ^d	4143.0 ± 106.1 ^b	1166.5 ± 9.2 ^d	6541.5 ± 92.6 ^c	2398.5 ± 13.4 ^{bc}	78.6 ± 0.6 ^b
	5.0	4352.5 ± 55.9 ^{bc}	3509.0 ± 11.3 ^a	843.5 ± 44.5 ^b	6096.0 ± 24.0 ^b	2587.0 ± 12.7 ^c	80.4 ± 0.5 ^{cd}
	7.5	4528.5 ± 58.7 ^c	3638.0 ± 16.9 ^a	890.5 ± 75.7 ^{bc}	6099.0 ± 25.5 ^b	2461.0 ± 42.4 ^{bc}	76.6 ± 1.1 ^a
ไม่ใส่น้ำมัน (ควบคุม)		4034.5 ± 72.8 ^{ab}	3453.5 ± 44.5 ^a	581.0 ± 28.3 ^a	6049.5 ± 55.9 ^b	2596.0 ± 11.3 ^c	80.7 ± 0.0 ^{cd}

หมายเหตุ: ^{a-d} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

PV หมายถึง ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity)

TV หมายถึง ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity)

BD หมายถึง ค่าการแตกสลายของเม็ดแป้ง (breakdown)

FV หมายถึง ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity)

SB หมายถึง ค่าการคืนตัว (setback)

PT หมายถึง อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature)

ตารางที่ 4.16 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวสาลีให้ถึงสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงโดยมีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน

ชนิดน้ำมัน	ปริมาณ (ร้อยละ)	PV (cP)	TV (cP)	BD (cP)	FV (cP)	SB (cP)	PT (°C)
มะพร้าว	2.5	1108.5 ± 7.8 ^d	920.5 ± 17.7 ^{bc}	188.0 ± 9.9 ^f	1416.5 ± 16.3 ^{cd}	496.0 ± 1.4 ^c	91.2 ± 1.1 ^{bc}
	5.0	1147.5 ± 86.9 ^d	969.0 ± 84.9 ^c	178.5 ± 2.1 ^e	1461.5 ± 118.1 ^d	492.5 ± 33.2 ^c	91.5 ± 0.5 ^{bc}
	7.5	1024.5 ± 31.8 ^c	872.0 ± 31.1 ^b	152.5 ± 0.7 ^c	1319.0 ± 36.8 ^c	447.0 ± 5.7 ^b	90.5 ± 1.1 ^{ab}
รำข้าว	2.5	841.5 ± 16.3 ^a	708.0 ± 19.8 ^a	133.5 ± 3.5 ^b	1068.5 ± 23.3 ^a	360.5 ± 3.5 ^a	92.5 ± 0.6 ^c
	5.0	936.5 ± 14.8 ^b	774.5 ± 13.4 ^a	162.0 ± 1.4 ^d	1204.5 ± 31.8 ^b	430.0 ± 18.4 ^b	92.4 ± 0.5 ^c
	7.5	1138.5 ± 17.7 ^d	975.5 ± 14.8 ^c	163.0 ± 2.8 ^d	1496.5 ± 10.6 ^d	521.0 ± 4.2 ^c	91.6 ± 0.6 ^{bc}
ไม่ใส่น้ำมัน (ควบคุม)		1158.0 ± 32.5 ^d	1059.0 ± 31.1 ^d	99.0 ± 1.4 ^a	1711.5 ± 47.4 ^e	652.5 ± 16.3 ^d	89.2 ± 0.5 ^a

หมายเหตุ: ^{a-f} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

PV หมายถึง ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity)

TV หมายถึง ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity)

BD หมายถึง ค่าการแตกสลายของเม็ดแป้ง (breakdown)

FV หมายถึง ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity)

SB หมายถึง ค่าการคืนตัว (setback)

PT หมายถึง อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature)

จากตารางที่ 4.14 ที่แสดงสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวหอมมะลิกิ่งสำเร็จรูปที่ได้จากกระบวนการหุงที่มีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน โดยจะพบว่าค่า PV ของข้าวที่มีการเติมน้ำมันร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักข้าวจะไม่แตกต่างกับข้าวกิ่งสำเร็จรูปที่ไม่ใส่น้ำมัน อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันให้มากขึ้นจะส่งผลให้ค่า PV มีแนวโน้มลดลง ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า BD โดยค่า BD มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันเช่นกัน การลดลงของค่า PV เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันอาจเนื่องมาจากมีปริมาณของน้ำมันมากขึ้นในการเข้าไปเคลือบอยู่ที่ผิวของเม็ดแป้ง ซึ่งส่งผลให้น้ำเข้าไปภายในเม็ดแป้งได้ลดลง การพองตัวของแป้งลดลง ความหนืดของแป้งจึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhou และคณะ (2007) ที่พบว่าการใส่กรดไขมันอิสระลงไปในสตาร์ชข้าวจะส่งผลให้ค่า PV และค่า BD ลดลง นอกจากนี้การลดลงของค่า BD เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมัน (ตารางที่ 4.14) อาจบ่งบอกได้ถึงความทนทานต่อแรงกวนของเม็ดแป้งข้าวกิ่งสำเร็จรูปที่มีการเติมน้ำมัน Zhou และคณะ (2007) ยังให้เหตุผลเพิ่มเติมอีกว่าค่า BD ที่ลดลงเนื่องมาจากการเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันในระหว่างการให้ความร้อนสตาร์ชกับกรดไขมันอิสระ ดังนั้นในการทดลองนี้ที่พบว่าค่า BD มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของน้ำมันอาจเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันในระหว่างการหุงข้าวร่วมกับน้ำมันที่มีปริมาณมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 7.5 ของน้ำหนักข้าวจะทำให้มีค่า BD ต่ำที่สุดคือ 927.0 cP นั้นอาจหมายถึงการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณมีค่าต่ำที่สุดเช่นกัน (ตารางที่ 4.11)

จากตารางที่ 4.15 ที่แสดงสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูปที่ได้จากกระบวนการหุงที่มีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน พบว่าผลที่ได้จะไม่สอดคล้องกับสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวหอมมะลิกิ่งสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน โดยจะพบว่าค่า PV และค่า BD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่น้ำมันในระหว่างการหุงข้าว ซึ่งหมายความว่าความพองตัวที่ดีมากขึ้น และความแข็งแรงที่ลดลงของเม็ดแป้งเมื่อมีการใส่น้ำมันลงไป ข้าวหอมปทุม โดย Kaur และ Singh (2000) ได้รายงานไว้เช่นกันว่าเมื่อมีการเติมกรดไขมันอิสระลงไป แป้งข้าว และให้ความร้อนจะส่งผลให้ความหนืดหรือค่า PV เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า SB ของแป้งข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูป (ตารางที่ 4.15) จะพบว่าค่า SB มีแนวโน้มลดลงยกเว้นการใส่น้ำมันมะพร้าวร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักข้าว นั้นหมายความว่าค่า SB ในปริมาณมากจะส่งผลให้ลดการเกิดรีโทรกราเดชันของแป้งข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูป โดย Becker และคณะ (2001) รายงานว่าโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันที่เกิดขึ้นจะป้องกันการเกิดรีโทรกราเดชัน ดังนั้นค่า SB ที่ลดลงเมื่อมีการใส่น้ำมันอาจเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันในข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูป

จากตารางที่ 4.16 ที่แสดงสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเส้าให้กึ่งสำเร็จรูปที่ได้จากกระบวนการหุงที่มีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน พบว่าข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ไม่มีการใส่น้ำมันจะมีค่า TV FV และ SB มากกว่าข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้จะพบว่า การใส่น้ำมันรำข้าวจะช่วยลดค่า PV ของแป้งข้าวเส้าให้กึ่งสำเร็จรูป โดยการใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักข้าวจะส่งผลให้มีค่า PV ต่ำที่สุดเท่ากับ 841.5 cP โดยค่า PV ที่ลดลงนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไวมัน ซึ่งโครงสร้างนี้มีความแข็งแรงและทำให้การพองตัวของเม็ดแป้งลดลง ความหนืดของแป้งจึงลดลง (Ai และคณะ 2013) รวมถึง Becker และคณะ (2001) ได้กล่าวอีกว่าการเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไวมันช่วยเพิ่มส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึก ซึ่งโครงสร้างนี้จะขัดขวางการพองตัวของเม็ดแป้ง และยังป้องกันการหลุดออกมาของสายอะมิโลสอีกด้วย ดังนั้นจึงทำให้ค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลลดลง (ตารางที่ 4.13) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า PT ของข้าวเส้าให้กึ่งสำเร็จรูป (ตารางที่ 4.16) จะพบว่าค่า PT มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมน้ำมันในขั้นตอนการหุงข้าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเติมน้ำมันรำข้าวจะส่งผลให้มีค่า PT มากที่สุด โดยการเพิ่มขึ้นของค่า PT นี้เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไวมัน (Kaur และ Singh, 2000) ดังนั้นการเติมน้ำมันในระหว่างการหุงข้าวเส้าให้กึ่งสำเร็จรูปจะทำให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไวมันภายในเมล็ดข้าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้รำข้าวร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักข้าว เนื่องจากที่สภาวะนี้จะทำให้ข้าวเส้าให้กึ่งสำเร็จรูปมีค่า PV ต่ำที่สุด และมีค่า PT มากที่สุด

4.2.3 ผลของชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของข้าวกึ่งสำเร็จรูป

จากการศึกษาผลของชนิดและปริมาณน้ำมันที่มีต่อสมบัติทางความร้อนได้แก่ อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลิตีในเซชัน (onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (conclusion temperature, T_c) และพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (enthalpy, ΔH) โดยพบว่าหลังจากการให้ความร้อนแก่แป้งข้าวกึ่งสำเร็จรูปทั้ง 3 ชนิดที่ผ่านการหุงร่วมกับน้ำมันจะพบการเปลี่ยนแปลงความร้อนแบบดูดความร้อน (endothermic transition) ทั้งหมด 2 พีก ซึ่งพีกที่ 1 มี $T_p < 100$ และพีกที่ 2 จะมี $T_p > 100$ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่พบนี้สะท้อนถึงการเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไวมัน โดยแสดงในตารางที่ 4.17-4.19

ตารางที่ 4.17 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวหอมมะลิที่สำเร็จรูปที่ผ่านการหุงโดยมีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน

ชนิดน้ำมัน	ปริมาณ (ร้อยละ)	พีคที่ 1 (Peak 1)				พีคที่ 2 (Peak 2)			
		T _o (°C) ^{ns}	T _p (°C) ^{ns}	T _c (°C)	ΔH (J/g) ^{ns}	T _o (°C) ^{ns}	T _p (°C) ^{ns}	T _c (°C) ^{ns}	ΔH (J/g) ^{ns}
มะพร้าว	2.5	90.4 ± 3.4	97.7 ± 0.3	103.2 ± 0.3 ^a	0.19 ± 0.1	105.9 ± 0.1	110.1 ± 0.9	115.2 ± 4.0	0.08 ± 0.0
	5.0	89.7 ± 0.2	98.3 ± 0.7	105.3 ± 0.8 ^c	0.27 ± 0.1	107.2 ± 1.5	110.5 ± 1.5	114.5 ± 3.5	0.04 ± 0.0
	7.5	90.6 ± 0.4	97.8 ± 1.1	104.0 ± 0.9 ^{abc}	0.18 ± 0.1	107.5 ± 0.7	110.2 ± 1.2	113.6 ± 3.5	0.03 ± 0.0
รำข้าว	2.5	88.6 ± 0.5	97.7 ± 0.6	103.8 ± 0.3 ^{ab}	0.27 ± 0.1	106.6 ± 0.1	110.6 ± 0.5	115.5 ± 0.8	0.08 ± 0.0
	5.0	89.7 ± 0.4	97.7 ± 0.7	104.2 ± 0.3 ^{abc}	0.24 ± 0.0	106.2 ± 1.1	110.6 ± 0.7	114.5 ± 0.1	0.06 ± 0.0
	7.5	89.0 ± 0.0	98.2 ± 0.2	105.1 ± 0.1 ^{bc}	0.30 ± 0.0	107.4 ± 0.8	111.2 ± 0.4	116.3 ± 0.2	0.06 ± 0.0
ไม่ใส่น้ำมัน (ควบคุม)		ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ: ^{a-c} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

T_o หมายถึง อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาทีโนเซชัน (onset temperature)

T_p หมายถึง อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (peak temperature)

T_c หมายถึง อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (conclusion temperature)

ΔH หมายถึง พลังงานในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (enthalpy)

ND หมายถึง ไม่พบพีค (not detected)

ตารางที่ 4.18 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงโดยมีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน

ชนิดน้ำมัน	ปริมาณ (ร้อยละ)	พีคที่ 1 (Peak 1)				พีคที่ 2 (Peak 2)			
		T _o (°C) ^{ns}	T _p (°C)	T _c (°C) ^{ns}	ΔH (J/g) ^{ns}	T _o (°C) ^{ns}	T _p (°C) ^{ns}	T _c (°C)	ΔH (J/g)
มะพร้าว	2.5	90.1 ± 1.5	98.0 ± 0.4 ^b	102.9 ± 0.4	0.13 ± 0.1	107.0 ± 0.0	110.9 ± 0.5	114.7 ± 0.6 ^a	0.06 ± 0.0 ^a
	5.0	92.9 ± 5.1	98.1 ± 0.4 ^b	102.8 ± 0.5	0.29 ± 0.1	106.6 ± 2.3	111.0 ± 0.6	117.5 ± 1.3 ^b	0.12 ± 0.0 ^{ab}
	7.5	90.1 ± 2.2	96.9 ± 0.4 ^{ab}	101.8 ± 0.8	0.13 ± 0.1	105.4 ± 0.6	110.7 ± 0.8	115.7 ± 0.6 ^{ab}	0.09 ± 0.0 ^{ab}
รำข้าว	2.5	90.9 ± 1.7	98.0 ± 0.1 ^b	104.1 ± 0.4	0.24 ± 0.1	107.3 ± 0.5	111.1 ± 0.6	117.3 ± 1.8 ^{ab}	0.12 ± 0.0 ^{ab}
	5.0	88.7 ± 0.4	97.2 ± 0.4 ^{ab}	102.9 ± 0.8	0.26 ± 0.0	105.8 ± 0.2	110.3 ± 0.4	115.1 ± 0.8 ^{ab}	0.15 ± 0.0 ^b
	7.5	91.4 ± 4.1	98.5 ± 0.6 ^b	103.9 ± 1.3	0.19 ± 0.2	107.1 ± 0.1	110.9 ± 0.1	115.8 ± 0.8 ^{ab}	0.10 ± 0.0 ^{ab}
ไม่ใส่น้ำมัน (ควบคุม)		89.8 ± 1.1	95.9 ± 1.7 ^a	102.8 ± 1.0	0.15 ± 0.1	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ: ^{a-b} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

T_o หมายถึง อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาทีโนเซชัน (onset temperature)

T_p หมายถึง อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (peak temperature)

T_c หมายถึง อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (conclusion temperature)

ΔH หมายถึง พลังงานในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (enthalpy)

ND หมายถึง ไม่พบพีค (not detected)

ตารางที่ 4.19 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเสาไห้ที่สำเร็จรูปที่ผ่านการหุงโดยมีการใส่น้ำมันและไม้น้ำมัน

ชนิดน้ำมัน	ปริมาณ (ร้อยละ)	พีคที่ 1 (Peak 1)				พีคที่ 2 (Peak 2)			
		T _o (°C) ^{ns}	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH (J/g)	T _o (°C) ^{ns}	T _p (°C) ^{ns}	T _c (°C)	ΔH (J/g) ^{ns}
มะพร้าว	2.5	92.0 ± 1.2	97.4 ± 0.0 ^b	102.8 ± 0.4 ^b	0.23 ± 0.0 ^b	108.7 ± 5.4	112.1 ± 1.8	116.4 ± 1.3 ^{ab}	0.12 ± 0.0
	5.0	93.3 ± 2.4	97.2 ± 0.0 ^b	100.7 ± 1.5 ^a	0.08 ± 0.0 ^a	106.9 ± 0.0	110.7 ± 0.3	114.4 ± 0.7 ^a	0.06 ± 0.0
	7.5	92.3 ± 0.0	98.0 ± 0.1 ^c	103.4 ± 0.0 ^{bc}	0.13 ± 0.0 ^a	105.7 ± 0.3	110.8 ± 0.1	114.7 ± 0.5 ^a	0.09 ± 0.0
รำข้าว	2.5	93.2 ± 0.3	99.4 ± 0.1 ^d	104.5 ± 0.5 ^c	0.22 ± 0.1 ^b	107.2 ± 1.6	111.5 ± 0.1	117.7 ± 1.3 ^b	0.06 ± 0.0
	5.0	91.7 ± 0.3	98.0 ± 0.1 ^c	103.7 ± 0.1 ^{bc}	0.22 ± 0.0 ^b	106.8 ± 0.9	111.0 ± 0.6	115.9 ± 0.1 ^{ab}	0.04 ± 0.0
	7.5	91.3 ± 0.0	95.6 ± 0.5 ^a	99.8 ± 0.2 ^a	0.07 ± 0.0 ^a	ND	ND	ND	ND
ไม้น้ำมัน (ควบคุม)		ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ: ^{a-d} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

T_o หมายถึง อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาทีโนเซชัน (onset temperature)

T_p หมายถึง อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (peak temperature)

T_c หมายถึง อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (conclusion temperature)

ΔH หมายถึง พลังงานในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (enthalpy)

ND หมายถึง ไม่พบพีค (not detected)

