

สมบัติเชิงหน้าที่และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องสี
และการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บบล

ปฐมพร แวคุ้ม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



FUNCTIONAL PROPERTIES AND BIOACTIVE COMPOUNDS
OF PIGMENTED BROWN RICE FLOUR AND APPLICATION
IN UBON NOODLE PRODUCT

PATOMPORN WAEWKUM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
MAJOR IN FOOD TECHNOLOGY
FACULTY OF AGRICULTURE
ACADEMIC YEAR 2020
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์

เรื่อง สมบัติเชิงหน้าที่และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องสีและการประยุกต์ใช้
ในผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บอุบล

ผู้วิจัย นางสาวปฐมพร แวคุ้ม

คณะกรรมการสอบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชฎาพร อุ่นศิริไธย์

ประธานกรรมการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตรา สิงห์ทอง

กรรมการ

ดร.วชิราพรรณ บุญญาพุทธิพงศ์

กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตรา สิงห์ทอง)

(ดร.นรินทร์ บุญพราหมณ์)

คณบดีคณะเกษตรศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2563

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตรา สิงห์ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ทางวิชาการ วิธีการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษาและชี้แนะในการทำวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และคุณธัญรัตน์ ศิริพานทอง กรรมการผู้จัดการ บริษัท เบน เบน ฟู้ด จำกัดที่ได้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยทั้งหมดภายใต้ทุนวิจัยโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชฎาพร อุ่นศิริไธย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.วชิราพรรณ บุญญาพุทธิพงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลามาทำการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำปรึกษาและช่วยแนะนำแก้ไขวิทยานิพนธ์ตลอดจนได้แนะแนวทางในการเขียนวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ศึกษาใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ในการทำวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งบุคลากร นักวิชาการที่ได้แนะนำการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ รวมทั้งพี่ เพื่อนและน้อง นักศึกษาปริญญาโทและปริญญาตรีในสาขาเทคโนโลยีการอาหาร ที่ได้ช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณครอบครัวทั้งบิดา มารดา พี่สาวและน้องสาวของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจในการผ่านอุปสรรคและสนับสนุนในการเรียนต่อปริญญาโทในครั้งนี้ ขอขอบคุณนางสาวสุภาพรรณ เวชกามา ผู้ที่เป็นคนที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุนและให้กำลังใจรวมถึงการตัดสินใจในการผ่านอุปสรรคต่าง ๆ ขอขอบคุณตัวข้าพเจ้าที่พยายามผ่านอุปสรรคที่พบเจอและสามารถแก้ไขปัญหาให้ผ่านไปได้ด้วยดี จนถึงตอนนี้ รวมทั้งเพื่อน พี่ น้องที่ตลอดจนผู้มีพระคุณที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ไม่สามารถกล่าวได้หมด ผู้ศึกษารู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและกำลังใจอันดีจากทุกท่าน จึงขอกราบขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้

ปฐมพร แวควัม
ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง : สมบัติเชิงหน้าที่และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องสีและการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บบล

ผู้วิจัย : ปฐมพร แววคุ้ม

ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา : เทคโนโลยีการอาหาร

อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตรา สิงห์ทอง

คำสำคัญ : แป้งข้าวกล้องสี, สมบัติเชิงหน้าที่, สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ, เส้นกวยจั๊บบล

ข้าวสี (Pigmented rice, colour rice) เป็นเมล็ดของพืชในสกุลข้าว (*Oryza sativa* L.) ชนิดหนึ่งที่มีการปลูกในประเทศไทย ข้าวสีมีค่อนข้างหลากหลายสายพันธุ์ ในปัจจุบันมีการบริโภคและนำข้าวสีมาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายมากขึ้น เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการที่มีประโยชน์กว่าข้าวขาว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้อง 4 สายพันธุ์ ได้แก่ แป้งข้าวกล้องหอมมะลิ แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง แป้งข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่ และแป้งข้าวกล้องหอมนิล รวมทั้งการนำแป้งข้าวกล้องสีไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บบล พบว่า แป้งข้าวกล้องสีมีองค์ประกอบทางเคมี และค่าสี (L^* , a^* และ b^*) ที่แตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) โดยในแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงจะมีปริมาณอะไมโลสสูงที่สุด (ร้อยละ 18.438) ขณะที่ปริมาณวิตามินและแร่ธาตุมีค่าใกล้เคียงกัน ลักษณะโครงสร้างและรูปร่างของแป้งข้าวกล้องสีโดยใช้กล้องจุลทรรศน์และ SEM มีลักษณะที่เป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม ขนาดไม่สม่ำเสมอและมีการเกาะตัวกัน ค่าดัชนีน้ำตาล (RAG และ eGI) มีค่าแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) แต่ SAG ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) สำหรับปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องสี พบว่าแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงมีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (11.029 mg GAE/g sample) ฟลาโวนอยด์ (60.422 mg QE/g sample) DPPH (2.538 mg TEAC/g sample) FRAP (24.991 mg Fe^{2+} /g sample) และ ABTS (10.299 mg TEAC/g sample) สูงที่สุด ($p \leq 0.05$) ส่วนปริมาณสารแอนโทไซยานินจะพบมากที่สุดในแป้งข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่ (33.410 mg CyE/g sample) จากการวิเคราะห์สมบัติแป้งเปียก พบว่าแป้งข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่จะมี pasting temperature สูงที่สุด (77°C) แป้งข้าวกล้องหอมมะลิจะมีค่า peak viscosity สูงที่สุด (2615 cPs) ขณะที่แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงจะมี final viscosity (3762 cPs) breakdown (853 cPs) และ setback (2071 cPs) สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่าแป้งข้าวกล้องหอมนิลจะมีค่า T_o (66.51°C) T_p (72.80°C) และ T_e (79.34°C) สูงที่สุด ($p \leq 0.05$) ส่วนค่าเอนทาลปีไม่พบความแตกต่าง ($p > 0.05$) จากการศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งข้าวกล้องสีพบว่า มีค่าการดูดซับน้ำ ค่าการละลายและการดูดซับน้ำมัน ค่ากำลังการพองตัวและการละลายใกล้เคียงกัน ขณะที่การละลายของโปรตีน ความสามารถในการเกิดโฟม ความคงตัวของโฟม และความคงตัวของอิมัลชันในแป้งข้าวกล้องหอมนิลจะมีค่าสูงที่สุด (ร้อยละ 6.523, 11.667, 3.810 และ 81.917 ตามลำดับ) ส่วนแป้งข้าวกล้องหอมมะลิจะมีความสามารถในการเกิดอิมัลชันสูงที่สุด (ร้อยละ 27.083) สำหรับความคงตัวต่อการ

แช่แข็งและการสูญเสียน้ำพบว่า แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงจะมีการสูญเสียน้ำสูงที่สุด ($p \leq 0.05$) และ แป้งข้าวกล้องหอมมะลิจะมีความคงตัวมากที่สุด จากนั้นนำแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงมาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บอุบลพบว่า การใช้แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงร้อยละ 10 ร่วมกับการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ จะส่งผลต่อค่าคุณภาพการต้มสุก ลักษณะด้านเนื้อสัมผัส และการยอมรับของผู้บริโภคที่ดีที่สุดและไม่แตกต่างกับเส้นกวยจั๊บสูตรควบคุม เส้นกวยจั๊บเสริมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงมีอายุการเก็บรักษาไม่เกิน 3 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ($30 \pm 2^\circ\text{C}$) และไม่เกิน 3 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิตู้เย็น ($4-10^\circ\text{C}$) ทั้งบรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศและโพรลัมโฟลิดีน จากนั้นนำมาศึกษากระบวนการผลิตเส้นกวยจั๊บเสริมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงถึงสำเร็จรูปพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 60 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เส้นกวยจั๊บมีค่าคุณภาพการต้มสุก ลักษณะด้านเนื้อสัมผัส และการยอมรับของผู้บริโภคใกล้เคียงกับเส้นสดมากที่สุด สำหรับการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างของเส้นกวยจั๊บเสริมข้าวกล้องหอมมะลิแดงโดยใช้ SEM พบว่าเส้นกวยจั๊บถึงสำเร็จรูปมีรูพรุนจำนวนมากและขนาดใหญ่ เมื่อนำมาทำการคั้นตัวสามารถคั้นตัวด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 5 นาที และไม่โครเวฟที่เวลา 4 นาที โดยส่งผลให้เส้นกวยจั๊บมีค่าคุณภาพการต้มสุก ลักษณะด้านเนื้อสัมผัส และการยอมรับของผู้บริโภคใกล้เคียงกับเส้นสดมากที่สุด ดังนั้น การใช้แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงสามารถเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะปรับปรุงคุณภาพของเส้นกวยจั๊บอุบลในด้านโภชนาการและช่วยเพิ่มมูลค่าของเส้นกวยจั๊บอุบล

ABSTRACT

TITLE : FUNCTIONAL PROPERTIES AND BIOACTIVE COMPOUNDS OF PIGMENTED BROWN RICE FLOUR AND APPLICATION IN UBON NOODLE PRODUCT

AUTHOR : PATOMPORN WAEWKUM

DEGREE : MASTER OF SCIENCE FOOD TECHNOLOGY

MAJOR : FOOD TECHNOLOGY

ADVISOR : ASST. PROF. JITTRA SINGTHONG, Ph.D.

KEYWORDS : PIGMENTED BROWN RICE FLOUR, FUNCTIONAL PROPERTIES, BIOACTIVE COMPOUNDS, UBON NOODLE PRODUCT

Pigmented rice (Color rice) is a seed of the rice genus (*Oryza sativa* L.) that is grown in Thailand. There are different varieties of pigmented rice. Currently pigmented rice is consumed and applied in a variety of products because it has more nutritional value than white rice. The aim of this study is to investigate physicochemical and functional properties including bioactive compounds and antioxidant functions of pigmented brown rice flour from four varieties (Jasmine brown, Red jasmine brown, Riceberry brown and Homnil brown rice) including brown rice flour applied to Ubon noodles. Proximate analysis and color (L^* , a^* and b^*) of all samples were significantly different ($p \leq 0.05$). The highest amylose content was found in red jasmine brown rice flour (18.438%). The vitamin and mineral content of the pigmented brown rice flours were similar. Morphological characteristics of pigmented rice flour using a light microscope and SEM were in a polyhedral shape, irregular size and agglomeration in all brown rice flours. The glycemic index (RAG and eGI) was analyzed and all samples were found to be significantly different ($p \leq 0.05$) but the SAG difference was insignificant ($p > 0.05$). Red jasmine brown rice flour was found to contain a total phenolic (11.029 mg GAE/g sample), flavonoid (60.422 mg QE/g sample), DPPH (2.538 mg TEAC/g sample), FRAP (24.991 mg Fe^{2+} /g sample) and ABTS (10.299 mg TEAC /g sample) were the highest ($p \leq 0.05$). The highest anthocyanin content was found in riceberry brown rice flour (33.410 mg CyE/g sample). The highest pasting temperature was found in riceberry brown rice flour (77 °C). The highest peak viscosity was found in jasmine brown rice flour (2615 cPs), while red jasmine brown rice flour showed the highest pasting temperature (77 °C), final viscosity (3762 cPs), breakdown (853 cPs) and setback (2071 cPs) with a significant difference ($p \leq 0.05$). The thermal properties using DSC showed that the highest T_o (66.51°C), T_p (72.80°C) and T_e (79.34°C) were found in homnil brown rice flour ($p \leq 0.05$). The enthalpy difference was insignificant ($p > 0.05$). The functional

properties of all pigmented brown rice flours were discovered to have insignificant differences with regard to water absorption, water solubility, oil absorption, swelling power and solubility among the four types. The functional properties such as protein solubility, foaming capacity, foaming stability and emulsion stability of homnil brown rice flour showed the highest value at 6.523%, 11.667%, 3.810% and 81.917%, respectively. Jasmine brown rice flour had the highest emulsion capacity (27.083%). For freeze-thaw stability and syneresis, the highest level of syneresis was found with red jasmine brown rice flour ($p \leq 0.05$) which also showed the highest stability. In addition, the red jasmine brown rice flour was applied to an Ubon noodles product. The result showed that 10% red jasmine brown rice flour with hydrocolloids showed cooking quality, textural properties and sensory evaluation closed to control. The shelf-life of red jasmine brown rice noodles was no more than 3 days at room temperature ($30 \pm 2^\circ\text{C}$) and 3 weeks with refrigeration ($4-10^\circ\text{C}$) in both vacuum and polypropylene packaging. From the study of the production process of instant red jasmine brown rice noodles, the results showed that when drying at 60°C , the cooking quality, textural properties and sensory evaluation of red jasmine brown rice flour noodles were similar to fresh noodles. Furthermore, the structural characteristics of instant red jasmine brown rice noodles was investigated using SEM, the result showed more porous and larger. Also, the instant noodles was rehydrated with hot water for 5 minutes and microwaved for 4 minutes, resulting in the cooking quality, textural properties and sensory evaluation of red jasmine brown rice flour noodles was identical to fresh noodles. In conclusion, Red jasmine brown rice flour could improve the quality of nutrition and physicochemical and sensory properties of Ubon noodles.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมติฐานงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ข้าว	4
2.2 แป้ง	7
2.3 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compound)	16
2.4 ดัชนีน้ำตาล (Glycemic index)	25
2.5 เส้นกวยจั๊บน้ำร้อน	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 วัตถุประสงค์ วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี	29
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 สมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องสี	39
4.2 ศึกษาสูตร วิธีการผลิตเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนอบลเสริมข้าวกล้องที่เหมาะสมและคุณภาพของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนอบลเสริมข้าวกล้องสีที่ได้	48
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	98
5.2 ข้อเสนอแนะ	99
เอกสารอ้างอิง	

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	
ก การวิเคราะห์ทางกายภาพ	110
ข การวิเคราะห์ทางเคมี	112
ค สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแปงข้าวกล้องสี	119
ง การวิเคราะห์สมบัติเชิงหน้าที่ของแปงข้าวกล้องสี	125
จ การวิเคราะห์คุณภาพเส้นกวยจั๊บเสริมข้าวกล้องสี	130
ประวัติผู้วิจัย	

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การแบ่งประเภทของข้าวตามปริมาณอะไมโลส	10
4.1	ค่าสีของแป้งข้าวกล้องสี	40
4.2	องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณและปริมาณอะไมโลสของแป้งข้าวกล้องสี	43
4.3	ปริมาณวิตามินและแร่ธาตุของแป้งข้าวกล้องสี	44
4.4	ดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของแป้งข้าวกล้องสี	46
4.5	สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องสี	48
4.6	สมบัติแป้งเปียกของแป้งข้าวกล้องสี	50
4.7	สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวกล้องสี	51
4.8	ดัชนีการดูดซับน้ำ ดัชนีการละลายและดัชนีการดูดซับน้ำมันของแป้งข้าวกล้องสี	53
4.9	ความสามารถในการละลายโปรตีนของแป้งข้าวกล้องสี	55
4.10	ความสามารถในการเกิดอิมัลชันและความคงตัวของอิมัลชันของแป้งข้าวกล้องสี	56
4.11	ความสามารถในการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟมของแป้งข้าวกล้องสี	56
4.12	สมบัติแป้งเปียกของแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลังและแป้งผสม	60
4.13	สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้งผสม	61
4.14	คุณภาพการต้มสุกของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นแต่ละสูตร	63
4.15	คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นแต่ละสูตร	65
4.16	ค่าสีของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นแต่ละสูตร	66
4.17	คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นแต่ละสูตร	67
4.18	ค่าคุณภาพของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส)	70
4.19	คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส)	70
4.20	ค่าสีของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส)	73
4.21	จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส)	74
4.22	ค่าคุณภาพของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นที่อุณหภูมิตู้เย็น (4-10 องศาเซลเซียส)	78
4.23	คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นที่อุณหภูมิตู้เย็น (4-10 องศาเซลเซียส)	80
4.24	ค่าสีของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นที่อุณหภูมิตู้เย็น (4-10 องศาเซลเซียส)	82
4.25	จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นที่อุณหภูมิตู้เย็น (4-10 องศาเซลเซียส)	84
4.26	ปริมาณความชื้นของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นที่สำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ	87
4.27	คุณภาพการต้มสุกของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นที่สำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ	88
4.28	คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นที่สำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ	89
4.29	ค่าสีของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นที่สำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ	90
4.30	คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำเย็นที่สำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ	90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.31	คุณภาพการต้มสุกเส้นของกวยจั๊บบลสูตรที่เหมาะสม	94
4.32	คุณลักษณะเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บบลสูตรที่เหมาะสม	95
4.33	คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่คั่นตัวด้วยน้ำร้อนและ ไมโครเวฟ	95
4.34	คุณค่าทางโภชนาการของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูป	97

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของเมล็ดข้าว
2.2	โครงสร้างของอะไมโลเพคตินและอะไมโลส
2.3	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน
2.4	ชนิดของสารประกอบฟีนอลิก
2.5	โครงสร้างของแอนโทไซยานิน
2.6	โครงสร้างของ DPPH และการยับยั้งโดยสารต้านอนุมูลอิสระ
2.7	การเกิดปฏิกิริยาของสาร ABTS กับสารต้านอนุมูลอิสระ
2.8	การเกิดปฏิกิริยาของ FRAP assay
3.1	เมล็ดข้าวกล้องสีและแป้งข้าวกล้องสี
4.1	ลักษณะและรูปร่างของแป้งข้าวกล้องสีโดยใช้ Scanning electron microscopy (SEM)
4.2	ลักษณะและรูปร่างของแป้งข้าวกล้องสีโดยใช้กล้องจุลทรรศน์
4.3	กราฟแสดงสมบัติแป้งเปียกของแป้งข้าวกล้องสีแต่ละสายพันธุ์โดยใช้ RVA
4.4	สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวกล้องสี
4.5	กราฟแสดงกำลังการพองตัว (ก) และการละลาย (ข) ของแป้งข้าวกล้องแต่ละสายพันธุ์
4.6	ค่าการสูญเสีย (Syneresis) ของแป้งข้าวกล้องแต่ละสายพันธุ์ในแต่ละรอบการละลาย
4.7	ปริมาณอะไมโลสในแป้งผสม
4.8	กวยจั๊บสูตรต่าง ๆ
4.9	กราฟแสดงค่าคุณภาพของเส้นกวยจั๊บของเส้นกวยจั๊บที่อุณหภูมิห้อง
4.10	กราฟแสดงคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บที่อุณหภูมิห้อง
4.11	กราฟแสดงค่าสีของเส้นกวยจั๊บที่อุณหภูมิห้อง
4.12	กราฟแสดงจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดของเส้นกวยจั๊บที่อุณหภูมิห้อง
4.13	กราฟแสดงจำนวนยีสต์และราของเส้นกวยจั๊บสูตรที่เหมาะสมที่อุณหภูมิห้อง
4.14	กราฟแสดงค่าคุณภาพของเส้นกวยจั๊บที่อุณหภูมิตู้เย็น
4.15	กราฟแสดงคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บที่อุณหภูมิตู้เย็น
4.16	กราฟแสดงค่าสีของเส้นกวยจั๊บที่อุณหภูมิตู้เย็น
4.17	กราฟแสดงจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดของเส้นกวยจั๊บที่อุณหภูมิตู้เย็น
4.18	กราฟแสดงจำนวน ยีสต์และราของเส้นกวยจั๊บที่อุณหภูมิตู้เย็น
4.19	เส้นกวยจั๊บสำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ
4.20	ลักษณะของเส้นกวยจั๊บสำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ
4.21	โครงสร้างตัดขวางของเส้นกวยจั๊บสำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้ SEM
4.22	เส้นกวยจั๊บสำเร็จรูปที่มีการคั่วด้วยน้ำร้อนและไม่โครเวฟที่เวลาต่าง ๆ

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ข.1	กราฟมาตรฐานของอะไมโลสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	116
ค.1	กราฟมาตรฐานของกรดแกลลิกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	120
ค.2	กราฟมาตรฐานของ Quercetin ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	121
ค.3	กราฟมาตรฐานของ Trolox ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	122
ค.4	กราฟมาตรฐานของ Ferrous sulfate ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	123
ค.5	กราฟมาตรฐานของ Trolox ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	124

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นเมล็ดของพืชในสกุลข้าวที่พบมากในเอเชีย ซึ่งประชากรโลกบริโภคเป็นอาหารสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทวีปเอเชียรวมถึงประเทศไทย ข้าวในประเทศไทยมีค่อนข้างหลากหลายสายพันธุ์ โดยข้าวไทยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ข้าวขาว (White rice) และข้าวสี (Pigmented rice or color rice) ข้าวขาวนั้นได้มาจากการเอาแกลบและชั้นนอกออกจากเมล็ดข้าวทั้งหมด ในขณะที่ข้าวสีสามารถทำได้โดยการกำจัดแกลบและชั้นนอกที่มีเม็ดสีจำนวนเพียงเล็กน้อยอยู่บ้าง (Kraithong, Lee and Rawdkuen, 2018) ซึ่งข้าวสีไทยยังสามารถแบ่งตามระดับการแปรรูปเป็น 3 ประเภท คือ ข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวซ้อมมือ (มาตรฐานสินค้าเกษตร, 2560) ข้าวกล้อง (Husked rice, brown rice or cargo rice or loonzain rice) หมายถึง ข้าวที่ผ่านการกะเทาะเปลือกออกเท่านั้น ทำให้ยังเหลือส่วนจมูกข้าว และเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวเหลืออยู่ ข้าวกล้องอาจจะมีสีน้ำตาลอ่อน สีม่วง สีดำ และสีแดงขึ้นกับชนิดและสายพันธุ์ของข้าว เช่น ข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่ ข้าวกล้องหอมมะลิแดง และข้าวกล้องหอมนิล เป็นต้น

ในปัจจุบันข้าวสีได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากมีปริมาณโพลีฟีนอล แร่ธาตุ และวิตามินที่สูง รวมถึงสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมากมาย (Reddy et al., 2017) โดยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compound) สามารถพบได้ในพืชทั่วไปและมีการศึกษาอย่างมากมายรวมทั้งในข้าวสี เช่น สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) ปริมาณแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) และสารต้านอนุมูลอิสระ (Total antioxidant) ซึ่งในปัจจุบันการวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและคุณลักษณะของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเป็นหนึ่งในหัวข้อที่นิยมที่สุดในงานวิจัยคุณภาพทางด้านโภชนาการของข้าว (Pang et al., 2018) โดยนอกจากการรับประทานข้าวแบบเป็นเมล็ดแล้ว ได้มีการนำแป้งข้าวมาใช้ในการแปรรูปและประยุกต์ใช้ในอาหารอย่างหลากหลายเนื่องจากแป้งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในโภชนาการของมนุษย์ อาหารทั้งหมดส่วนใหญ่จะมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลักของทุกชนชาติ เช่น ข้าว ขนมปัง ก๋วยเตี๋ยว และพาสต้า เป็นต้น ถึงแม้ว่าบทบาทที่สำคัญของแป้งคือ ใช้เป็นแหล่งอาหารพลังงานสูงของมนุษย์ แต่จากคุณสมบัติเฉพาะของแป้งจึงได้มีการนำแป้งมาใช้ในการอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของอาหาร เช่น ทำให้เกิดเจล ควบคุมความคงตัวและเนื้อสัมผัสของอาหารจำพวกซอส ซุป และน้ำปรุงรสอาหาร ป้องกันเนื้อสัมผัสของอาหารเสียรูปเนื่องจากกระบวนการแช่แข็งและคั้นรูปจากเยือกแข็ง (Freeze-thaw) สภาวะกรด การทำพาสเจอร์ไรเซชัน (Pasteurization) และสเตอริไรเซชัน (Sterilization) เป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) ดังนั้น คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ รวมถึงสมบัติเชิงหน้าที่และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งจึงมีผลอย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้กับอาหารหรือการนำไปแปรรูปต่าง ๆ

อาหารที่แปรรูปจากข้าวและมีลักษณะเป็นเส้นที่เป็นที่รู้จักกันดี นอกจากเส้นก๋วยเตี๋ยวและเส้นขนมจีน ยังมีอีกเส้นหนึ่งที่เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและขึ้นชื่อของจังหวัดอุบลราชธานีคือเส้นกวยจั๊บ โดยเส้นกวยจั๊บ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากข้าวเจ้าที่โม่แล้วหรือแป้งข้าวเจ้าผสมกับแป้งมันสำปะหลังทำให้สุกแล้วนำมาทอดผสมกับแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังอีกครั้งหนึ่ง โดยอาจผสมแป้งข้าวเหนียวด้วยก็ได้อัดเป็นเส้น แล้วทำให้แห้งด้วยแสงแดดหรือแหล่งพลังงานอื่น ลักษณะเนื้อสัมผัสเมื่อทำให้สุกแล้ว เส้นต้องไม่เกาะติดกัน และนิ่มเหนียว (สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2546) เส้นกวยจั๊บอุบล หรือเส้นกวยจั๊บญวน ได้รับอิทธิพลมาจากชาวเวียดนามที่อพยพมายังประเทศไทย และแพร่หลายไปยังจังหวัดแถบภาคอีสานรวมถึงจังหวัดอุบลราชธานี โดยกวยจั๊บอุบลเป็นกวยจั๊บเส้นเล็ก เมื่อทำให้สุกจะเป็นสีขาวใส มีความเหนียวนุ่ม รับประทานร่วมกับน้ำซุ๊ป หมูยอ หอมเจียว เป็นต้น ในปัจจุบันมีการจำหน่ายเส้นกวยจั๊บหลากหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นกวยจั๊บเส้นสด เส้นแห้ง และเส้นกึ่งสำเร็จรูป ซึ่งผู้บริโภคให้ความสนใจด้านสุขภาพมากขึ้น อีกทั้งอาหารเป็นส่วนสำคัญที่จะช่วยให้มีสุขภาพที่ดี ในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์อาหารนอกจากจะให้ความสนใจด้านความปลอดภัย ความสะอาด รสชาติ ยังให้ความสำคัญด้านสุขภาพอีกด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกัลลังสี 4 สายพันธุ์ ได้แก่ แป้งข้าวกัลลังหอมมะลิ แป้งข้าวกัลลังหอมมะลิแดง แป้งข้าวกัลลังไรซ์เบอร์รี่ และแป้งข้าวกัลลังหอมนิล รวมทั้งการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บอุบลเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้เส้นกวยจั๊บอุบล เป็นทางเลือกอีกหนึ่งทางที่จะปรับปรุงคุณภาพของเส้นกวยจั๊บอุบลในด้านโภชนาการและช่วยเพิ่มมูลค่าของเส้นกวยจั๊บอุบลให้มีมูลค่าสูงขึ้นโดยการใช้ข้าวกัลลังเป็นวัตถุดิบในการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้แก่กวยจั๊บ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกัลลัง 4 สายพันธุ์ ได้แก่ แป้งข้าวกัลลังหอมมะลิ แป้งข้าวกัลลังหอมมะลิแดง แป้งข้าวกัลลังไรซ์เบอร์รี่ และแป้งข้าวกัลลังหอมนิล