จากตารางที่ 4.17 ที่แสดงสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงโดยมีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน พบว่าแป้งข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปที่ไม่มีการใส่น้ำมันจะไม่พบฟิสิกเมื่อมีการให้ความร้อน ในขณะที่การใส่น้ำมันในระหว่างการหุงข้าวหอมมะลิจะพบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างแป้งจะพบฟิสิกของการเปลี่ยนแปลงความร้อนแบบดูดความร้อนจำนวน 2 ฟิสิก ซึ่งฟิสิกทั้งสองฟิสิกที่เกิดขึ้นนี้บ่งบอกถึงการเกิด โครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันในระหว่างการหุงข้าวร่วมกับน้ำมัน โดยการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดจากการสลายโครงสร้างเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นมาใหม่ ซึ่งฟิสิกที่ 1 แสดงถึงการแตกสลายของโครงสร้างเชิงซ้อนของ อะมิโลสและไขมันแบบไม่เป็นระเบียบ (ชนิดที่ 1) และฟิสิกที่ 2 แสดงถึงการแตกสลายของโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันแบบผลึกที่มีความแข็งแรงมากกว่า (ชนิดที่ 2) (Putseys และคณะ 2010) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Farooq และคณะ (2018) ที่กล่าวว่าเมื่อให้ความร้อนกับตัวอย่างที่มีโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความร้อนแบบดูดความร้อนสองช่วงคือ $T_p < 100^{\circ}\text{C}$ และ $100 - 125^{\circ}\text{C}$ ซึ่งหมายถึงการสลายโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงผลของชนิดและปริมาณน้ำมันในการใส่ลงไปนข้าวหอมมะลิจะพบว่าค่า T_0 , T_p และ ΔH ของทั้งสองฟิสิกไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันทั้ง 2 ชนิดจะส่งผลให้ค่า T_c ของฟิสิกที่ 1 มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_c) สามารถบอกได้ถึงความแข็งแรงของโครงสร้างที่อยู่ภายในเม็ดแป้ง ดังนั้นการเพิ่มปริมาณน้ำมันอาจจะช่วยเพิ่มโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันส่งผลให้โครงสร้างภายในเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น ค่า T_c จึงเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับการทดลองของ Farooq และคณะ (2018) ที่พบว่าการเติมน้ำมันปาล์มลงในสตาร์ชข้าวและให้ความร้อนจะส่งผลให้ค่า T_0 , T_p และ T_c เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวที่ไม่มีการเติมน้ำมันปาล์ม

จากตารางที่ 4.18 แสดงสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูปผ่านการหุงโดยมีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน พบว่าข้าวถึงสำเร็จรูปที่ไม่มีการใส่น้ำมันจะพบเพียงฟิสิกที่ 1 ในขณะที่ข้าวถึงสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันนั้นจะพบทั้งสองฟิสิก นั้นหมายถึงการใส่น้ำมันจะทำให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันแบบผลึกที่มีความแข็งแรงมากกว่า อีกทั้งเมื่อพิจารณาที่ฟิสิกที่ 1 จะพบว่าค่า T_p ของข้าวถึงสำเร็จรูปที่ไม่มีการใส่น้ำมันจะมีค่าน้อยกว่าข้าวถึงสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมัน ซึ่งหมายถึงโครงสร้างของข้าวที่มีการเติมน้ำมันจะมีความแข็งแรงมากกว่า อาจเนื่องมาจากการเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันแบบไม่เป็นระเบียบที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการใส่น้ำมันเข้าไปในระหว่างการหุง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของปริมาณน้ำมันที่ใส่ลงไปนระหว่างการหุงข้าวจะพบว่าการใส่น้ำมันทั้งสองชนิดในปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักข้าวจะส่งผลให้มีค่า ΔH ของทั้งสองฟิสิกสูงที่สุด นั้นหมายถึงต้องใช้พลังงานที่มากขึ้นในการสลาย

โครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันทั้งแบบไม่เป็นระเบียบและแบบผลึก ดังนั้นการหุงข้าวหอมปทุมด้วยน้ำมันปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักข้าวจะทำให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันมากกว่าที่ปริมาณอื่น ๆ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 5 ของน้ำหนักข้าว จะพบว่ามีค่าต่ำที่สุด (ตารางที่ 4.12) โดยการลดลงของค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณนี้อาจเนื่องมาจากการที่มีโครงสร้างเชิงซ้อนมากที่สุดเมื่อทำการหุงข้าวที่สภาวะนี้

จากตารางที่ 4.19 แสดงสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเสาให้ถึงสำเร็จรูปผ่านการหุงโดยมีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน พบว่าเมื่อมีการให้ความร้อนกับตัวอย่างแป้งข้าวเสาให้ถึงสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันจะพบพีคทั้งสองพีคกเว้นข้าวที่มีการใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 7.5 ของน้ำหนักข้าวจะพบพีคที่ 1 เพียงพีคเดียว ในขณะที่ข้าวถึงสำเร็จรูปที่ไม่มีการใส่น้ำมันจะไม่พบพีคใด ๆ (ตารางที่ 4.19) การที่ไม่พบพีคใด ๆ ในข้าวถึงสำเร็จรูปที่ไม่ใส่น้ำมันนี้อาจหมายถึงภายในเม็ดแป้งตัวอย่างมีโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันอยู่น้อยจนเครื่อง DSC ไม่สามารถตรวจพบได้ ซึ่งการเติมน้ำมันจะทำให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันในข้าวเพิ่มมากขึ้นเนื่องมาจากเมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความร้อนแบบจุดความร้อนเพื่อเอาไปสลายโครงสร้างเชิงซ้อนที่มีอยู่ เมื่อพิจารณาผลของชนิดและปริมาณน้ำมันที่ใส่ลงไปในช่วงขั้นตอนการหุงข้าวเสาให้จะพบว่าที่ปริมาณน้ำมันร้อยละ 2.5 และ 5 การใส่น้ำมันรำข้าวจะส่งผลให้มีอุณหภูมิในการสลายโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันแบบไม่เป็นระเบียบ (T_p และ T_c ของพีคที่ 1) มากกว่าน้ำมันมะพร้าว ดังนั้นการใส่น้ำมันรำข้าวจะทำให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันแบบไม่เป็นระเบียบได้มากกว่าน้ำมันมะพร้าว เนื่องจากในน้ำมันมะพร้าวประกอบไปด้วยกรดลอริก (C12:0) อยู่เป็นจำนวนมาก (Bhatnagar และคณะ 2009) กรดไขมันชนิดนี้เป็นกรดไขมันสายปานกลาง ซึ่งจะจับกับสายอะมิโลสภายในเม็ดแป้งได้ยากกว่าไตรกลีเซอไรด์สายยาวดังการทดลองของ Ai และคณะ (2013) และ Marinopoulou และคณะ (2016) นอกจากนี้ไขมันรำข้าวประกอบด้วยกรดโอเลอิก (C18:1) กรดลิโนเลอิก (C18:2) และกรดปาล์มติก (C16:0) (Gopala Krishna และคณะ 2006) ซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีสายยาวกว่ากรดลอริก จึงจับกับสายอะมิโลสได้ดีกว่า Putseys และคณะ (2010) ได้มีการรายงานว่ายางของกรดไขมันอิสระมีความยาวมากขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิในการสลายโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันเพิ่มขึ้น โดยสายไฮโดรคาร์บอนของกรดไขมันอิสระที่มีขนาดยาวจะช่วยเพิ่มแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic interaction) ทำให้สายของกรดไขมันสามารถจับกับสายอะมิโลสได้ดีมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างเชิงซ้อนและต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการทำลายโครงสร้างเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นนี้ ดังนั้นจากผลการทดลองจะพบว่าการใส่น้ำมันรำข้าวในช่วงขั้นตอนการหุงข้าวเสาให้จะส่งผลให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันได้

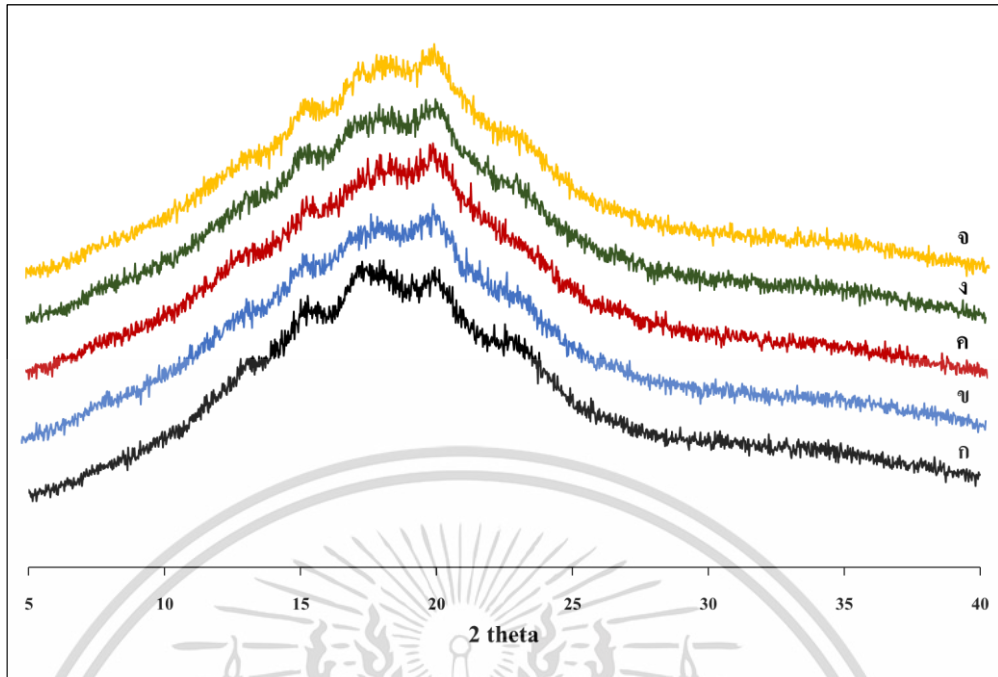
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าน้ำมันมะพร้าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักเนื่องจากมีค่า T_p และ T_c ของพีคที่ 1 มากที่สุด

ค่า ΔH เป็นค่าที่บอกถึงพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างเชิงซ้อน โดย Kawai และคณะ (2012) ได้กล่าวว่าค่า ΔH จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน และ ดิกรีความเป็นผลึกของโครงสร้าง จากการทดลองนี้จะพบว่าการลดปริมาณน้ำมันจะส่งผลให้ค่า ΔH ของพีคที่ 1 เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งหมายถึงการมีโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันแบบไม่เป็นระเบียบที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการหุงข้าวเสาให้ควรรีใสน้ำมันในปริมาณน้อย (ร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักข้าว) จะทำให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนได้มากกว่าการใส่น้ำมันในปริมาณมาก อาจเนื่องมาจากเมื่อใส่น้ำมันในปริมาณที่มากเกินไป น้ำมันจะไปเคลือบที่ผิวของเมล็ดข้าวทั่วทั้งเมล็ด ซึ่งจะส่งผลให้น้ำมันไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปภายในเมล็ดข้าวเพื่อไปจับกับอะมิโลส การเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันจึงลดลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาพีคที่ 2 จะพบว่าปริมาณโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันแบบผลึกจะไม่มี ความแตกต่างกันเมื่อมีการใส่น้ำมันในปริมาณที่แตกต่างกัน เนื่องจาก ΔH ของพีคที่ 2 จะไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

4.2.4 ผลของชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีต่อ โครงสร้างผลึกของอนุภาคแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูป

จากการศึกษาผลของชนิดและปริมาณน้ำมันที่มีต่อ โครงสร้างผลึกของแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูปทั้ง 3 ชนิดได้แก่ ข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเสาไห้ โดยพบว่าการใส่น้ำมันที่ต่างชนิดกันและปริมาณที่แตกต่างกันนั้นจะส่งผลต่อลักษณะ โครงสร้างผลึกและดิกรีของผลึก (degree of crystallinity) ของแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูป โครงสร้างผลึกและดิกรีของผลึกสามารถเชื่อมโยงได้ถึงเกิดการเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน ซึ่งลักษณะ โครงสร้างผลึกของแป้งข้าวหอมมะลิ หอมปทุม และเสาไห้ทั้งสำเร็จรูปที่ผ่านการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมันจะแสดงในภาพที่ 4.14 - 4.16 ตามลำดับ นอกจากนี้รูปแบบ โครงสร้างผลึกและดิกรีของผลึกของแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการหุง โดยใส่และไม่ใส่น้ำมันจะถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 4.20



ภาพที่ 4.14 ลักษณะ โครงสร้างผลึกของแป้งข้าวหอมมะลิกิ่งสำเร็จรูปที่ไม่ใส่น้ำมัน (ก) และใส่น้ำมันมะพร้าวร้อยละ 2.5 (ข) และ 7.5 (ค) ของน้ำหนักรำข้าวและน้ำมันรำข้าวร้อยละ 2.5 (ง) และ 7.5 (จ) ของน้ำหนักรำข้าว

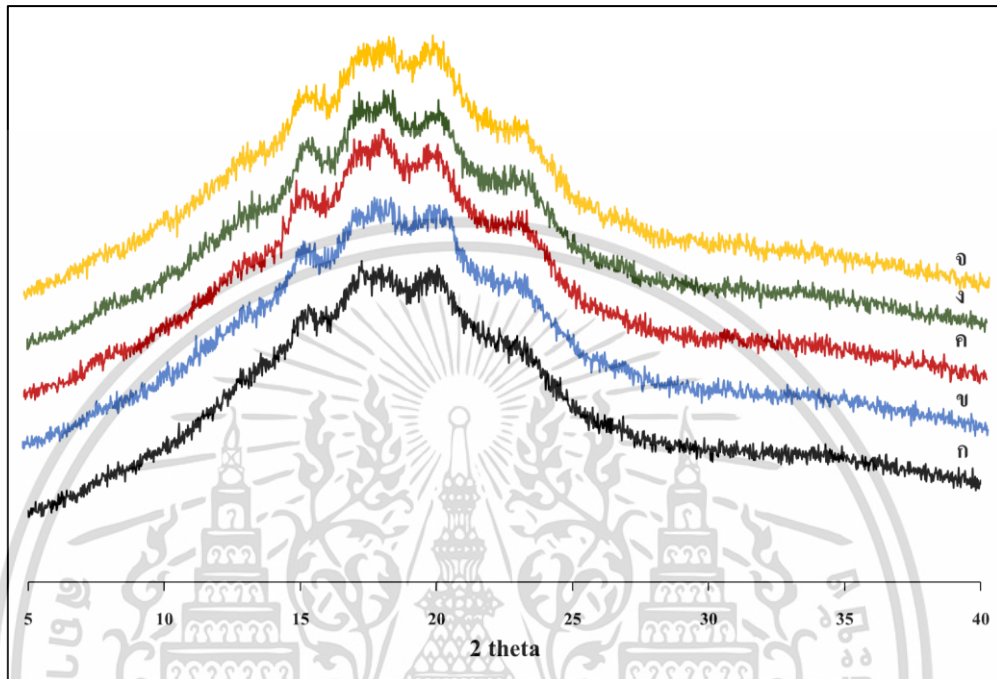
จากภาพที่ 4.14 แสดงลักษณะ โครงสร้างผลึกของแป้งข้าวหอมมะลิกิ่งสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมันในขั้นตอนการหุง โดยจะพบว่าแป้งข้าวหอมมะลิกิ่งสำเร็จรูปทุกตัวอย่าง (ภาพที่ 4.14) จะมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบผสมกับแบบวี (A+V type) เนื่องจากทุกตัวอย่างจะพบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏพิกัดเด่นชัดที่ 15° 17° 18° 19.8° และ 23° โดยสตาแรซที่มีผลึกแบบเอจะพบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏพิกัดเด่นชัดที่ 15° 17° 18° และ 23° ซึ่งจะพบได้จากสตาแรซจากธรรมชาติเช่น สตาแรซข้าว ข้าวสาลี และข้าวโพด เป็นต้น นอกจากนี้การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกแบบวีจะปรากฏพิกัดเด่นชัดที่ 19.8° โดยผลึกแบบวีจะพบในสตาแรซที่เกิดสตาแรซประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน (ปริสนา, 2561) ดังนั้นแป้งข้าวหอมมะลิกิ่งสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมันจะพบรูปแบบผลึกแบบผสมกับแบบวี ซึ่งผลึกแบบเอจะพบได้ทั่วไปในแป้งข้าวและนอกจากนี้กระบวนการแปรรูปข้าวกิ่งสำเร็จรูปจะทำให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันอีกด้วย เนื่องจากพบโครงสร้างผลึกแบบวี จากตารางที่ 4.20 ที่แสดงดิกิริของผลึกจะพบว่าแป้งข้าวหอมมะลิกิ่งสำเร็จรูปที่ไม่ใส่น้ำมันจะมีดิกิริของผลึกใกล้เคียงกับตัวอย่างที่มีการใส่น้ำมัน อย่างไรก็ตามการใส่น้ำมันมะพร้าวร้อยละ 7.5 ของน้ำหนักรำข้าวจะส่งผลให้ตัวอย่างแป้งมีดิกิริของผลึกลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ใส่น้ำมัน แป้งข้าวหอมมะลิกิ่งสำเร็จรูปที่ใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 7.5 ของน้ำหนักรำข้าวจะมีดิกิริของผลึกมากที่สุดนั่นคือเท่ากับ 16.98

โดยการมีดิกิริของผลึกมากที่สุดนี้อาจส่งผลให้ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณลดลง เนื่องจากตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

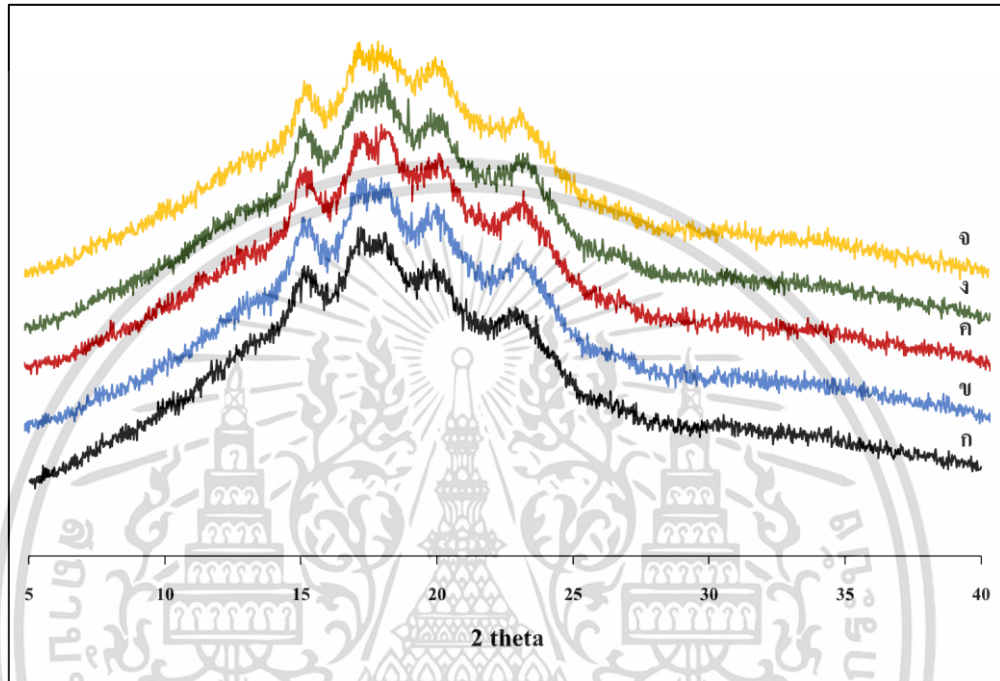
มีโครงสร้างที่เป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เอนไซม์เข้าไปย่อยได้ยากขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณา ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของแป้งข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 7.5 ของน้ำหนัก (ตารางที่ 4.11) จะพบว่าข้าวถึงสำเร็จรูปมีค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณต่ำที่สุด



ภาพที่ 4.15 ลักษณะโครงสร้างผลึกของของแป้งข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูปที่ไม่ใส่น้ำมัน (ก) และใส่น้ำมันมะพร้าวร้อยละ 2.5 (ข) 7.5 (ค) ของน้ำหนักข้าวและน้ำมันรำข้าวร้อยละ 2.5 (ง) และ 7.5 (จ) ของน้ำหนักข้าว

จากภาพที่ 4.15 แสดงลักษณะ โครงสร้างผลึกของแป้งข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมันในขั้นตอนการหุง โดยพบว่าแป้งข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูปทุกตัวอย่าง มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบเอผสมกับแบบวี (A+V type) เนื่องจากทุกตัวอย่างจะพบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏพิคเด่นชัดที่ 15° 17° 18° 19.8° และ 23° นอกจากนี้เมื่อพิจารณาดักริกของผลึกของตัวอย่างแป้งข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูปที่แสดงในตารางที่ 4.20 จะพบว่าแป้งข้าวถึงสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงโดยไม่มี การใส่น้ำมันจะมีดักริกของผลึกน้อยกว่าแป้งข้าวถึงสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมัน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของดักริกของผลึกเมื่อมีการใส่น้ำมันในขั้นตอนการหุงอาจเนื่องมาจากการเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน โดย Shin และคณะ (2009) ได้นำสตาร์ชข้าวมาผสมกับกรดซิตริกและให้ความร้อน ซึ่งพบว่าโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวจะเปลี่ยนแปลงไปโดยมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบวีเพิ่มเข้ามาจากเดิมที่มีเพียงแค่แบบเอ เนื่องจากเกิด โครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใส่กรดซิตริกยังช่วยเพิ่มดักริกของผลึกเนื่องจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรดซิติริกจะไปจับกับอะมิโลสเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความแข็งแรง จากตารางที่ 4.15 เมื่อพิจารณาผลของชนิดและปริมาณน้ำมันที่มีต่อดัชนีของผลึกแป้งข้าวจะพบว่าข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ใส่น้ำมันมะพร้าวจะมีดัชนีของผลึกที่ใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมัน อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันรำข้าวจะส่งผลให้ดัชนีของผลึกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 4.16 ลักษณะ โครงสร้างผลึกของของแป้งข้าวเสาให้ถึงสำเร็จรูปที่ไม่ใส่น้ำมัน (ก) และใส่น้ำมันมะพร้าวร้อยละ 2.5 (ข) 7.5 (ค) ของน้ำหนักรำข้าวและน้ำมันรำข้าวร้อยละ 2.5 (ง) และ 7.5 (จ) ของน้ำหนักรำข้าว

จากภาพที่ 4.16 แสดงลักษณะ โครงสร้างผลึกของแป้งข้าวเสาให้ถึงสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมันในขั้นตอนการหุง โดยพบว่าแป้งข้าวเสาให้ถึงสำเร็จรูปทุกตัวอย่างจะมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบผสมกับแบบวี (A+V type) เช่นกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาดัชนีของผลึกของตัวอย่างแป้งข้าวเสาให้ถึงสำเร็จรูปที่แสดงในตารางที่ 4.20 จะพบว่าดัชนีของผลึกมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการใส่น้ำมันในขั้นตอนการหุงข้าว ยกเว้นการใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 7.5 ของน้ำหนักรำข้าวจะส่งผลให้แป้งข้าวมีดัชนีของผลึกต่ำกว่าแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ไม่มี การใส่น้ำมัน นอกจากนี้การใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักรำข้าวจะส่งผลให้แป้งข้าวเสาให้ถึงสำเร็จรูปมีดัชนีของผลึกมากที่สุดคือเท่ากับ 19.98 ซึ่งอาจเนื่องมาจากการเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับการหุงข้าวที่สภาวะอื่น โดยการใส่น้ำมันร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักรำข้าวจะส่งผลให้ข้าวเสาให้ถึงสำเร็จรูปมีค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณต่ำที่สุด (ตารางที่ 4.13) นั่นอาจเป็นเพราะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

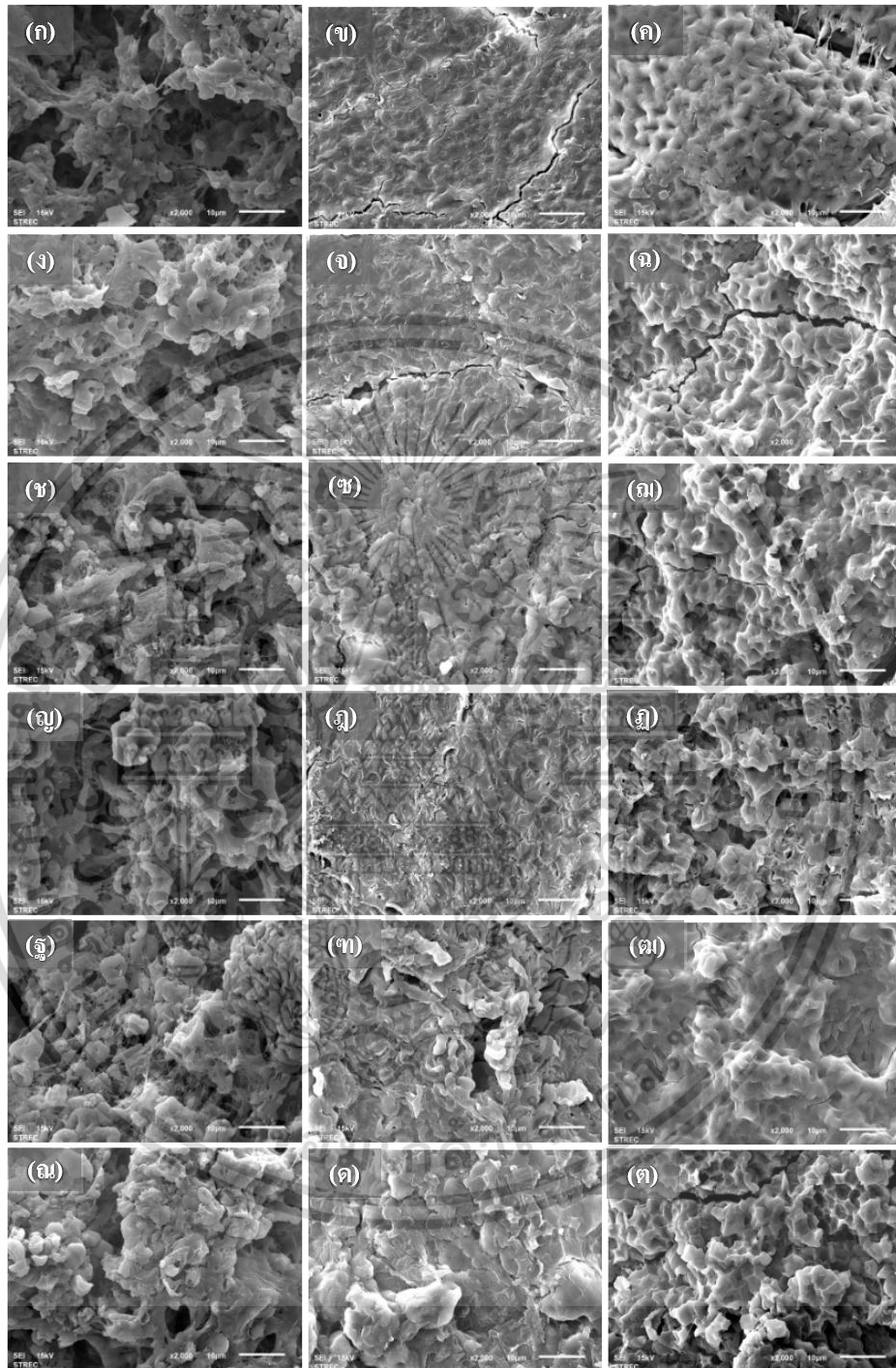
ที่สภาวะนี้มีดีกรีของผลึกมากที่สุด ซึ่งสะท้อนถึงการเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนที่เพิ่มมากขึ้น โดยโครงสร้างเชิงซ้อนจะมีความแข็งแรง และทำให้เอนไซม์เข้าไปย่อยได้ยากขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณลดต่ำลง

ตารางที่ 4.20 รูปแบบโครงสร้างผลึกและดีกรีของผลึก (degree of crystallinity) ของแป้งข้าว
กึ่งสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันและไม่ใส่น้ำมัน

ชนิดข้าว	ชนิดน้ำมัน	ปริมาณ (ร้อยละ)	รูปแบบโครงสร้างผลึก	ดีกรีของผลึก (ร้อยละ)
หอมมะลิ	-	-	A+V	16.18
	มะพร้าว	2.5	A+V	16.67
		7.5	A+V	14.81
	รำข้าว	2.5	A+V	15.89
		7.5	A+V	16.98
	หอมปทุม	-	-	A+V
มะพร้าว		2.5	A+V	17.07
		7.5	A+V	17.14
รำข้าว		2.5	A+V	17.06
		7.5	A+V	17.40
เสาไห้		-	-	A+V
	มะพร้าว	2.5	A+V	19.54
		7.5	A+V	19.88
	รำข้าว	2.5	A+V	19.98
		7.5	A+V	16.95

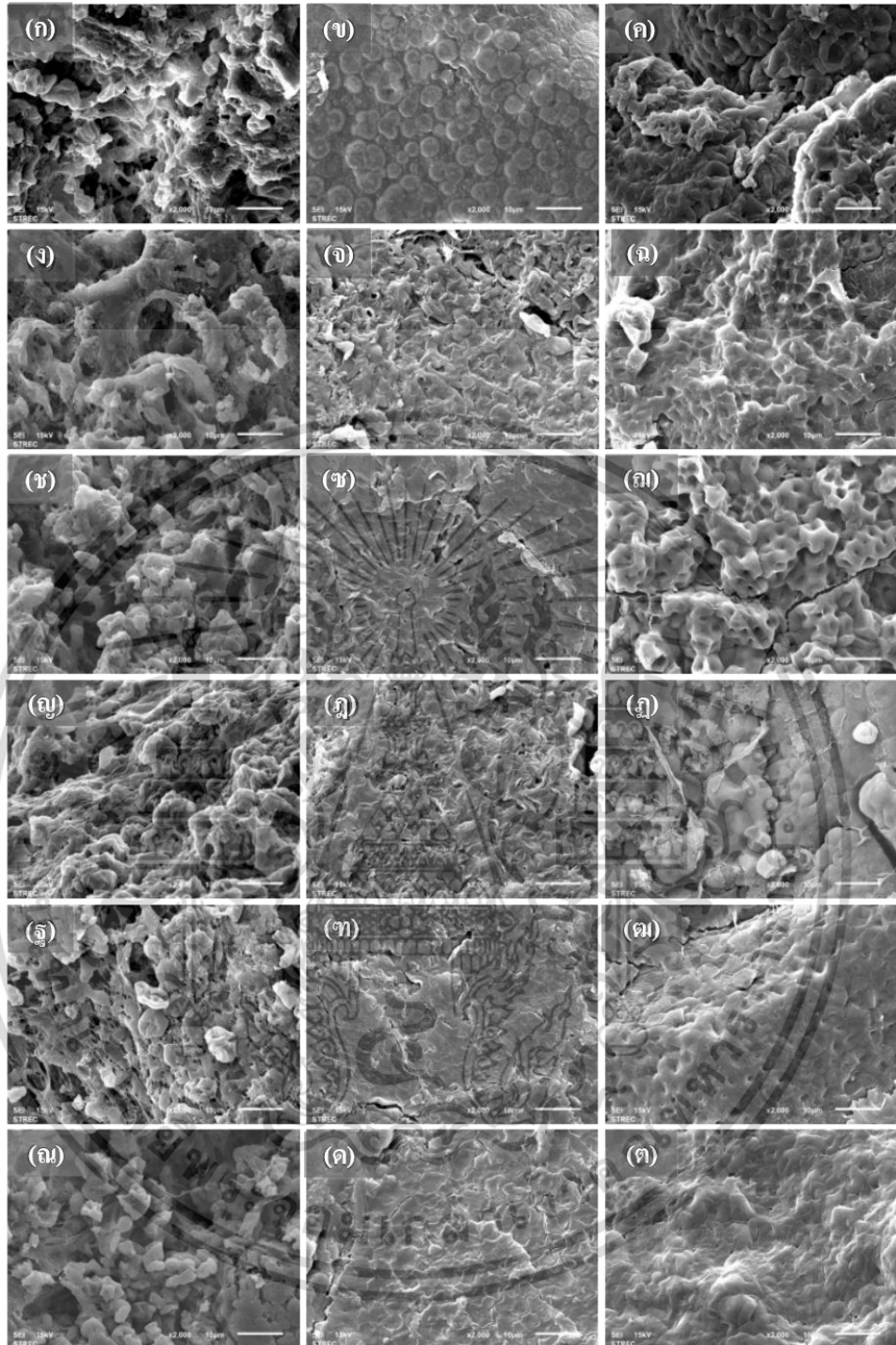
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ผลของชนิดและปริมาณของน้ำมันที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาคและพื้นผิวของข้าว กึ่งสำเร็จรูป



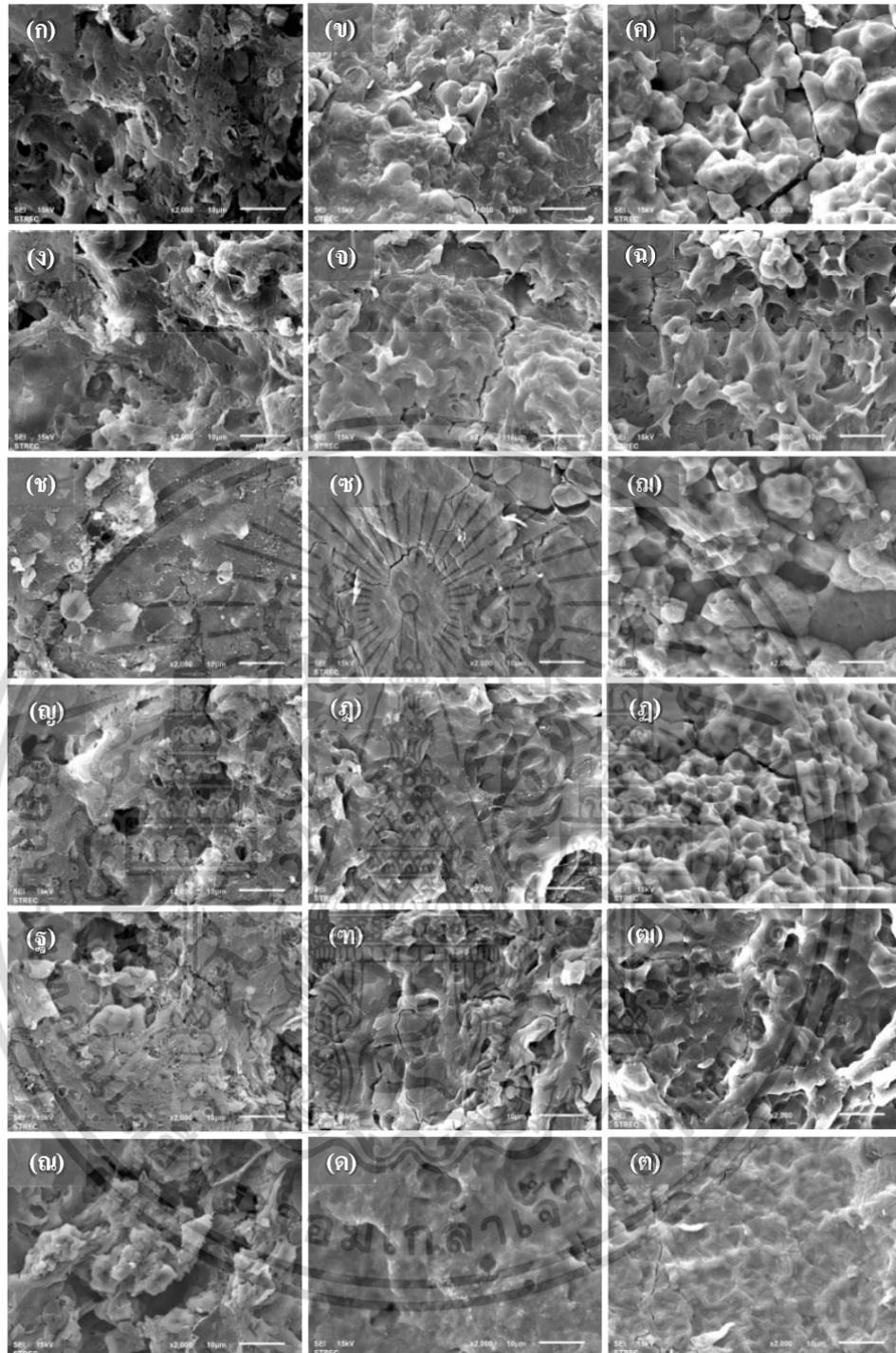
ภาพที่ 4.17 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมมะลิที่สำเร็จรูปที่ผ่านการหุงโดยมีการใส่น้ำมันมะพร้าวร้อยละ 2.5 (ก-ค) 5 (ง-ฉ) และ 7.5 (ช-ฉ) ของน้ำหนักข้าวและใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 2.5 (ญ-ฎ) 5 (ฐ-ฒ) และ 7.5 (ณ-ด) ของน้ำหนักข้าวโดยประกอบด้วยภาพพื้นผิวของเมล็ดข้าวกำลังขยาย 2000 เท่า (ซ้าย) และภาพส่วนตัดขวางด้านนอก (กลาง) และภาพส่วนตัดขวางด้านในของเมล็ด (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.18 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุง โดยมีการใส่น้ำมันมะพร้าวร้อยละ 2.5 (ก-ค) 5 (ง-ฉ) และ 7.5 (ช-ณ) ของน้ำหนักข้าวและใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 2.5 (ญ-ฎ) 5 (ฐ-ฒ) และ 7.5 (ณ-ต) ของน้ำหนักข้าวโดยประกอบด้วยภาพพื้นผิวของเมล็ดข้าวกำลังขยาย 2000 เท่า (ซ้าย) และภาพส่วนตัดขวางด้านนอก (กลาง) และภาพส่วนตัดขวางด้านในของเมล็ด (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.19 โครงสร้างทางจุลภาคของเม็ดข้าวเส้าให้กึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงโดยมีการใส่น้ำมันมะพร้าวร้อยละ 2.5 (ก-ค) 5 (ง-ฉ) และ 7.5 (ช-ฉ) ของน้ำหนักข้าวและใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 2.5 (ญ-ฎ) 5 (ฐ-ฒ) และ 7.5 (ณ-ต) ของน้ำหนักข้าวโดยประกอบด้วยภาพพื้นผิวของเม็ดข้าวกำลังขยาย 2000 เท่า (ซ้าย) และภาพส่วนตัดขวางด้านนอก (กลาง) และภาพส่วนตัดขวางด้านในของเม็ด (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลของชนิดและปริมาณน้ำมันที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาคและพื้นผิวของข้าวกล้องสำเร็จรูป 3 ชนิด ได้แก่ ข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเส้าไห้ จะมีการส่องดูพื้นผิวภายนอกของเมล็ดข้าวเพื่อดูความแตกต่างของรูพรุนบนพื้นผิวของเมล็ดข้าว นอกจากนี้ยังมีการส่องดูโครงสร้างในภาคตัดขวางของเมล็ดข้าวทั้งส่วนด้านนอก (ใกล้ผิวภายนอก) และด้านใน (ตรงกลาง) เพื่อคุณลักษณะของเม็ดแป้งภายในข้าวเมื่อมีการหุงด้วยน้ำมันที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสะท้อนถึงค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวกล้องสำเร็จรูปได้ โดยภาพทั้งหมดจะแสดงในภาพที่ 4.17-4.19