1.2.2 เพื่อศึกษาสูตร วิธีการผลิตเส้นกวยจั๊บอุบลเสริมข้าวกัลลังที่เหมาะสมและคุณภาพของเส้นกวยจั๊บเสริมข้าวกัลลังที่ได้

1.3 สมมติฐานงานวิจัย

1.3.1 แป้งข้าวกัลลังที่มีสายพันธุ์แตกต่างกัน ส่งผลให้มีองค์ประกอบทางเคมีกายภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพแตกต่างกัน จะส่งผลให้แป้งมีสมบัติเชิงหน้าที่แตกต่างกัน

1.3.2 การประยุกต์ใช้แป้งข้าวกัลลังในผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บ จะสามารถช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้สูงขึ้นได้

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้อง 4 สายพันธุ์ ได้แก่ แป้งข้าวกล้องหอมมะลิ แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง แป้งข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่ และแป้งข้าวกล้องหอมนิล

1.4.2 สามารถนำแป้งข้าวกล้องมาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บอุบลได้ โดยเลือกแป้งข้าวกล้องที่มีสมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ รวมถึงความคุ้มค่าในการนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุด

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบสมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้อง 4 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวกล้องหอมมะลิ แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง แป้งข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่ และแป้งข้าวกล้องหอมนิล

1.5.2 ได้ผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บอุบลที่ผลิตจากแป้งข้าวกล้อง

1.5.3 เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับนำแป้งข้าวกล้องไปประยุกต์ในผลิตภัณฑ์อาหารอื่น ๆ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหารที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าว

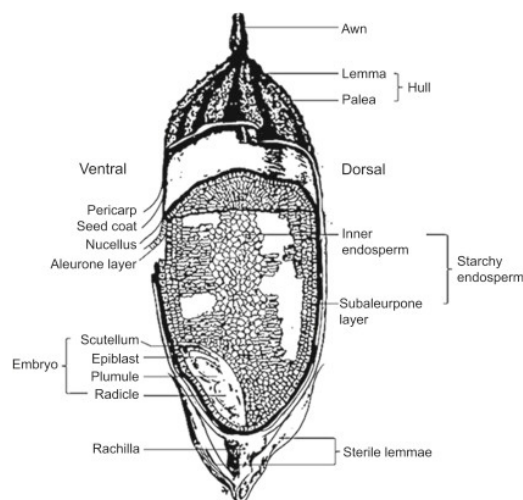
ข้าวเป็นเมล็ดของพืชในสกุลข้าวที่พบมากในเอเชีย ชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Oryza sativa* ข้าวเป็นธัญพืชซึ่งประชากรโลกบริโภคเป็นอาหารสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทวีปเอเชีย จากข้อมูลเมื่อปี 2553 ข้าวเป็นธัญพืชซึ่งมีการปลูกมากที่สุดเป็นอันดับสามทั่วโลก รองจากข้าวสาลีและข้าวโพด (สารานุกรมเสรี, 2562) ข้าว เป็นพืชตระกูลหญ้า จัดอยู่ในวงศ์ Poaceae หรือ Gramineae เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ในสกุล *Oryza* มีระบบรากเป็นแบบรากฝอย ลำต้นมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ภายในกลวงประกอบไปด้วยลักษณะที่เป็นข้อและปล้อง มีตาอยู่ตามข้อ โดยปกติตาที่อยู่ตามข้อส่วนล่างบริเวณใต้ผิวดินหรือเหนือดินเล็กน้อยจะสามารถพัฒนาเป็นต้นใหม่ได้ ข้าวต้นหนึ่งๆ แตกหน่อได้ 5-15 หน่อ ใบข้าวมีลักษณะเรียวยาวเหมือนใบหญ้ามีกาบใบห่อหุ้มตาและลำต้นไว้ กาบใบและแผ่นใบเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อใบ ด้านบนของข้อต่อใบมีแผ่นบาง ๆ รูปสามเหลี่ยมปลายแหลม เรียกว่า ลิ้นใบ และด้านนอกของข้อต่อใบมีส่วนที่ยื่นออกมาคล้ายหางกระรอก เรียกว่า หูใบ ซึ่งเป็นลักษณะของข้าวที่แตกต่างจากพืชตระกูลหญ้าอื่น ๆ ดอกของข้าวมีลักษณะเป็นช่อเกิดตรงส่วนปลายยอดสุดของลำต้น ประกอบด้วย ดอกย่อย (Spikelet) เป็นจำนวนมาก แต่ละดอกหลังจากผสมเกสรแล้วจะพัฒนาเป็นเมล็ดข้าว ซึ่งช่อดอกนี้ก็จะกลายเป็นรวงข้าว เมล็ดข้าวจะสุกแก่และเก็บเกี่ยวได้ภายในระยะเวลา 25-30 วัน หลังจากผสมเกสร เปลือกหุ้มเมล็ดข้าวมีสีแตกต่างกันตามพันธุ์ ตั้งแต่สีเหลืองอ่อนถึงเหลืองเข้ม สีม่วงเข้ม หรือดำ ถ้าแกะเปลือกหุ้มเมล็ดออกจะได้เมล็ดข้าวที่เรียกว่าข้าวกล้อง (สมัคร ยิ่งยง, ลือชัย อารยะรังสฤษฎ์ และสมทรง โชติชื่น, 2562) ข้าวกล้อง หมายถึงข้าวที่สีเอาเปลือกหรือกลีบออกไป โดยยังมีจมูกข้าวและเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวเหลืออยู่ ซึ่งจมูกข้าวและเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวนี้เป็นส่วนที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีสารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายมาก

2.1.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

โครงสร้างของเมล็ดข้าว แบ่งออกเป็น 5 ส่วนใหญ่ๆ (แสดงดังภาพที่ 2.1) คือ เปลือกแข็งหุ้มเมล็ดหรือกลีบ (Hull) เปลือกหุ้มผล (Pericarp) คัพภะ (Germ หรือ embryo) และเนื้อเมล็ด (Endosperm) (งามชื่น คงเสรี, 2542)

2.2.1.1 เปลือกแข็งหุ้มเมล็ดหรือกลีบ (Hull) ทำหน้าที่หุ้มเมล็ดเอาไว้ภายใน มีน้ำหนักประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักเมล็ดข้าว มีปริมาณเซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ประมาณร้อยละ 68 ลิกนิน (Lignin) ร้อยละ 19.2-24.5 แพนโทแซน (Pentosans) ประมาณร้อยละ 15 และเถ้า (Ash) ร้อยละ 13.2-29.0 (ประกอบด้วยซิลิกา (Silica) ประมาณร้อยละ 86.9-97.3)

2.2.1.2 เปลือกหุ้มผล (Pericarp) เป็นเซลล์รูปแท่งห่อหุ้มรอบเมล็ด มีอยู่ด้วยกัน 6 ชั้น มีผนังเซลล์บางอยู่ชั้นนอกสุด มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ให้โครงสร้าง เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส โปรตีน ไขมัน และแร่ธาตุต่าง ๆ



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ที่มา: Juliano and Tuanó. (2019)

2.2.1.3 เมล็ด

- 1) เปลือกหุ้มเมล็ด (Tegmen หรือ seed coat) เป็นผนังเซลล์บาง รูปร่างยาวรี อุดมไปด้วยไขมัน จึงทำให้มีคุณสมบัติในการป้องกันน้ำไม่ให้เข้าสู่เนื้อเมล็ด
- 2) ชั้นเยื่อโปร่งใส (Hyaline layer หรือ nucellus) อยู่ติดกับชั้นเปลือกหุ้มเมล็ด ลักษณะโปร่งใส ประกอบด้วยสารให้สี เช่นเดียวกับในชั้นเปลือกหุ้มเมล็ด
- 3) ชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด (Aleurone layer) มีลักษณะเซลล์รูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ และมีนิวเคลียสอยู่ตรงกลาง ประกอบด้วยโปรตีน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส โดยในข้าวประกอบด้วยเซลล์ชั้นนี้ 1 ถึง 7 ชั้น

2.2.1.4 คัพภะ (Germ หรือ embryo) เป็นส่วนที่เรียกว่าจมูกข้าวเป็นตำแหน่งรวมของส่วนที่จะงอกเป็นต้นข้าวต้นใหม่ คัพภะ เป็นส่วนที่จะงอกเป็นยอดอ่อน (Plumule) และส่วนที่จะงอกเป็นรากกำเนิด (Radicle) ทั้งสองส่วนนี้ยึดติดกันด้วยปล้องที่สั้นมากเรียกว่า มีโซคอติล (Mesocotyl) ยอดอ่อนจะห่อหุ้มลักษณะที่คล้ายใบเรียกว่า เยื่อหุ้มยอดอ่อน (coleoptile) ส่วนของคัพภะทั้งหมดอยู่ในชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด และคัพภะอยู่ติดกับส่วนที่เป็นแบ่งทางด้านท้องของเมล็ด (Ventral side) ในส่วนนี้จะอุดมไปด้วยสารอาหาร แร่ธาตุ และวิตามิน เพื่อการเจริญเติบโต สารอาหารที่มีมากคือ โปรตีน (อยู่ในรูป protein bodies) ไขมัน (อยู่ในรูป lipid bodies) วิตามินที่มีมากคือ วิตามินบี (Thiamine) วิตามินอี (Tocopherol)

2.2.1.5 เนื้อเมล็ด (Endosperm) มีประมาณร้อยละ 68-70 ของเมล็ดข้าวภายในเซลล์ ประกอบด้วยสตาร์ช (Starch) และโปรตีนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสตาร์ชของข้าวมีขนาดเล็กมาก (3-5 ไมครอน) เป็นรูปเหลี่ยม ลักษณะเม็ดส่วนใหญ่อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (Compound granule) มากถึง 150 เม็ดต่อกลุ่ม โปรตีนที่พบในเนื้อเมล็ดอยู่ร่วมกับเม็ดสตาร์ช โดยเกาะรวมกันเป็นรูปร่างกลม ซึ่งพบอยู่ในชั้นติดกับชั้นเยื่อหุ้มเมล็ดเป็นส่วนใหญ่

2.1.2 สายพันธุ์ข้าว

2.1.2.1 ข้าวหอมมะลิไทย

ข้าวหอมมะลิไทย (Thai Hom Mali Rice) ซึ่งได้มาจากพืชที่มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa* L. วงศ์ Gramineae หรือ Poaceae พันธุ์ที่ผลิตเป็นการค้ากระทรวงเกษตรและสหกรณ์ประกาศรับรองว่าเป็นพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์ กข 15 ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวหอมที่ไวต่อช่วงแสง มีกลิ่นหอมตามธรรมชาติของข้าวใหม่หรือข้าวเก่า ข้าวหุงสุกมีความอ่อนนุ่ม และเป็นข้าวที่ผลิตในประเทศไทยในฤดูนา (มาตรฐานสินค้าเกษตร, 2560)

2.1.2.2 ข้าวหอมมะลิแดง

ข้าวหอมมะลิแดง (Red brown rice, Red hawn rice, Red jasmine rice, Khao-Hom-Mali-Dang) หรือเรียกว่า ข้าวหอมแดง เป็นข้าวหอมมะลิชนิดหนึ่ง เป็นพืชตระกูลหญ้า มีอายุสั้นเพียงฤดูเดียว เจริญเติบโตได้ง่ายๆ เป็นพืชล้มลุกขนาดเล็ก ลำต้นตั้งตรง ลำต้นมีลักษณะกลมเล็ก ๆ มีข้อและปล้องกลวง ช่วงโคนต้นมีข้อและปล้องสั้นกว่าและยาวขึ้นเรื่อย ๆ มีเปลือกหนา มีขนหยาบ ๆ ปกคลุม ต้นมีสีเขียว ใบเป็นใบเดี่ยวออกตรงข้ามสลับกัน ใบมีลักษณะยาวรีขอบใบเรียบมีเส้นกลางใบตามยาวเห็นชัด ก้านใบออกหุ้มรอบ ๆ ลำต้นมีขนเล็ก ๆ ปกคลุม ผิวใบสากมือมีสีเขียว ผลเป็นเมล็ดอยู่เป็นช่อ มีลักษณะทรงรีเรียวยาวเล็ก ๆ มีเปลือกแข็งแห้งหุ้มเมล็ด เปลือกเมล็ดอ่อนมีสีเขียว เปลือกเมล็ดมีสีเหลืองทอง ข้างในมีเมล็ดแข็งมาก มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีแดงเข้ม เมล็ดมีสีน้ำตาลแดงเข้มเมื่อหุงสุกแล้วเมล็ดจะร่วนสลาย นุ่มเหนียว มีกลิ่นหอม นำมาประกอบอาหารต่าง ๆ หลายเมนู โดยปลูกในประเทศไทยจะมีคุณภาพดีที่สุดในด้านการปลูกหลายสายพันธุ์ (THAI-THAIFOOD.COM, 2017)

2.1.2.3 ข้าวไรซ์เบอร์รี่

ข้าวไรซ์เบอร์รี่ (Riceberry) เป็นข้าวเจ้าพันธุ์ใหม่ที่ได้รับการคัดเลือกและพัฒนาพันธุ์ โดยการผสมข้ามพันธุ์ระหว่าง ข้าวเจ้าหอมนิล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พันธุ์พ่อ) กับ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (ข้าวหอมมะลิ) จากสถาบันวิจัยข้าว (พันธุ์แม่) โดยเริ่มผสมพันธุ์เมื่อปี พ.ศ. 2545 ณ ศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว, มปป) ข้าวไรซ์เบอร์รี่ มีลักษณะเรียวยาว ผิวมันวาว เป็นข้าวเจ้าสีม่วงเข้มคล้ายกับลูกเบอร์รี่ที่มีสีม่วงเข้มเมื่อสุก หากเป็นข้าวกล้องจะมีกลิ่นหอมที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว อีกทั้งยังมีรสชาติหอมมัน เนื้อสัมผัสเหนียวนุ่ม เนื่องจากผ่านการขัดสีเพียงแค่บางส่วนเท่านั้น จึงยังทำให้คงคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้อย่างครบถ้วน ข้าวสายพันธุ์พิเศษสีม่วงนี้สามารถปลูกได้ตลอดทั้งปี มีอายุเก็บเกี่ยว 130 วัน ให้ผลผลิตปานกลาง มีความสามารถต้านทานต่อโรคไหม้ แต่ไม่ต้านทานโรคหาลาว จึงแนะนำให้เปลี่ยนเมล็ดพันธุ์ทุกรอบของการปลูก (กรมการข้าว, 2560)

2.1.2.4 ข้าวหอมนิล

ข้าวเจ้าหอมนิลเป็นข้าวที่ได้รับการคัดเลือกและพัฒนาจนได้ข้าวที่มีเมล็ดข้าวกล้องเรียวยาวสีม่วงเข้ม ข้าวกล้องเมื่อหุงสุกจะนุ่ม เหนียว หอม ข้าวสารหุงสุกมีสีม่วงอ่อน นุ่ม และมีกลิ่นหอมเช่นกัน คุณสมบัติที่สำคัญของข้าวเจ้าหอมนิลคือ ข้าวกล้องมีโปรตีนสูงถึงร้อยละ 12.5 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 70 ปริมาณอะไมโลสร้อยละ 16 และยังประกอบไปด้วยธาตุเหล็ก สังกะสี ทองแดง แคลเซียม และโพแทสเซียม ซึ่งสูงกว่าข้าวขาวดอกมะลิ นอกจากนี้ลักษณะดีเด่นของข้าวเจ้าหอมมะลิที่พบนอกจากคุณค่าทางโภชนาการได้แก่ ทรงต้นเตี้ย แตกกอดี เมล็ดมีน้ำหนักดี อายุ

สั้นเพียง 90 วันทำให้สามารถปลูกได้ถึง 3 ครั้งต่อปี ดังนั้นหากได้รับการจัดการที่เหมาะสมในการผลิตต่อปีสูงกว่าข้าวพันธุ์อื่น ๆ เป็นข้าวเจ้าไม่ไวต่อแสง สามารถปลูกได้ตลอดทั้งปี เมล็ดพันธุ์ข้าวกล้องเรียวยาว สีม่วงเข้ม เมื่อหุงสุกจะเหนียวและมีกลิ่นหอมน่ารับประทาน มีคุณค่าทางโภชนาการสูง ถูกพัฒนาสายพันธุ์โดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (กรมการข้าว, 2560)

2.2 แป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ $(C_6H_{12}O_5)_n$ มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 สตาร์ชเป็นโพลิเมอร์ของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ประกอบด้วยโพลิเมอร์ของกลูโคสสองชนิด คือ โพลิเมอร์เชิงเส้น (อะไมโลส) และ โพลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะไมโลเพคติน) ทั้งอะไมโลสและอะไมโลเพคตินมีสมบัติที่แตกต่างกัน สตาร์ชทางการค้ามีส่วนประกอบอื่นเจือปนในปริมาณน้อย ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และเกลือแร่ หากมีส่วนประกอบอื่น ๆ อยู่มากหรือมีส่วนประกอบของโปรตีนอยู่สูง เรียกว่า แป้งดิบ (Flour) ถ้ามีการสกัดสิ่งเจือปนต่างๆ ออกจนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ เรียกว่าสตาร์ช (Starch) (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

แป้งเป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสและเป็นโฮโมโพลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งที่พบมากในพืช ที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง แป้งเป็นสารอาหารที่ให้พลังงานสำคัญที่สุดของมนุษย์และส่วนใหญ่ได้มาจากเมล็ดของพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี เป็นต้น บางส่วนได้มาจากหัวและรากของพืช เช่น มันเทศ มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง เป็นต้น แป้งที่ได้จากพืชแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะคือ มีโครงสร้างทางเคมีโมเลกุล ขนาด รูปร่าง และสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน และในเมล็ดแป้งยังมีแร่ธาตุ ไขมัน และโปรตีน เป็นองค์ประกอบอยู่บ้างเล็กน้อย สมบัติทั่วไปของแป้ง ได้แก่ เป็นแหล่งสะสมพลังงานของพืช ไม่มีรสหวาน ไม่ละลายในน้ำ แต่จะพองตัวได้ เป็นสารละลายชั้นหนืดให้ความร้อนกลายเป็นเจล อยู่ในรูปเม็ดแป้งที่มีเยื่อหุ้ม เมื่อเม็ดแป้งกระจายตัวอยู่ในน้ำ และนำไปให้ความร้อน เม็ดแป้งจะดูดน้ำทำให้พองตัวออกมีขนาดใหญ่ขึ้นและเกิดเจลาติไนเซชันได้เป็นสารละลายชั้นหนืด และเมื่อปล่อยสารละลายให้เย็นลงจะเกิดเป็นเจลสามารถใช้เป็นสารเพิ่มความข้นหนืดให้แก่ผลิตภัณฑ์อาหารบางชนิด แต่ถ้านำไปแช่เย็นหรือแช่แข็งจะเกิดการจับตัวใหม่ของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินของสตาร์ชเรียกว่าการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสอาหารเปลี่ยนไป เม็ดแป้งประกอบด้วยโมเลกุลแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังมี โปรตีน ไขมัน ฟอสฟอรัส สารอินทรีย์อื่นๆ และน้ำในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพืช

บทบาทหน้าที่สำคัญของแป้ง คือ ใช้เป็นแหล่งอาหารพลังงานสูงของมนุษย์ แต่จากคุณสมบัติเฉพาะของแป้งจึงได้มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของอาหาร เช่น ทำให้เกิดเจล ควบคุมความคงตัวและเนื้อสัมผัสของอาหารจำพวกซอส ซุป และน้ำปรุงรสอาหาร ป้องกันเนื้อสัมผัสของอาหารเสียรูปเนื่องจากกระบวนการแช่แข็ง และคืนรูปจากเยือกแข็ง สภาวะกรด การทำการพาสเจอไรเซชัน และสเตอริไลเซชัน เป็นต้น นอกจากนี้ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแล้วยังมีการนำแป้งมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมแป้งอัดแปร เป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

2.2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

2.2.1.1 โครงสร้าง รูปร่าง และขนาดของเม็ดแป้ง

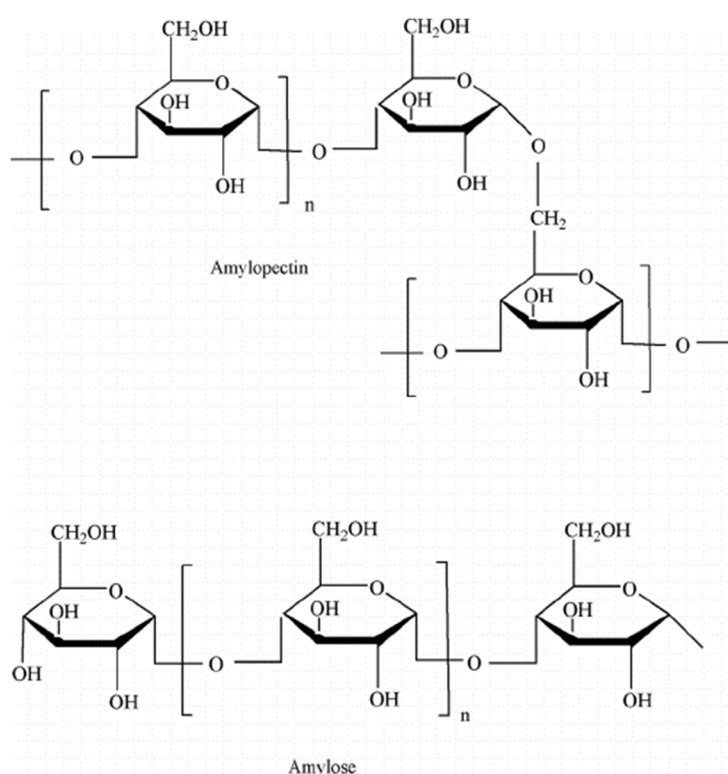
เป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในเอนโดสเปิร์ม (endosperm) มีอนุภาคขนาด 3-9 ไมครอน กลุ่มของอนุภาคแป้งเหล่านี้ จะอยู่ในส่วนของอะไมโลพลาส (Amyloplast) แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิดคือ อะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพกติน (Amylopectin) อัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่ต่างกันทำให้คุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน (Juliano and Tuan, 2019) (ตารางที่ 2.1) แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้งขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจสอบลักษณะ ของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาและแบบอิเล็กตรอนพบว่า เม็ดแป้งจะมี ขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้น ๆ เม็ดแป้งมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้ง เป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (Crystallite) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) เม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้าเกิดการจัดเรียงตัวกันหนาแน่นมากจะเกิดเป็นผลึกแบบ A คือ แป้งจากธัญพืชต่าง ๆ ถ้าเรียงตัวกันหลวม ๆ จะเกิดผลึกแบบ B คือ แป้งจากพืชหัว และถ้าเกิดการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึก แบบ C ได้แก่ แป้งจากพืชตระกูลถั่ว เม็ดแป้งจะมีคุณสมบัติทำให้เกิดการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ หรือเรียกว่าไบรีฟริงเจนส์ (Birefringence) รูปแบบการหักเหรังสีเอกซ์เผยแสดงให้เห็นว่าในแป้งมีโครงสร้างที่เป็นผลึกอยู่ร้อยละ 25 ถึง 50 ในแป้งจากหัวหรือรากส่วนของอะไมโลเพกตินจะมีโครงสร้างบางส่วนเป็นผลึกและส่วนของอะไมโลสจะอยู่ในส่วนของอสัณฐาน สำหรับแป้งจากธัญพืชส่วนของอะไมโลเพกตินจะรวมกันเป็นผลึก (กล้านรงค์ ศรีรอต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

2.2.1.2 อะไมโลส (Amylose)

อะไมโลสเป็นโพลิเมอร์สายตรงของ α -D-glucose เชื่อมด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic แสดงดังภาพที่ 2.2 อะไมโลสสามารถถูกไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ α -amylase และ glucoamylase ปัจจุบันพบว่าอะไมโลสไม่ใช่โพลิเมอร์สายตรงร้อยละ 100 แต่มีสายกิ่งที่ยาวจับกับกับสายโซ่หลักด้วยพันธะ α -1,6-glycosidic linkage แต่จะพบสายกิ่ง ถึงจะไม่มาก มีรายงานว่าอยู่ในช่วง 9-20 กิ่งต่อโมเลกุล แต่ละกิ่งมีน้ำตาล D-glucose 4 ถึงมากกว่า 100 AGU (หน่วยเป็นไฮโดรกลูโคส) ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสอาจจะมีจำนวน น้ำตาลกลูโคสหรือระดับการเกิดโพลิเมอร์ (degree of polymerization: DP) 1,000 ถึง 6,000 AGU ทั้งนี้ขึ้นกับแหล่งของอะไมโลส เช่น สตาร์ช ข้าวสาลีจะมี DP ในช่วง 1,000-2,000 AGU เป็นต้น เนื่องจากอะไมโลสมีสายโมเลกุลที่ยาว ดังนั้นเมื่ออยู่ในสารละลายอะไมโลสจึงอยู่ในรูปแบบที่เป็นเกลียว (Helix) ที่สามารถจับกับไอโอดีนอยู่ในรูปโพลีไอโอดด์ จะเข้าไปอยู่ภายในของเกลียวจึงทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไอโอดีนที่มีสีน้ำเงิน นอกจากนี้เมื่ออะไมโลสอยู่ในสารละลายจะมีแนวโน้มที่โมเลกุลจะรวมกลุ่มระหว่างสายโซ่เกิดโมเลกุลเกลียวคู่ โมเลกุลเหล่านี้สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นส่งผลให้อะไมโลสเกิดรีโทรเกรด (Retrograde) ได้เจลหรือตะกอนที่ไม่ละลายน้ำเกิดขึ้น (ในกรณีหลังจะเกิดขึ้นเมื่ออะไมโลสมีระดับความเข้มข้นต่ำ) (กล้านรงค์ ศรีรอต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

2.2.1.3 อะไมโลเพคติน (Amylopectin)