จากภาพที่ 4.17 แสดงภาพพื้นผิวภายนอก และส่วนตัดขวางของเมล็ดข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันมะพร้าว และรำข้าวปริมาณต่าง ๆ ในระหว่างขั้นตอนการหุง โดยพบว่าพื้นผิวของเมล็ดข้าวที่ผ่านการหุงร่วมกับน้ำมันทุกตัวอย่างมีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งอาจมาจากการหลุดออกไปของสายสตาร์ชที่อยู่ตรงพื้นผิวในระหว่างการหุง สอดคล้องกับผลการทดลองของ Rewthong และคณะ (2011) ที่พบว่าพื้นผิวภายนอกของเมล็ดข้าวกล้องสำเร็จรูปจะมีช่องว่างหรือรูพรุนและมีความแน่นน้อยกว่าตรงกลาง เนื่องจากสตาร์ชที่อยู่ในส่วนผิวด้านนอกจะหลุดออกไปกับน้ำในระหว่างการหุงได้ดีกว่าสตาร์ชที่อยู่ภายในเมล็ด นอกจากนี้ยังพบว่าการใส่น้ำมันทั้งสองชนิดในปริมาณน้อย (2.5) (ภาพที่ 4.17ก, ข) จะส่งผลให้ผิวด้านนอกของข้าวมีรูพรุนขนาดใหญ่มากกว่าการใส่น้ำมันในปริมาณมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำมันปริมาณมากจะไปเคลือบอยู่ที่ผิวของเมล็ดข้าวอย่างทั่วถึง ซึ่งป้องกันการหลุดออกของสายสตาร์ชได้มากกว่า เมื่อพิจารณาในส่วนของโครงสร้างภาคตัดขวางของเมล็ดข้าวจะพบว่าเมื่อทำการหุงข้าวโดยมีการใส่น้ำมันต่างชนิดและปริมาณแตกต่างกัน ภาพภาคตัดขวางในส่วนด้านนอกจะมีลักษณะเรียบเหมือนกัน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผิวด้านนอกและด้านในของภาคตัดขวาง จะพบว่าที่ด้านนอกจะมีลักษณะเรียบมากกว่าด้านใน ซึ่งด้านในยังคงเห็นเม็ดแป้งมีลักษณะเหลี่ยม (polygonal shape) นั้นหมายความว่าที่ภายในกึ่งกลางของเมล็ดข้าวจะเกิดการเจลาติไนซ์ได้น้อยกว่าที่ผิวด้านนอก โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Briffaz และคณะ (2012) ที่พบว่าด้านนอกของเมล็ดข้าวจะเกิดการเจลาติไนซ์มากกว่าตรงกึ่งกลางเมื่อมีการแช่ข้าวที่อุณหภูมิสูง และเมื่อเปรียบเทียบผลของชนิดและปริมาณน้ำมันที่มีต่อโครงสร้างภาคตัดขวางด้านในจะพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันทั้งสองชนิดจะส่งผลให้เม็ดแป้งที่อยู่ตรงกึ่งกลางมีลักษณะเหลี่ยมมากกว่า (ภาพที่ 4.17ค, ด) ซึ่งอาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณน้ำมันจะส่งผลให้น้ำมันเข้าไปเคลือบที่ผิวด้านนอกของเมล็ดข้าวอย่างทั่วถึง และทำให้น้ำเข้าไปภายในเมล็ดข้าวได้ยากมากขึ้น ส่งผลให้เม็ดแป้งที่อยู่ภายในเกิดการเจลาติไนซ์ลดลง ซึ่งผลนี้อาจไปส่งผลต่อค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณที่ลดลง เมื่อทำการหุงข้าวหอมมะลิร่วมกับน้ำมันรำข้าวในปริมาณสูง (ร้อยละ 7.5 ของน้ำหนักข้าว) (ตารางที่ 4.11)

จากภาพที่ 4.18 แสดงภาพพื้นผิวภายนอก และส่วนตัดขวางของเมล็ดข้าวหอมปทุม กึ่งสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันมะพร้าว และรำข้าวปริมาณต่าง ๆ ในระหว่างขั้นตอนการหุง โดยพบว่า ลักษณะพื้นผิวของข้าวจะมีความใกล้เคียงกับข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูป นั่นคือที่ผิวด้านภายนอกของ เมล็ดข้าวจะมีรูพรุนจำนวนมาก มีพื้นผิวที่ขรุขระ (ภาพที่ 4.18ก, ง, ข, ฉ, จ, ฉ) นอกจากนี้ลักษณะ โครงสร้างภาคตัดขวางด้านนอกจะมีความเรียบ และมีลักษณะไม่แตกต่างกันเมื่อทำการใส่น้ำมันที่ ต่างกัน (ภาพที่ 4.18ข, จ, ข, ฉ, จ, ฉ) ซึ่งความเรียบของพื้นผิวนี้เกิดจากการหลอมรวมกันของ เม็ดแป้งที่อยู่ภายในเมื่อมีการเกิดเจลาคีโนเซชัน (Ogawa และคณะ 2003) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึง ภาพภาคตัดขวางด้านใน (ภาพที่ 4.18ค, ฉ, ฉ, ฉ, ฉ, ฉ) จะพบว่าเม็ดแป้งยังคงมีลักษณะเป็นเหลี่ยม เช่นเดียวกับข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูป และการใส่น้ำมันมะพร้าวร้อยละ 7.5 ของน้ำหนักข้าวจะ ทำให้เม็ดแป้งที่อยู่ด้านในยังคงมีลักษณะเหลี่ยมมากกว่าเมื่อเทียบกับการใส่น้ำมันในปริมาณลดลง

จากภาพที่ 4.19 แสดงภาพพื้นผิวภายนอก และส่วนตัดขวางของเมล็ดข้าวเสาให้ กึ่งสำเร็จรูปที่มีการใส่น้ำมันมะพร้าว และรำข้าวปริมาณต่าง ๆ ในระหว่างขั้นตอนการหุง โดยจะ พบว่าลักษณะพื้นผิวของข้าวเสาให้จะมีรูพรุน แต่จะมีผิวที่เรียบมากกว่าข้าวหอมมะลิและหอมปทุม นอกจากนี้เมื่อพิจารณาโครงสร้างภาคตัดขวางก็จะพบว่ามีความคล้ายคลึงกับข้าวอีกสองชนิด โดย ด้านนอกมีลักษณะเรียบและด้านในเม็ดแป้งยังคงมีความเหลี่ยม ลักษณะเรียบที่พบนี้เกิดมาจากการ เกิดเจลาคีโนเซชัน ซึ่งเม็ดแป้งจะพองตัวและเกิดการหลอมรวมกันจนมีลักษณะเรียบ (Hsu และ คณะ 2015a)

จากการศึกษาผลของชนิดและปริมาณน้ำมันที่มีต่อสมบัติทางการย่อย ค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณ โครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน และ โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าว พบว่าการเกิด โครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน ในระหว่างขั้นตอนการหุงข้าวร่วมกับ น้ำมันจะส่งผลให้ข้าวกึ่งสำเร็จรูปมีค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณลดลง ทั้งนี้ชนิดและ ปริมาณน้ำมันที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิด โครงสร้างเชิงซ้อนมากที่สุดขึ้นอยู่กับชนิดของข้าวด้วย โดย ในข้าวหอมมะลิจะพบว่าการใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 7.5 ของน้ำหนักข้าวจะส่งผลให้เกิด โครงสร้าง เชิงซ้อนมากที่สุด และทำให้ข้าวกึ่งสำเร็จรูปมีค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณต่ำที่สุด ในส่วนของข้าว หอมปทุม การใส่น้ำมันทั้งสองชนิดร้อยละ 5 ของน้ำหนักข้าวจะมีความเหมาะสมมากที่สุด และใน ข้าวเสาให้ การใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักข้าวจะมีความเหมาะสมมากที่สุด

4.3 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อโครงสร้างภายในเมล็ดข้าวกึ่งสำเร็จรูป สมบัติทางการ ย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ

ในการศึกษานี้จะเป็นการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งในขั้นตอนแรก โดยข้าวที่ผ่าน การหุงด้วยสภาวะที่เหมาะสม (82°C สัดส่วนน้ำต่อข้าวสารเท่ากับ 1.9:1 ของน้ำหนักแห้งของข้าว) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถูกนำมาแช่เย็นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจะนำมาอบโดยมีการแปรอุณหภูมิในการอบขั้นแรกคือ 40 50 และ 60°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นจะเพิ่มอุณหภูมิในการอบเป็น 95°C และทำการอบต่ออีก 1 ชั่วโมง ข้าวที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย ข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเส้าไห้ โดยข้าวถึงสำเร็จรูปที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ สมบัติด้านความหนืด สมบัติทางความร้อน อัตราการกินตัวของข้าวถึงสำเร็จรูป และต้องดูโครงสร้างทางจุลภาคและพื้นผิวของเมล็ดข้าวคังแสดงในข้อที่ 4.3.1 – 4.3.5

4.3.1 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อสมบัติทางการย่อยของแป้งในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิการอบแห้งในขั้นแรกที่มีต่อปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า ปริมาณสตาร์ชทนย่อย และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเส้าไห้ถึงสำเร็จรูป จะพบว่าอุณหภูมิในการอบแห้งจะมีผลต่อปริมาณสตาร์ชชนิดต่าง ๆ และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปเท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวถึงสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกัน

ชนิดข้าว	อุณหภูมิอบ (°C)	สตาร์ชย่อยเร็ว (ร้อยละ)	สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (ร้อยละ)	สตาร์ชทนย่อย (ร้อยละ)	ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ
หอมมะลิ	40	47.56 ± 1.46 ^b	24.63 ± 0.61 ^a	0.85 ± 0.13 ^a	80.29 ± 1.10 ^b
	50	44.41 ± 1.64 ^a	26.88 ± 1.32 ^b	1.16 ± 0.25 ^a	77.26 ± 0.92 ^a
	60	45.75 ± 1.68 ^{ab}	24.98 ± 0.89 ^a	1.08 ± 0.36 ^a	77.28 ± 0.39 ^a
หอมปทุม	40	39.39 ± 0.83 ^a	29.43 ± 1.30 ^a	1.41 ± 0.17 ^a	76.08 ± 0.71 ^a
	50	39.22 ± 1.79 ^a	33.11 ± 1.08 ^b	1.71 ± 0.38 ^a	75.07 ± 1.40 ^a
	60	39.55 ± 0.72 ^a	32.25 ± 1.13 ^b	1.50 ± 0.39 ^a	76.07 ± 1.25 ^a
เส้าไห้	40	29.08 ± 1.89 ^a	35.06 ± 0.78 ^a	4.55 ± 0.40 ^a	67.36 ± 0.94 ^a
	50	28.44 ± 2.14 ^a	35.90 ± 1.98 ^a	4.83 ± 0.76 ^a	66.50 ± 0.57 ^a
	60	28.99 ± 0.35 ^a	35.45 ± 2.57 ^a	4.17 ± 0.79 ^a	67.03 ± 0.37 ^a

หมายเหตุ: ^{a-b} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของข้าวชนิดเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.21 ที่แสดงสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง และค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณของข้าวกล้องสำเร็จรูปชนิดต่าง ๆ ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยพบว่า การแปรอุณหภูมิในการอบแห้งไม่มีผลต่อปริมาณสตาร์ชชนิดต่าง ๆ และค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณของข้าวหอมปทุม และข้าวเส้าให้กล้องสำเร็จรูป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ สตาร์ชชนิดต่าง ๆ และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณเพียงเล็กน้อย และไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูปจะพบว่าอุณหภูมิในการอบส่งผลต่อปริมาณสตาร์ชชนิดต่าง ๆ และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการอบจะส่งผลให้ปริมาณสตาร์ชย่อยเร็วมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ซามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะไปสอดคล้องกับค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณที่ลดลง โดยพบว่า การอบแห้งในขั้นแรกที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C จะทำให้ข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูปมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดย Hsu และคณะ (2015a) ได้ทำการอบแห้งข้าวกล้องสำเร็จรูป โดยใช้อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำช่วยลดปริมาณสตาร์ชย่อยเร็วในข้าวกล้องสำเร็จรูปได้ เนื่องจากการอบแห้งข้าวที่มีความชื้นสูง (มากกว่าร้อยละ 30 ของน้ำหนักข้าว) โดยใช้อุณหภูมิต่ำ (< 55°C) จะช่วยให้เกิดการจัดเรียงโครงสร้างของสายสตาร์ชในข้าว ให้มีความเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการย่อยของข้าวลดลง ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่าการ คัดแปรแบบแอนนิลลิ่ง (annealing) โดยจัดอยู่ในการคัดแปรแบบไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal modification) กระบวนการแอนนิลลิ่งจัดเป็นการคัดแปรทางกายภาพของสตาร์ชในสภาวะที่มีน้ำ ในปริมาณมาก โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการคัดแปรจะสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, T_g) แต่จะต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาติเนชัน (onset temperature, T_o) การคัดแปรแบบแอนนิลลิ่งทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลสตาร์ช การเคลื่อนที่ของสายสตาร์ชขณะ คัดแปรจะส่งผลให้เกิดสายเกลียวคู่ระหว่างอะมิโลสกับอะมิโลส และอะมิโลสกับอะมิโลเพกติน ซึ่ง จะช่วยเพิ่มโครงสร้างแบบผลึกที่มีความแข็งแรง (Zavareze และ Dias, 2011) โดยในการทำการ ทดลองนี้การอบที่อุณหภูมิสูง (50 – 60°C) อาจจะทำให้โมเลกุลสตาร์ชในข้าวหอมมะลิมีการจัดเรียง ตัวที่เป็นระเบียบ และเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึกมากกว่าการอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า (40°C) จึงส่งผลให้ ข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C มีค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาล โดยประมาณลดลงเมื่อเทียบกับการอบที่อุณหภูมิ 40°C อย่างไรก็ตามการแปรอุณหภูมิในการ แอนนิลลิ่งข้าวหอมปทุมและข้าวเส้าให้กล้องจะไม่ได้ทำให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้างสตาร์ช เปลี่ยนแปลง โดยจะพบว่าค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อสมบัติด้านความหนืดของข้าวกล้องสำเร็จรูป

ผลของอุณหภูมิการอบแห้งในขั้นตอนแรกที่มีต่อค่าความหนืดสูงสุด (PV) ค่าความหนืดต่ำสุด (TV) ค่าการแตกสลายของเม็ดแป้ง (BD) ค่าความหนืดสุดท้าย (FV) ค่าการคืนตัว (SB) และอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (PT) ของแป้งข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเสาไห้ กึ่งสำเร็จรูปจะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.22 โดยความหนืดที่ลดลงสามารถสะท้อนถึงการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างสตาร์ชที่มีความแข็งแรงในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งจากตารางที่ 4.22 พบว่าค่า PV และ TV ของแป้งข้าวหอมมะลิ กึ่งสำเร็จรูปจะไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ในขณะที่ค่า PV และ TV ของแป้งข้าวหอมปทุมและเสาไห้ กึ่งสำเร็จรูปจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง อย่างไรก็ตามค่า BD และ PT ของแป้งข้าวทั้งสามชนิดไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในการแอนนิลลิ่งจะมีผลต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวหอมปทุมและข้าวเสาไห้ โดยการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้แป้งมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น จากการศึกษาของ Jacobs และคณะ (1996) จะพบว่าการแอนนิลลิ่งจะส่งผลให้ค่า PV และ FV ของสตาร์ชข้าว สตาร์ชถั่ว และสตาร์ชข้าวสาลีเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับการทดลองของ Stute (1992) ที่กล่าวว่า การแอนนิลลิ่งส่งผลให้ค่า PT และ FV ของสตาร์ชมันฝรั่งเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่า PV ของสตาร์ชมันฝรั่งมีค่าลดลง โดยการแอนนิลลิ่งจะทำให้โมเลกุลของสายสตาร์ชจัดเรียงตัวกันใหม่ ได้เป็นโครงสร้างผลึกที่มีความแข็งแรง ซึ่งส่งผลให้เม็ดสตาร์ชสามารถทนต่อความร้อน และแรงเฉือนได้เพิ่มมากขึ้น ความหนืดจึงลดลง และยังทำให้อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (PT) เพิ่มสูงขึ้น

ความหนืดของแป้งที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งข้าวหอมปทุมและข้าวเสาไห้สามารถแสดงให้เห็นถึงการลดลงของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ โดยน้ำสามารถเข้าไปจับกับสายอะมิโลสและอะมิโลเพกตินได้ง่าย และทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวเพิ่มมากขึ้น ความหนืดจึงเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการอบแห้งข้าวหอมปทุม และข้าวเสาไห้ที่อุณหภูมิต่ำ (40°C) จะทำให้โมเลกุลของสตาร์ชจัดเรียงตัวกันได้เป็นระเบียบและมีความแข็งแรงมากกว่า เนื่องจากแป้งมีความหนืดต่ำกว่า และมีค่า PT สูงกว่า ซึ่งค่า PT ที่สูงกว่านี้สามารถบ่งบอกได้ถึงความแข็งแรงของโครงสร้างที่เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.22 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกัน

ชนิดข้าว	อุณหภูมิ (°C)	PV (cP)	TV (cP)	BD (cP)	FV (cP)	SB (cP)	PT (°C)
หอมมะลิ	40	5486.5 ± 65.8 ^a	4270.0 ± 104.7 ^a	1216.5 ± 38.9 ^a	6931.5 ± 64.3 ^b	2661.5 ± 40.3 ^a	78.6 ± 0.6 ^a
	50	5342.5 ± 37.5 ^a	4171.5 ± 44.5 ^a	1171.0 ± 82.0 ^a	6819.0 ± 26.9 ^{ab}	2647.5 ± 17.7 ^a	77.4 ± 0.0 ^a
	60	5491.0 ± 52.3 ^a	4180.0 ± 31.1 ^a	1311.0 ± 83.4 ^a	6759.5 ± 60.1 ^a	2579.5 ± 29.0 ^a	78.6 ± 0.5 ^a
หอมปทุม	40	3553.0 ± 45.3 ^a	3036.0 ± 18.4 ^a	517.0 ± 63.6 ^a	5371.5 ± 29.0 ^a	2335.5 ± 47.4 ^a	82.1 ± 1.6 ^a
	50	3683.5 ± 20.5 ^b	3093.0 ± 31.1 ^a	590.5 ± 10.6 ^a	5440.5 ± 34.6 ^a	2347.5 ± 3.5 ^a	79.9 ± 1.3 ^a
	60	3933.5 ± 4.9 ^c	3280.5 ± 47.4 ^b	653.0 ± 52.3 ^a	5654.5 ± 61.5 ^b	2374.0 ± 14.1 ^a	81.5 ± 1.1 ^a
เสาไห้	40	1079.0 ± 2.8 ^a	955.0 ± 5.7 ^a	124.0 ± 2.8 ^a	1534.0 ± 5.7 ^a	579.0 ± 11.3 ^a	89.9 ± 0.5 ^a
	50	1158.0 ± 32.5 ^b	1059.0 ± 31.1 ^b	99.0 ± 1.4 ^a	1711.5 ± 47.4 ^b	652.5 ± 16.3 ^{ab}	89.2 ± 0.5 ^a
	60	1305.5 ± 2.1 ^c	1175.0 ± 19.8 ^c	130.5 ± 21.9 ^a	1847.5 ± 57.3 ^b	672.5 ± 37.5 ^b	89.6 ± 0.1 ^a

หมายเหตุ: ^{a-c} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของข้าวชนิดเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

PV หมายถึง ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity)

TV หมายถึง ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity)

BD หมายถึง ค่าการแตกสลายของเม็ดแป้ง (breakdown)

FV หมายถึง ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity)

SB หมายถึง ค่าการคืนตัว (setback)

PT หมายถึง อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature)

4.3.3 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของข้าวกล้องสำเร็จรูป

การศึกษาผลของอุณหภูมิการอบแห้งในขั้นตอนแรกที่มีต่อสมบัติทางความร้อนได้แก่ อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลิตีในเซชัน (onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (conclusion temperature, T_c) และพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (enthalpy, ΔH) ของแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูปทั้งสามชนิดจะแสดงในตารางที่ 4.23 โดยพบว่าหลังจากให้ความร้อนตัวอย่างแป้งกล้องสำเร็จรูปทั้ง 3 ชนิด จะพบการเปลี่ยนแปลงความร้อนแบบดูดความร้อน (endothermic transition) ทั้งหมด 2 พีก โดยพีกแรกจะเกิดจากการเจลลิตีในเซชัน และพีกที่สองเกิดจากการสลายโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันที่พบตามธรรมชาติในเมล็ดแป้ง (Horndok และ Noomhorm, 2007) ซึ่งเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูป พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง หรือแอนนัลลิ่งจะส่งผลให้ ΔH มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งหมายความว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนัลลิ่งข้าวหอมมะลิจะช่วยให้โครงสร้างสตาร์ชภายในเมล็ดข้าวเกิดการจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบ มีความเป็นผลึกที่มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการเจลลิตีในเซชัน (ΔH เพิ่มสูงขึ้น) ซึ่งจะสอดคล้องกับสมบัติทางกายภาพในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณในข้อที่ 4.3.1 โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการอบข้าวหอมมะลิจะส่งผลให้ค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณลดลง ซึ่งอาจมาจากการที่โครงสร้างจัดเรียงตัวเป็นผลึกแข็งแรงมากกว่า จึงทำให้เอนไซม์เข้าไปย่อยได้ยากมากขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีน้ำตาลลดลง

ในส่วนของข้าวหอมปทุมกล้องสำเร็จรูป จะพบว่าอุณหภูมิการอบแห้งหรือการแอนนัลลิ่งจะไม่มีผลต่อการจัดเรียงตัวของโครงสร้างสตาร์ช เนื่องจากสมบัติทางความร้อนเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เมื่อแปรอุณหภูมิการทำแห้ง (ตารางที่ 4.23) และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณในข้อที่ 4.3.1 ก็จะพบว่าการแปรอุณหภูมิในการทำแห้งจะไม่ได้ทำให้ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากโครงสร้างสตาร์ชที่จัดเรียงตัวใหม่ไม่มีความแตกต่างกันเมื่อทำการแปรอุณหภูมิในการแอนนัลลิ่ง

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิการอบแห้งที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเสาไห้ในตารางที่ 4.23 ก็จะพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (40°C) จะส่งผลให้แป้งข้าวเสาไห้กล้องสำเร็จรูปมีค่า T_o และ T_p มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่า ซึ่งอาจบ่งบอกได้ถึงความแข็งแรงของโครงสร้างสตาร์ชที่มีการจัดเรียงตัวใหม่ โดย ปรีศนา (2561) กล่าวว่า การแอนนัลลิ่งจะส่งผลต่ออุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชัน โดยจะทำให้ค่า T_o และ T_p ของการเกิดเจลลิตีในเซชันเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการแอนนัลลิ่งจะส่งผลให้ช่วงกว้างของอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชัน (gelatinization range, $T_c - T_o$) ลดลง (Jayakody และ Hoover, 2008)

ตารางที่ 4.23 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกัน

ชนิดข้าว	อุณหภูมิ (°C)	พีคที่ 1 (Peak 1)				พีคที่ 2 (Peak 2)			
		T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH (J/g)	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH (J/g)
หอมมะลิ	40	68.8 ± 0.3 ^a	74.0 ± 0.1 ^a	80.5 ± 0.1 ^a	0.3 ± 0.0 ^a	89.1 ± 1.7 ^a	96.8 ± 0.6 ^a	103.6 ± 0.2 ^a	0.3 ± 0.1 ^a
	50	68.3 ± 0.0 ^a	74.0 ± 0.1 ^a	80.4 ± 0.4 ^a	0.4 ± 0.0 ^b	87.8 ± 0.3 ^a	97.2 ± 0.1 ^a	104.4 ± 0.2 ^b	0.4 ± 0.0 ^a
	60	68.3 ± 0.3 ^a	74.2 ± 0.4 ^a	80.2 ± 0.1 ^a	0.5 ± 0.0 ^c	87.3 ± 1.4 ^a	96.9 ± 0.5 ^a	103.9 ± 0.1 ^{ab}	0.5 ± 0.2 ^a
หอมปทุม	40	70.0 ± 0.6 ^a	74.9 ± 0.3 ^a	81.1 ± 0.2 ^a	0.4 ± 0.0 ^a	89.6 ± 0.8 ^a	97.5 ± 1.0 ^a	103.7 ± 0.8 ^a	0.2 ± 0.0 ^a
	50	69.6 ± 0.4 ^a	74.9 ± 0.5 ^a	81.5 ± 0.3 ^a	0.4 ± 0.0 ^a	89.1 ± 0.1 ^a	97.3 ± 0.3 ^a	103.9 ± 0.5 ^a	0.3 ± 0.0 ^a
	60	69.8 ± 0.7 ^a	74.7 ± 0.4 ^a	80.8 ± 0.3 ^a	0.5 ± 0.2 ^a	89.1 ± 0.0 ^a	96.8 ± 0.3 ^a	103.5 ± 0.1 ^a	0.3 ± 0.0 ^a
เสาไห้	40	79.0 ± 0.2 ^b	82.4 ± 0.0 ^b	87.2 ± 0.1 ^a	0.8 ± 0.0 ^a	91.9 ± 0.6 ^a	97.2 ± 0.1 ^a	101.5 ± 0.9 ^a	0.1 ± 0.1 ^a
	50	78.6 ± 0.2 ^{ab}	82.1 ± 0.0 ^a	87.0 ± 0.1 ^a	0.8 ± 0.1 ^a	93.4 ± 3.5 ^a	97.4 ± 0.0 ^b	101.7 ± 0.7 ^a	0.2 ± 0.0 ^a
	60	78.5 ± 0.0 ^a	82.2 ± 0.1 ^a	87.1 ± 0.2 ^a	0.8 ± 0.0 ^a	90.7 ± 0.4 ^a	97.4 ± 0.0 ^{ab}	103.3 ± 0.8 ^a	0.3 ± 0.1 ^a

หมายเหตุ: ^{a-c} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของข้าวชนิดเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

T_o หมายถึง อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาทีโนเซชัน (onset temperature)

T_p หมายถึง อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (peak temperature)

T_c หมายถึง อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (conclusion temperature)

ΔH หมายถึง พลังงานในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (enthalpy)

4.3.4 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่ออัตราการคืนตัวของข้าวกล้องสำเร็จรูป

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิการอบแห้งในขั้นแรกที่มีต่ออัตราการคืนตัวของข้าวกล้องสำเร็จรูปทั้งสามชนิด จะพบว่าอุณหภูมิในการอบแห้งจะมีผลต่ออัตราการคืนตัวของข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูปเท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.24 โดยอัตราการคืนตัวสามารถสะท้อนถึงความสามารถในการดูดน้ำกลับของเมล็ดข้าวกล้องสำเร็จรูป ซึ่งเป็นการวิเคราะห์คุณภาพในการรับประทาน อัตราการคืนตัวของข้าวกล้องสำเร็จรูปทั่วไปจะมีค่าประมาณ 2.11 – 2.58 เท่า (Sripinyowanich และ Noomhorm, 2013; Wongsa และคณะ 2016) นอกจากนี้การวิเคราะห์อัตราการคืนตัวสามารถเชื่อมโยงถึงค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวกล้องสำเร็จรูปได้

ตารางที่ 4.24 อัตราการคืนตัวของข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกัน

ชนิดข้าว	อุณหภูมิอบ (°C)	อัตราการคืนตัว (เท่า)
หอมมะลิ	40	3.48 ± 0.20 ^b
	50	3.22 ± 0.13 ^a
	60	3.17 ± 0.12 ^a
หอมปทุม	40	2.87 ± 0.11 ^a
	50	2.88 ± 0.12 ^a
	60	2.89 ± 0.08 ^a
เส้าไห้	40	2.96 ± 0.10 ^a
	50	2.89 ± 0.60 ^a
	60	2.94 ± 0.07 ^a

หมายเหตุ: ^{a-b} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของข้าวชนิดเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อพิจารณาอัตราการคืนตัวของข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.24 จะพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (40°C) จะส่งผลให้ข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูปมีอัตราการคืนตัวที่สูงกว่า โดยข้าวที่สามารถคืนตัวได้ดีจะต้องมีความหนาแน่นต่ำ มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก เพื่อให้สามารถเข้าไปได้อย่างรวดเร็ว (Prasert และ Suwannaporn, 2009) ดังนั้นการอบแห้งข้าวหอมมะลิที่อุณหภูมิต่ำ (40°C) จะส่งผลให้ข้าวมีความพองตัวสูง และมีรูพรุนจำนวนมากว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง (50, 60°C) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wongsa และคณะ (2016) ที่พบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้อัตราการคืนตัวของข้าวกล้องสำเร็จรูปลดลง

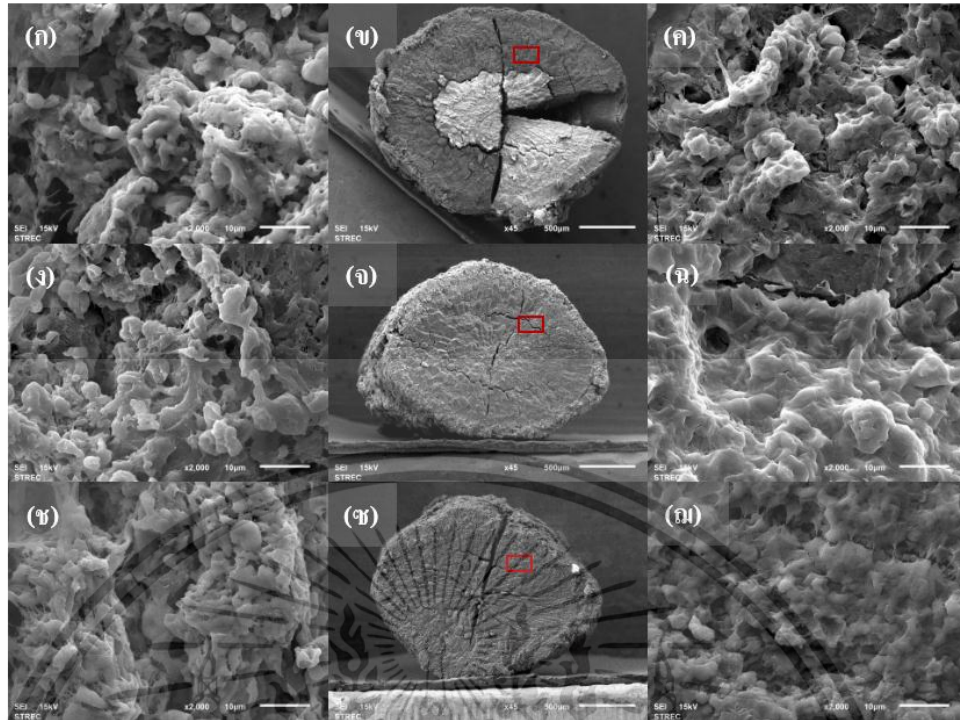
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเกิดเปลือกแข็ง (case hardening) ที่ผิวภายนอกของเมล็ดข้าว ส่งผลให้ลดการเข้าถึงของน้ำ ในขั้นตอนการคั่วข้าว นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการย่อยในหลอดทดลองในข้อที่ 4.3.1 จะพบว่าข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C จะมีปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณมากที่สุด เมื่อเทียบกับ 50 และ 60°C ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความมีรูพรุนเป็นจำนวนมากเมื่อทำการอบแห้งข้าวที่อุณหภูมิ 40°C ซึ่งรูพรุนนี้จะช่วยอำนวยความสะดวกให้เอนไซม์เข้าไปย่อยได้ง่ายมากขึ้น ส่งผลให้ข้าวถึงสำเร็จรูปมีค่าดัชนีน้ำตาลเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามจะพบว่าอุณหภูมิในการอบแห้งจะมีผลต่ออัตราการคั่วตัวของข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปเท่านั้น โดยอัตราการคั่วตัวของข้าวหอมปทุมและข้าวเส้าให้ถึงสำเร็จรูปจะไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เมื่อมีการแปรอุณหภูมิในการอบ นั่นอาจเป็นเพราะลักษณะพื้นผิวและลักษณะรูพรุนของข้าวหอมปทุม และข้าวเส้าให้ถึงสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกันจะมีลักษณะคล้ายกันดังแสดงในภาพที่ 4.21 และ 4.22