อะไมโลเพคตินเป็นโมเลกุลของสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลสหลายเท่าและมีถึงจำนวนมากที่ประกอบขึ้นด้วยกลูโคสที่เชื่อมต่อกันเป็นสายพันธะ α -1,4 glycosidic linkage และมีสายกิ่งมากมายที่จับกับน้ำตาลในสายตรงพันธะ α -1,6 glycosidic linkage แสดงดังภาพที่ 2.2 ปริมาณกิ่งในอะไมโลเพคตินมีประมาณร้อยละ 4-5 อะไมโลเพคตินมีระดับการเกิดโพลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of polymerization, DP) 104 ถึง 105 ต่อโมเลกุล มีน้ำหนักโมเลกุล 107 ถึง 108 ดาลตัน ถึงแม้จะมี helix ในสายกิ่งแต่จะสั้นกว่าอะไมโลส ดังนั้น อะไมโลเพคตินเมื่อย้อมด้วยสารละลายไอโอดีนจะให้สีม่วงแดง เมื่ออะไมโลเพคตินอยู่ในสารละลายในสภาวะเป็นกลางจะไม่เกิดรีโทรเกรด โมเลกุลจะเสถียรหรือคงตัวเพราะการมีกิ่งก้านมากทำให้ไม่สามารถรวมตัวกันได้ง่ายเหมือนอะไมโลส (กล้านรงค์ ศรีรอต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลเพคตินและอะไมโลส
ที่มา: Ismail, Irani and Ahmad. (2013)

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของข้าวตามปริมาณอะไมโลส

ประเภทข้าว	ปริมาณอะไมโลส (ร้อยละ)	ลักษณะข้าวเมื่อสุก
ข้าวเหนียว	0-2	เหนียวมาก
ข้าวเจ้าอะไมโลสต่ำ	10-19	เหนียว-นุ่ม
ข้าวเจ้าอะไมโลสปานกลาง	20-25	ค่อนข้างร่วน ไม่แข็ง
ข้าวเจ้าอะไมโลสสูง	26-34	ร่วนแข็ง

ที่มา: งามชื่น คงเสรี (2547)

2.2.1.4 ความชื้น

ความชื้นของแป้งขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) ของอากาศขณะที่เก็บผลิตภัณฑ์ถ้ามีความชื้นสัมพัทธ์กับแป้งจะมีความชื้นต่ำด้วย ถ้าความชื้นสูงเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำไว้มาก ปริมาณความชื้นสมดุลของแป้งจะขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งภายใต้สภาวะอากาศ แป้งโดยทั่วไปมีความชื้นร้อยละ 10 ถึง 20 โดยน้ำหนัก (ดุขฤ์ อุตภาพและน้องนุช เจริญกุล, 2548) โดยในแป้งข้าวเจ้าจะมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 13 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งข้าวเจ้า: มอก. 638-2529 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2529)

2.2.1.5 ไขมัน

ไขมันในข้าวจะอยู่ในชั้น aleurone layer หรือในส่วนของรำข้าว (Bran) ประเภทของไขมันข้าวส่วนใหญ่คือ ไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) รองลงมาคือ ฟอสโฟไลพิด (Phospholipids) ไกลโคไลพิด (Glycolipids) และเทอร์พีนอยด์ (Terpenoids) (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ในระหว่างการเก็บรักษามะลิข้าว ไขมันจะถูก hydrolyzed และ oxidized จะได้กรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) และ peroxide ไขมันดังกล่าวเป็นสาเหตุทำให้ความเป็นกรดเพิ่มสูงขึ้น เกิดการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดในแง่ของรสชาติหรือกลิ่น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในขบวนการนี้มีเอนไซม์หลายชนิดเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น lipase, phospholipase และ phosphatase เป็นต้น ส่วนกรดไขมันอิสระมีส่วนประกอบด้วย กรดปาล์มมิติก และสเตียริกร้อยละ 13.0 กรดโอเลอิกร้อยละ 52.0 และกรดไลโนเลอิกร้อยละ 35 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับไขมัน (Amylose-lipid complex) มีผลต่อการพองตัว ความสามารถในการละลาย การเกิดเจลลาคีโนเซชัน และการเกิดรีโทรเกรดชันของแป้ง (Eliasson and Krong, 1985)

2.2.1.6 โปรตีน

ในเมล็ดข้าวมีโปรตีนเฉลี่ยร้อยละ 8 ซึ่งมากเป็นอันดับสองรองจากคาร์โบไฮเดรต ปริมาณโปรตีนขึ้นกับชนิดและสายพันธุ์ของข้าว ปริมาณโปรตีนคิดจากการวิเคราะห์โดยวิธีของ Kjeldahl ด้วยการนำปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดคูณด้วยแฟกเตอร์ 5.95 โปรตีนในเมล็ดข้าวส่วนใหญ่เป็นกลูเตลิน (Glutelin) มีมากกว่าร้อยละ 85-90 เป็นโปรตีนที่ละลายในกรดหรือด่างเจือจาง ที่เหลือเป็นอัลบูมิน (Albumin) เป็นโปรตีนที่ละลายได้ในน้ำ โกลบูลิน (Globulin) เป็นโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือ และโพรลามีน (Prolamine) เป็นโปรตีนที่ละลายในแอลกอฮอล์ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

โมเลกุลของโปรตีนที่รวมกันอยู่เป็นโปรตีนรูปร่าง (Protein bodies) จะมีกลูเตลินเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ภายใน จะมี 3 รูปแบบ คือ แบบผลึก แบบรูปร่างกลมขนาดเล็ก และแบบรูปร่างกลมขนาดใหญ่ ซึ่งโปรตีนที่กระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อเมล็ดจะเป็นโปรตีนรูปร่างกลมขนาดเล็กแทรกตัวอยู่ระหว่างเม็ดแป้ง มีผลต่อการเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดแป้ง โดยยับยั้งการพองตัวทำให้เม็ดแป้งไม่เสียรูปร่างได้ง่าย ป้องกันการซึมผ่านของโมเลกุลอะมิโนโลสออกนอกเม็ดแป้ง ทำให้ความหนืดลดลง มีผลต่อลักษณะความอ่อนหรือความแข็งของเจลเมื่อเย็นลง ซึ่งส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของข้าวสุก (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) โปรตีนที่อยู่ภายนอกเมล็ดมีส่วนทำให้ระยะเวลาในการหุงต้มข้าวสุกนานขึ้น เนื่องจากโปรตีนเป็นตัวขัดขวางการซึมผ่านของน้ำเข้าไปในเมล็ด (งามชื่น คงเสรี, 2547)

2.2.1.7 แร่ธาตุหรือเกลือ

แร่ธาตุหรือเกลือแร่ (Minerals) คือ แร่หรือสารประกอบอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของอาหาร ส่วนที่เหลือเป็นเถ้าหลังจากการเผาไหม้สารอินทรีย์ทั้งหมดในเนื้อเยื่อพืชและสัตว์ และเป็นสารอาหารที่ไม่ให้พลังงาน ร่างกายต้องการในปริมาณไม่มาก แต่ก็ขาดไม่ได้ โดยเป็นสารอาหารที่มีความจำเป็นต่อร่างกายในด้านการช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงและควบคุมการทำงานของส่วนต่าง ๆ ในร่างกาย ควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อในทุก ๆ อวัยวะ ช่วยควบคุมการทำงานของฮอร์โมน และรักษาสสมดุลของกระบวนการออสโมซิส และมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของร่างกาย เป็นองค์ประกอบของเซลล์ เนื้อเยื่อและเส้นประสาท รวมไปถึงเอนไซม์ ฮอร์โมน และวิตามิน โดยร่างกายของเรามีเกลือแร่อยู่ประมาณร้อยละ 4 ของน้ำหนักตัว แร่ธาตุหรือเกลือแร่ที่พบได้ในอาหารจะมีอยู่ด้วยกันประมาณ 60 ชนิด และที่จำเป็นต่อร่างกายมีประมาณ 17 ชนิด มีอยู่ในร่างกายและในอาหารที่เรารับประทาน โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่

1) แร่ธาตุหลัก (Macro minerals) หรือเกลือแร่ที่ร่างกายต้องการในปริมาณมาก ซึ่งกลุ่มนี้จะเป็นเกลือแร่ที่มีอยู่ในร่างกายมากกว่าร้อยละ 0.01 ของน้ำหนักตัว หรือมีมากกว่า 5 กรัม และร่างกายของเราจะต้องการเกลือแร่เหล่านี้จากอาหารต่อวันตั้งแต่ 100 มิลลิกรัมขึ้นไป เกลือแร่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ แคลเซียม (Calcium) ฟอสฟอรัส (Phosphorous) แมกนีเซียม (Magnesium) โพแทสเซียม (Potassium) โซเดียม (Sodium) คลอไรด์ (Chloride) และกำมะถันหรือซัลเฟอร์ (Sulfur)

2) แร่ธาตุรอง (Trace minerals) หรือเกลือแร่ที่ร่างกายต้องการในปริมาณน้อย ซึ่งกลุ่มนี้จะเป็นเกลือแร่ที่มีอยู่ในร่างกายเพียงเล็กน้อย หรือน้อยกว่า 5 กรัม และร่างกายของเราต้องการเกลือแร่เหล่านี้จากอาหารต่อวันน้อยกว่า 100 มิลลิกรัม โดยเกลือแร่ในกลุ่มนี้ได้แก่ ธาตุเหล็ก (Iron) ซีลีเนียม (Selenium) โคบอลต์ (Cobalt) โครเมียม (Chromium) ทองแดง (Copper) แมงกานีส (Manganese) โมลิบดีนัม (Molybdenum) ฟลูออไรด์ (Fluoride) วาเนเดียม (Vanadium) สังกะสี (Zinc) และไอโอดีน (Iodine) (MedThai, 2014)

2.2.2 สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้ง

2.2.2.1 ความสามารถในการดูดซับน้ำและไขมัน

องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต และโปรตีน มีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำ เนื่องจากองค์ประกอบเหล่านี้มีส่วนที่ชอบน้ำ คาร์โบไฮเดรตและโปรตีนมีความเป็นขั้วและมีประจุอยู่ ปริมาณกรดอะมิโนชนิดไม่มีขั้ว คาร์โบไฮเดรตชนิดที่ชอบน้ำ และส่วนประกอบของไขมันมีความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำ เนื่องจากเป็นขั้วน้อย ความสามารถในการจับกับน้ำขึ้นอยู่กับองค์ประกอบกรดอะมิโน รูปร่างของโปรตีน ความเข้มข้นของโปรตีนในสารละลาย ความเป็นกรดต่าง (pH) และอุณหภูมิ (Jitngarmkusol, Hongsuwankul and Tananu Wong, 2008)

2.2.2.2 การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำที่เติมลงไป ภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นใน บรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้นร้อยละ 10 ถึง 17 น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก น้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bound water) และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้นร้อยละ 9 ถึง 10 สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่า แป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคส แต่ละหน่วยของแป้ง จะได้สตาร์ชโมโนไฮเดรต น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นสามารถแพร่และผ่านเข้าไปในร่างแหของไมเซลล์ (Micelles) ในเม็ดแป้งได้อย่างอิสระ แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืด และความใสเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของการบิตระนาบแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) ในเม็ดแป้งจะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัว และความสามารถในการละลายคือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และ ลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำใน สารละลายแป้ง และการดัดแปรแป้งทางเคมี รูปแบบในการพองตัว และการละลายของเม็ดแป้ง แต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวและบางส่วนของแป้งจะละลายออกมา กำลังการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ สำหรับความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ (กล้านรงค์ ศรีรอต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

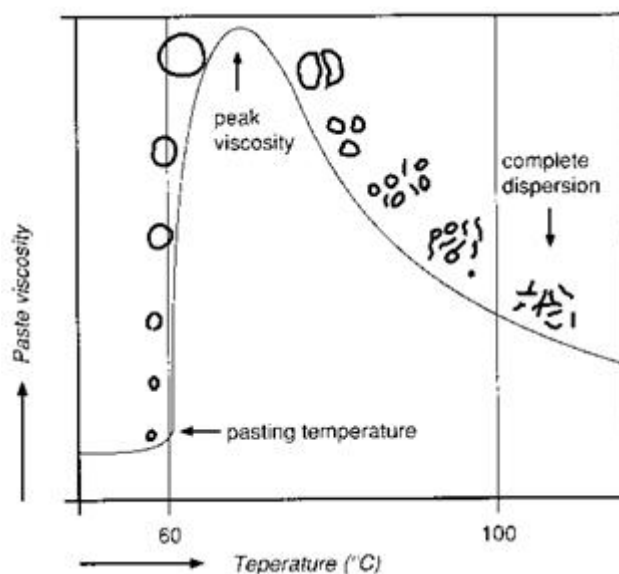
2.2.2.3 การเกิดเจลาติไนเซชัน

การเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization) คือ ปรากฏการณ์ของน้ำแป้งเมื่อได้รับความร้อน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโมเลกุลของเม็ดแป้ง (Starch granule) เนื่องจากความร้อนทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของสตาร์ชในเม็ดแป้ง สายโพลิเมอร์ของอะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพคติน (Amylopectin) ที่อัดแน่นอยู่ในเม็ดแป้งจะคลายตัวและรวมกับน้ำที่ล้อมรอบ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะปรากฏ เม็ดแป้งพองตัว และความหนืดของน้ำแป้ง

เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิที่สตาร์ชเริ่มเกิดเจลาติไนเซชัน เรียกว่า gelatinization temperature หรือ pasting temperature อยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 60-70 °C ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ช่วงนี้เม็ดแป้งยังคงมีสภาพอยู่ได้โดยไม่แตกออก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเม็ดแป้งจะพองตัวเพิ่มขึ้น และมีความเหนียวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เกิดลักษณะของน้ำแป้งข้น (Starch paste) ความหนืดจะเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่เม็ดแป้งเกิดการพองตัวสูงสุด และให้ความหนืดสูงสุด (Maximum viscosity) จากนั้นเม็ดแป้งจะแตกมากที่สุดซึ่งไม่สามารถคืนสภาพได้ หรือมีการกวนอย่างรุนแรงจนเม็ดแป้งแตกออก การเจลาติไนเซชันเป็นการสุกของสตาร์ชซึ่งเกิดจากการให้ความร้อนแก่อาหารที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบ เกิดในการทำอาหารสุก (Cooking) ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การนึ่ง การทอด การอบ การทำให้สุกด้วยเอกซ์ทราเดอร์ เป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

2.2.2.4 ความหนืด (Viscosity)

เป็นสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำ แป้งทำให้เม็ดแป้งซึ่งเกิดการพองตัวและความหนืดมากขึ้น (แสดงดังภาพที่ 2.3) พฤติกรรมความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่งแขวนลอยในน้ำได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่งจะพองตัวได้อย่างรวดเร็ว ให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเร็วมาก อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) จากนั้นอาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง การที่แป้งมีความหนืดสูงสุดเนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้น และมีชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินบางส่วนที่แตกสลายออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลายและละลายออกมามีมากกว่าการพองตัวที่เพิ่มความหนืดจะเริ่มลดลง ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำแป้งสุกจะเป็นผลมาจากการพองตัวของเม็ดแป้ง และการแตกหักของเม็ดแป้งร่วมกับการละลายออกมาของโมเลกุลแป้ง เมื่อลดอุณหภูมิลงโมเลกุลอิสระที่กระจัดกระจายออกมา (โดยเฉพาะส่วนของอะไมโลส) ถ้ามีขนาดโมเลกุลที่เหมาะสมคือไม่สั้นและยาวเกินไปจะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกันและกักน้ำไว้ได้ ให้ความหนืดสูงขึ้นอีก ความหนืดที่กลับสูงขึ้นนี้อีกนี้เรียกว่า setback และปรากฏการณ์นี้ก็คือการคืนตัวของแป้ง (Retrogradation) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดได้แก่ ชนิดของแป้ง ขนาดอนุภาค สัดส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคติน อุณหภูมิ และแรงเฉือน (Shear rate) เป็นต้น แต่ที่มีผลมากที่สุดคือชนิดของแป้ง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)



ภาพที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2550)

2.2.2.5 การเกิดรีโทรกราเดชัน (Retrogradation)

การเกิดรีโทรกราเดชันเกิดขึ้นเมื่อปล่อยให้สารละลายของเม็ดสตาร์ชที่เกิดเจลในเซชันแล้วเย็นตัวลง โมเลกุลของสตาร์ชบางส่วนโดยเฉพาะโมเลกุลของอะไมโลส จะมาเกาะรวมกันตักตะกอนหรือเกิดเป็นเจล เรียกกระบวนการนี้ว่าการคืนตัวหรือการเกิดรีโทรกราเดชัน สำหรับเจลที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งหรืออ่อน ขึ้นอยู่กับการเกิด junction zone ซึ่งยังผันแปรไปตามองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น ไขมัน โปรตีน น้ำตาล กรด ปริมาณน้ำที่อยู่ในสารละลายนั้น เป็นต้น (นิธิยา รัตนูปนนท์, 2557) ขณะอุณหภูมิลดลงโมเลกุลอิสระของอะไมโลสซึ่งอยู่ใกล้กันจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและจับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดสภาพการจัดเรียงตัวของโมเลกุลขึ้นใหม่ ถ้าแป้งสุกมีความเข้มข้นต่ำ การเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้จะทำให้เกิดลักษณะตะกอนขุ่นขาว แต่ถ้าแป้งสุกมีความเข้มข้นสูง เช่น แป้งข้าวโพดความเข้มข้นร้อยละ 7 โดยน้ำหนักจำนวนโมเลกุลที่มาจัดเรียงตัวกันใหม่มีมาก และระหว่างเคลื่อนที่เข้ามาจับกันจะสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น และในที่สุดเกิดลักษณะเจลที่อ่อนนุ่ม การคืนตัวของน้ำแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งแตกต่างกัน โดยทั่วไปแป้งจากรากและหัว จะมีอัตราการคืนตัวช้ากว่าแป้งจากธัญพืช ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากรากและหัว เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมากและรวดเร็ว เม็ดแป้งจึงแตกง่าย ทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้ง ยากที่โมเลกุลอะไมโลสจะมาจัดเรียงตัวกันได้ใหม่ แต่แป้งจากธัญพืช เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวน้อยกว่า เม็ดแป้งแตกน้อย โมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งอยู่ใกล้กัน หรือระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลอะไมโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดสภาพเป็น matrix ซึ่งยึดอยู่ด้วยกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ การมีอะไมโลเพคตินอยู่ด้วยทำให้อัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกช้าลง เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกาะกะ ยากที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้า

มาจับกันใหม่ได้ จึงพบว่าแป้งประเภท waxy มีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสูงกว่าแป้งชนิดอื่น ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดมีผลในการเกิดการคืนตัวของน้ำแป้งอีกด้วย โมเลกุลอะไมโลสที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกันคือ ในช่วง 100-200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่ง มีอะไมโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000-6,000 หน่วยกลูโคส จะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวยู่ตลอดเวลาทำให้จับกันยากเช่นกัน (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

2.2.2.6 สมบัติการละลายของโปรตีน

เป็นสมบัติที่สำคัญของโปรตีน ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในอาหารที่เป็นของเหลว และเครื่องดื่ม เนื่องจากการละลายของโปรตีนมีผลต่อการเกิดเจล การเกิดอิมัลชัน และการเกิดโฟม โดยการละลายของโปรตีนจะมีความสัมพันธ์กับส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โดยส่วนที่เป็นส่วนที่ชอบน้ำ จะอยู่บริเวณพื้นที่ผิวของโปรตีนเป็นส่วนใหญ่ และส่วนที่เป็นส่วนไม่ชอบน้ำ มักจะอยู่ภายในโมเลกุลของโปรตีน ดังนั้นหากโปรตีนมีส่วนที่ชอบน้ำมากและมีส่วนที่ไม่ชอบน้ำน้อย (วราทิพย์ วงษ์เอี่ยม, 2552) โปรตีนจะมีสมบัติในการละลายที่ดี โปรตีนเมื่อผสมกับน้ำเป็นสารพวกคอลลอยด์ (Colloid) ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันเนื่องจากโปรตีนมีโมเลกุลขนาดใหญ่ ดังนั้นการละลายน้ำของโปรตีนมีความหมายว่าโปรตีนกระจายตัวในน้ำ การละลายน้ำของโปรตีนขึ้นอยู่กับพีเอช กำลังไอออนิก และอุณหภูมิ โปรตีนสามารถละลายน้ำได้น้อยที่สุดที่จุดไอโซอิเล็กทริก (pI) เพราะโปรตีนมีประจุบวกเท่ากับประจุลบ แรงผลักระหว่างโมเลกุลจึงไม่มี แต่ถ้าระดับความเป็นกรด-ด่างสูงหรือต่ำกว่าจุด pI โปรตีนมีประจุบวกหรือประจุลบจึงผลักรัน ไม่สามารถเข้าใกล้กันได้ จึงมีการกระจายตัวของโปรตีนในน้ำได้ดี โปรตีนในข้าวประกอบด้วย 4 ชนิดหลัก ๆ ตามความสามารถในการละลาย ได้แก่ โปรตีนอัลบูมิน (Albumins) ละลายได้ดีในน้ำ โปรตีนโกลบูลิน (Globulins) ละลายได้ดีในเกลือ โปรตีนกลูเตลิน (Glutelins) ละลายได้ดีในสภาวะกรดหรือด่าง และโปรตีนโพรลามิน (Prolamins) ละลายได้ดีในแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 70-90 โดยอัตราส่วนของโปรตีนแบ่งเป็นร้อยละ 5: 10: 80: 5 ตามลำดับ (Bewley and Black, 1994)

2.2.2.7 สมบัติการเกิดอิมัลชัน

อิมัลชัน คือระบบของอาหารที่มีลักษณะเป็นเนื้อผสม โดยทั้งตัวกระจายและตัวทำละลายเป็นของเหลว มีของเหลวอย่างน้อย 1 ชนิดที่รวมตัวกับของเหลวอื่นไม่ได้ซึ่งเรียกว่าตัวกระจาย โดยจะอยู่ในรูปของ droplets การทำให้เกิดอิมัลชัน พบว่าเกี่ยวข้องกับกรดอะมิโนไม่มีขั้วบนผิวของโมเลกุล โดยการเกิดอิมัลชันเป็นผลมาจากการดูดซับโมเลกุลโปรตีนไว้บนผิวของเม็ดน้ำมัน กรดอะมิโนไม่มีขั้วจะทำให้โปรตีนสามารถเกาะตัวอยู่บนผิวของเม็ดน้ำมันได้ โดยกรดอะมิโนที่ไม่มีขั้วจะแทรกตัวเข้าไปอยู่บนผิวของเม็ดน้ำมัน และหันส่วนที่มีขั้วออกมาสัมผัสกับน้ำ ทำให้เม็ดน้ำมันมีประจุชนิดเดียวกันไม่สามารถเข้าใกล้กันได้ ดังนั้นโปรตีนที่มีสัดส่วนของกรดอะมิโนไม่มีขั้วสูงจะทำให้เม็ดน้ำมันดูดซับได้มาก อิมัลชันจึงเกิดได้ดีอย่างไรก็ตาม โปรตีนที่จะทำหน้าที่เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ได้ดีจะต้องละลายน้ำได้ดีด้วย (วราทิพย์ วงษ์เอี่ยม, 2552)

2.2.2.8 สมบัติการเกิดโฟม

โปรตีนมีสมบัติที่สามารถทำให้เกิดพื้นผิวสัมผัสหรือฟิล์มขึ้นระหว่างอากาศกับของเหลว ซึ่งโปรตีนจะทำหน้าที่ในการลดแรงตึงผิวระหว่างอากาศกับของเหลว โดยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ

ของโปรตีนจะเป็นส่วนที่สำคัญในการเกิดพื้นที่ผิวสัมผัส โดยจะเป็นส่วนที่ถูกดูดซับที่ผิวสัมผัส อีกทั้งยังพบว่าการเกิดโพลีเมอร์ของโปรตีนมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการละลายของโปรตีน ถ้าโปรตีนละลายได้มากนั้นหมายถึงเกิดการกระจายตัวของโปรตีนในน้ำได้ดีเช่นกัน จึงส่งผลให้โมเลกุลของโปรตีนที่สามารถละลายได้ในส่วนที่เป็นของเหลวจะสามารถแพร่กระจายไปยังผิวหนังระหว่างน้ำและอากาศได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดการจับกับอากาศของโปรตีนส่งผลให้เกิดโครงสร้างฟิล์มล้อมรอบฟองอากาศไว้ได้ (วรทิพย์ วงษ์เอี่ยม, 2552)

Tangsrianugul, Wongsagonsup and Suphantharika. (2019) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสาลีสายพันธุ์ต่าง ๆ ที่ผลิตเป็นแป้งและสตาร์ช จากข้าวสาลีของไทย 4 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวไรซ์เบอร์รี่ (RB) หอมนิล (HN) ข้าวเหนียวดำ (ND) และข้าวลิ้มผั่ว (KP) โดยทำการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติด้านรีโอโลยี จากการศึกษาพบว่าปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชจากข้าว RB มีค่าอยู่ที่ร้อยละ 12.09 HN ร้อยละ 8.14 KP ร้อยละ 2.87 และ ND ร้อยละ 2.77 สตาร์ชจากข้าว HN มีสัดส่วนของ อะไมโลเพคตินโซลัน A ต่ำที่สุดในขณะที่สตาร์ชจากข้าว KP มีค่าสูงที่สุด นอกจากนี้ข้าว KP มีค่า Pasting temperature, setback และ final viscosity สูงที่สุดในแป้งและสตาร์ช ในขณะที่ breakdown และกำลังการพองตัวลดลง เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณอะไมโลส สำหรับทั้งตัวอย่างแป้งและสตาร์ช แป้งและสตาร์ชจาก RB และ HN มีค่า T_o , T_p และค่า enthalpy มากกว่าค่าข้าว ND และ KP ยิ่งไปกว่านั้นอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันของสตาร์ชทั้งหมดยังต่ำกว่า แป้งอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

2.3 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (bioactive compound)

สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compound) สามารถพบได้ในพืชและมีการศึกษาอย่างมากมายรวมทั้งในข้าวสาลี เช่น สารประกอบฟีนอลิก (Total phenolic) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) ปริมาณแอนโธไซยานิน (Anthocyanins) และสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant)

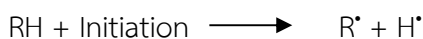
2.3.1 อนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระ (Free radical) หมายถึง เป็นสารที่มีอิเล็กตรอนอิสระ (Unpaired electron) อยู่ในวงนอกของอะตอมหรือโมเลกุล อย่างน้อย 1 อิเล็กตรอน เกิดขึ้นได้เมื่อพันธะระหว่างอะตอมแตกออก อนุมูลอิสระนั้นไม่เสถียรและไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียง เพื่อให้ตัวเองเสถียรขึ้น โมเลกุลข้างเคียงที่สูญเสียหรือรับอิเล็กตรอนจะกลายเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลต่อไปเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) (อธิป สกุลเผือก, 2559) อนุมูลอิสระมีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาโดยรับอิเล็กตรอนจากสารอื่น ๆ ใกล้เคียง ส่งผลให้ตนเองเสถียรขึ้น ในขณะเดียวกันก็ชักนำให้สารที่ให้อิเล็กตรอนไปนั้นมีอิเล็กตรอนไม่ครบคู่จนอาจกลายเป็นสารที่มีความรุนแรง ซึ่งถ้าเกิดขึ้นในสิ่งมีชีวิตอาจทำอันตรายกับส่วนประกอบสำคัญของเซลล์ บริเวณรอบ ๆ นั้น ไม่ว่าจะเป็นโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต หรือ DNA ทำให้สารชีวโมเลกุลเหล่านี้เกิดเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและเสียหายที่ในการทำงาน ดังนั้นในสภาวะที่มีการสร้างอนุมูลอิสระจำนวนมากจะ ก่อให้เกิดการบาดเจ็บของเซลล์ ซึ่งเป็นกลไกที่สำคัญที่ก่อให้เกิดพยาธิสภาพต่างๆ ได้ เช่น โรคมะเร็ง โรค หลอดเลือด โรคหัวใจ และโรคพาร์กินสัน (Parkinson) (โอภา วัชรคุปต์, 2549) โดยชนิดของอนุมูลอิสระแบ่งออกเป็น 2 ชนิดดังนี้คือ

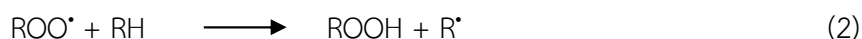
2.3.1.1 อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในร่างกาย

1) ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นเอง (Auto - oxidation) เป็นการเกิดออกซิเดชันของไขมันซึ่งแบ่ง ออกเป็น 3 ระยะ

1.1) ระยะการเหนี่ยวนำ (Initiation) เป็นระยะที่กรดไขมันแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ โดยมีแสง อุณหภูมิ เป็นตัวเร่งสมการ



1.2) ระยะเพิ่มจำนวน (Propagation) เป็นระยะที่อนุมูลอิสระทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเป็นอนุมูลอิสระเปอร์ออกซี (Peroxy radical) ดังสมการที่ 1 ซึ่งทำปฏิกิริยากับกรดไขมันเกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydro peroxide) และอนุมูลอิสระดังสมการที่ 2 ซึ่งถ้ามีแสงและความร้อนตัวเร่งก็จะเกิดปฏิกิริยาต่อ ทำให้อนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น และอนุมูลที่เกิดขึ้นก็สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนใหม่ได้ต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ ดังสมการ



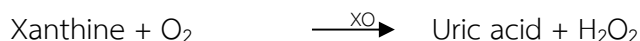
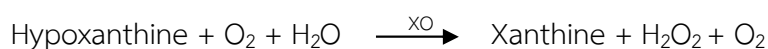
1.3) ระยะสิ้นสุด (Termination) เป็นระยะที่อนุมูลอิสระเกิดขึ้นอาจจะรวมตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ ดังสมการ



2) ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง

การทำงานของเอนไซม์สำคัญ 2 ชนิดที่มีผลกระตุ้นการสร้างอนุมูลอิสระภายในร่างกาย ได้แก่

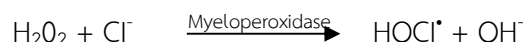
2.1) เอนไซม์ Xanthine Oxidase (OX) ทำหน้าที่สำคัญในการสลายเบสพิวรีน (Purine) โดย เร่งปฏิกิริยา Hypoxanthine เป็น Xanthine และ Xanthine เป็น Uric acid พร้อม ๆ กับขนถ่ายอิเล็กตรอนให้ ออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ ($O_2^\bullet$) ดังสมการ



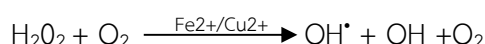
2.2) เอนไซม์ Lipoyxygenase (LOX) ทำหน้าที่เร่งออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง (Polyunsaturated fatty acid) โมเลกุลของเอนไซม์มีเหล็ก Fe^{2+} เป็นส่วนประกอบ ทำหน้าที่ดึงอะตอมของไฮโดรเจนจากกรดไขมันและเติมออกซิเจนให้กับกรดไขมันเกิด Hydroperoxide กระบวนการกำจัดสิ่งแปลกปลอมของเม็ดเลือดขาว ในขั้นตอนทำลายสิ่งแปลกปลอม โดยเฉพาะเชื้อโรคที่ถูกกลืนเข้ามาภายในเซลล์เม็ดเลือดขาว จะมีการดึงโมเลกุลของออกซิเจนมาใช้เป็น จำนวนมาก เพื่อผลิตเป็นอนุมูลอิสระ ซูเปอร์ออกไซด์ ($O_2^\bullet$) จากปฏิกิริยาของเอนไซม์ NADPH oxidase ที่อยู่บนเยื่อหุ้มชั้นนอก (Outer membrane) ของเม็ดเลือดขาว ดังสมการ



นอกจากนี้ใน (Granule) ของเม็ดเลือดขาวยังมีเอนไซม์ Myeloperoxidase ทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮโปคลอรัส (Hypochlorus, HOCl[•]) ซึ่งเป็นสารที่ทำลายจุลชีพได้ ดังปฏิกิริยา



2.3) โลหะทรานซิชัน (Transition metal) โลหะทรานซิชัน 2 ชนิด คือ Fe²⁺ และทองแดง Cu²⁺ ที่มีอยู่ทั่วไปในร่างกายสามารถเร่งการสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH[•]) จากซูเปอร์ออกไซด์ (O₂^{•-}) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H₂O₂) ในปฏิกิริยา Fenton (Fenton's reaction) ดังสมการ



2.3.1.2 อนุมูลอิสระภายในร่างกาย

1) ยารักษาโรค บางชนิดสามารถก่อให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นภายในร่างกายได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งยาในกลุ่มต้านจุลชีพและต้านมะเร็ง เช่น Bleomycin และ Anthracyclines เนื่องจากมีฤทธิ์เสริมออกซิเดชัน (Prooxidation)

2) รังสี การใช้รังสีรักษาโรค เช่น รังสี X-ray และรังสีแกมมา อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดอนุมูลอิสระ ขึ้นในร่างกายจากการถ่ายทอดพลังงานให้กับน้ำซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ แล้วก่อให้เกิดปฏิกิริยาขั้นต่อไป (Secondary reaction) กับออกซิเจนที่ละลายอยู่ในเซลล์นั้นได้ อนุมูลอิสระเกิดขึ้น

3) คาร์บอนพรี คาร์บอนพรีมีส่วนประกอบของ Nitric Oxide (NO), Nitrogen dioxide (NO₂), Peroxynitrite (ONOO⁻) และสารมลพิษได้แก่ Sulfur dioxide (SO₂), และ Carbon tetrachloride (CCl₄) กำจัด ออกจากร่างกายโดยการทำงานของเอนไซม์ Cytochrome P-450 hydroxylase ที่มีอยู่มากในเซลล์ตับและพบ ได้บ้างในเซลล์ปอดและลำไส้เล็ก ทำให้เป็นสาเหตุของการสร้างอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ภายในเซลล์ ดังกล่าว

4) โอโซน ไม่ได้เป็นอนุมูลอิสระแต่จัดเป็นสารออกซิไดส์ที่แรงสูงซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปเป็น อนุมูลไฮดรอกซิลได้จากการกระตุ้นของคลื่นแสง UV

2.3.2 สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant)

สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) คือสารประกอบที่สามารถป้องกันหรือชะลอการเกิดกระบวนการออกซิเดชัน กระบวนการออกซิเดชันมีได้หลายรูปแบบ เช่น กระบวนการออกซิเดชันที่ทำให้เหล็กกลายเป็นสนิม ทำให้แอปเปิลเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลหรือทำให้น้ำมันพืชเหม็นหืน หรือ กระบวนการออกซิเดชันที่เกิดในร่างกาย เช่น การย่อยสลายโปรตีนและไขมันจากอาหารที่กินเข้าไป

มลพิษทางอากาศ การหายใจ ควันบุหรี รังสียูวี ล้วนทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นในร่างกายของเราได้ (รัชชัย ตระกูลเลิศยศ, 2560)

2.3.2.1 สารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบฟีนอลิกเป็นกลุ่มสารทุติยภูมิที่พบได้ทั่วไปในผัก ผลไม้ ไวน์ ชา น้ำมันมะกอก และซีอิ๊วเกลือ เป็นต้น สารประกอบฟีนอลิกส่วนใหญ่จะพบในรูปอนุพันธ์และหรือไอโซเมอร์ของฟลาโวนส์ ไอโซฟลาโวนส์ ฟลาโวนอลส์ คาร์ทีซิน และกรดฟีนอลิก สารเหล่านี้มีฤทธิ์หลายอย่าง เช่น ด้านการเกิดสภาวะออกซิเดชัน ป้องกันการเกิดโรคมะเร็งต่าง ๆ เช่น มะเร็งเต้านม มะเร็งหลอดอาหาร มะเร็งผิวหนัง มะเร็งลำไส้ มะเร็งต่อมลูกหมาก และมะเร็งตับ เป็นต้น สามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางยา โดยเป็นสารประกอบที่มีฤทธิ์ต้านสารก่อมะเร็ง การอักเสบต่าง ๆ และช่วยปรับระบบภูมิคุ้มกัน สามารถกำจัดอนุมูลอิสระ และโครงสร้างมีความเสถียร สามารถป้องกันการเกิดออกซิเดชันของกรดลิโนเลอิก (Linoleic acid) และ low-density lipoprotein (LDL) ป้องกันเนื้อเยื่อและดีเอ็นเอจากการถูกทำลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

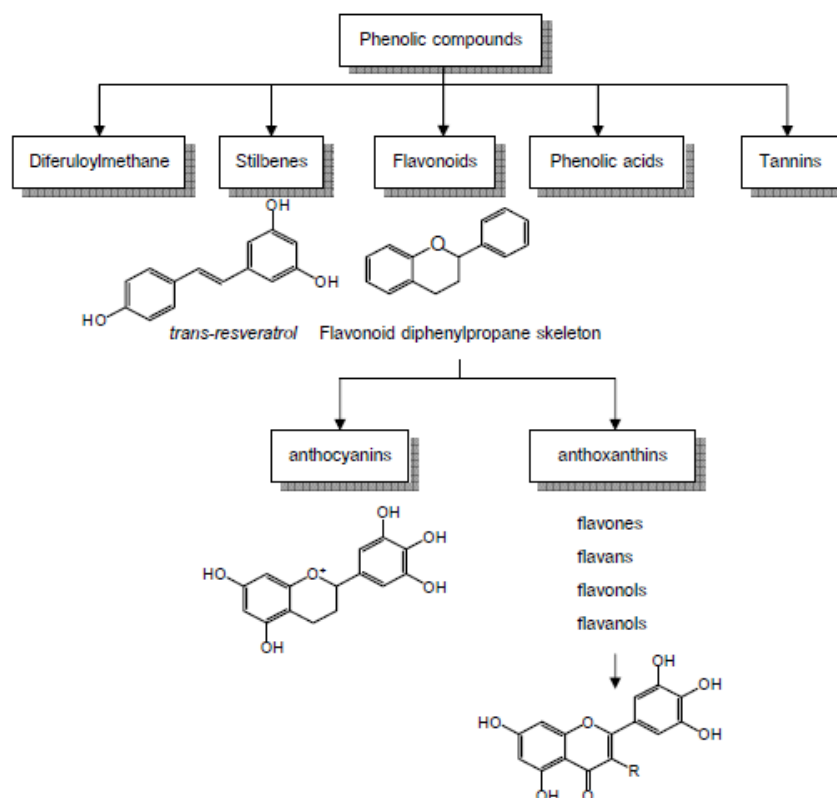
การจำแนกชนิดของสารประกอบฟีนอลิก สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารต้านออกซิเดชันที่พบมากในอาหาร ในธรรมชาติพบมากกว่า 8,000 ชนิด 20 เป็นสารทุติยภูมิที่สร้างขึ้นโดยพืช โดยมีโครงสร้างประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซีเกาะอยู่กับวงแหวนเบนซีน สามารถจำแนกชนิดของสารประกอบฟีนอลิกเป็นกลุ่มต่าง ๆ (ดังแสดงในภาพที่ 2.4) ได้แก่

(1) กลุ่มกรดฟีนอลิกที่มาจาก hydroxybenzoic acids ได้แก่ gallic acid และกรดฟีนอลิกที่มาจาก hydroxycinnamic acid ได้แก่ caffeic, ferulic และ coumaric acid

(2) กลุ่มฟลาโวนอยด์ เป็นกลุ่มใหญ่ ประกอบด้วยกลุ่ม ฟลาโวนส์ ไอโซฟลาโวนส์ ฟลาโวนอลส์ แอนโธไซยานิน และฟลาวานอลส์

(3) กลุ่มสติลเบิน (Stilbenes)

(4) กลุ่มลิกนินส์และโพลีเมอร์ของลิกนินส์ สารประกอบฟีนอลิกพบมากในผลไม้ ผัก และเครื่องดื่ม ร่างกายได้รับกรดฟีนอลิกปริมาณ 1 ใน 3 และ 2 ใน 3 จะเป็นสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่พบมาก ในอาหารจะอยู่ในกลุ่มฟลาโวนอลส์ เช่น คาร์ทีซินส์ และโปรแอนโธไซยานิน และกลุ่มแอนโธไซยานิน (ลือชัย บุตคุป, 2554)



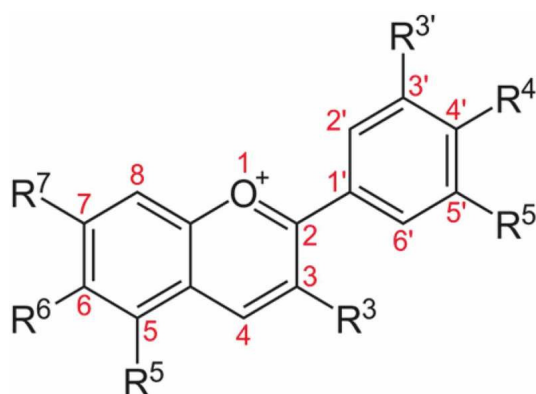
ภาพที่ 2.4 ชนิดของสารประกอบฟีนอลิก
ที่มา: ลือชัย บุตุคุป (2554)

2.3.2.2 ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid)

ฟลาโวนอยด์เป็นสารประกอบฟีนอลิกที่พบมากที่สุด พบได้ทั่วไปในอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพืช เช่น ผัก และผลไม้ ฟลาโวนอยด์เป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างหลักฟลาโวนตรงนิวเคลียส มีสูตรโมเลกุล คือ C_{15} ($C_6-C_3-C_6$) โดยมีวงแหวน A และ B (Phenyl ring) จับกับไพแรนหรือไพโรน (C) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ ring C ทำให้มีการแยกฟลาโวนอยด์ ออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ และการเกิด hydroxylation ที่ ring A และ B ทำให้เกิดอนุพันธ์ของฟลาโวนอยด์ชนิดนั้น ๆ ในธรรมชาติพบฟลาโวนอยด์มากกว่า 4,000 ชนิด ส่วนใหญ่อยู่ในรูปไกลโคไซด์ ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลหนึ่งหมู่หรือมากกว่าในโมเลกุลจะจับอยู่กับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น กลูโคส แรมโนส อะราบิโนสและไซโลส ฟลาโวนอยด์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ (1) แอนโทไซยานิน (Anthocyanins) ซึ่งจะพบในรูปของอนุพันธ์ต่างๆ พบมากในสีของดอกไม้ ผัก และผลไม้ (2) แอนโทแซนทิน (Anthoxanthins) เป็นกลุ่มสารที่ไม่มีสีประกอบด้วยกลุ่มต่างๆ ได้แก่ กลุ่มฟลาโวนส์ ฟลาเวนส์ ไอโซฟลาโวนส์ ฟลาโวนอลส์ ฟลาวานอลส์ และอนุพันธ์ที่อยู่ในรูปไกลโคไซด์ ชนิดของฟลาโวนอยด์ที่พบส่วนใหญ่ คือ ไมริเซติน (Myricetin) ฟิเซติน (Fisetin) เคอซีติน (Quercetin) และเคมเฟอรอล (Kaempferol) (ลือชัย บุตุคุป, 2554)

2.3.2.3 แอนโธไซยานิน (Anthocyanin)

แอนโธไซยานินเป็นรงควัตถุที่ละลายน้ำได้ จัดอยู่ในกลุ่มฟลาโวนอยด์ เป็นสารให้สีตามธรรมชาติ โดยสีของแอนโธไซยานินจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะความเป็นกรด-ด่าง แอนโธไซยานินมีโครงสร้างเป็น แบบ $C_6-C_3-C_6$ (แสดงดังภาพที่ 2.5) ซึ่งเป็นไกลโคไซด์ของ 2-phenylbenzopyrylium หรือ flavylum cation ที่มีด้วยกันหลายชนิด แต่มีอยู่ 6 ชนิดเท่านั้นที่พบบ่อย ได้แก่ pelargonidin, cyanidin, delphinidin, peonidin, petunidin และ malvidin ในสารละลายตัวกลาง แอนโธไซยานินจะทำหน้าที่เป็นอินดิเคเตอร์วัดความเป็นกรด-ด่าง (pH indicator) คือ ให้สีแดงที่ pH ต่ำให้สีน้ำเงินที่สภาวะเป็นกลางและไม่มีสีที่ pH สูง โดยปัจจัยที่มีผลต่อสีและความเสถียรของแอนโธไซยานิน คือ ปัจจัยทางเคมีและกายภาพ เช่น โครงสร้าง อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง กรดแอสคอร์บิก น้ำตาล และปัจจัยอื่น ๆ แอนโธไซยานินมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ทั้งทางเภสัชวิทยาและชีววิทยา เช่น เป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Biological activity) ช่วยต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) สามารถลดอาการอักเสบ (Anti-inflammatory) ช่วยปกป้องหลอดเลือด ลดคอเลสเตอรอลในเลือด ลดความเสี่ยงของโรคมะเร็งและต้านไวรัส แต่คุณสมบัติเด่นที่สุดของแอนโธไซยานินคือ ประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ โดยแอนโธไซยานินมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าวิตามินซี และอีถึง 2 เท่า ปริมาณของแอนโธไซยานินที่มนุษย์สามารถบริโภคได้ ซึ่งเฉลี่ยสูงสุดคือ 200 มิลลิกรัมต่อวัน (สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2553)



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของแอนโธไซยานิน
ที่มา: Khoo et al. (2017)

Thitipramote et al. (2016) ได้ทำการศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (ปริมาณฟีนอลิก แอนโธไซยานินและสาร โปรแอนโธไซยานินทั้งหมด) และกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (DPPH, ABTS radical scavenging and ferric reducing antioxidant power assays; FRAP) ของข้าวกล้องหอมมะลิแดง, ข้าวลิ้มผิว และข้าวกล้องญี่ปุ่น โดยนำข้าวแต่ละชนิดมาทำการสกัดโดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากผลการทดลองพบว่าสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดง (1.018 mg GAE / mg extract) มีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดมากกว่า

ข้าวลิ้มผิวและข้าวกล้องญี่ปุ่น (0.755 และ 0.069 mg GAE / mg extract ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนสารโปรแอนโทไซยานินจะพบเฉพาะในสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงเท่านั้น โดยมีปริมาณ 3.168 mg. CE / mg extract ในขณะที่สารแอนโทไซยานินจะมีเฉพาะในสารสกัดจากข้าวลิ้มผิว ซึ่งมีปริมาณ 17.784 mg / ml extract และจากการศึกษากิจกรรมต้านอนุมูลอิสระทั้ง 3 วิธี (DPPH, ABTS และ FRAP) พบว่าข้าวกล้องหอมมะลิแดง (7.528, 84.476, 10.792 mg TE / mg) มีแนวโน้มกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระที่สูงกว่าข้าวลิ้มผิว (7.227, 79.347, 8.727 mg TE / mg extract) และข้าวกล้องญี่ปุ่น (0.537, 18.199, 0.640 mg TE / mg extract) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งให้เห็นว่าข้าวกล้องหอมมะลิแดง มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูงและมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูง ซึ่งสารสกัดของข้าวกล้องหอมมะลิแดงสามารถนำมาใช้เป็นสารออกฤทธิ์ในเครื่องสำอาง อาหาร และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้

ณัฐณี ตั้งศรีอนุกุล (2551) ได้ทำการศึกษาผลของวิธีการทำแห้งและสภาวะการเก็บรักษาต่อปริมาณของสารกลุ่มฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดง จากการศึกษาการทำแห้งข้าวเปลือก (การทำแห้งในที่ร่ม การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด) แล้วทำการวิเคราะห์ความชื้น a_w ค่าสี ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu และฤทธิ์ต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP จากการทดลองพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์มีความชื้นและค่า a_w ต่ำที่สุด ($p < 0.05$) ค่าสีของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 3 วิธี ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งในที่ร่มมีปริมาณของสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดสูง ($p < 0.05$) แต่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันไม่แตกต่างจากตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ ($p > 0.05$) ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดมีปริมาณของสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันต่ำที่สุด ($p < 0.05$) เมื่อศึกษาสภาวะการเก็บรักษา โดยบรรจุตัวอย่างในบรรจุภัณฑ์ชนิด OPP/AL/LLDPE หรือ Nylon/LLDPE เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง (28-35°C) หรือที่ 15°C เป็นเวลา 12 เดือน พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีใดก็ได้ ตามเมื่อบรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง จะมีความชื้นและค่า a_w เปลี่ยนแปลงมากที่สุดในการเก็บรักษา ระหว่างการเก็บรักษาปริมาณของสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างที่วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH และ FRAP อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงไม่เกินร้อยละ 24 20 และ 26 ของค่าเริ่มต้น (เดือนที่ 0) ตามลำดับ และจากการศึกษาผลของการหุงข้าวต่อค่าสี ปริมาณของสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน พบว่าข้าวกล้องหุงสุกมีค่า L^* สูงกว่าข้าวดิบ ในขณะที่ข้าวกล้องหุงสุกมีค่า a^* และค่า b^* ต่ำกว่าข้าวดิบ สำหรับทุกตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ การหุงข้าวจะทำให้ปริมาณของสารกลุ่มฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างที่วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH และ FRAP มีค่า ลดลงใกล้เคียงกัน

Reddy et al. (2017) ได้ทำการศึกษาการขัดสีข้าวต่อสมบัติทางเคมีกายภาพต่อองค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางเคมีกายภาพ แร่ธาตุและสารต้านอนุมูลอิสระในข้าวสี จากข้าวสีทั้ง 3 สายพันธุ์ ได้แก่ Chak-hao Angangba, Chak-hao Amubi และ Chak-hao Poireiton. พบว่าข้าวมีปริมาณไขมัน ถั่ว แร่ธาตุ สารสำคัญลดลงเมื่อมีการขัดสีข้าว ขณะที่ปริมาณอะไมโลสและค่าความขาวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น จากการศึกษาสมบัติแป้งเปียกและสมบัติทางความร้อนพบว่ามีความลดลงหลังจากการขัดสีข้าว ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลึกในเม็ดสตาร์ช (Crystallinity)

เอนทาลปี (Enthalpy) และสัณฐานวิทยา (Morphology) ของแป้งข้าว เมื่อทำการศึกษาด้านอนุมูลอิสระในข้าวที่ไม่ผ่านการขัดสีและข้าวที่ผ่านการขัดสี พบว่า กระบวนการขัดสีส่งผลให้ข้าวมีแนวโน้มของปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด, ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และ DPPH ลดลง เนื่องจากการกำจัดส่วนเยื่อหุ้มหรือรำข้าว และจมูกข้าว ซึ่งมีส่วนดังกล่าวมีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่สูง และเมื่อพิจารณาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด พบว่า ข้าวทุกชนิดจะมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าปริมาณฟลาโวนอยด์ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าสารประกอบฟีนอลิกมีหลายชนิด เช่น ฟลาโวนอยด์ ซึ่งสามารถพบได้ทุกส่วนของพืช แต่จะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณ

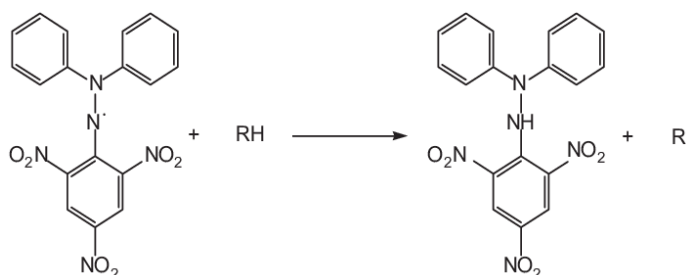
Pramai and Jiamyangyuen (2016) ได้ทำการศึกษาริโซไทยสายพันธุ์ต่าง ๆ ซึ่งประกอบไปด้วยข้าวสีขาวย สีแดง และสีดำ ที่ได้จากทางภาคเหนือของประเทศไทย จากนั้นทำการศึกษาค่าสีและสารต้านอนุมูลอิสระของข้าวสี พบว่า ปริมาณแอนโทไซยานินจะพบในข้าวสีดำ (21.115-441.96 mg/100g rice) สำหรับปริมาณฟีนอลิก ปริมาณฟลาโวนอยด์และ α -tocopherol จะพบสูงที่สุดในกลุ่มข้าวสีดำตามมาด้วยกลุ่มข้าวสีแดง และเมื่อทำการศึกษาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ พบว่าจะมีค่านี้อยู่สูงในข้าวทุกสายพันธุ์ ข้าวสีดำที่ปลูกบริเวณภูเขาจะมีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระที่สูงกว่าการปลูกบริเวณพื้นที่อื่น เมื่อทำการศึกษาค่าความสว่าง (L^*) จะมีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระที่ได้ทำการศึกษา ขณะที่ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ โดยเฉพาะ γ -oryzanol มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ จากการศึกษาพบว่า ค่าสีและสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระสามารถเป็นตัวบ่งชี้หรือจำแนกชนิดของข้าวสีได้ โดยใช้ PCA และ HCA

2.3.3 การวัดความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

การวัดความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเป็นขั้นตอนสำคัญในการวิเคราะห์ และประเมินคุณภาพของสารต้านอนุมูลอิสระ ใช้วัดปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระในสารสกัดหยาบ (Crude extract) ด้วยหลักการวัดการดูดกลืนคลื่นแสง (กิตติพัฒน์ โสภิตธรรมคุณ และปานทิพย์ รัตนศิลป์กัลยาณู, 2560)