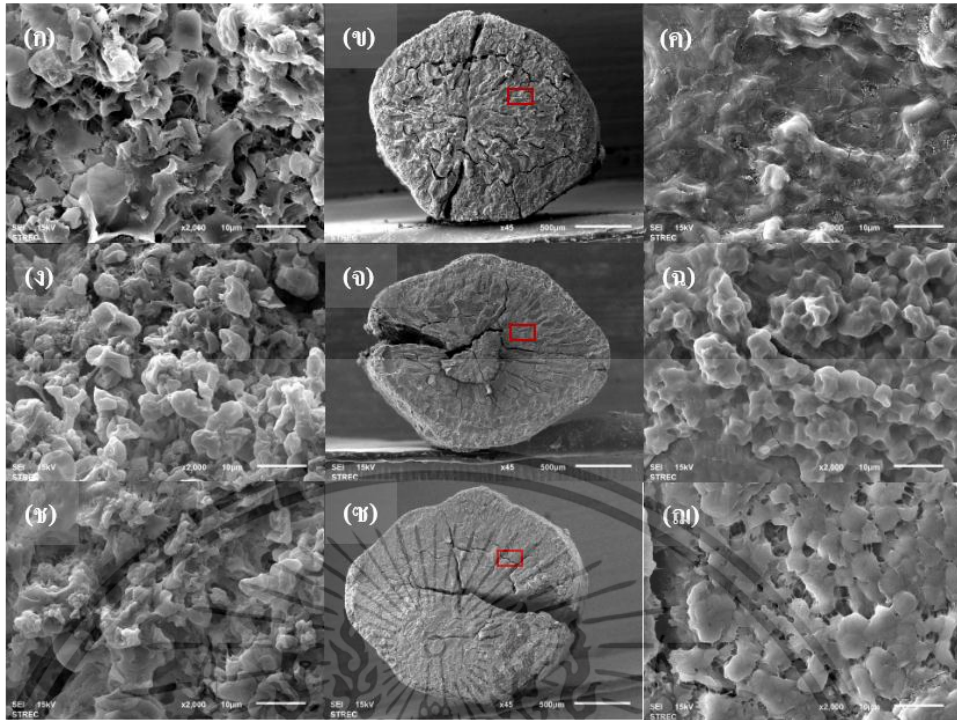
4.3.5 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อ โครงสร้างทางจุลภาคและพื้นผิวของข้าวถึงสำเร็จรูป

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิการอบแห้งที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาคและพื้นผิวของข้าวถึงสำเร็จรูป 3 ชนิด ได้แก่ ข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวเส้าให้ โดยจะมีการส่องดูพื้นผิวภายนอกของเมล็ดข้าวเพื่อดูลักษณะรูพรุนที่พื้นผิว และดูโครงสร้างในภาคตัดขวางของเมล็ดข้าวถึงสำเร็จรูปที่กำลัขยาย 45 และ 2000 เท่าเนื่องจากต้องการดูความเสียหายของเมล็ดข้าวในส่วนตัดขวางทั้งเมล็ด และดูลักษณะของเม็ดแป้งภายในเมล็ดข้าว โดยแสดงในภาพที่ 4.20 – 4.22



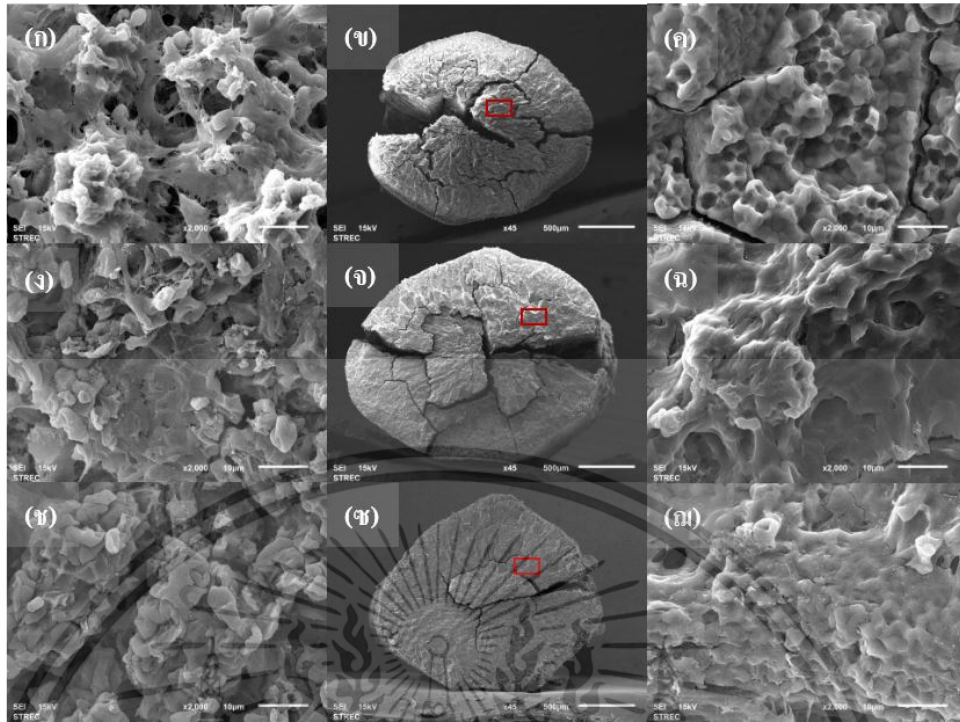
ภาพที่ 4.20 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมมะลิที่สำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งในขั้นตอนแรกที่อุณหภูมิ 40°C (ก-ค) 50°C (ง-ฉ) และ 60°C (ช-ฉ) โดยประกอบด้วยภาพพื้นผิวของเมล็ดข้าวกำลังขยาย 2000 เท่า (ก, ง, ช) ภาพส่วนตัดขวางกำลังขยาย 45 เท่า (ข, จ, ฅ) และภาพส่วนตัดขวางกำลังขยาย 2000 เท่า (ค, ฉ, ฉ)

จากภาพที่ 4.20 ที่แสดงภาพพื้นผิวและภาคตัดขวางของเมล็ดข้าวหอมมะลิที่สำเร็จรูปที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะพบว่าเมล็ดข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C จะมีรูพรุนขนาดใหญ่ และมีลักษณะเป็นโพรงที่พื้นผิวของเมล็ดข้าว (ภาพที่ 4.20ก) ซึ่งการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C จะส่งผลให้ที่ผิวของข้าวมีความแน่น และมีรูพรุนขนาดเล็กกว่า (ภาพที่ 4.20ง, ช) และเมื่อพิจารณาภาพภาคตัดขวางของเมล็ดข้าว พบว่าการอบแห้งที่ 40°C ส่งผลให้ภายในเมล็ดข้าวมีรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งรูพรุนนี้ช่วยให้น้ำสามารถเข้าไปได้ง่าย ส่งผลให้อัตราการคืนตัวสูงซึ่งแสดงในตารางที่ 4.24 นอกจากนี้รูพรุนที่พบอยู่เป็นจำนวนมากยังช่วยให้เอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยได้ง่ายมากขึ้น จึงพบว่าข้าวหอมมะลิที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C จะมีค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการอบที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C (ตารางที่ 4.21)



ภาพที่ 4.21 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งในขั้นตอนแรกที่อุณหภูมิ 40°C (ก-ค) 50°C (ง-ฉ) และ 60°C (ช-ฉ) โดยประกอบด้วยภาพพื้นผิวของเมล็ดข้าวกำลังขยาย 2000 เท่า (ก, ง, ช) ภาพส่วนตัดขวางกำลังขยาย 45 เท่า (ข, จ, ช) และภาพส่วนตัดขวางกำลังขยาย 2000 เท่า (ค, ฉ, ฉ)

จากภาพที่ 4.21 ที่แสดงภาพพื้นผิวและภาคตัดขวางของเมล็ดข้าวหอมปทุมกิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าพื้นผิวของเมล็ดข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกันจะมีลักษณะคล้ายกันคือมีรูพรุน และพื้นผิวขรุขระ ซึ่งเมื่อพิจารณาภาพพื้นผิวของข้าวเสาให้กิ่งสำเร็จรูป (ภาพที่ 4.22ก, ง, ช) ก็จะพบว่าอุณหภูมิในการอบแห้งจะไม่มีผลต่อลักษณะพื้นผิวของข้าวเช่นกัน โดยที่พื้นผิวมีลักษณะคล้ายกัน คือมีรูพรุน และมีความขรุขระ และจากภาพภาคตัดขวางของเมล็ดข้าวหอมปทุมและข้าวเสาให้ (ภาพที่ 4.21ค, ฉ, ฉ และ ภาพที่ 4.22ค, ฉ, ฉ) ก็จะพบการพองตัวของเม็ดแป้งที่เป็นองค์ประกอบอยู่ภายใน โดยเม็ดแป้งจะพองตัวและรวมเข้าด้วยกัน ซึ่งลักษณะส่วนตัดขวางนี้จะมีความคล้ายคลึงกับข้าวกิ่งสำเร็จรูปในงานวิจัยของ Hsu และคณะ (2015a)



ภาพที่ 4.22 โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวเส้าให้กิ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งในขั้นตอนแรก ที่อุณหภูมิ 40°C (ก-ค) 50°C (ง-ฉ) และ 60°C (ช-ฉ) โดยประกอบด้วยภาพพื้นผิวของ เมล็ดข้าวกำลังขยาย 2000 เท่า (ก, ง, ช) ภาพส่วนตัดขวางกำลังขยาย 45 เท่า (ข, จ, ซ) และภาพส่วนตัดขวางกำลังขยาย 2000 เท่า (ค, ฉ, ฉ)

การศึกษารูปแบบของอุณหภูมิในการอบแห้งในขั้นตอนแรกนี้ เป็นการอบแห้งในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาตินในเซชันของข้าว (ประมาณ 65 - 75 °C) ซึ่งข้าวที่เข้าอบจะมีความชื้นสูง จึงจัดว่ากระบวนการนี้เป็นการแอนนิลลิ่งเมล็ดข้าว ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของสายสสารภายในเมล็ดแป้งให้มีความเป็นระเบียบมากขึ้น เกิดเป็น โครงสร้างแบบผลึกที่มีความแข็งแรง เพื่อที่จะช่วยให้ข้าวกิ่งสำเร็จรูปมีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง โดยพบว่า การอบแห้งข้าวหอมมะลิที่อุณหภูมิสูง (50 และ 60°C) จะทำให้ข้าวกิ่งสำเร็จรูปมีค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณลดลง เนื่องจากการอบที่อุณหภูมินี้จะส่งผลให้โมเลกุลสสารที่อยู่ในเกิดการจัดเรียงตัวอย่างแข็งแรงมากกว่า ซึ่งสามารถดูได้จากค่า ΔH ที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูง โดยค่านี้สามารถบ่งบอกถึงการใช้พลังงานที่มากขึ้นเพื่อเจลาตินไนซ์โครงสร้างที่มีความแข็งแรง นอกจากนี้การอบแห้งข้าวหอมมะลิที่อุณหภูมิสูงยังส่งผลให้พื้นผิวของข้าวมีรูพรุนน้อยกว่า มีความแน่นมากขึ้น ซึ่งช่วยลดการเข้าไปย่อยโดยเอนไซม์ได้ ค่าดัชนีน้ำตาลจึงลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการอบที่มีต่อสมบัติทางการย่อย และลักษณะของข้าวหอมปทุม และข้าวเส้าให้ จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบไม่มีผลต่อสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวทั้งสองชนิด โดยโครงสร้างภายในข้าวที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออบที่อุณหภูมิต่ำจะไม่มี ความแตกต่างกัน นอกจากนี้ลักษณะพื้นผิว และ โครงสร้างภาคตัดขวางของข้าวทั้งสองชนิดเมื่อทำการอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีลักษณะคล้ายคลึงกัน จึงทำให้ค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวที่อบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การเพิ่มอุณหภูมิ และลดสัดส่วนของน้ำต่อข้าวสารในขั้นตอนการให้ความร้อนข้าว จะส่งผลให้ข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูป ข้าวหอมปทุมถึงสำเร็จรูป และข้าวเส้าให้ถึงสำเร็จรูปมี ปริมาณสารซ้อยเร็วเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่สารซ้อยที่ถูกลดได้ช้า และสารซ้อยหน่ยมีปริมาณลดลง นอกจากนี้ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อน และลด สัดส่วนของน้ำต่อข้าวสาร โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวและ แดก สายสสารซ้อยที่อยู่ภายในเม็ดแป้งหลุดออกมาภายนอก ส่งผลให้เม็ดแป้งเกิดความเสียหาย ซึ่ง สามารถพิจารณาได้จากค่าความหนืดสูงสุด (PV) ที่เพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งการให้ความร้อนสูง และใช้ เวลาในการให้ความร้อนนานจะทำให้เกิดรอยแตกที่ผิวหน้าของเมล็ดข้าว ซึ่งเอื้ออำนวยต่อการเข้า ไปย่อยของเอนไซม์ จึงทำให้ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณเพิ่มขึ้น โดยสถานะในการให้ความร้อน เพื่อแปรรูปข้าวถึงสำเร็จรูปที่มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลงคือ การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 82°C ร่วมกับน้ำ ที่สัดส่วน 1.9 ของน้ำหนักแห้งของข้าว

5.1.2 การหุงข้าวร่วมกับน้ำมันจะช่วยลดค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของข้าวถึงสำเร็จรูป ได้ เนื่องจากก่อให้เกิด โครงสร้างเชิงของอะมิโลสและไขมันขึ้น ซึ่งโครงสร้างนี้มีความแข็งแรง และทนต่อการย่อยของเอนไซม์ นอกจากนี้จะพบว่าชนิดและปริมาณน้ำมันที่เหมาะสมต่อการทำให้ เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนมากที่สุดจะขึ้นอยู่กับชนิดของข้าวด้วย การใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 7.5 ของ น้ำหนักข้าว ส่งผลให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนมากที่สุดในข้าวหอมมะลิ ในส่วนของข้าวหอมปทุม การใส่น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันรำข้าวร้อยละ 5 ของน้ำหนักข้าวจะมีความเหมาะสมมากที่สุด ในขณะที่การใส่น้ำมันรำข้าวร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักข้าว ก่อให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อนมากที่สุดใน ข้าวเส้าให้

5.1.3 อุณหภูมิการอบแห้งในขั้นแรกจะมีผลต่อสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง และ ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณในข้าวหอมมะลิเท่านั้น ซึ่งการอบแห้งข้าวหอมมะลิที่ผ่านการหุงสุก โดยใช้อุณหภูมิ 50 – 60°C จะทำให้มีค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C ซึ่งการลดลงของค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณนี้เป็นผลมาจากกระบวนการแอนนิลลิงที่ทำให้ โครงสร้างสสารซ้อยเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่มีความแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิในการอบแห้งที่มี ความเหมาะสมต่อข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปคือ 50 – 60°C อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาข้าวหอมปทุม และข้าวเส้าให้จะพบว่าการแปรอุณหภูมิการอบแห้งไม่มีผลต่อค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ อัตรา

การกินตัว และลักษณะพื้นผิวของเมล็ดข้าวถึงสำเร็จรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพในหลอดทดลอง และค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ ภายหลังจากการหุงข้าวเสร็จ และหลังจากการแช่เย็น เพื่อดูผลกระทบของกระบวนการต่าง ๆ ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ และค่าดัชนีน้ำตาลของข้าว

5.2.2 ควรมีการวิเคราะห์คุณภาพในด้านของการรับประทานของข้าวถึงสำเร็จรูปมาเป็นตัวแปรตามร่วมกับค่าดัชนีน้ำตาลเพื่อให้ได้สภาวะการหุงที่เหมาะสมในการแปรรูปข้าวถึงสำเร็จรูปลดค่าดัชนีน้ำตาลที่มีความอร่อย สามารถรับประทานได้ และได้รับการยอมรับจากผู้บริโภค

5.2.3 ควรมีการศึกษาต่อยอดในเรื่องของการเพิ่ม โครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันภายในข้าวถึงสำเร็จรูป โดยทำการเติมกรดไขมันอิสระชนิดต่าง ๆ ลงไปในระหว่างการหุงข้าว เนื่องจากกรดไขมันจะสามารถเข้าไปจับกับสายอะมิโลสได้ดีกว่า

5.2.4 ในขั้นตอนการหุงข้าวร่วมกับน้ำมันควรใช้อุณหภูมิและสัดส่วนน้ำที่ส่งผลให้เกิดรูพรุนจำนวนมากภายในเมล็ดข้าว เพื่อให้ไขมันสามารถแทรกซึมเข้าไปจับกับสายอะมิโลสภายในเมล็ดข้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 6

สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

ตีพิมพ์ผลงานเรื่อง Optimization of Processing Condition of Instant Rice to Lower the Glycemic Index. ลงในวารสาร Journal of Food Science ที่อยู่ในฐานข้อมูล ISI โดยผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์แสดงอยู่ในภาคผนวก ก