2.3.3.1 ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)

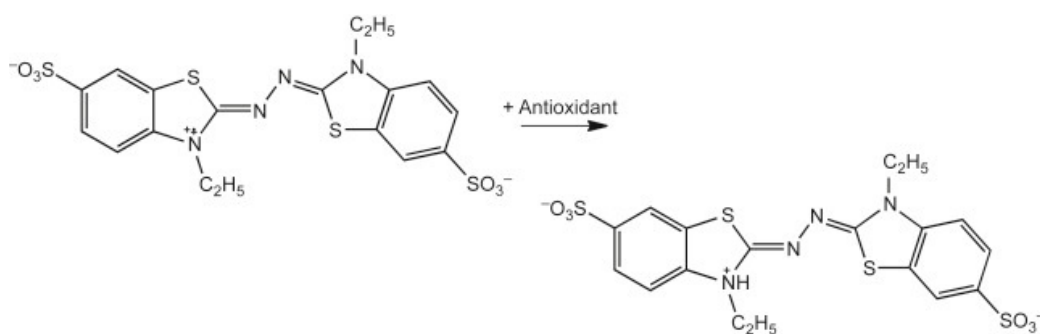
DPPH คืออนุมูลอิสระที่มีความเสถียร (Stable free radical) โดยแสดงดังภาพที่ 2.6 เป็นสารที่นิยมนำไปใช้เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารที่สนใจ ใช้หลักการของ DPPH• ในรูปของอนุมูลอิสระ ที่อยู่ในสารละลายจะมีสีม่วงเข้ม และดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร การสูญเสียอิเล็กตรอนอิสระให้กับโมเลกุลอื่น โดยมีตัวรับอิเล็กตรอนคือสารต้านอนุมูลอิสระหรือสารสกัด จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปออกซิไดซ์ (DPPH) ซึ่งการลดลงของอนุมูลอิสระดังกล่าวจะสังเกตได้จากการจางลงของสีม่วงในสารละลาย สามารถวัดการค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ลดลงที่ความยาวคลื่นที่ 515 นาโนเมตร เป็นตัวชี้วัดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น หรือก็คือการลดลงของ DPPH ที่มีผลมาจากสารต้านอนุมูลอิสระ



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของ DPPH และการยับยั้งโดยสารต้านอนุมูลอิสระ
ที่มา: Dureja and Dhiman (2012)

2.3.3.2 ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ ABTS [2,2'-azinobis-(3-ethyl-benzothiazoline-6-sulfonic acid)]

ใช้หลักการเหมือนกับการลดลงของอนุมูลอิสระ DPPH แต่ในกรณี ABTS^{•+} เป็นอนุมูลอิสระที่มีประจุเป็นบวก ในสารละลายจะมีสีเขียวเข้มและมีค่าการดูดกลืนแสงความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) หลายค่าได้แก่ 415, 645, 734 และ 815 นาโนเมตร แต่ทั่วไปแล้วจะนิยมใช้ความยาวคลื่นที่ 415 และ 743 นาโนเมตรในการติดตามปฏิกิริยา โดยในการลดลงของการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นดังกล่าว จะใช้เป็นตัวชี้วัดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น (สีเขียวของสารละลายจางลง) ในการเตรียมอนุมูลอิสระของ ABTS เพื่อใช้ทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระจะมีขั้นตอนที่ยุ่งยากกว่าในกรณีของ DPPH นั่นคือ ต้องนำเอา ABTS ไปบ่มกับ potassium persulfate ด้วยอัตราส่วน 1:0.5 (Stoichiometry ratio) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12-16 ชั่วโมง เพื่อให้ได้อนุมูลอิสระที่เป็นประจุบวกของ ABTS^{•+} ก่อนนำไปใช้ในการทดสอบปฏิกิริยาการต้านอนุมูลอิสระต่อไป (แสดงดังภาพที่ 2.7)

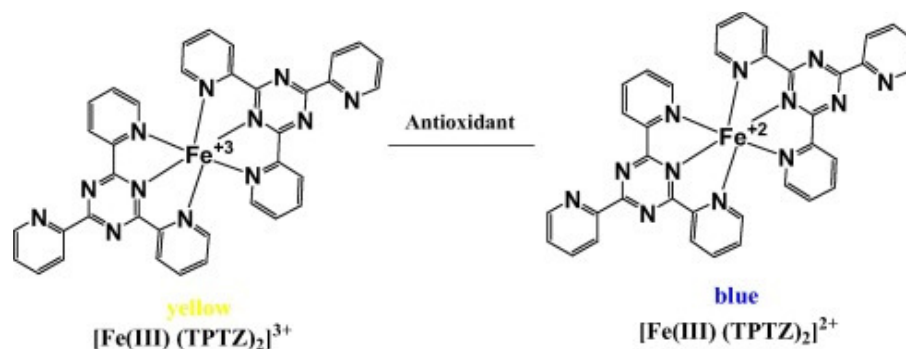


ภาพที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาของสาร ABTS กับสารต้านอนุมูลอิสระ
ที่มา: Hernández-Rodríguez, Baquero and Larrota. (2019)

2.3.3.3. การวัดความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของสารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี Ferric reducing antioxidant power (FRAP)

หลักการของวิธีนี้จะวัดความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของสารต้านอนุมูลอิสระ (คุณสมบัติเป็น Reductant) จะใช้หลักการที่แตกต่างจาก DPPH และ ABTS โดยในสารละลาย FRAP ประกอบด้วย Fe^{3+} และ 2,4,6-tri (2-pyridyl)-1,3,5-triazine (TPTZ) ในสถานะที่เป็นกรด

โดย Fe^{3+} ใน FRAP reagent จะรับอิเล็กตรอนจากสารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐาน หรือในสารสกัดจากสมุนไพรแล้วเปลี่ยนเป็น Fe^{2+} จากนั้นเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับ TPTZ เปลี่ยนเป็นสารประกอบเชิงซ้อนดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร การวัดความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีนี้ จะวัดจากการเพิ่มขึ้นของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Fe^{2+} และ TPTZ โดยค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นที่ความยาวคลื่นดังกล่าวนี้จะใช้เป็นตัวชี้วัดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น (แสดงดังภาพที่ 2.8)



ภาพที่ 2.8 การเกิดปฏิกิริยาของ FRAP assay
ที่มา: Pérez-Cruz et al. (2018)

2.4 ดัชนีน้ำตาล (Glycemic index)

Glycemic index (GI) หรือ ดัชนีน้ำตาล คือ ค่าที่มีเฉพาะในสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตเท่านั้น โดยเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงความสามารถของอาหารที่ประกอบไปด้วยคาร์โบไฮเดรตต่าง ๆ นั้นว่ามีผลต่อการขึ้นของระดับน้ำตาลในเลือดได้รวดเร็วเพียงใดภายใน 2-3 ชั่วโมง หลังการบริโภคอาหารชนิดนั้น ค่าดัชนีน้ำตาลในอาหารสำคัญกับผู้ป่วยเบาหวานมาก เพราะผู้ป่วยเบาหวานจะมีความผิดปกติของฮอร์โมนที่ชื่อว่าอินซูลิน (Insulin) ซึ่งเป็นฮอร์โมนที่ทำหน้าที่ในการควบคุมระดับน้ำตาลในกระแสเลือด ดังนั้นหากผู้ป่วยเบาหวานมีความรู้ความเข้าใจในการเลือกแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำได้ ก็จะสามารถควบคุมโรคเบาหวานได้ (ตามพงศ์ เหลืองบริบูรณ์, 2561)

การรับประทานอาหารที่มีค่า GI สูงจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลในกระแสเลือดอย่างรวดเร็ว และสูงมาก ในขณะที่มีการรับประทานอาหารที่มีค่า GI ต่ำ จะมีการปลดปล่อยน้ำตาลเข้าสู่กระแสเลือดอย่างช้า และมีความสม่ำเสมอ ทำให้ร่างกายสามารถควบคุมปริมาณน้ำตาลในเลือดได้ให้อยู่ในระดับปกติ โดยทั่วไปแล้ว สามารถแบ่งระดับ GI ได้ทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่

- (1) ดัชนีน้ำตาลต่ำ (Low Glycemic) คือ ค่าจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำตาลในเลือดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 55
- (2) ดัชนีน้ำตาลปานกลาง (Medium Glycemic) คือ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำตาลในเลือดระหว่าง 56-69
- (3) ดัชนีน้ำตาลสูง (High Glycemic) คือ ค่า จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำตาลในเลือดมากกว่าหรือเท่ากับ 70

สุนันทา วงศ์ปิยชน และคณะ (2558) ได้ทำการศึกษาค่าดัชนีน้ำตาลและดัชนีอินซูลินของข้าวสุก จากข้าวจำนวน 8 พันธุ์ ที่มีปริมาณอะไมโลสต่าง ๆ กัน เป็นข้าวเหนียว 1 พันธุ์ คือ กข6 ข้าวอะไมโลสต่ำ 4 พันธุ์ คือ ข้าวดอกมะลิ 105 ปทุมธานี 1 ทับทิมชุมแพ และ มะลิณีสรรรินทร์ ข้าวอะไมโลสปานกลาง 1 พันธุ์ คือ ข้าวตาแห้ง 17 และข้าวอะไมโลสสูง 2 พันธุ์ คือ แจ็กเซย์ 1 และ เหลืองประทิว 123 ทำการศึกษาในผู้ป่วยโรคเบาหวานชนิดที่ 2 จำนวน 12 คน โดยการเจาะเลือดหาค่าเฉลี่ยระดับน้ำตาลและอินซูลินในเลือดหลังจากบริโภคข้าวสุกจากข้าวขาว ข้าวกล้อง และข้าวกล้องงอก เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยระดับน้ำตาลและอินซูลินหลังบริโภคสารละลายกลูโคสที่เวลา 0, 30, 60, 90, 120, 180 และ 240 นาที แล้วคำนวณค่าดัชนีน้ำตาล (GI) และดัชนีอินซูลิน (I) พบว่า ข้าวพันธุ์ กข6 ข้าวดอกมะลิ 105 ปทุมธานี 1 ทับทิมชุมแพ มะลิณีสรรรินทร์ ข้าวตาแห้ง 17 แจ็กเซย์ 1 และเหลืองประทิว 123 ในข้าวขาวมีค่าดัชนีน้ำตาลเท่ากับ 61.9, 63.2, 62.9, 59.7, 63.9, 53.6, 49.0 และ 50.2 ในข้าวกล้องมีค่าดัชนีน้ำตาลเท่ากับ 61.5, 57.0, 56.7, 58.8, 61.3, 48.6, 49.1 และ 41.4 ในข้าวกล้องงอกมีค่าดัชนีน้ำตาลเท่ากับ 55.4, 56.3, 53.3, 54.8, 56.3, 51.0, 47.3 และ 45.2 ตามลำดับ สำหรับค่าดัชนีอินซูลินในข้าวขาว มีค่าเท่ากับ 83.5, 74.1, 79.6, 62.7, 62.0, 71.2, 62.3 และ 54.0 ในข้าวกล้องมีค่าดัชนีอินซูลินเท่ากับ 71.8, 85.7, 76.6, 63.5, 74.9, 73.6, 64.9 และ 40.7 ในข้าวกล้องงอกมีค่าดัชนีอินซูลินเท่ากับ 68.7, 76.6, 66.6, 70.2, 66.4, 61.9, 65.1 และ 51.6 ตามลำดับ จากข้าวที่ทดสอบพบว่าข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกพันธุ์ข้าวตาแห้ง 17 แจ็กเซย์ 1 และเหลืองประทิว 123 เป็นข้าวดัชนีน้ำตาลต่ำ

2.5 เส้นกวยจั๊ว

เส้นกวยจั๊ว หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากข้าวเจ้าที่ไม่แล้วหรือแป้งข้าวเจ้าผสมกับแป้งมันสำปะหลังทำให้สุกแล้วนำมาผสมกับแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังอีกครั้งหนึ่ง โดยอาจผสมแป้งข้าวเหนียวด้วยก็ได้อัดเป็นเส้น แล้วทำให้แห้งด้วยแสงแดดหรือแหล่งพลังงานอื่น ลักษณะเนื้อสัมผัสเมื่อทำให้สุกแล้ว เส้นต้องไม่เกาะติดกัน และนิ่มเหนียว (สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2546)

กวยจั๊วญวน เป็นเมนูที่คนไทยได้รับเอาวัฒนธรรมการกินอยู่มาจากคนญวน (ประเทศเวียดนาม ซึ่งคนทางภาคอีสานมักจะเรียกว่า คนญวน) เป็นอาหารท้องถิ่นที่นิยมกินกันในมื้อเช้า ชาวเวียดนามเดินทางเข้ามาอยู่ในประเทศไทยตั้งแต่สมัยกรุงศรีอยุธยา และได้กระจายไปอาศัยอยู่ตามเมืองจังหวัดต่างๆ เมื่อชาวเวียดนามเข้ามาในประเทศไทยก็นำวัฒนธรรมอาหารการกินแบบเวียดนามเข้ามาด้วย แต่เดิมเมนูนี้มีชื่อเรียกเป็นภาษาเวียดนามว่า จ้าว กัน แต่คนไทยรู้จักกันในชื่อ กวยจั๊วญวน หรือ ข้าวเปียกเส้น (บางจังหวัดจะเรียกข้าวเปียกเส้น เช่น จังหวัดนครพนม หนองคาย อุดรธานี เป็นต้น) กวยจั๊วญวน เป็นที่รู้จักกันมานานกว่าเกือบร้อยปี เส้นกวยจั๊วญวนจะมีสีขาวขุ่นตอนที่ยังไม่ต้ม แต่เมื่อนำไปต้มแล้วเส้นจะมีสีใส (พิชญาดา เจริญจิต, 2561)

กวยจั๊วอุบล หรือกวยจั๊วญวน เป็นอาหารพื้นเมืองที่ได้รับความนิยมของชาวจังหวัดอุบลราชธานี และจังหวัดใกล้เคียง โดยนำมารับประทานร่วมกับหมูยอ และน้ำซุบ เส้นกวยจั๊วญวน (เส้นสด) ของอุบลแท้จะมีความพิเศษคือเหนียวนุ่ม เส้นใส ต้มง่ายไม่หัก กวยจั๊วอุบลที่นิยมมีจำหน่ายอยู่ 2 ชนิด คือ เส้นใหญ่ซึ่งมีขนาดเส้นใหญ่กว่าเส้นกวยจั๊วแบบเล็กประมาณสองถึงสามเท่า แต่ชนิดที่เป็นที่นิยมมาก

คือ แบบเส้นเล็กเนื่องจากใช้เวลาต้มน้อย สุกง่าย (การะเวก, 2551) ส่วนเส้นกวยจั๊บอุบลเส้นแห้งเมื่อนำเส้นไปทำให้สุกที่บริเวณผิวภายนอกจะสุกก่อนแต่แกนกลางของเส้นยังไม่สุก หรือถ้าภายในแกนกลางเส้นสุกผิวภายนอกเส้นจะมีลักษณะและ ในการทำให้สุกต้องนำเส้นแห้งมาแช่น้ำก่อนนำไปต้ม ลักษณะเส้นที่ได้ไม่เหนียวและขาดง่าย

จิตรา สิงห์ทอง (2556) ได้ทำการศึกษาสารไฮโดรคอลลอยด์เพื่อปรับปรุงคุณลักษณะของแป้งและเส้นกวยจั๊บอุบล โดยใช้ไฮโดรคอลลอยด์ทั้งหมด 6 ชนิดคือ แชนแทนกัม กัวร์กัม อัลจิเนต คาร์ราจีแนน ผงบุก และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยกำหนดปริมาณสารไฮโดรคอลลอยด์ทั้ง 6 ชนิดที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 โดยน้ำหนัก เติมน้ำหนัก เติมน้ำหนักในสูตรกวยจั๊บอุบลที่ต้องการนำมาปรับปรุงคุณภาพ พบว่าปริมาณการเติมไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิดที่สามารถปรับปรุงคุณภาพทั้งทางเคมีและทางกายภาพรวมทั้งประสาทสัมผัสของเส้นกวยจั๊บอุบลได้ดีที่สุดคือ แชนแทนกัมร้อยละ 0.5, กัวร์กัมร้อยละ 0.75, คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 0.75, คาร์ราจีแนนร้อยละ 0.25, อัลจิเนตร้อยละ 0.75 และผงบุกร้อยละ 1.0

Jarnsuwan and Thongngam (2011) ได้ทำการศึกษาการเติมกัวร์กัม แชนแทนกัม และ CMC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ลงในกระบวนการผลิตเส้นกวยเตี๋ยว พบว่าร้อยละผลผลิตมีค่าสูงขึ้นเมื่อเติมกัวร์กัมและแชนแทนกัมร้อยละ 1.0 และ CMC ทั้ง 2 ระดับความเข้มข้น ผิวของเส้นกวยเตี๋ยวมียุขลักษณะรุขร ค่าแรงเคี้ยวและแรงเคี้ยวสูงสุด เมื่อเติมกัวร์กัมร้อยละ 1.0 และการเติม CMC เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก คุณภาพเส้นที่ได้เหมือนกับสูตรควบคุม

Jang, Bae and Lee. (2015) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ต่อการต้านทานการย่อย รวมถึงคุณภาพของเส้นกวยเตี๋ยวที่ผลิตจากแป้งจากธัญพืช พบว่า เส้นกวยเตี๋ยวที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ทำให้แป้งถูกย่อยได้ลดลง โดยเฉพาะกวยเตี๋ยวที่ผลิตจากข้าวสาลี และข้าวสาลีที่ไม่ผ่านการขัดสี แต่เส้นกวยเตี๋ยวที่ผลิตจากแป้งข้าวโพดผสมไฮโดรคอลลอยด์จะถูกย่อยได้สูงขึ้น และสรุปว่า การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการผลิตเส้นกวยเตี๋ยวจากแป้งจากธัญพืชทำให้คุณภาพของเส้นที่ได้มีคุณภาพหลังทำให้สุกดีขึ้นและมีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างจากชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์

Sutheeves, Chai-Uea and Thirathumthavorn, (2020) ได้ทำการศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและการยอมรับทางประสาทสัมผัสของเส้นกวยเตี๋ยวปราศจากกลูเตนที่สำเร็จรูปจากแป้งข้าวและแป้งถั่วเขียว โดยใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ ได้แก่ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (HPMC) กัวร์กัม (GG) และแชนแทนกัม (XG) จากผลการศึกษาพบว่าเส้นกวยเตี๋ยวปราศจากกลูเตนที่มีการใช้ CMC มีการดูดซึมน้ำมันและใช้เวลาในการทำสุก (Cooking time) น้อยที่สุด ไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการเกิดเจลลิตินซ์ของโดแป้งกวยเตี๋ยว การเพิ่มขึ้นของ GG ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางสัมผัสและผลตอบแทนการปรุงอาหารของเส้นกวยเตี๋ยวที่สำเร็จรูป เส้นกวยเตี๋ยวที่เสริมด้วย HPMC แสดงให้เห็นว่ามีการสูญเสียระหว่างหุงต้ม (Cooking loss) ต่ำกว่าตัวอย่างอื่น ๆ เมื่อทำการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างของเส้นกวยเตี๋ยวพบว่า เส้นกวยเตี๋ยวที่มีการใช้ XG เผยให้เห็นถึงความไม่เป็นโครงสร้างตาข่าย จากการศึกษาพบว่าการเพิ่ม GG หรือ HPMC ช่วยปรับปรุงการยอมรับทางประสาทสัมผัสของเส้นกวยเตี๋ยวที่สำเร็จรูปปราศจากกลูเตน

หทัยชนก ศรีประไพ, ฉัตรชนก บุญไชย และยศสินี หัวดวง (2561) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์พาสต้าชนิดราวีโอลีแบบสดจากแป้งข้าวกล้อง โดยมีการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวกล้อง ในผลิตภัณฑ์พาสต้าชนิดราวีโอลีแบบสดที่ระดับร้อยละ 0 (ตัวอย่างควบคุม), 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักแป้ง ผลการตรวจสอบคุณภาพในด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ พบว่า ในด้านค่าสี เมื่อปริมาณแป้งข้าวกล้องเพิ่มขึ้น พาสต้าที่ได้มีค่าความเป็นสีแดง (a^*) เพิ่มขึ้น แต่ค่าความสว่าง (L^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ลดลง ($p \leq 0.05$) ส่วนด้านเนื้อสัมผัส เมื่อมีการทดแทนด้วยปริมาณแป้งข้าวกล้องที่เพิ่มขึ้น ค่าการยืดเกาะลดลง และจากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสทางด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติ ความยืดหยุ่น และความชอบโดยรวม พบว่าผลิตภัณฑ์พาสต้าสดที่ทดแทนด้วยแป้งข้าวกล้องที่ระดับร้อยละ 20 ให้คะแนนความชอบมากที่สุดในด้านความเหนียวนุ่มและความชอบโดยรวม เมื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์พาสต้าสดจากแป้งข้าวกล้อง มีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใย และคาร์โบไฮเดรต เท่ากับร้อยละ 31.11, 10.10, 4.72, 0.87, 6.72 และ 46.48 ตามลำดับ และเมื่อศึกษาฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging assay และ FRAP assay พบว่าพาสต้าที่ทดแทนด้วยแป้งข้าวกล้องมีศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระดีกว่าพาสต้าตัวอย่างควบคุม ทั้งวิธี DPPH และ FRAP (0.81 ± 0.03 mg TEAC/g DW, 0.67 ± 0.03 mg Fe(II)/g DW ตามลำดับ) และมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 1.05 ± 0.01 mg GAE/g DW

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบ วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 วัตถุดิบ

ข้าวกล้อง 4 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวกล้องหอมมะลิแดง ข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่ (ชื่อจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตข้าวกล้องบ้านสร้างมีง 120 ม.7 ต.หนองเมือง อ.ม่วงสามสิบ จ.อุบลราชธานี) และข้าวกล้องหอมนิล (ชื่อจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนร่วมใจโนนค้อทุ่ง 157 ม.5 ต.โพนเมืองน้อย อ.ห้วยตะพาน จ. อำนาจเจริญ)

3.1.2 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

3.1.2.1 เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) รุ่น LLOYD model LR 5K Series ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2.2 เครื่องวัดสี (Chroma meter) ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Color Flex 45/0 ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2.3 เครื่องวิเคราะห์และแยกสารของเหลวด้วยความดันสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) ยี่ห้อ Waters Alliance รุ่น Waters 2695 ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2.4 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและโลหะด้วยเทคนิค ICP (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer, ICP-OES) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Optima8000 ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2.5 กล้องจุลทรรศน์ ชนิด 3 ตา (Trinocular Microscope) ยี่ห้อ Carl ZEISS รุ่น Primo Star+AxioCam Erc 5s ประเทศเยอรมนี

3.1.2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น primus 7600+ ประเทศญี่ปุ่น

3.1.2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV ประเทศญี่ปุ่น

3.1.2.8 เครื่อง UV-Vis spectrophotometer ยี่ห้อ Thermo Fisher Scientific รุ่น Evolution 300 PC ประเทศสหรัฐอเมริกา และ Cuvette

3.1.2.9 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น DSC3 ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2.10 เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) ยี่ห้อ Newport รุ่น RVA-4 ประเทศออสเตรเลีย

3.1.2.11 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น S220 SevenCompact™ pH/Ion ประเทศสหรัฐอเมริกา

- 3.1.2.12 ไมโครปิเปต ยี่ห้อ Rainin ขนาด 100-1000 ไมโครลิตร รุ่น SL-1000XLS ประเทศเยอรมัน
- 3.1.2.13 เครื่องปั่นเหวี่ยง ยี่ห้อ Hettich Undertable centrifuge รุ่น ROTANTA 460 RC (with cooling) ประเทศเยอรมัน
- 3.1.2.14 หลอดปั่นเหวี่ยงพลาสติก (Centrifuge tube) ขนาด 50 ml
- 3.1.2.15 กระบอกฉีดยา (Syringe) และเข็มฉีดยา
- 3.1.2.16 หม้อนึ่งความดันฆ่าเชื้อระบบไฟฟ้า (Autoclave) ยี่ห้อ HIRAYAMA รุ่น HV-85 II NEW ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.2.17 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น QUINTIX224-1S ประเทศเยอรมัน
- 3.1.2.18 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ยี่ห้อ VERINOX รุ่น J1900 ประเทศอิตาลี
- 3.1.2.19 ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ memmert รุ่น UF-Series ประเทศเยอรมัน
- 3.1.2.20 เครื่องสกัดไขมัน SER148 Solvent Extraction Unit ยี่ห้อ VELP Scientifica ประเทศอิตาลี
- 3.1.2.21 เครื่อง vortex mixture ยี่ห้อ Scientific industries รุ่น Vortex – Genie 2 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.2.22 เตาเผา (Muffle furnace) ยี่ห้อ CARBOLITE รุ่น CFW 11/13 ประเทศอังกฤษ
- 3.1.2.23 เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hotplate Stirrer) ยี่ห้อ SCHOTT รุ่น EW-84305-00 ประเทศประเทศเยอรมัน และ Magnetic bar
- 3.1.2.24 เครื่องบดแห้งอเนกประสงค์ ยี่ห้อ NANOTECH รุ่น NT-200C ประเทศไทย
- 3.1.2.25 โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 3.1.2.26 ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 10, 50, 100, 250, 500, 1000 มิลลิลิตร
- 3.1.2.27 ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask) 10, 25, 50, 100, 200, 500, 1000 มิลลิลิตร
- 3.1.2.28 ปิเปต (Pipette) ขนาด 1, 2, 5, 10 และ 25 มิลลิลิตร
- 3.1.2.29 กระดาษกรอง เบอร์ 1 และ 4 ยี่ห้อ Whatman
- 3.1.2.30 ตะแกรงร่อน ขนาด 40 และ 80 mesh ยี่ห้อ Endecotts ประเทศอังกฤษ
- 3.1.2.31 เครื่องอัดเส้นกวยจั๊บ
- 3.1.2.32 ถ้วยอะลูมิเนียม (can)
- 3.1.2.33 Fiber bag
- 3.1.2.34 ที่คีบ (Tongs/Forceps)
- 3.1.2.35 Aluminum pan 40 µl
- 3.1.2.36 ถุงบรรจุภัณฑ์ชนิดโพลิโพรพิลีน (Polypropylene bag) Food grade
- 3.1.2.37 ถุงบรรจุภัณฑ์ชนิดสุญญากาศ (Vacuum bag) Food grade

3.1.3 สารเคมี

- 3.1.3.1 ABTS (2,2'-Azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich #11557-1g ประเทศจีน
- 3.1.3.2 Acetic acid glacial Analytical Grade ยี่ห้อ QeëC ประเทศนิวซีแลนด์
- 3.1.3.3 Aluminum chloride hexahydrate ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) Analytical Grade ยี่ห้อ Ajax Finechem Pty Ltd ประเทศออสเตรเลีย
- 3.1.3.4 Amyloglucosidase (form *Aspergillus niger* 300U/mL) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich #A7095-50ml ประเทศเดนมาร์ก
- 3.1.3.5 Amylose form potato ยี่ห้อ Sigma-Aldrich #A0512-1g ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.6 Boric acid (H_3BO_3) Analytical Grade ยี่ห้อ KemAus ประเทศออสเตรเลีย
- 3.1.3.7 Copper (II) sulphate ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) Analytical Grade ยี่ห้อ Ajax Finechem Pty Ltd ประเทศออสเตรเลีย
- 3.1.3.8 D-Glucose Assay Kit (GOPOD-FORMAT) K-GLUC 02/18 ยี่ห้อ Megazyme ประเทศไอร์แลนด์
- 3.1.3.9 DPPH (2, 2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich #D9132-1g ประเทศเยอรมนี
- 3.1.3.10 Ethyl alcohol 99.9% Analytical Grade ยี่ห้อ QeëC ประเทศนิวซีแลนด์
- 3.1.3.11 Ferrous chloride (Iron (III) chloride, FeCl_3) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich #157740-1kg ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.12 Ferrous sulfate (Iron (II) sulphate, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) Analytical Grade ยี่ห้อ BDH Laboratory ประเทศอังกฤษ
- 3.1.3.13 Folin & Ciocalteu's phenol reagent ยี่ห้อ Sigma-Aldrich #47641-100ml ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
- 3.1.3.14 Gallic acid monohydrate ยี่ห้อ Sigma-Aldrich #398225-100g ประเทศจีน
- 3.1.3.15 Hydrochloric acid (HCl) Analytical Grade ยี่ห้อ QeëC ประเทศนิวซีแลนด์
- 3.1.3.16 Invertase from baker's yeast (*S. cerevisiae*) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich #I9274-100mg ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.17 Iodine (I_2) Analytical Grade ยี่ห้อ Riedel-de Haën ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.3.18 Pancreatin (From porcine pancrease) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich #P3292-100g สหราชอาณาจักร
- 3.1.3.19 Pepsin (From porcine gastric mucosa) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich #P7000-25g ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.3.20 Peptone water ยี่ห้อ HiMedia Laboratories Pvt Ltd ประเทศอินเดีย

3.1.3.21 Petroleum ether Analytical Grade ยี่ห้อ AppliChem

ประเทศเยอรมัน

3.1.3.22 Plate count agar ยี่ห้อ HiMedia Laboratories Pvt Ltd ประเทศอินเดีย

3.1.3.23 Potassium chloride (KCl) Analytical Grade ยี่ห้อ Carlo Erba

ประเทศอิตาลี

3.1.3.24 Potassium iodide (KI) Analytical Grade ยี่ห้อ Ajax Finechem Pty Ltd

ประเทศออสเตรเลีย

3.1.3.25 Potassium persulfate ($K_2S_2O_8$) Analytical Grade ยี่ห้อ KemAus

ประเทศออสเตรเลีย

3.1.3.26 Potato dextrose agar ยี่ห้อ HiMedia Laboratories Pvt Ltd

ประเทศอินเดีย

3.1.3.27 Potassium sulphate (K_2SO_4) Analytical Grade ยี่ห้อ KemAus ประเทศ

ออสเตรเลีย

3.1.3.28 Quercetin hydrate ($C_{15}H_{10}O_7 \cdot xH_2O$) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich #337951-25g ประเทศญี่ปุ่น

3.1.3.29 Sodium acetate (CH_3COONa) Analytical Grade ยี่ห้อ QeëC ประเทศนิวซีแลนด์

3.1.3.30 Sodium carbonate (Na_2CO_3) Analytical Grade ยี่ห้อ Ajax Finechem Pty Ltd ประเทศนิวซีแลนด์

3.1.3.31 Sodium hydroxide (NaOH) Analytical Grade ยี่ห้อ Ajax Finechem Pty Ltd ประเทศออสเตรเลีย

3.1.3.32 Sodium nitrite ($NaNO_2$) Analytical Grade ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี

3.1.3.33 Sulfuric acid (H_2SO_4) Analytical Grade ยี่ห้อ QeëC ประเทศนิวซีแลนด์

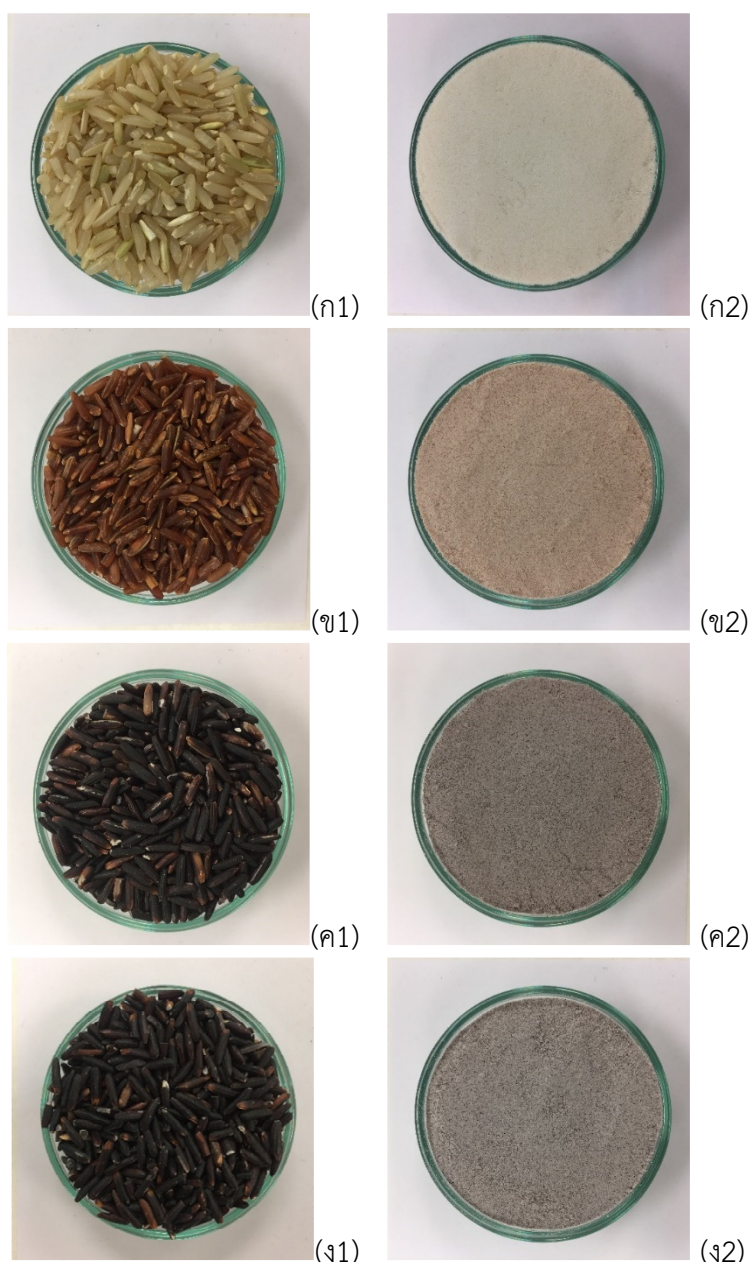
3.1.3.34 Tartaric acid Analytical Grade ยี่ห้อ Ajax Finechem Pty Ltd ประเทศออสเตรเลีย

3.1.3.35 TPTZ (2,4,6-Tris(2-pyridyl)-s-triazine) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich #93285-1g ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

3.1.3.36 Trolox (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich #238813-1g ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นที่ 1 ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกัลลิ่ง 4 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวกัลลิ่งหอมมะลิ แป้งข้าวกัลลิ่งหอมมะลิแดง ข้าวกัลลิ่งไรซ์เบอร์รี่ และข้าวกัลลิ่งหอมนิล และขั้นตอนที่ 2 ศึกษาสูตร วิธีการผลิตเส้นกวยจั๊บอุบลเสริมแป้งข้าวกัลลิ่งที่เหมาะสม และคุณภาพของเส้นกวยจั๊บเสริมแป้งข้าวกัลลิ่งที่ได้ ซึ่งการศึกษามีการดำเนินการทดลองดังนี้



ภาพที่ 3.1 เมล็ดข้าวกัลลิ่งสี (1) และแป้งข้าวกัลลิ่งสี (2) โดย (ก) ข้าวกัลลิ่งหอมมะลิ (ข) ข้าวกัลลิ่งหอมมะลิแดง (ค) ข้าวกัลลิ่งไรซ์เบอร์รี่ (ง) ข้าวกัลลิ่งหอมนิล

3.2.1 การเตรียมแป้งข้าว

นำข้าวกล้อง ได้แก่ ข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวกล้องหอมมะลิแดง ข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่ และ ข้าวกล้องหอมนิล มาทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที เพื่อให้ ความชื้นไม่เกินร้อยละ 13 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งข้าวเจ้า : มอก. 638-2529 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2529) นำไปบดด้วยเครื่องบดเพื่อลดขนาด จากนั้นร่อน ผ่านตะแกรงขนาด 80 mesh แล้วบรรจุในถุงสุญญากาศ และแช่แข็งไว้จนกว่าจะมีการวิเคราะห์

3.2.2 ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้ง ข้าวกล้อง

3.2.2.1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของแป้งข้าวกล้อง

1) วิเคราะห์ลักษณะ รูปร่าง และขนาดของเม็ดแป้ง ด้วยกล้องจุลทรรศน์ และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM) ดัดแปลงตาม วิธีการของ Thiranusornkij et al. (2019)

2) วัดค่าสีแป้งข้าว ด้วยเครื่องวัดสี (Chroma meter)

3.2.2.2 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของแป้งข้าวกล้อง

1) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน เยื่อใย และคาร์โบไฮเดรต (AOAC, 2005)

2) วิเคราะห์วิตามิน ได้แก่ วิตามินบี 1 (Thiamine) วิตามินบี 2 (Riboflavin) วิตามินบี 3 (Niacin / Niacinamide) วิตามินเอ (Beta-carotene) และวิตามินอี (Alpha-Tocopherol) ดัดแปลงตามวิธีการของ Al-Farga and et al. (2016) โดยใช้เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

3) วิเคราะห์แร่ธาตุของแป้งข้าวกล้อง ได้แก่ ฟอสฟอรัส (Phosphorus, P) แคลเซียม (Calcium, Ca) โพแทสเซียม (Potassium, K) แมกนีเซียม (Magnesium, Mg) แมงกานีส (Manganese, Mn) สังกะสี (Zinc, Zn) เหล็ก (Iron, Fe) โซเดียม (Sodium, Na) ซีลีเนียม (Selenium, Se) และทองแดง (Copper, Cu) ดัดแปลงตามวิธีการของ AOAC (2000) โดยใช้เครื่อง วิเคราะห์หาปริมาณธาตุและโลหะด้วยเทคนิค ICP (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer, ICP-OES)

4) วิเคราะห์ค่า water activity (a_w) โดยใช้เครื่อง Aqua Lab DewPoint Water Activity Meter

5) วิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส ตามวิธีของ Juliano (1971)

6) วิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาล (Glycemic index: GI) ดัดแปลงตามวิธีการของ Englyst et al. (1996) และ Goñi, Garcia-Alonso, and Saura-Calixto (1997)

3.2.2.3 วิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้อง

1) ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ดัดแปลงตามวิธีการของ Thiranusornkij et al. (2018)

2) ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด วัดตามวิธีของ Pengkumsri et al. (2015)

3) ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด ตามวิธีของ Sultan, Wani and Masoodi (2018)

4) ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ โดยใช้วิธี DPPH วัดตามวิธีของ Sultan, Wani and Masoodi (2018), FRAP วัดตามวิธีของ Thiranusornkij et al. (2019) และ ABTS assay วัดตามวิธีของ Shen et al. (2009)

3.2.2.4 วิเคราะห์สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งข้าวก้อง

1) สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry

2) สมบัติของแป้งเปียก (Pasting properties) ของแป้งเมื่อได้รับความร้อน โดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA)

3) ดัชนีการดูดซับน้ำ (Water absorption index: WAI) และดัชนีการละลาย (Water solubility index: WSI) ตามวิธีของ Kraithong, Lee and Rawdkuen. (2018)

4) ดัชนีการดูดซับน้ำมัน (Oil absorption index: OAI) ตามวิธีของ Kraithong, Lee and Rawdkuen. (2018)

5) กำลังการพองตัว (Swelling power) และการละลาย (Solubility) วัดตามวิธีของ Thiranusornkij et al. (2018)

6) ความสามารถในการละลายของโปรตีน วัดตามวิธีของ Amagliani et al. (2019)

7) ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน (Emulsion capacity: EC) และความคงตัวของอิมัลชัน (Emulsion stability: ES) ตามวิธีของ Sultan, Wani and Masoodi (2018) และ Yasumatsu et al. (1972)

8) ความสามารถในการเกิดโฟม (Foaming capacity: FC) และความคงตัวของโฟม (Foaming stability: FS) ตามวิธีของ Sultan, Wani and Masoodi (2018)

9) ความคงตัวต่อการละลายและการแช่แข็ง (Freeze-thaw stability) และวิเคราะห์ค่าการสูญเสีย (Syneresis) วัดตามวิธีของ Katekhong and Charoenrein (2012)

3.2.3 ศึกษาสูตร วิธีการผลิตเส้นกวยจั๊บอุบลเสริมข้าวก้องที่เหมาะสม และคุณภาพของเส้นกวยจั๊บเสริมข้าวก้องที่ได้

3.2.3.1 สูตรการผลิตเส้นกวยจั๊บอุบลเสริมข้าวก้อง

ศึกษาปริมาณของแป้งข้าวก้องสีที่เหมาะสมในการผลิตเส้นกวยจั๊บอุบล โดยใช้แป้งข้าวก้องสีทดแทนแป้งข้าวเจ้าที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ผสมกับแป้งมันสำปะหลังและสารไฮโดรคอลลอยด์ จากนั้นผสมให้เข้ากัน ด้วยเครื่องนวดแป้ง นำไปนึ่งให้สุก แล้วนำมาผสมกับแป้งส่วนที่เหลือ สารไฮโดรคอลลอยด์ และน้ำเดือด นวดให้เข้ากัน จนแป้งเข้ากันจนเป็นเนื้อเนียน ทำการขึ้นรูปเป็นเส้นกวยจั๊บอุบลจากนั้นนำเส้นกวยจั๊บอุบลมาวิเคราะห์คุณภาพดังนี้

1) การวัดค่าสี ด้วยเครื่องวัดสี (Chroma meter)

2) การวัดค่าลักษณะเนื้อสัมผัส (ความนุ่มและความยืดหยุ่น) โดยการทดสอบแรงดึง (tensile test) ด้วยเครื่อง Texture analyzer

3) คุณภาพการต้มสุก (Cooking quality) ดัดแปลงจากวิธีการของ AACC (2000) ซึ่งประกอบด้วยระยะเวลาในการต้มสุก (Cooking time) ร้อยละผลผลิตการต้มสุก (%Cooking yield) ร้อยละการดูดซับน้ำ (%Water absorption) และร้อยละการสูญเสียระหว่างการหุงต้ม (%Cooking loss)

4) คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส โดยการทดสอบชิม ด้วยวิธีทดสอบความชอบ (9-point Hedonic scale) ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ให้คะแนนในช่วง 1-9 โดยคะแนน 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด และ 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด

5) สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของแป้งผสม โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry

6) สมบัติของแป้งเปียก (Pasting properties) ของแป้งผสม โดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA)

7) วิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสของแป้งผสม ตามวิธีของ Juliano (1971)

3.2.3.2 ศึกษาอายุการเก็บรักษาของเส้นเส้นกวยจั๊บอุบลเสริมข้าวกล้อง

จากการศึกษาสูตรการผลิตเส้นกวยจั๊บอุบลเสริมข้าวกล้อง ทำให้ทราบถึงสูตรการทำเส้นกวยจั๊บอุบลเสริมข้าวกล้องที่เหมาะสม จากนั้นนำมาทำการศึกษาอายุการเก็บรักษาเทียบกับสูตรควบคุม โดยศึกษาบรรจุภัณฑ์ 2 ชนิด ได้แก่ ถุงสุญญากาศ (Vacuum) ถุงโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) ทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2) และอุณหภูมิเย็น (4-10 องศาเซลเซียส) แล้วทำการตรวจวิเคราะห์คุณภาพทุกสัปดาห์ ดังนี้

1) การวัดค่าสี ด้วยเครื่องวัดสี (Chroma meter)

2) การวัดค่าลักษณะเนื้อสัมผัส (ความนุ่มและความยืดหยุ่น) โดยการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ด้วยเครื่อง Texture analyzer

3) ปริมาณความชื้น (Moisture content) ตามวิธีของ AOAC (2005)

4) วิเคราะห์ค่า water activity (a_w) โดยใช้เครื่อง Aqua Lab DewPoint Water Activity Meter

5) จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total plate count) ตามวิธีของ AOAC (2016)

6) ยีสต์และรา (Yeast and mold) ตามวิธีของ AOAC (2016)

3.2.3.3 ศึกษากระบวนการผลิตเส้นกวยจั๊บสำเร็จรูป

จากการศึกษาสูตรการผลิตเส้นกวยจั๊บอุบลเสริมข้าวกล้อง ทำให้ทราบถึงสูตรการทำเส้นกวยจั๊บอุบลที่เหมาะสม จากนั้นนำเส้นกวยจั๊บที่ได้มาต้มในน้ำเดือด เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำเส้นที่ได้ลงแช่ในน้ำเย็น ตักขึ้นให้สะเด็ดน้ำก่อนที่จะนำมาเรียงใส่ถาด นำเส้นไปแช่แข็ง (-18 ถึง -20 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำเส้นมาตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จัดเรียงเส้นใส่ถาดเพื่อนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เพื่อให้มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเส้นกวยจั๊บ: มผช. 141/2546 (สำนักงานมาตรฐาน

ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2546) จากนั้นนำเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนที่ผ่านการอบแห้งมาทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณภาพดังนี้

- 1) ปริมาณความชื้น (Moisture content) ตามวิธีของ AOAC (2005)
- 2) การวัดค่าสี ด้วยเครื่องวัดสี (Chroma meter)
- 3) การวัดค่าลักษณะเนื้อสัมผัส (ความนุ่มและความยืดหยุ่น) โดยการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ด้วยเครื่อง Texture analyzer
- 4) คุณภาพการต้มสุก (Cooking quality) ดัดแปลงจากวิธีการของ AACC (2000) ซึ่งประกอบด้วยระยะเวลาในการต้มสุก (Cooking time) ร้อยละผลผลิตการต้มสุก (%Cooking yield) ร้อยละการดูดซับน้ำ (%Water absorption) และร้อยละการสูญเสียระหว่างการหุงต้ม (%Cooking loss)
- 5) คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส โดยการทดสอบชิม ด้วยวิธีทดสอบความชอบ (9-point Hedonic scale) ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ให้คะแนนในช่วง 1-9 โดยคะแนน 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด และ 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด

3.2.3.4 การศึกษาการคืนตัวของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนสำเร็จรูป

จากการศึกษากระบวนการผลิตเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนสำเร็จรูป ทำให้ทราบถึงกระบวนการผลิตเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนสำเร็จรูปที่เหมาะสม จากนั้นนำมาทำการคืนตัวด้วยน้ำร้อน และไมโครเวฟ แล้วนำเส้นที่ผ่านการคืนตัวทั้ง 2 วิธีมาศึกษาคุณภาพดังนี้

- 1) การวัดค่าลักษณะเนื้อสัมผัส (ความนุ่มและความยืดหยุ่น) โดยการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ด้วยเครื่อง Texture analyzer
- 2) คุณภาพการต้มสุก Cooking quality ดัดแปลงจากวิธีการของ AACC (2000) ซึ่งประกอบด้วยระยะเวลาในการต้มสุก (Cooking time) ร้อยละผลผลิตการต้มสุก (%Cooking yield) ร้อยละการดูดซับน้ำ (%Water absorption) และร้อยละการสูญเสียระหว่างการหุงต้ม (%Cooking loss)
- 3) คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส โดยการทดสอบชิม ด้วยวิธีทดสอบความชอบ (9-point Hedonic scale) ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ให้คะแนนในช่วง 1-9 โดยคะแนน 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด และ 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด

3.2.3.5 คุณค่าทางโภชนาการของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนสำเร็จรูป

นำผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บน้ำร้อนสำเร็จรูปมาศึกษา ปริมาณความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน เยื่อใย และคาร์โบไฮเดรต (AOAC, 2005)

3.2.3.6 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนสำเร็จรูป

- 1) ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ดัดแปลงตามวิธีการของ Thiranusornkij et al. (2018)
- 2) ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด ดัดแปลงตามวิธีของ Pengkumsri et al. (2015)
- 3) ปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมด ตามวิธีของ Sultan, Wani and Masoodi (2018)

4) ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ โดยใช้วิธี DPPH ตัดแปลงตามวิธีของ Sultan, Wani and Masoodi (2018), FRAP ตัดแปลงตามวิธีการของ Thiranusornkij et al. (2019) และ ABTS assay ตัดแปลงตามวิธีการของ Shen et al. (2009)

3.2.3.7 ลักษณะทางโครงสร้างของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อน

นำผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บน้ำร้อนสำเร็จรูปมาศึกษาลักษณะทางโครงสร้างโดยวิธี Scanning electron microscopy (SEM)

3.2.4 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

3.2.4.1 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องทั้ง 4 สายพันธุ์

การตรวจสอบสมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้อง ได้แก่ แป้งข้าวกล้องหอมมะลิ แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง แป้งข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่ และแป้งข้าวกล้องหอมนิล โดยวัดแต่ละทรีทเมนต์ 3 ซ้ำ ยกเว้น ค่าสัปดาห์แต่ละทรีทเมนต์ 5 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ใช้การวางแผนการทดลองแบบ Completed Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) และวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ ด้วยวิธี Duncans Multiple Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.2.4.2 ศึกษากระบวนการผลิตเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนอบสุก

การตรวจสอบกระบวนการผลิตเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนอบสุก โดยวัดแต่ละทรีทเมนต์ 3 ซ้ำ ยกเว้นค่าสี และเนื้อสัมผัสสัปดาห์แต่ละทรีทเมนต์ 5 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ใช้การวางแผนการทดลองแบบ Completed Randomized Design (CRD) และวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Duncans Multiple Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.2.4.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

การทดสอบทางประสาทสัมผัส ใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 40 คน โดยวางแผนการทดลองแบบ Randomized Completed Block Design (RCBD) วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) และวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Duncans Multiple Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.2.5 สถานที่ทำวิจัย

3.2.5.1 ห้องปฏิบัติการผลิตภัณฑ์เนื้อนุ่มและห้องปฏิบัติการโภชนาศาสตร์ อาคารเทคโนโลยีการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์

3.2.5.2 อาคารปฏิบัติการและโรงงานต้นแบบทางอุตสาหกรรม คณะเกษตรศาสตร์

3.2.5.3 ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ อาคารปฏิบัติการทางชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์

3.2.5.4 ศูนย์เครื่องมือกลางวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

4.1 สมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องสี

สมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งข้าวกล้องสีที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแตกต่างกันไป รวมถึงสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องสีที่ส่งผลต่อคุณค่าทางโภชนาการและอาจรวมถึงการยอมรับของผู้บริโภค ด้วยจากการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์ ได้แก่ แป้งข้าวกล้องหอมมะลิ แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง แป้งข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่และแป้งข้าวกล้องหอมนิล โดยผลที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

4.1.1 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวกล้องสี

จากการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวกล้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์ ได้แก่ แป้งข้าวกล้องหอมมะลิ แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง แป้งข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่และแป้งข้าวกล้องหอมนิลโดยทำการศึกษาค่าสี ลักษณะและรูปร่าง องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณอะไมโลส ปริมาณวิตามิน แร่ธาตุ และดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของแป้งข้าวกล้องสี จากการศึกษาค่าสีที่ได้แสดงดังนี้

4.1.1.1 ค่าสีของแป้งข้าวกล้องสี

จากการวิเคราะห์ค่าสีของแป้งข้าวกล้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์ ได้แก่ แป้งข้าวกล้องหอมมะลิ แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง แป้งข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่ และแป้งข้าวกล้องหอมนิล โดยใช้เครื่อง color meter โดยทำการวิเคราะห์ค่า L^* a^* และ b^* ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยที่ L^* บ่งบอกถึงสีขาว (+) และสีดำ (-) a^* บ่งบอกถึงสีแดง (+) และสีเขียว (-) ส่วน b^* บ่งบอกถึงสีเหลือง (+) และสีน้ำเงิน (-) จากการวิเคราะห์ค่าสีของแป้งข้าวกล้องสีพบว่า ข้าวกล้องหอมมะลิจะมีความขาวสูงที่สุด ($+L^*$) ส่วนแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงมีค่าสีแดง ($+a^*$) และค่าสีเหลือง ($+b^*$) สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวกล้องชนิดอื่นๆ โดยจะเห็นว่าแป้งข้าวกล้องหอมมะลิจะมีความสีขาวและสีเหลือง แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงจะมีสีน้ำตาลอมแดง แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่และแป้งข้าวกล้องหอมนิลจะมีสีค่อนข้างดำหรือม่วง สีของแป้งข้าวกล้องที่แตกต่างกันนั้นเป็นผลมาจากสารกลุ่มฟีนอลิก(phenolic compounds) ที่ทำให้เกิดรงควัตถุ เช่น แอนโทไซยานินที่จะพบในข้าวกลุ่มสีน้ำเงินและม่วง โพรแอนโทไซยานินจะพบในข้าวกลุ่มสีแดง และแคโรทีนอยด์จะพบในข้าวกลุ่มสีเหลือง (Anggraini et al., 2015) ปริมาณของรงควัตถุที่อยู่ในแป้งข้าว โดยเฉพาะค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ที่พบในปริมาณที่สูงจะแสดงถึงคุณค่าทางโภชนาการและประโยชน์ต่อสุขภาพที่สูงกว่าแป้งข้าวขาว (Kraithong, Lee and Rawdkuen, 2018) มีการรายงานว่ปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant contents) และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant capacities) ของข้าวสีจะมีมากกว่าในข้าวขาว และจากการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation analysis) พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างกับค่าสีและสารต้านอนุมูลอิสระต่าง ๆ (Pramai and Jiamyangyuen, 2016)