ตีพิมพ์ผลงานเรื่อง Effect of Oil Addition on *In Vitro* Starch Digestibility and Physicochemical Properties of Instant rice. ลงในวารสาร International Journal of Agricultural Technology ฉบับที่ 14 เดือน ธันวาคม 2561 ซึ่งอยู่ในฐานข้อมูล Scopus โดยผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์แสดงอยู่ในภาคผนวก ข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- งามชื่น คงเสรี. 2530. คุณภาพข้าว. เอกสารประกอบคำบรรยาย: การสัมมนาเทคโนโลยีเพื่อการส่งออกสินค้าเกษตรและปศุสัตว์. กรุงเทพฯ: กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์.
- งามชื่น คงเสรี. 2545. คุณภาพข้าวและการตรวจสอบข้าวปนเปื้อนในข้าวมะลิไทย. กรุงเทพฯ : กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- จิรนาถ บุญคง. 2553. Resistant Starch แป้งที่มีบทบาทต่อสุขภาพ. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร. มหาวิทยาลัยสยาม. 6(1): 1-8.
- ชาลินี ทนันทชัย. 2556. ศักยภาพของประเภทของแป้งด้านทานในการกระตุ้นการเจริญของแบคทีเรียในลำไส้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาเทคโนโลยีอาหาร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นิรนาม. โครงสร้างของเมล็ดข้าว. [Online]. เข้าถึงได้จาก : www.ricethailand.go.th/rkb/varieties. 2561.
- นิรนาม. โครงสร้างโมเลกุลของอะมิโลเพกติน. [Online]. เข้าถึงได้จาก : www.smartkitchen.com/resources/amylopectin. 2561.
- นิรนาม. โครงสร้างโมเลกุลของอะมิโลส. [Online]. เข้าถึงได้จาก : www.smartkitchen.com/resources/amylose. 2561.
- บริสุทธิ์ สมฤทธิ์. 2537. ข้าวญี่ปุ่นในประเทศไทย. ข้าวสารเกษตรศาสตร์. 39(4): 1-5.
- ปริศนา สุวรรณภรณ์. 2561. การตัดแปรสตาร์ชทางกายภาพและการประยุกต์ใช้ในอาหาร. กรุงเทพฯ : พรทรัพย์การพิมพ์.
- ยุทธนา พิมพ์ศิริผล 2561. การลดค่าดัชนีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์อาหาร. กรุงเทพฯ : แคนเน็กซ์อินเตอร์คอร์ปอเรชั่น.
- รัชดา เกรสซี่ 2558. โรคเบาหวาน: ความรู้พื้นฐานและการตรวจทางห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้อง. เชียงใหม่ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- วรรณดา ตูลยชัย. 2551. เหมื่ออาหารของคาร์โบไฮเดรต. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิภา สุโรจนะเมธากุล. 2549. ค่าดัชนีไกลเซมิกของอาหาร. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. วารสารอาหาร. 36(3): 183-187.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วิภาวี สัจฉกิจ. 2547. ผลของการเตรียมข้าวและการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพของข้าวถึงสำเร็จรูป. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมอาหาร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. 2532. **เคมีทางธัญญาหาร**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. 2556. **ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Ai, Y., Hasjim, J., and Jane, J. L. 2013. Effects of lipids on enzymatic hydrolysis and physical properties of starch. **Carbohydr Polym.** 92(1): 120-127.
- Annor, G. A., Marcone, M., Corredig, M., Bertoft, E., and Seetharaman, K. 2015. Effects of the amount and type of fatty acids present in millets on their in vitro starch digestibility and expected glycemic index (eGI). **Journal of Cereal Science.** 64: 76-81.
- Becker, A., Hill, S. E., and Mitchell, J. R. 2001. Relevance of amylose-lipid complexes to the behaviour of thermally processed starches. **Starch-Stärke.** 53(3-4): 121-130.
- Bhatnagar, A., Prasanth Kumar, P., Hemavathy, J., and Gopala Krishna, A. 2009. Fatty acid composition, oxidative stability, and radical scavenging activity of vegetable oil blends with coconut oil. **Journal of the American Oil Chemists' Society.** 86(10): 991-999.
- Briffaz, A., Mestres, C., Escoute, J., Lartaud, M., and Dornier, M. 2012. Starch gelatinization distribution and peripheral cell disruption in cooking rice grains monitored by microscopy. **Journal of Cereal Science.** 56(3): 699-705.
- Chang, U. J., Hong, Y. H., Jung, E. Y., and Suh, H. J. 2014. Rice and the Glycemic Index. In V. R. Preedy & S. Zibadi (Eds.), **Wheat and Rice in Disease Prevention and Health** (pp. 357-363). San Diego: Academic Press.
- Chung, H. J., Lim, H. S., and Lim, S. T. 2006. Effect of partial gelatinization and retrogradation on the enzymatic digestion of waxy rice starch. **Journal of Cereal Science.** 43(3): 353-359.
- Chung, H. J., Liu, Q., Lee, L., and Wei, D. 2011. Relationship between the structure, physicochemical properties and in vitro digestibility of rice starches with different amylose contents. **Food Hydrocolloids.** 25(5): 968-975.
- Englyst, H. N., Kingman, S. M., and Cummings, J. H. 1992. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. **European Journal of Clinical Nutrition.** 46: 33-50.

- Fardet, A., Hoebler, C., Armand, M., Lairon, D., and Barry, J. L. 1999. In vitro starch degradation from wheat-based products in the presence of lipid complex emulsions. **Nutrition Research**. 19(6): 881-892.
- Farooq, A. M., Dhital, S., Li, C., Zhang, B., and Huang, Q. 2018. Effects of palm oil on structural and in vitro digestion properties of cooked rice starches. **International Journal of Biological Macromolecules**. 107: 1080-1085.
- Goñi, I., Garcia-Alonso, A., and Saura-Calixto, F. 1997. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. **Nutrition Research**. 17(3): 427-437.
- Gopala Krishna, A., Hemakumar, K., and Khatoon, S. 2006. Study on the composition of rice bran oil and its higher free fatty acids value. **Journal of the American Oil Chemists' Society**. 83(2): 117-120.
- Hagenimana, A., Ding, X., and Fang, T. 2006. Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. **Journal of Cereal Science**. 43(1): 38-46.
- Haralampu, S. G. 2000. Resistant starch—a review of the physical properties and biological impact of RS3. **Carbohydrate Polymers**. 41(3): 285-292.
- Horndok, R., and Noomhorm, A. 2007. Hydrothermal treatments of rice starch for improvement of rice noodle quality. **LWT - Food Science and Technology**. 40(10): 1723-1731.
- Hsu, R. J. C., Chen, H. J., Lu, S., and Chiang, W. 2015a. Effects of cooking, retrogradation and drying on starch digestibility in instant rice making. **Journal of Cereal Science**. 65(Supplement C): 154-161.
- Hsu, R. J. C., Lu, S., Chang, Y. h., and Chiang, W. 2015b. Effects of added water and retrogradation on starch digestibility of cooked rice flours with different amylose content. **Journal of Cereal Science**. 61: 1-7.
- Hu, P., Zhao, H., Duan, Z., Linlin, Z., and Wu, D. 2004. Starch digestibility and the estimated glycemic score of different types of rice differing in amylose contents. **Journal of Cereal Science**. 40(3): 231-237.
- Jacobs, H., Eerlingen, R. C., and Delcour, J. A. 1996. Factors Affecting the Visco-Amylograph and Rapid Visco-Analyzer Evaluation of the Impact of Annealing on Starch Pasting Properties. **Starch - Stärke**. 48(7-8): 266-270.

- Jayakody, L., and Hoover, R. 2008. Effect of annealing on the molecular structure and physicochemical properties of starches from different botanical origins – A review. **Carbohydrate Polymers**. 74(3): 691-703.
- Jenkins, D., Wolever, T., Taylor, R. H., Barker, H., Fielden, H., Baldwin, J. M., . . . Goff, D. V. 1981. Glycemic index of foods: a physiological basis for carbohydrate exchange. **The American journal of clinical nutrition**. 34(3): 362-366.
- Kaur, B., Ranawana, V., and Henry, J. 2016. The Glycemic Index of Rice and Rice Products: A Review, and Table of GI Values. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 56(2): 215-236.
- Kaur, K., and Singh, N. 2000. Amylose-lipid complex formation during cooking of rice flour. **Food Chemistry**. 71(4): 511-517.
- Kawai, K., Takato, S., Sasaki, T., and Kajiwara, K. 2012. Complex formation, thermal properties, and in-vitro digestibility of gelatinized potato starch–fatty acid mixtures. **Food Hydrocolloids**. 27(1): 228-234.
- Lee, E., and Wissgott, U. (2001). Instant soakable rice: United States Patent.
- Lee, S. W., Lee, J. H., Han, S. H., Lee, J. W., and Rhee, C. 2005. Effect of Various Processing Methods on the Physical Properties of Cooked Rice and on in vitro Starch Hydrolysis and Blood Glucose Response in Rats. **Starch - Stärke**. 57(11): 531-539.
- Lehmann, U., and Robin, F. 2007. Slowly digestible starch – its structure and health implications: a review. **Trends in Food Science & Technology**. 18(7): 346-355.
- Luangmalawat, P., Prachayawarakorn, S., Nathakaranakule, A., and Soponronnarit, S. 2008. Effect of temperature on drying characteristics and quality of cooked rice. **LWT - Food Science and Technology**. 41(4): 716-723.
- Marinopoulou, A., Papastergiadis, E., Raphaelides, S. N., and Kontominas, M. G. 2016. Structural characterization and thermal properties of amylose-fatty acid complexes prepared at different temperatures. **Food Hydrocolloids**. 58: 224-234.
- Miller, J. B., Pang, E., and Bramall, L. 1992. Rice: a high or low glycemic index food? **The American journal of clinical nutrition**. 56(6): 1034-1036.
- Nanri, A., and Mizoue, T. 2014. Rice and Type 2 Diabetes. In V. R. Preedy & S. Zibadi (Eds.), **Wheat and Rice in Disease Prevention and Health** (pp. 347-355). San Diego: Academic Press.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Ogawa, Y., Glenn, G. M., Orts, W. J., and Wood, D. F. 2003. Histological Structures of Cooked Rice Grain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 51(24): 7019-7023.
- Park, E. Y., Baik, B. K., and Lim, S. T. 2009. Influences of temperature-cycled storage on retrogradation and in vitro digestibility of waxy maize starch gel. **Journal of Cereal Science**. 50(1): 43-48.
- Prasert, W., and Suwannaporn, P. 2009. Optimization of instant jasmine rice process and its physicochemical properties. **Journal of Food Engineering**. 95(1): 54-61.
- Putseys, J. A., Lamberts, L., and Delcour, J. A. 2010. Amylose-inclusion complexes: Formation, identity and physico-chemical properties. **Journal of Cereal Science**. 51(3): 238-247.
- Rewthong, O., Soponronnarit, S., Taechapiroj, C., Tungtrakul, P., and Prachayawarakorn, S. 2011. Effects of cooking, drying and pretreatment methods on texture and starch digestibility of instant rice. **Journal of Food Engineering**. 103(3): 258-264.
- Shin, S. I., Lee, C. J., Kim, M. J., Choi, S. J., Choi, H. J., Kim, Y., and Moon, T. W. 2009. Structural characteristics of low-glycemic response rice starch produced by citric acid treatment. **Carbohydrate Polymers**. 78(3): 588-595.
- Singh, J., Dartois, A., and Kaur, L. 2010. Starch digestibility in food matrix: a review. **Trends in Food Science & Technology**. 21(4): 168-180.
- Sopade, P. A. 2017. Cereal processing and glycaemic response. **International Journal of Food Science and Technology**. 52(1): 22-37.
- Srikaeo, K., and Sopade, P. A. 2010. Functional properties and starch digestibility of instant Jasmine rice porridges. **Carbohydrate Polymers**. 82(3): 952-957.
- Sripinyowanich, J., and Noomhorm, A. 2013. Effects of Freezing Pretreatment, Microwave-Assisted Vibro-Fluidized Bed Drying and Drying Temperature on Instant Rice Production and Quality. **Journal of Food Processing and Preservation**. 37(4): 314-324.
- Stute, R. 1992. Hydrothermal Modification of Starches: The Difference between Annealing and Heat/Moisture -Treatment. **Starch - Stärke**. 44(6): 205-214.
- Tang, M. C., and Copeland, L. 2007. Analysis of complexes between lipids and wheat starch. **Carbohydrate Polymers**. 67(1): 80-85.
- Wang, S., Li, P., Zhang, T., Yu, J., Wang, S., and Copeland, L. 2017. In vitro starch digestibility of rice flour is not affected by method of cooking. **LWT - Food Science and Technology**. 84: 536-543.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Wani, A. A., Singh, P., Shah, M. A., Schweiggert-Weisz, U., Gul, K., and Wani, I. A. 2012. Rice Starch Diversity: Effects on Structural, Morphological, Thermal, and Physicochemical Properties-A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. 11(5): 417-436.
- Wongsa, J., Uttapap, D., Lamsal, B. P., and Rungsardthong, V. 2016. Effect of puffing conditions on physical properties and rehydration characteristic of instant rice product. **International Journal of Food Science and Technology**. 51(3): 672-680.
- Zavareze, E. d. R., and Dias, A. R. G. 2011. Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: A review. **Carbohydrate Polymers**. 83(2): 317-328.
- Zhang, G., and Hamaker, B. R. 2009. Slowly Digestible Starch: Concept, Mechanism, and Proposed Extended Glycemic Index. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 49(10): 852-867.
- Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., and Blanchard, C. 2007. Effect of the addition of fatty acids on rice starch properties. **Food Research International**. 40(2): 209-214.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

ผลงานเรื่อง Optimization of Processing Condition of Instant Rice to Lower the Glycemic Index. ตีพิมพ์ลงในวารสาร Journal of Food Science ที่อยู่ในฐานข้อมูล ISI



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

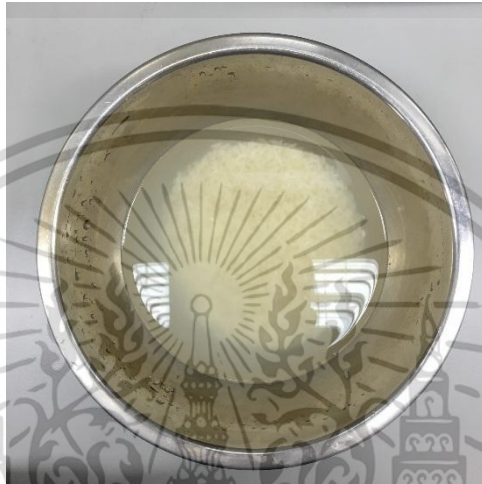
ผลงานเรื่อง Effect of Oil Addition on *In Vitro* Starch Digestibility and Physicochemical Properties of Instant rice. ลงในวารสาร International Journal of Agricultural Technology ฉบับที่ 14 เดือน ธันวาคม 2561 ซึ่งอยู่ในฐานข้อมูล Scopus



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
กระบวนการแปรรูปข้าวกล้องสำเร็จรูป

ค1 กระบวนการแปรรูปข้าวกล้องสำเร็จรูป



1. นำข้าวสารมาล้างทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มาจากข้าวสาร จากนั้นแช่ข้าวในน้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



2. นำข้าวที่ผ่านการแช่ไปให้ความร้อนโดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิน้ำ (water bath) โดยใช้อุณหภูมิระดับน้ำ และเวลาที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



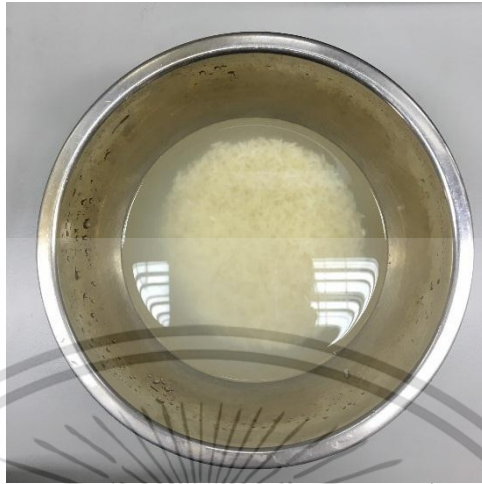
3. เมื่อข้าวสุกแล้วจะนำข้าวสุกที่ได้มาทำการล้างด้วยน้ำเย็นเพื่อป้องกันการเกาะติดกันของเมล็ดข้าว จากนั้นบรรจุข้าวสุกลงไปในถุงพลาสติก PE และนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



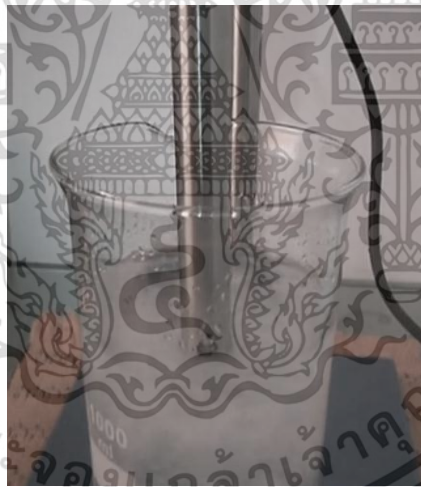
4. เมื่อครบกำหนดเวลาการแช่เย็นแล้วจะนำข้าวที่ได้มาอบให้แห้งโดยใช้อุณหภูมิ 2 ระดับคือ 50°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบแห้งที่ 95°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ได้ข้าวถึงสำเร็จรูปที่มีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 11-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค2 กระบวนการแปรรูปข้าวถึงสำเร็จรูปที่มีการเติมน้ำมันในขั้นตอนการหุง



1. นำข้าวสารมาล้างทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มาจากข้าวสาร จากนั้นแช่ข้าวในน้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



2. เติมน้ำมันที่ใช้ในการศึกษาลงไปในน้ำที่ใช้สำหรับหุงข้าวจากนั้นใช้เครื่องสอโมจิในชั่งน้ำหนักกับน้ำมันให้กลายเป็นอิมัลชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3. นำส่วนผสมของน้ำกับน้ำมันใส่ลงไปในช่วงที่ผ่านการแช่มาแล้วเรียบร้อยแล้ว ข้าวและส่วนผสมของน้ำกับน้ำมันจะถูกให้ความร้อนด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้อุณหภูมิ และเวลาที่กำหนด



4. เมื่อให้ความร้อนจนข้าวสุกแล้วจะนำข้าวสุกที่ได้มาบรรจุลงไปในถุงพลาสติก PE และนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



5. ข้าวที่ผ่านการแช่เย็นมาอบให้แห้งโดยใช้อุณหภูมิ 2 ระดับคือ 50°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงจากนั้น

นำไปอบแห้งที่ 95°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยูเอตให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

สมบัติทางความร้อนของข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการหุงและนำไปแช่เย็น