ตารางที่ 4.1 ค่าสีของแป้งข้าวก่ำล้องสี

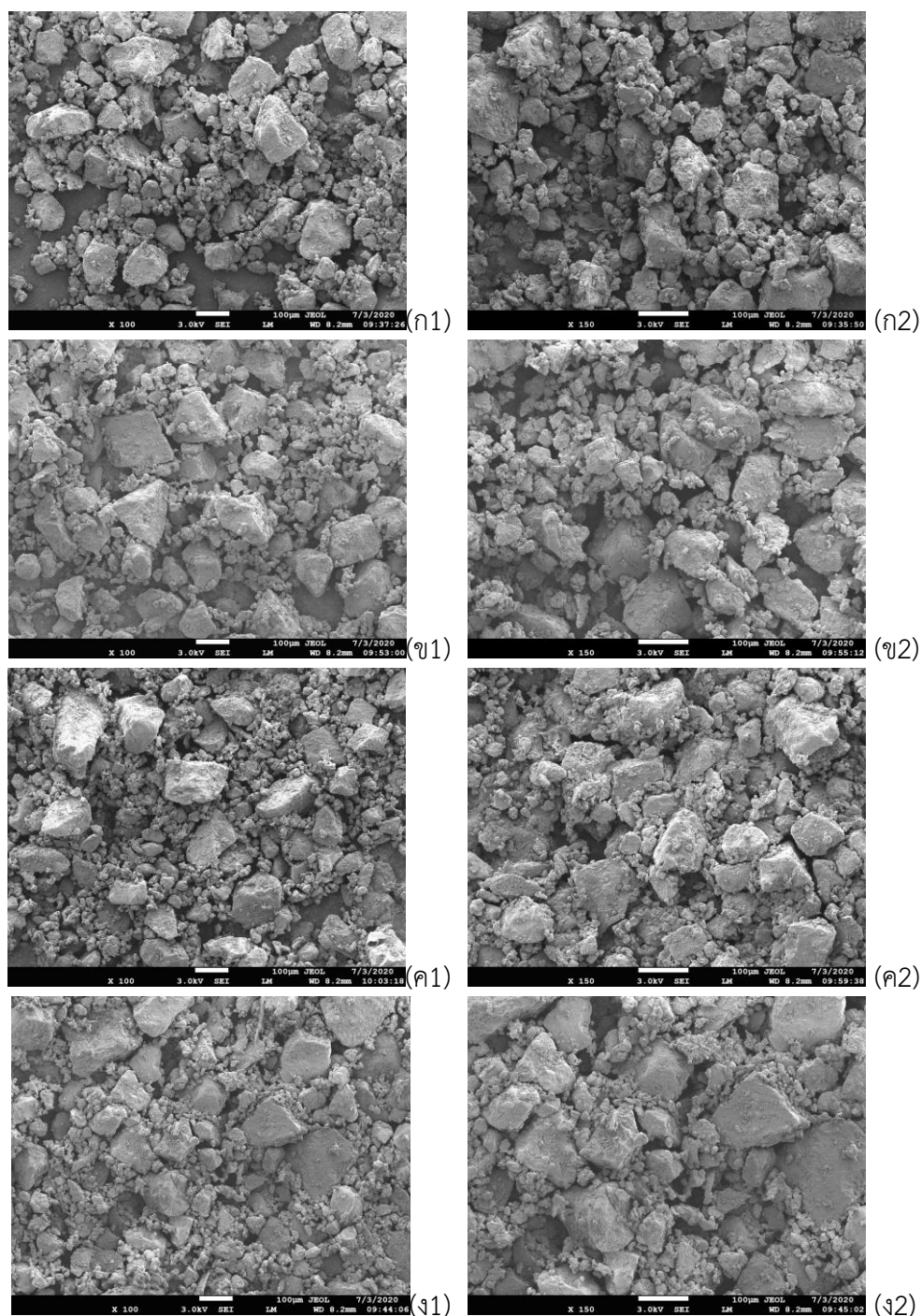
แป้งข้าวก่ำล้อง	ค่าสี		
	L*	a*	b*
หอมมะลิ	86.703±0.032 ^a	-1.690±0.010 ^d	10.670±0.080 ^b
หอมมะลิแดง	70.100±0.123 ^b	5.810±0.010 ^a	10.823±0.040 ^a
ไรซ์เบอร์รี่	60.380±0.061 ^d	2.247±0.035 ^b	3.433±0.080 ^c
หอมนิล	64.353±0.012 ^c	1.823±0.021 ^c	3.550±0.030 ^c

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=5)

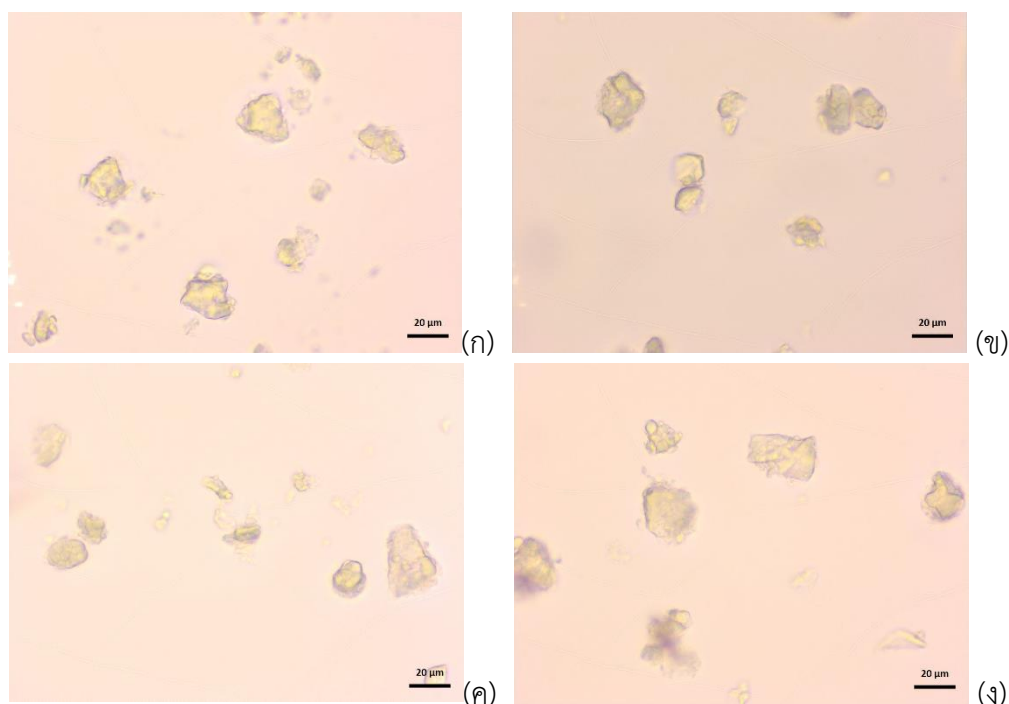
^{a-d} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

4.1.1.2 ลักษณะและรูปร่างของแป้งข้าวก่ำล้องสี

เมื่อทำการศึกษาลักษณะและรูปร่างของแป้งข้าวก่ำล้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์ ได้แก่ แป้งข้าวก่ำล้องหอมมะลิ แป้งข้าวก่ำล้องหอมมะลิแดง แป้งข้าวก่ำล้องไรซ์เบอร์รี่ และแป้งข้าวก่ำล้องหอมนิล โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM) ในการวิเคราะห์ที่กำลังขยาย 100 และ 150 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่า แป้งข้าวก่ำล้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์ มีขนาดโดยประมาณอยู่ในช่วง 12-190 μm มีรูปร่างหลายเหลี่ยม มีขนาดไม่สม่ำเสมอเนื่องจากกระบวนการผลิตเป็นแป้งโดยวิธีการบดแห้ง และมีการเกาะตัวกันระหว่างเม็ดแป้งและองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น รำข้าว เป็นต้น และเมื่อทำการศึกษาลักษณะและรูปร่างของแป้งข้าวก่ำล้องสีโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Light microscope) ดังแสดงในภาพที่ 4.2 พบว่ามีลักษณะที่เป็นรูปร่างหลายเหลี่ยม ขนาดไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกับการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Reddy et al. (2017) ที่ได้ทำการศึกษาลักษณะรูปร่างของแป้งข้าวก่ำสีสายพันธุ์ต่างๆ โดยใช้ SEM พบว่าลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีรูปร่างหลายเหลี่ยม นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Thiranusornkij et al. (2019) ที่ได้ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของแป้งข้าวก่ำหอมมะลิและแป้งข้าวก่ำไรซ์เบอร์รี่ โดยใช้ SEM พบว่ามีรูปร่างหลายเหลี่ยมและมีการเกาะตัวกัน (Agglomeration) ระหว่างเม็ดแป้งและองค์ประกอบอื่น ๆ



ภาพที่ 4.1 ลักษณะและรูปร่างของแ่่งข้าวกล้อ่งสีโดยใช้ Scanning electron microscopy (SEM) โดย (ก) แ่่งข้าวกล้อ่งหอมมะลิ (ข) แ่่งข้าวกล้อ่งหอมมะลิแดง (ค) แ่่งข้าวกล้อ่งไรซ์เบอร์รี่ และ (ง) แ่่งข้าวกล้อ่งหอมนิล: หมายเลข (1) กำล้งขยาย 100 เท่า (100x) และ (2) กำล้งขยาย 150 เท่า (150x)



ภาพที่ 4.2 ลักษณะและรูปร่างของแบ่งข้าวกล้องสีโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ โดย (ก) แบ่งข้าวกล้องหอมมะลิ (ข) แบ่งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (ค) แบ่งข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่ และ (ง) แบ่งข้าวกล้องหอมนิล

4.1.1.3 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณและปริมาณอะไมโลสของแบ่งข้าวกล้องสี

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาณความชื้น เถ้า ไขมัน โปรตีน เยื่อใยและคาร์โบไฮเดรต วอเตอร์แอกติวิตีและปริมาณอะไมโลสของแบ่งข้าวกล้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า มีปริมาณความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 9.138-10.115 ร้อยละปริมาณเถ้า 1.388-1.604 ปริมาณไขมันร้อยละ 3.205-3.852 ปริมาณโปรตีนร้อยละ 7.436-8.457 ปริมาณเยื่อใยร้อยละ 0.736-0.848 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 76.199-76.534 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี 0.420-0.486 และปริมาณอะไมโลสร้อยละ 15.916-18.438 โดยองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของแบ่งข้าวกล้องสีในแต่ละสายพันธุ์ที่ได้นำมาทำการศึกษาครั้งนี้มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของข้าว แหล่งที่ปลูกรวมถึงสภาวะการเก็บรักษา แบ่งข้าวสีมีแนวโน้มที่จะมีคุณค่าทางโภชนาการที่สูงกว่าแบ่งข้าวขาวเนื่องจากการมีอยู่ขององค์ประกอบทางเคมีที่สูงกว่า เช่น เถ้า โปรตีน ไขมัน โปรตีนและเยื่อใย เป็นต้น (Kraithong, Lee and Rawdkuen, 2018) จากการศึกษาปริมาณอะไมโลสพบว่าแบ่งข้าวกล้องหอมมะลิแดงจะมีปริมาณอะไมโลสสูงที่สุด ปริมาณอะไมโลสในข้าวนี้มีความสำคัญมากต่อการทำให้สุก ในด้านความเหนียว ใส รสชาติ ด้านความร้อนรวมถึงด้านเนื้อสัมผัส (Reddy et al., 2017) ปริมาณอะไมโลสที่พบในแบ่งข้าวกล้องสีที่แตกต่างกันนั้น ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์รวมถึงแหล่งและสภาวะที่ทำการเพาะปลูก (Singh et al., 2000) เช่นเดียวกันกับองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณและปริมาณอะไมโนสของแป้งข้าวกล้องสี

องค์ประกอบ (ร้อยละ)	แป้งข้าวกล้อง			
	หอมมะลิ	หอมมะลิแดง	ไรซ์เบอร์รี่	หอมนิล
ความชื้น (wb.)	9.925±0.064 ^b	9.628±0.034 ^c	9.138±0.173 ^d	10.115±0.015 ^a
เถ้า (db.)	1.537±0.002 ^b	1.388±0.003 ^c	1.604±0.013 ^a	1.519±0.021 ^b
ไขมัน (db.)	3.584±0.215 ^b	3.308±0.073 ^c	3.852±0.050 ^a	3.205±0.042 ^c
โปรตีน (db.)	7.650±0.370 ^b	8.195±0.156 ^a	8.358±0.193 ^a	8.197±0.161 ^a
เยื่อใย (db.)	0.830±0.047 ^a	0.736±0.003 ^b	0.848±0.072 ^a	0.821±0.043 ^{ab}
คาร์โบไฮเดรต	76.474±0.133 ^{ab}	76.745±0.177 ^a	76.199±0.176 ^{bc}	76.143±0.148 ^c
วอเตอร์แอคทีวี่	0.460±0.012 ^b	0.486±0.002 ^a	0.420±0.005 ^c	0.463±0.004 ^b
อะไมโนส	16.488±0.143 ^c	18.438±0.690 ^a	15.916±0.332 ^c	17.322±0.232 ^b

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

^{a-d} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

4.1.1.4 ปริมาณวิตามินและแร่ธาตุของแป้งข้าวกล้องสี

เมื่อนำแป้งข้าวกล้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์ ได้แก่ แป้งข้าวกล้องหอมมะลิ แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง แป้งข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่ และแป้งข้าวกล้องหอมนิล มาทำการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินและแร่ธาตุ โดยในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินจะทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC (High Performance Liquid Chromatography) ส่วนปริมาณแร่ธาตุจะทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและโลหะด้วยเทคนิค ICP (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer, ICP-OES) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3

เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินในแป้งข้าวกล้องสี โดยทำการวิเคราะห์วิตามินบี 1 (Thiamine) วิตามินบี 2 (Riboflavin) วิตามินบี 3 (Niacin / Niacinamide) และวิตามินอี (Alpha-Tocopherol) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่า แป้งข้าวกล้องหอมมะลิจะมี วิตามินบี 3 สูงที่สุด (1.113 mg/100g) เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวกล้องสีชนิดอื่น ๆ ปริมาณวิตามินบี 1 และปริมาณวิตามินบี 2 จะพบในแป้งข้าวกล้องหอมนิลสูงที่สุด (0.332 และ 0.014 mg/100g) ส่วนวิตามินอีจะพบในแป้งข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่สูงที่สุด (1.130 mg/100g)

สำหรับการศึกษาปริมาณแร่ธาตุในแป้งข้าวกล้องสี โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัส (Phosphorus, P) แคลเซียม (Calcium, Ca) โพแทสเซียม (Potassium, K) แมกนีเซียม (Magnesium, Mg) และโซเดียม (Sodium, Na) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของแร่ธาตุชนิดหลัก (Macro minerals) หรือแร่ธาตุที่ร่างกายต้องการในปริมาณมาก และแร่ธาตุรอง (Micro minerals หรือ Trace minerals) หรือแร่ธาตุที่ร่างกายต้องการในปริมาณน้อย ได้แก่ สังกะสี (Zinc, Zn) แมงกานีส (Manganese, Mn) เหล็ก (Iron, Fe) ซีลีเนียม (Selenium, Se) และทองแดง (Copper, Cu) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่า แป้งข้าวกล้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์มีปริมาณแร่ธาตุที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกัน

โดยในแป้งข้าวกล้องหอมมะลิจะมีปริมาณของซิลิเนียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียมมากที่สุด แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงจะมีปริมาณแมงกานีสและทองแดงมากที่สุด แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่จะมีปริมาณแคลเซียม โซเดียมและโพแทสเซียมสูงที่สุด และแป้งข้าวกล้องหอมนิลจะมีปริมาณของสังกะสีและธาตุเหล็กสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวกล้องสีชนิดอื่น ๆ ความแตกต่างของปริมาณแร่ธาตุในแป้งข้าวกล้องสีอาจจะเนื่องมาจากอิทธิพลของชนิดหรือสายพันธุ์ของข้าว สภาวะการเพาะปลูกรวมถึงแหล่งที่ปลูก จากการศึกษาของ Reddy et al. (2017) ที่ได้ทำการศึกษาปริมาณแร่ธาตุของข้าวสีที่ทำการขัดสีและไม่ทำการขัดสีพบว่า ปริมาณแร่ธาตุในข้าวสีจะลดลงเมื่อทำการขัดสี ซึ่งการขัดสีนั้นเป็นการกำจัดส่วนของรำข้าวออกไปแสดงให้เห็นว่าปริมาณแร่ธาตุส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณส่วนของรำข้าว นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการรายงานของ Lamberts et al. (2007) พบว่าปริมาณของแร่ธาตุส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณในส่วนของรำ (Bran) มากถึงร้อยละ 61.0

ตารางที่ 4.3 ปริมาณวิตามินและแร่ธาตุของแป้งข้าวกล้องสี

วิตามินและแร่ธาตุ	แป้งข้าวกล้อง			
	หอมมะลิ	หอมมะลิแดง	ไรซ์เบอร์รี่	หอมนิล
วิตามิน (mg/100g)				
วิตามินบี 1 (Vitamin B1)	0.289	0.119	0.251	0.332
วิตามินบี 2 (Vitamin B2)	0.013	0.007	0.007	0.014
วิตามินบี 3 (Vitamin B3)	1.113	0.702	0.923	0.896
วิตามินอี (Vitamin E)	0.640	0.480	1.130	0.800
แร่ธาตุ (mg/g)				
ซิลิเนียม (Se)	0.006	0.005	0.005	0.005
สังกะสี (Zn)	0.240	0.233	0.237	0.282
ฟอสฟอรัส (P)*	3.110	2.605	3.035	2.721
เหล็ก (Fe)	0.091	0.121	0.127	0.180
แมงกานีส (Mn)	0.264	0.311	0.244	0.187
แมกนีเซียม (Mg)*	11.002	9.990	10.973	10.180
แคลเซียม (Ca)*	0.807	1.221	1.451	1.410
ทองแดง (Cu)	0.013	0.042	0.020	0.015
โซเดียม (Na)*	0.221	0.208	0.407	0.187
โพแทสเซียม (K)*	26.274	21.548	26.712	25.548

หมายเหตุ: *แร่ธาตุหลัก (macro mineral หรือ major mineral) หรือแร่ธาตุที่ร่างกายต้องการปริมาณมาก

4.1.1.5 ดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของแป้งข้าวกล้องสี

จากการศึกษาดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ โดยใช้วิธีการเลียนแบบการย่อยการดูดซึมน้ำตาลในหลอดทดลอง (In vitro Rapidly Available Glucose) เปรียบเทียบกับน้ำตาลกลูโคส (D-glucose) โดยทำการศึกษา Rapid available glucose (RAG) ที่บ่งบอกปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากการย่อยคาร์โบไฮเดรตด้วยเอนไซม์อย่างรวดเร็ว Slowly available glucose (SAG) คือปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากการย่อยคาร์โบไฮเดรตที่เหลือน้ำตาลด้วยเอนไซม์อีก 100 นาทีถัดมาและดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (Estimate glycemic index: eGI) จากการศึกษแป้งข้าวกล้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่า แป้งข้าวกล้องหอมมะลิจะมีค่า RAG สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวกล้องชนิดอื่น ซึ่งบ่งบอกถึงการดูดซึมน้ำตาลเข้าสู่ร่างกายได้อย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 20 นาทีแรก ขณะที่แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงจะมีค่า RAG ต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วน SAG พบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) จากผลการทดลองจะพบว่าแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงและแป้งข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่จะมีค่า RAG ที่ต่ำและ SAG ที่สูงแสดงถึงปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายในช่วงแรกของการรับประทาน ซึ่งจะมีปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวกล้องชนิดอื่น และปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป 100 นาที

จากการศึกษาของสุนีย์ สหัสโพธิ์และคณะ (2558) โดยศึกษาดัชนีน้ำตาลในข้าวเหนียวและข้าวเจ้าพันธุ์พื้นเมืองในข้าวกล้องและข้าวขัดสี โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะไมโลสและอัตราส่วนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพกตินกับค่า RAG พบว่า ปริมาณอะไมโลสและอัตราส่วนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพกตินมีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับปริมาณกลูโคสที่ได้จากการย่อย (ทั้งข้าวกล้องและข้าวขัด) แต่ทั้งนี้มีความสัมพันธ์กันในระดับปานกลางเท่านั้น ระดับของดัชนีน้ำตาลในข้าวมีความแตกต่างกันนั้น อาจเนื่องมาจากหลายปัจจัยด้วย เช่น สายพันธุ์ของข้าว ปริมาณอะไมโลสหรืออัตราส่วนของ ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินและคุณสมบัติอื่น ๆ ของแป้งข้าว เช่น ขนาดของเม็ดแป้ง โครงสร้างและความหนาแน่นผลึกของแป้ง ระดับการเจลาติไนเซชัน การพองตัวของเม็ดสตาร์ช การแตกตัวของผลึกในสตาร์ชกระบวนการหุงต้ม ผนังเซลล์ที่หนาซึ่งช่วยในการจับเม็ดแป้ง และปริมาณไขมันซึ่งจะจับตัวเป็นสารประกอบกับอะไมโลส ส่งผลทำให้การย่อยแป้งทำได้ยากขึ้นและยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่แป้งในเมล็ดข้าว เช่น ไขมัน โปรตีน เยื่อใย เป็นต้น โดยคุณสมบัติเหล่านี้มีผลต่อการย่อยแป้ง ซึ่งจะส่งผลต่อระดับน้ำตาลในเลือดของร่างกาย

สำหรับดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (eGI) พบว่า แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงจะมีดัชนีน้ำตาลต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวกล้องชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อทำการศึกษาดัชนีน้ำตาล ในแป้งข้าวกล้องสีพบว่า แป้งข้าวกล้องสีจะมีค่าดัชนีน้ำตาลอยู่ที่ 63.242-66.507 ซึ่งจัดอยู่ในดัชนีน้ำตาลระดับปานกลาง ($GI=56-69$) และถือว่ามีค่าดัชนีน้ำตาลที่ต่ำเมื่อเทียบกับดัชนีน้ำตาลของข้าวขาวที่มีดัชนีน้ำตาลอยู่ที่ 73 ± 4 (Harvard Health Publishing, 2020) และข้าวหอมมะลิที่มีดัชนีน้ำตาลอยู่ที่ 100 (ตามพงศ์ เหลืองบริบูรณ์, 2561)

จากการศึกษาของสุนันทา วงศ์ปิยชนและคณะ (2558) ได้ทำการศึกษาดัชนีน้ำตาลของข้าวพันธุ์ไทยทั้งหมด 8 สายพันธุ์ ที่มีปริมาณอะไมโลสต่างกัน ได้แก่ ข้าวเหนียว กข6

ข้าวอะไมโลสต่ำ (ข้าวดอกมะลิ 105 ปทุมธานี 1 ทับทิมชุมแพ และมะลินิลสุรินทร์) ข้าวอะไมโลสปานกลาง (ข้าวตาแห้ง 17) และข้าวอะไมโลสสูง (เจ๊กเขย 1 และ เหลืองประทิว 123) โดยทำการเจาะเลือดหาค่าเฉลี่ยระดับน้ำตาลในเลือดหลังจากบริโภคข้าวสุกจากข้าวขาว ข้าวกล้อง และข้าวกล้องงอกจากการศึกษาค่าดัชนีน้ำตาล (GI) พบว่า ข้าวพันธุ์ กข6 ข้าวดอกมะลิ 105 ปทุมธานี 1 ทับทิมชุมแพ มะลินิลสุรินทร์ ข้าวตาแห้ง 17 เจ๊กเขย 1 และเหลืองประทิว 123 ในข้าวขาวมีค่าดัชนีน้ำตาลเท่ากับ 61.9, 63.2, 62.9, 59.7, 63.9, 53.6, 49.0 และ 50.2 ในข้าวกล้องมีค่าดัชนีน้ำตาลเท่ากับ 61.5, 57.0, 56.7, 58.8, 61.3, 48.6, 49.1 และ 41.4 ในข้าวกล้องงอกมีค่าดัชนีน้ำตาลเท่ากับ 55.4, 56.3, 53.3, 54.8, 56.3, 51.0, 47.3 และ 45.2 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาค้นคว้าข้าวกล้องขาวดอกมะลิและข้าวมะลินิลสุรินทร์ จัดว่าเป็นข้าวกล้องที่มีดัชนีน้ำตาลอยู่ในระดับปานกลาง (GI=56-69) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าดัชนีน้ำตาลของแป้งข้าวกล้องสีที่ทำการศึกษ

นอกจากนี้ Thiranusornkij et al. (2019) ได้ทำการศึกษาค่าดัชนีน้ำตาลของแป้งข้าวหอมมะลิและข้าวไรซ์เบอร์รี่พบว่า แป้งข้าวหอมมะลิมียค่าดัชนีน้ำตาลอยู่ที่ 81.1 จัดว่าเป็นข้าวที่มีดัชนีน้ำตาลอยู่ในระดับสูง ($GI \geq 70$) ส่วนแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มีค่าดัชนีน้ำตาลอยู่ที่ 65.4 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแป้งข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่ที่ได้ทำการศึกษ ซึ่งจัดเป็นข้าวที่มีดัชนีน้ำตาลอยู่ในระดับปานกลาง ($GI=56-69$) แม้ว่าปริมาณอะไมโลสในแป้งข้าวกล้องสีที่สูงหรืออัตราส่วนของปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคติน จะส่งผลต่อค่า SAG ที่สูง RAG และ eGI ให้มีค่าต่ำหรือมีการดูดซึมน้ำตาลที่ช้าลง แต่ยังมีปัจจัย เช่น สายพันธุ์ของข้าว องค์ประกอบอื่น ๆ ในแป้งข้าวกล้องสี ก็ส่งผลต่อระดับน้ำตาลในเลือดได้ จากการศึกษแป้งข้าวกล้องสีทั้ง 4 ชนิดพบว่าแป้งข้าวกล้องสีที่มี RAG และ eGI ที่ต่ำจะเหมาะสมกับผู้ป่วยเบาหวานที่ต้องการบริโภคข้าวที่มีดัชนีน้ำตาลต่ำหรือเป็นแหล่งที่ให้พลังงานอย่างช้า ๆ ขณะที่ค่า RAG ที่สูงและ SAG ที่ต่ำสามารถเป็นแหล่งที่ให้พลังงานอย่างรวดเร็วได้