ตารางที่ ง-1 สมบัติทางความร้อนของข้าวที่ผ่านกระบวนการต่าง ๆ

ชนิดข้าว	กระบวนการ	สมบัติทางความร้อน			
		T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH (J/g)
ข้าวหอมมะลิ	ไม่ผ่านกระบวนการ	65.13 ± 0.03 ^b	71.20 ± 0.99 ^b	77.14 ± 0.46 ^b	2.65 ± 0.51 ^d
	ผ่านกระบวนการหุงที่สภาวะเหมาะสม	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	ผ่านกระบวนการแช่เย็นที่ 4°C	68.15 ± 0.29 ^c	74.12 ± 0.23 ^c	80.25 ± 0.76 ^d	0.18 ± 0.01 ^a
ข้าวหอมปทุม	ไม่ผ่านกระบวนการ	65.40 ± 0.56 ^b	71.73 ± 0.82 ^b	78.92 ± 0.60 ^c	2.90 ± 0.01 ^d
	ผ่านกระบวนการหุงที่สภาวะเหมาะสม	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	ผ่านกระบวนการแช่เย็นที่ 4°C	67.76 ± 0.04 ^c	74.11 ± 0.23 ^c	81.11 ± 0.02 ^d	0.28 ± 0.01 ^a
ข้าวเสาไห้	ไม่ผ่านกระบวนการ	74.70 ± 0.04 ^d	78.14 ± 0.02 ^d	83.44 ± 0.15 ^e	1.23 ± 0.04 ^c
	ผ่านกระบวนการหุงที่สภาวะเหมาะสม	56.61 ± 0.25 ^a	60.38 ± 0.11 ^a	64.18 ± 0.21 ^a	0.09 ± 0.00 ^a
	ผ่านกระบวนการแช่เย็นที่ 4°C	78.26 ± 0.09 ^e	82.93 ± 0.01 ^e	87.04 ± 0.56 ^f	0.70 ± 0.02 ^b

หมายเหตุ: ^{a-f} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

T_o หมายถึง อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาทีโนเซชัน (onset temperature)

T_p หมายถึง อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (peak temperature)

T_c หมายถึง อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (conclusion temperature)

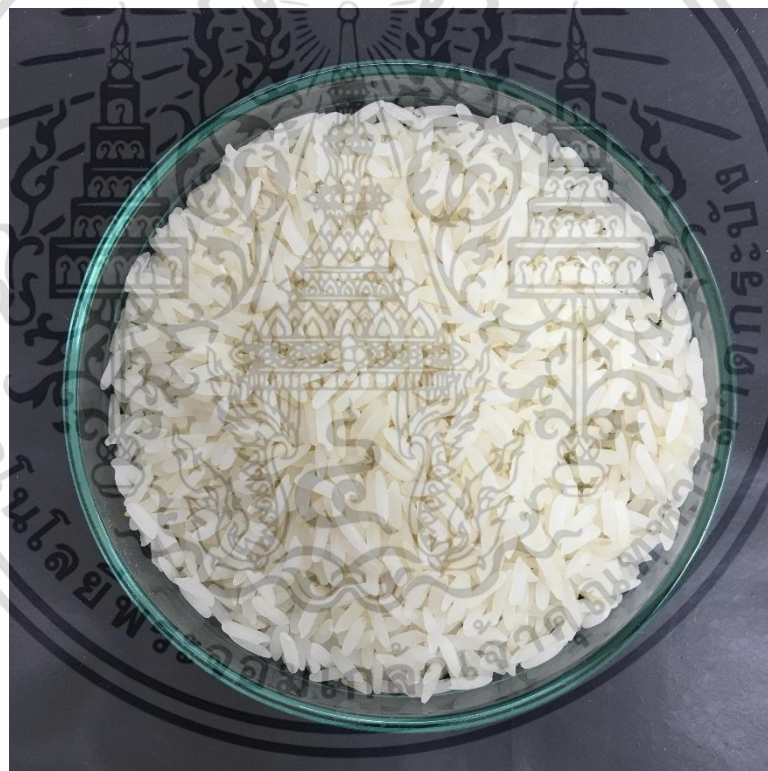
ΔH หมายถึง พลังงานในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (enthalpy)

ภาคผนวก จ

ลักษณะและปริมาณอะมิโลสของข้าวชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ จ-1 ลักษณะและปริมาณอะมิโลสของข้าวชนิดต่าง ๆ

ชนิดข้าว	ปริมาณอะมิโลส (ร้อยละ)	ลักษณะเมล็ดข้าว
หอมมะลิ	14.38	เมล็ดเรียวยาว สีขาว
หอมปทุม	17.26	เมล็ดเรียวยาว สีขาว มีเมล็ดที่หักอยู่เล็กน้อย
เสาไห้	21.35	เมล็ดเรียวยาว สีขาว มีสีขาวงุ่นอยู่เล็กน้อย

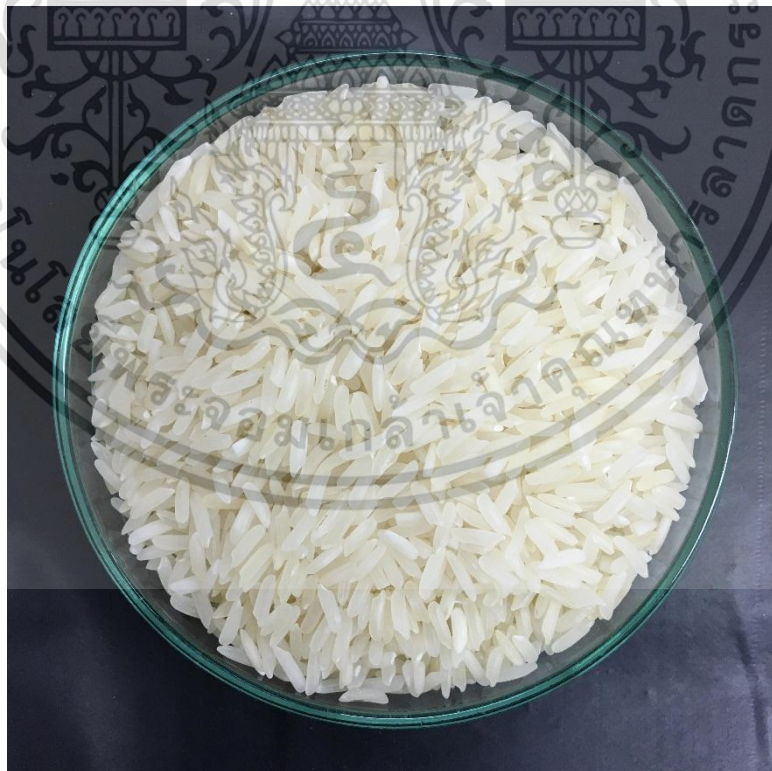


ภาพที่ จ-1 ลักษณะเมล็ดข้าวหอมมะลิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ จ-2 ลักษณะเมล็ดข้าวหอมปทุม



ภาพที่ จ-3 ลักษณะเมล็ดข้าวเส้าไห้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส (Juliano, 1971)

การเตรียมสารละลายมาตรฐานอะมิโลส

1. ชั่งอะมิโลสบริสุทธิ์ 0.040 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นประมาณ 95 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าเบา ๆ ระวังอย่าให้อะมิโลสเกาะที่ผนังขวด
3. เติมน้ำกลั่นโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 9 มิลลิลิตร
4. กวนของเหลวในขวดด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้านาน 10 นาที
5. นำแท่งแม่เหล็กออก และล้างส่วนที่ติดกับแท่งแม่เหล็กกลับมาลงในขวดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

การเตรียมตัวอย่าง

1. บดเมล็ดข้าวด้วยเครื่องบดแห้ง จากนั้นร่อนผ่านตะแกรง
2. ชั่งตัวอย่าง 0.1000 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
3. เติมน้ำกลั่นขึ้นตอนการเตรียมสารละลายมาตรฐานอะมิโลสในข้อที่ 2 – 5

การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1. ปิเปตสารละลายจากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นประมาณ 70 มิลลิลิตร
3. ปิเปตสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร
4. ปิเปตสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร
5. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 20 นาที
6. ทำ blank เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง
7. วิเคราะห์ความเข้มสีของสารละลายโดยใช้เครื่อง spectrophotometer วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปรับค่าสารละลาย blank เท่ากับศูนย์
8. นำค่าดูดกลืนแสงที่ได้ไปหาปริมาณอะมิโลส โดยเทียบจากกราฟมาตรฐาน

การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1. ปิเปตสารละลายจากการเตรียมสารละลายมาตรฐานอะมิโลสปริมาตร 1 2 3 4 และ 5 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นประมาณ 70 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปิเปตสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ลงในขวดที่มีสารละลายมาตรฐาน ตามลำดับ
4. ปิเปตสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร
5. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 20 นาที
6. วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร และเขียนกราฟระหว่างปริมาณอะมิโลส (คิดเป็นร้อยละ 8 16 24 32 และ 40) กับค่าการดูดกลืนแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นางนภัสรพี เหลืองสกุล

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ ระดับ 7

หน่วยงานที่อยู่ คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทรศัพท์ 0 2329-8526-7 โทรสาร 0 2329-8526-7

E-mail: klarunee@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.ด	เทคโนโลยีทางอาหาร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2553
วท.ม	เทคโนโลยีทางอาหาร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2544
วท.บ.	เทคโนโลยีทางอาหาร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2535

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ : Rice products, Bread technology, Bakery technology, Cereal-based products and Fermented-cereal based products, Starch technology

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

BOOK CHAPTER:

Keeratipibul S, Luangsakul N (2012): Chinese steamed buns. In Handbook of Plant-Based Fermented Food and Beverage Technology, 2ed, edited by Y. H. Hui; E. Özgül Evranuz, CRC presss, NY.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PUBLICATIONS IN ARTICLES:

- Luangsakul, N.** 2003. Varietal Differences of Thai Glutinous Rice in relation to Quality Characteristics of Traditional Thai Rice Cracker (Khao-tan). **King Mongkut's Agricultural Journal**. 21(3), pp 55-67. (in Thai)
- Luangsakul, N.,** Kulmanoachwong, D., Chivavithunekit, P. 2004. Utilization of Skipjack Fish Bone in Traditional Thai Rice Cracker (Khao-tan) for Calcium Fortification. **King Mongkut's Agricultural Journal**. 22(1), pp 61-69. (in Thai)
- Keeratipibul, S., **Luangsakul, N.,** Lertsatchayarn, T. 2008. The effect of Thai glutinous rice cultivars, grain length and cultivating locations on the quality of rice cracker (arare). **LWT-Food Science and Technology**, 41, 1934-1943.
- Luangsakul, N,** Keeratipibul, S, Jindamorakot, S., Tanasupawat, S. 2009. Lactic acid bacteria and yeasts isolated from the starter doughs for Chinese steamed buns in Thailand. **LWT-Food Science and Technology**, 42, 1404-1412.
- Keeratipibul, S., **Luangsakul, N.,** Otsuka, S., Sakai, S., Hatano, Y., Tanasupawat, S. 2010. Application of the Chinese steamed bun starter dough (CSB-SD) in breadmaking. **Journal of Food Science**, 75, 596-604.
- Keeratipibul, S., **Luangsakul, N.,** Otsuka, S., Sakai, S., Hatano, Y., Tanasupawat, S. 2012. Effects of the amount of Chinese steamed bun starter dough (CSB-SD) and the activation time on dough and bread properties. **Journal of Food Processing and Preservation**, properties, 37, 232-244.
- Luangsakul, N.,** Supasom, B. and Yaiyen, S. 2016. Impact of the Enzymatic Modification of Rice Flours on *In Vitro* Digestibility and Molecular Properties. **Journal of Agricultural Technology**. 12(7.2): 2141-2154.
- Wongsrisiri, S and **Luangsakul, N.** 2017. Effect of setting agent on quality of tubed-package on sesame tofu. **Journal of Agricultural Technology**. 13(7.1): 1517-1526.
- Ritudomphol, O and **Luangsakul, N.** 2018. Optimization of Processing Condition of Instant Rice to Lower the Glycemic Index. **Journal of Food Science**. DOI: 10.1111/1750-3841.14406. (SJR 2017: Q1)

การเสนอผลงานวิชาการ

CONFERENCE FULL TEXT

- Chupanit, W., Mulser, C. and Luangsakul, N. 2003. **Utilization of Red Snapper Fish Bone In Butter Cookies for Calcium Fortification.** In Proceedings of the 5th Agro-Industrial Conference THAIFEX AND THAIMEX 2003. Bitec Convention Center, Bangkok. 30th-31st May, 2003: pp: 282-288. (in Thai)
- Luangsakul, N. 2004. **Effect of Processing Parameters in relation to Qualities of Traditional Thai Fried Rice Cracker (Khao-Tan).** In Proceedings of the 1st KMITL International Conference on Integation of Science and Technology for Sustainable Development. KMITL, Bangkok. Thailand. 24th-26th August, 2004: pp: 379-384.
- Luangsakul, N., Katekasem, P., Suksawang, M. and Pornanansiri, S. 2011 **The effects of the amount and type of wheat flour and mixing method on the quality of fortune cookies.** In Proceedings of the 49th Kasetsart University Annual Conference. Kasetsart University, Bangkok. Thailand. 1st-4th February, 2011: pp: 290-298. (in Thai)
- Luangsakul, N., Siamtong, A., Wongthida, T., and Punga, U. 2011. **Effects of dough sheeting, dough weight and proofing temperature on dough and bread properties using no-time dough method.** In Proceedings of The 12th Asean Food Conference 2011. BITEC Bangna, Bangkok, Thailand 16th-18th June, 2011: pp: 556-559.
- Lunnawa, P., Luangsakul, N. 2012. **Composition and physicochemical properties of starch isolated from Chinese water chestnut (*Eleocharis dulcis* Trin.).** In Proceedings of the 1st Asean plus three Graduate Research Congress (AGRC 2012). Chiang Mai, Thailand, 1st- 2nd March, 2012. pp: 422-428.
- Luangsakul, N., Ruenpirom, S., Boothsri, A. 2012. **Pasting properties of Chinese water chestnut (*Eleocharis dulcis* Trin.) starch and textural properties of its gel.** In Proceedings of the 14th Food Innovation Asia Conference 2012. BITEC Bangna, Bangkok, Thailand, 14th-15th June, 2012. pp: 37-42.
- Luangskul, N., Apiwong, P., Reungsang, M. and Kaewmon, A. 2012 **Development of freeze-dried snack from Chinese water chestnut (*Eleocharis dulcis* Trin.).** In Proceedings of the 14th Food Innovation Asia Conference 2012. BITEC Bangna, Bangkok, Thailand, 14th-15th June, 2012: pp: 318-324.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Jaikwang, K. and **Luangsakul, N.**, 2012. **Characteristics of dough and Chinese steamed bun fermented from Thai traditional fermentation starter (Loog-Pang) produce in the northern part of Thailand.** In Proceedings: The 1st KMITL Agro-Industry Conference. The Emerald Hotel, Bangkok. Thailand, 7st September, 2012 pp: 109-116. (in Thai)
- Suksawat, C. and **Luangsakul, N.** 2012. **Resistant starch content and physicochemical properties of legume flour.** In Proceedings: The 1st KMITL Agro-Industry Conference. The Emerald Hotel, Bangkok. Thailand, 7st September, 2012 pp:214-220. (in Thai)
- Rongchoung, J. and **Luangsakul, N.** 2012. **Effects of selected gluten-free flours on the qualities of gluten-free cookies.** In Proceedings: The 1st KMITL Agro-Industry Conference. The Emerald Hotel, Bangkok. Thailand, 7st September, 2012. (in Thai)
- Oamsukho, N. and **Luangsakul, N.** 2013. **Effects of various processing techniques on the in vitro starch digestibility in Pigeon Pea, Red kidney bean and Chinese water chestnut starch.** In Proceedings: The 2nd KMITL Agro-Industry Conference. The Windsor Hotel, Bangkok. Thailand, 30st August, 2013 pp: 145-151.
- Sartsara, W., and **Luangsakul, N.** 2014. Characteristics of the bread made from rice and legume flours substituted to wheat flour. In Proceedings of the **International Research Conference on Engineering and Technology (IRCET 2014)**. Ayodya resort, Bali, Indonesia, 27th-29th June, 2014. pp: 602-611.
- Supasom, B., and **Luangsakul, N.** 2014. **Comparison of *in vitro* starch digestibility between legumes, tubers and cereals.** In Proceedings of the International Research Conference on Engineering and Technology (IRCET 2014). Ayodya resort, Bali, Indonesia, 27th-29th June, 2014. pp: 612-622.
- Chomchuenjitsin, T., and **Luangsakul, N.**, 2014. **Effects of oil types on the quality of cake for vegans.** In Proceedings of the International Research Conference on Engineering and Technology (IRCET 2014). Ayodya resort, Bali, Indonesia, 27th-29th June, 2014. pp: 623-630.
- Chiralaksanakul, N. and **Luangsakul, N.** 2018. **Effects of aging egg white on quality of macaron shell.** In Proceeding of the 20th Food Innovation Asia Conference 2018, BITEC Bangna, Bangkok, Thailand, 14-16th June, 2018. pp: 23-27.

รางวัลด้านวิชาการ

Young Investigator's Award, the excellent paper of Characteristics of two cultivars of Thai glutinous rice and their application to the rice crackers (arare) in the 2nd International Symposium on Rice and Disease Prevention, 26th-27th October, 2008. Wakayama, Japan.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานสรุปโครงการ ประจำปีงบประมาณ 2561

แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ) แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ... การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องสำเร็จรูปที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ

(ภาษาอังกฤษ) ... Development of low glycemic index instant rice

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย (อ./ดร./ผศ./รศ./ศ.) ... ผศ.ดร.นภัสรพี เหลืองสกุล

ระยะเวลาดำเนินการ ... 1 ปี ... เดือน ตั้งแต่วันที่ ... 1 ต.ค. 2560 ... ถึงวันที่ ... 30 ก.ย. 2561

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดที่ 1 ... 539,495 บาท ... 85 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว) ... 22 ธ.ค. 2560

งวดที่ 2 ... 95,205 บาท ... 15 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว) ... 19 มิ.ย. 2561

ดอกเบี้ย 244.35 บาท วันที่ได้รับ 31 ธ.ค. 2560

ดอกเบี้ย 923.87 บาท วันที่ได้รับ 30 มิ.ย. 2561

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้ นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร : ค่าจ้างชั่วคราว	187,200	156,000	31,200
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน	-	-	-
ค่าใช้สอย	199,700	199,069.03	630.97
ค่าวัสดุ	247,800	293,512.93	(45,712.93)
ค่าสาธารณูปโภค	-	-	-
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	-	-	-
รวม	634,700	648,581.96	(13,881.96)

.....
(.....)

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

..... /

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา (กรณีไม่อนุญาตให้แก้ไขในระเบียบข้อบังคับ) ค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

..... /