ตารางที่ 4.4 ดัชนีน้ำตาลโดยประมาณของแป้งข้าวกล้องสี

แป้งข้าวกล้อง	RAG	SAG	eGI
หอมมะลิ	6.696 $\pm$ 0.401 ^a	3.319 $\pm$ 0.561 ^a	66.507 $\pm$ 0.966 ^a
หอมมะลิแดง	5.475 $\pm$ 0.445 ^c	4.267 $\pm$ 0.816 ^a	63.242 $\pm$ 0.457 ^b
ไรซ์เบอร์รี่	5.862 $\pm$ 0.455 ^{bc}	4.043 $\pm$ 0.605 ^a	65.204 $\pm$ 0.518 ^a
หอมนิล	6.318 $\pm$ 0.308 ^{ab}	3.273 $\pm$ 0.355 ^a	65.667 $\pm$ 0.800 ^a

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

^{a-c} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

RAG (Rapid available glucose) คือ ปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากการย่อยคาร์โบไฮเดรตด้วยเอนไซม์อย่างรวดเร็ว

SAG (Slowly available glucose) คือ ปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากการย่อยคาร์โบไฮเดรตที่เหลือด้วยเอนไซม์อีก 100 นาทีถัดมา

eGI (Estimate glycemic index) คือ ดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ

4.1.2 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องสี

จากการศึกษาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์ โดยทำการศึกษาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด ปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมด ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ โดยใช้วิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH), ferric reducing antioxidant power (FRAP) และ 2, 2'-azobis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่า ปริมาณสารสำคัญที่ทำการศึกษาส่วนใหญ่จะพบมากในแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวกล้องสีชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงสารต้านอนุมูลอิสระที่มีอยู่ในข้าวสีได้ โดยยังมีค่ามากบ่งบอกถึงการมีสมบัติการต้านอนุมูลอิสระที่ดี แต่ยกเว้นปริมาณสารแอนโธไซยานินที่พบเฉพาะในแป้งข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่และหอมนิลซึ่งมีสีม่วงและสีดำ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Pengkumsri et al. (2015) ที่มีการศึกษาปริมาณแอนโธไซยานินในข้าวสีดำ (ข้าวดำเชียงใหม่) แดง (ข้าวหอมมะลิแดง) และขาว (ข้าวกล้องสุพรรณบุรี 1) พบว่าปริมาณแอนโธไซยานินพบเฉพาะในข้าวที่มีสีดำเท่านั้น ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากข้าวแต่ละชนิดมีปริมาณแอนโธไซยานินแต่ละประเภทที่แตกต่างกัน ทำให้แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงไม่สามารถตรวจพบ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับ Thitipramote et al. (2016) ที่ได้ทำการศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (ปริมาณฟีนอลิก แอนโธไซยานินและสารโปรแอนโธไซยานินทั้งหมด) และกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระโดยใช้วิธี DPPH, ABTS และ FRAP ของข้าวกล้องหอมมะลิแดง (แดง) ข้าวลิ้มผัว (ดำ) และข้าวกล้องญี่ปุ่น (น้ำตาล) พบว่า ข้าวกล้องหอมมะลิแดงมีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดมากกว่าข้าวลิ้มผัวและข้าวกล้องญี่ปุ่น ส่วนสารโปรแอนโธไซยานินจะพบเฉพาะในสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงเท่านั้น ในขณะที่สารแอนโธไซยานินจะมีเฉพาะในสารสกัดจากข้าวลิ้มผัว นอกจากนี้ข้าวกล้องหอมมะลิแดงมีแนวโน้มของกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (DPPH, ABTS และ FRAP) ที่สูงกว่าข้าวลิ้มผัวและข้าวกล้องญี่ปุ่น ชี้ให้เห็นว่าข้าวกล้องหอมมะลิแดง มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูงและมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูง

ตารางที่ 4.5 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องสี

สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ	แป้งข้าวกล้อง			
	หอมมะลิ	หอมมะลิแดง	ไรซ์เบอร์รี่	หอมนิล
Total phenolic (mg GAE/g sample)	2.468±0.089 ^d	11.029±0.303 ^a	8.514±0.729 ^b	7.331±0.212 ^c
Total flavonoid (mg QE/g sample)	11.414±1.827 ^d	60.422±0.585 ^a	28.306±0.444 ^b	18.263±2.377 ^c
Total anthocyanin (mg CyE/g sample)	ND	ND	33.410±0.224 ^a	14.697±1.629 ^b
DPPH (mg TEAC/g sample)	0.379±0.004 ^d	2.538±0.025 ^a	1.227±0.009 ^b	1.053±0.072 ^c
FRAP (mg Fe ²⁺ /g sample)	4.848±0.032 ^d	24.991±0.546 ^a	18.103±0.734 ^b	13.622±2.094 ^c
ABTS (mg TEAC/g sample)	2.093±0.428 ^d	10.299±0.497 ^a	8.381±0.081 ^b	6.992±0.496 ^c

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

mg GAE/g sample คือ mg gallic acid equivalent/g ตัวอย่าง

mg TEAC/g sample คือ mg trolox equivalent antioxidant capacity/g ตัวอย่าง

mg CyE /g sample คือ mg cyanidin-3-glucoside equivalent/g ตัวอย่าง

mg QE/g sample คือ mg quercetin equivalent/g ตัวอย่าง

ND คือ ไม่พบหรือไม่สามารถตรวจสอบได้

^{a-d} ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

4.1.3 สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งข้าวกัลลงสี

สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งมีความสำคัญในการนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร ไม่ว่าจะเป็นการช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความหนืด ช่วยเพิ่มความคงตัวหรือแม้กระทั่งปรับปรุงเนื้อสัมผัส การศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งข้าวกัลลงสีจึงมีความสำคัญอย่างมากเพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารอย่างเหมาะสม จากการศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งข้าวกัลลงสี โดยทำการศึกษาสมบัติแป้งเปียก สมบัติทางความร้อน ดัชนีการดูดซับน้ำ ดัชนีการละลาย ดัชนีการดูดซับน้ำมัน กำลังการพองตัวและการละลาย การละลายของโปรตีน ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน ความคงตัวของอิมัลชัน ความสามารถในการเกิดโฟม ความคงตัวของโฟม และความคงตัวต่อการละลายและการแช่แข็ง ผลที่ได้แสดงดังนี้

4.1.3.1 สมบัติแป้งเปียกของแป้งข้าวกัลลงสี

จากการศึกษาสมบัติแป้งเปียกหรือสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งข้าวกัลลงสี ทั้ง 4 สายพันธุ์ โดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) จากการวิเคราะห์ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.3 พบว่า อุณหภูมิในการเกิดเพส (Pasting temperature) ของแป้งข้าวกัลลงสีไรซ์เบอร์รี่ค่าสูงที่สุด ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากองค์ประกอบทางเคมีของข้าวเช่น ไขมันและโปรตีน โดยในแป้งข้าวกัลลงสีไรซ์เบอร์รี่จะมีปริมาณไขมันและโปรตีนที่สูงกว่าข้าวชนิดอื่นๆ ซึ่งปริมาณไขมันและโปรตีนจะสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อน เช่น สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสและไขมัน (Amylose-lipid complex) เป็นต้น ส่งผลให้อุณหภูมิในการเกิดเพสสูง ส่วนค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) พบว่าแป้งข้าวกัลลงสีหอมมะลิมีค่าความหนืดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวกัลลงสีชนิดอื่น เนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสที่ต่ำเมื่อเทียบกับแป้งข้าวกัลลงสีหอมมะลิแดง โดยทั่วไปแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีการพองตัวของสตาร์ชต่ำ ส่งผลให้ค่าความหนืดมีค่าต่ำกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ แป้งข้าวกัลลงสีหอมมะลิแดงจะมีค่า breakdown, final viscosity และ setback สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวกัลลงสีชนิดอื่นเนื่องจากปริมาณอะไมโลสที่สูงสามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการจัดเรียงตัวกันอีกครั้งของอะไมโลสระหว่างลดอุณหภูมิหลังเกิดเจลลิตีในเซชันได้ ค่าความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและต่ำสุดในช่วงให้ความร้อน (Breakdown) แสดงถึงค่าความหนืดหรือการเกิดเพสมีการเปลี่ยนแปลงน้อยหรือเพสมีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงหรือความคงตัวของสตาร์ช ค่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) แสดงถึงความสามารถของแป้งต่อการรักษาความหนืดเมื่อเกิดเพส ส่วนค่าผลต่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด (Setback) บ่งบอกถึงการจัดเรียงตัวกันใหม่ของอะไมโลส โดยค่า final viscosity และ setback ที่สูงบ่งบอกถึงปริมาณอะไมโลสที่มีอยู่มากในแป้งข้าวกัลลงสี ซึ่งปริมาณอะไมโลสในแป้งข้าวกัลลงสีหอมมะลิแดงมีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้นอกจากปัจจัยในด้านปริมาณอะไมโลสที่ส่งผลต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้ง ยังมีปัจจัยในด้านขององค์ประกอบทางเคมี เช่น ไขมัน โปรตีน เยื่อใย ที่ส่งผลต่อค่าความหนืดได้ของแป้งได้ โดยแป้งข้าวกัลลงสีที่มีไขมันและโปรตีน จะสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสและไขมัน (Amylose-lipid complex) หรืออะไมโลสและโปรตีน (Amylose-protein complex) ที่ส่งผลให้ค่า setback และ final viscosity สูงขึ้นแต่ peak viscosity และ breakdown มีค่าลดลง (Alcázar-Alay and Meireles, 2015) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kraithong, Lee and Rawdkuen. (2018) ที่ได้ทำการศึกษาศสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งข้าวกัลลงสี

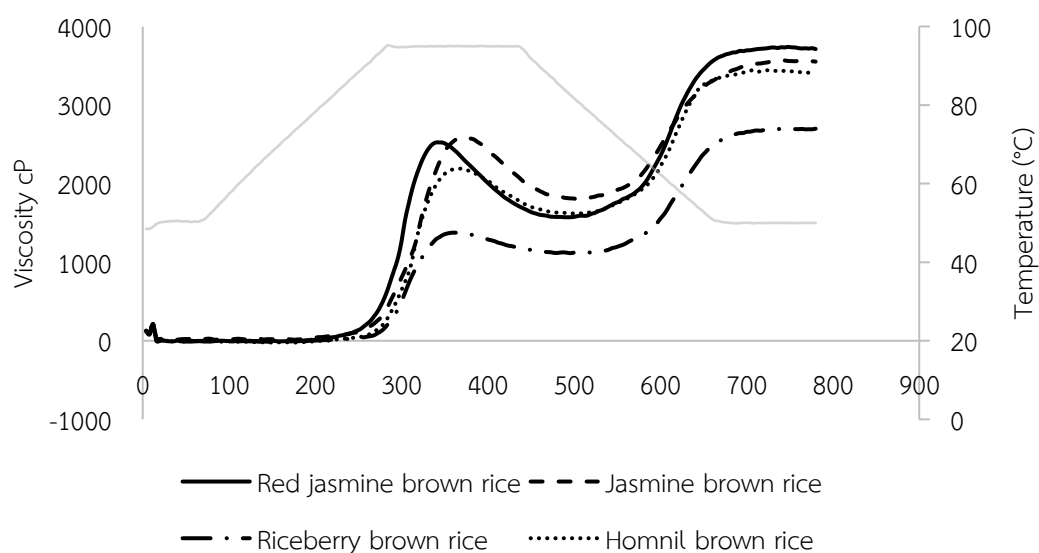
อินทรีย์ไทย ได้แก่ แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ แป้งข้าวพิษณุโลก แป้งข้าวกล้องหอมมะลิ และแป้งข้าวหอมมะลิแดง พบว่า มีอุณหภูมิในการเกิดเพสอยู่ที่ 81.73-87.77 °C ความหนืดสูงสุด 1534.33-4067.33 cP ความหนืดสุดท้าย 2338.67-3939.67 cP ค่า breakdown 409.33-2077.33 cP และค่า setback - 491.67-1551.33 cP

ตารางที่ 4.6 สมบัติแป้งเปียกของแป้งข้าวกล้องสี

สมบัติแป้งเปียก	แป้งข้าวกล้อง			
	หอมมะลิ	หอมมะลิแดง	ไรซ์เบอร์รี่	หอมนิล
Pasting temperature (°C)	73±0 ^b	73±1 ^b	77±2 ^a	74±1 ^{ab}
Peak viscosity (cPs)	2615±33 ^a	2529±7 ^b	1383±9 ^d	2215±5 ^c
Final viscosity (cPs)	3562±12 ^b	3762±12 ^a	2682±24 ^d	3446±0 ^c
Breakdown	850±16 ^a	853±32 ^a	260±2 ^c	577±3 ^b
Setback	1784±13 ^b	2071±33 ^a	1592±11 ^c	1802±7 ^b

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

^{a-d} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกัน แสดงถึงความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงสมบัติแป้งเปียกของแป้งข้าวกล้องสีโดยใช้ RVA

4.1.3.2 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวกัลลิ่งสี

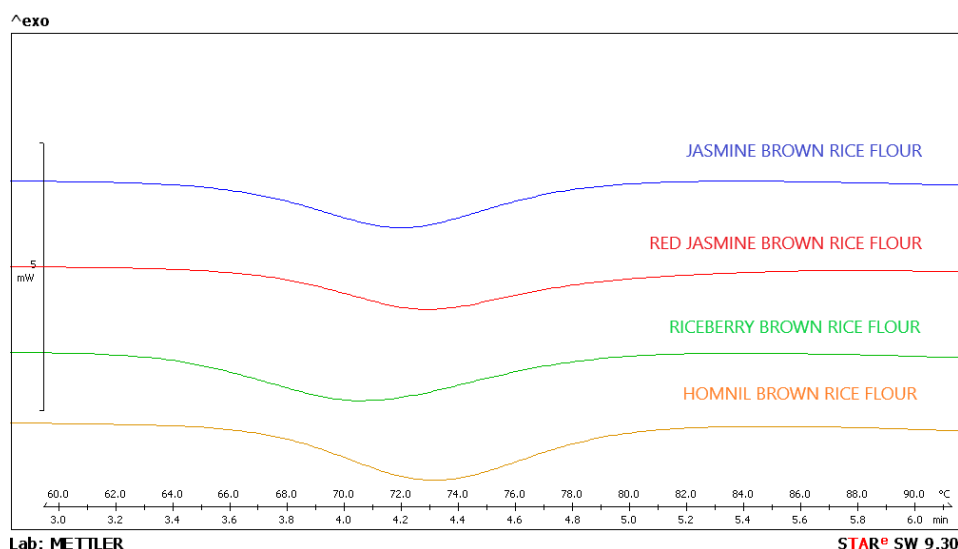
จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของแป้งข้าวกัลลิ่งสีทั้ง 4 สายพันธุ์ โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ได้แสดงดังตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.4 พบว่า แป้งข้าวกัลลิ่งหอมนิลมีค่าอุณหภูมิเริ่มการเปลี่ยนแปลง (Onset temperature, T_o) สูงสุดแต่ไม่พบความแตกต่างกับแป้งข้าวกัลลิ่งหอมมะลิแดง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ขณะที่อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (Peak temperature, T_p) และอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสุดท้าย (End temperature, T_e) ของแป้งข้าวกัลลิ่งหอมมะลิแดงและหอมนิลมีค่าสูงที่สุด (ปริมาณอะไมโลสร้อยละ 18.438 และ 17.322 ตามลำดับ) เนื่องจากปริมาณอะไมโลสที่สูงจะมีการพองตัวของแป้งหรือสตาร์ชต่ำ จึงส่งผลให้มีการใช้อุณหภูมิที่สูงในการเกิดเจลลาตินซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวกัลลิ่งที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่าอย่างแป้งข้าวกัลลิ่งไรซ์เบอร์รี่และแป้งข้าวกัลลิ่งหอมมะลิ (ร้อยละ 15.916 และ 16.488) ส่วนพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาตินซ์ (เอนทาลปี) พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาตินซ์ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงพลังงานที่ใช้ในการทำลายส่วน double helix order ของสตาร์ช (Sun *et al.*, 2020) พบว่าสตาร์ชหรือแป้งจะมีค่าเอนทาลปีสูง เนื่องจากการมีอยู่ของส่วนที่ไม่ใช่สตาร์ช (Non-starch) เช่น โปรตีนไขมัน รวมทั้งเยื่อใยที่จะไปขัดขวางการเกิดเจลลาตินซ์ ดังนั้นจึงมีการใช้พลังงานที่สูงเพื่อทำให้สตาร์ชเกิดเจลลาตินในเซชัน นอกจากนี้สารประกอบเชิงซ้อนของระหว่างอะไมโลสและไขมัน (Amylose-lipid complex) หรืออะไมโลสและโปรตีน (Amylose-protein complex) ในแป้งข้าวกัลลิ่ง ส่งผลให้อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลลาตินในเซชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น (Morales-Martínez *et al.*, 2014)

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวกัลลิ่งสี

แป้งข้าวกัลลิ่ง	T_o (°C)	T_p (°C)	T_e (°C)	Enthalpy (J/g)
หอมมะลิ	65.48±0.16 ^b	71.56±0.24 ^b	77.82±0.04 ^b	8.60±0.30 ^a
หอมมะลิแดง	66.23±0.33 ^{ab}	72.23±0.27 ^a	79.04±0.73 ^a	8.28±0.51 ^a
ไรซ์เบอร์รี่	63.73±0.44 ^c	70.22±0.24 ^c	77.92±0.13 ^b	8.53±0.47 ^a
หอมนิล	66.51±0.00 ^a	72.80±0.13 ^a	79.34±0.11 ^a	9.16±0.16 ^a

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

^{a-d} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\leq 0.05$)



ภาพที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวกล้องสี

4.1.3.3 ดัชนีการดูดซับน้ำ ดัชนีการละลายและดัชนีการดูดซับน้ำมันของแป้งข้าวกล้องสี

จากการศึกษาดัชนีการดูดซับน้ำ ดัชนีการละลายและดัชนีการดูดซับน้ำมันของแป้งข้าวกล้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.8 จากการศึกษาพบว่า แป้งข้าวกล้องสีมีดัชนีการดูดซับน้ำใกล้เคียงกันอยู่ที่ 2.347-2.468 (g/g) ดัชนีการละลายร้อยละ 0.314-0.379 และดัชนีการดูดซับน้ำมัน 1.977-2.128 (g/g) โดยดัชนีการละลายบ่งบอกถึงปริมาณขององค์ประกอบที่สามารถละลายในของเหลวหรือน้ำได้ แป้งที่มีการดูดซับน้ำสูงบ่งบอกถึงองค์ประกอบที่ชอบน้ำของแป้งข้าวกล้องอย่างคาร์โบไฮเดรต โปรตีนและเยื่อใย โดยแป้งที่มีเยื่อใย โปรตีนและคาร์โบไฮเดรตที่สูงจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีกว่า ความแตกต่างของความสามารถในการดูดซับน้ำขึ้นอยู่กับความแตกต่างของโครงสร้างของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตส่วนที่ชอบน้ำ ในทางตรงกันข้ามดัชนีการดูดซับน้ำมันบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับน้ำมันของแป้งข้าว โดยการดูดซับไขมันของแป้งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของโปรตีนส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) การปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารในด้านต่าง ๆ เช่น ความรู้สึกในปาก (Mouthfeel) ความคงตัวของกิลินรส และความน่ารับประทานของผลิตภัณฑ์อาหาร เป็นต้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการจับกับไขมันหรือการดูดซับน้ำมันของแป้งที่สูง แต่การดูดซับน้ำมันของแป้งที่สูงก็อาจจะส่งผลต่อกลิ่นหืนของผลิตภัณฑ์ได้เช่นกัน (Falade and Chirstopher, 2015) จากการศึกษาของ Kraithong, Lee and Rawdkuen. (2018) ที่ได้ทำการศึกษาดัชนีการดูดซับน้ำ ดัชนีการละลายและดัชนีการดูดซับน้ำมันของแป้งข้าวสีไทย พบว่าแป้งข้าวสีไทยมีดัชนีการดูดซับน้ำอยู่ที่ 5.44-7.14 (g/g) ดัชนีการละลายร้อยละ 2.97-7.05 และดัชนีการดูดซับน้ำมัน 1.11-1.34 (g/g) ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ ดัชนีการละลายและดัชนีการดูดซับน้ำมันที่แตกต่างกันขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวแต่ละชนิด

ตารางที่ 4.8 ดัชนีการดูดซับน้ำ ดัชนีการละลายและดัชนีการดูดซับน้ำมันของแป้งข้าวกัลลิ่งสี

แป้งข้าวกัลลิ่ง	ดัชนีการดูดซับน้ำ (g/g)	ดัชนีการละลาย (ร้อยละ)	ดัชนีการดูดซับน้ำมัน (g/g)
หอมมะลิ	2.468±0.038 ^a	0.357±0.008 ^a	2.128±0.030 ^a
หอมมะลิแดง	2.442±0.006 ^a	0.314±0.002 ^a	2.112±0.064 ^a
ไรซ์เบอร์รี่	2.347±0.048 ^b	0.379±0.058 ^a	2.073±0.062 ^a
หอมนิล	2.420±0.022 ^a	0.343±0.044 ^a	1.977±0.031 ^b

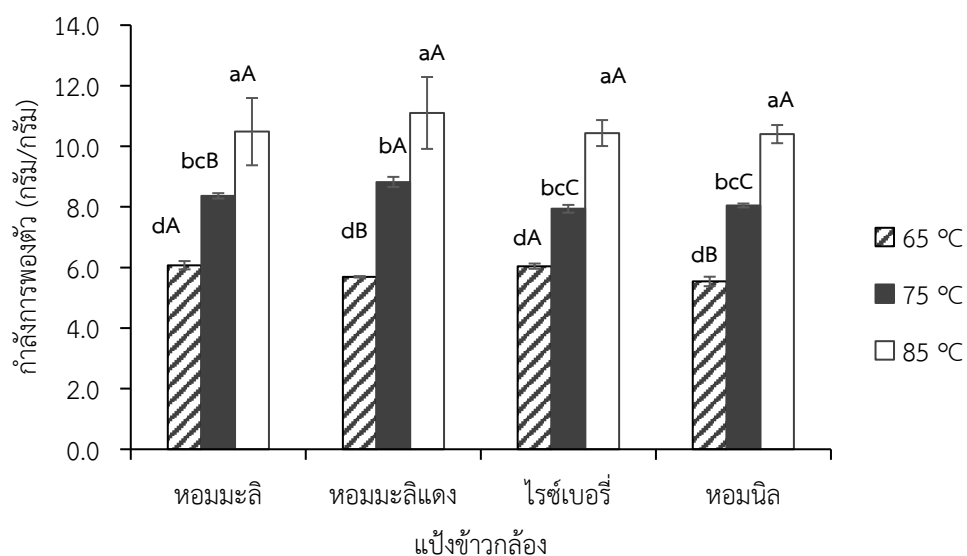
หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

^{a, b} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

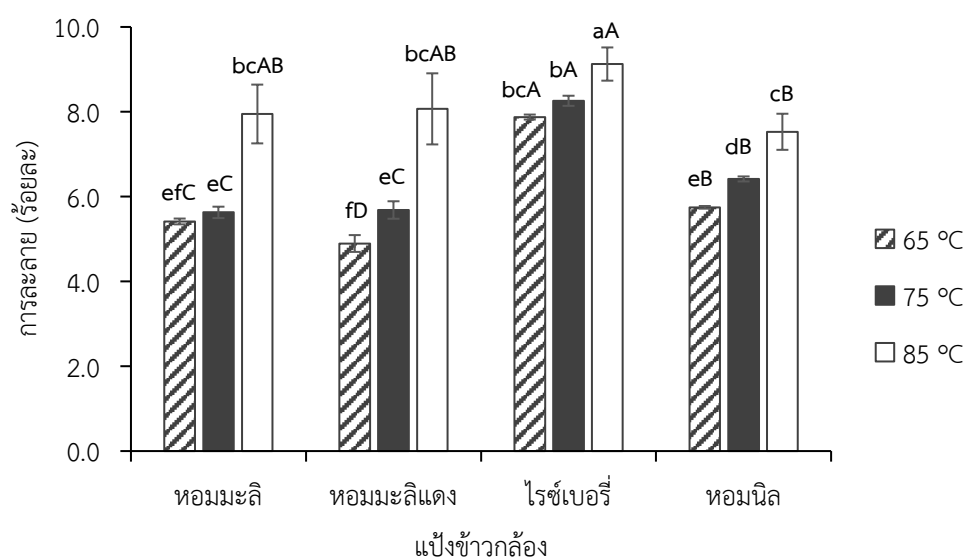
4.1.3.4 กำลังการพองตัว และการละลายของแป้งข้าวกัลลิ่งสี

จากการศึกษากำลังการพองตัวและการละลายของแป้งข้าวกัลลิ่งสีทั้ง 4 สายพันธุ์ โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.5 (ก)-4.5 (ข) พบว่า แป้งข้าวกัลลิ่งสีทั้ง 4 สายพันธุ์ มีกำลังการพองตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทาง ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบที่อุณหภูมิเดียวกัน และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าการพองตัวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้สสารขมิการพองตัวเพิ่มสูงขึ้น โดยเมื่อให้ความร้อนจนเม็ดสสารเกิดการเจลาติไนซ์ พันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างแบบเกลียวคู่ (Double helices) ของโมเลกุลของสสารจะถูกทำลาย และปล่อยให้หมู่ไฮดรอกซิลสร้างสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำขึ้นใหม่ ทำให้เม็ดสสารเกิดการบวมหรือพองตัว ซึ่งการที่สสารเกิดการพองตัว จะเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงโมเลกุลส่วนที่อยู่ด้านในของสสาร และสามารถถูกชะออกมาจากส่วนที่อยู่ด้านในของเม็ดสสารได้ง่ายขึ้น จึงสามารถเพิ่มความสามารถในการละลายของของสสารได้ (Hasjim, 2012; Bao, 2018; Thiranusornkij, 2018) เมื่อพิจารณาการละลายของแป้งข้าวกัลลิ่งสีพบว่า การละลายมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเช่นเดียวกับการพองตัว โดยเฉพาะการละลายของแป้งข้าวกัลลิ่งไรซ์เบอร์รี่ที่มีการละลายที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวกัลลิ่งสีชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับการละลายของโปรตีน ดังตารางที่ 4.9 การพองตัวของแป้งหรือสสารยังมีปัจจัยอื่น ๆ นอกจากอุณหภูมิที่ใช้ เช่น ปริมาณอะไมส ไขมันและโปรตีน เป็นต้น ที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสและไขมันหรือโปรตีนได้ การละลายของแป้งจะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการจับกับน้ำและการถูกทำลายของแป้ง กำลังการพองตัวและการละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ (Singthong and Meesit, 2017) สอดคล้องกับการรายงานของ Thiranusornkij et al. (2018) ที่ได้ทำการศึกษากำลังการพองตัวและการละลายของแป้งข้าวกัลลิ่งสีและแป้งข้าวกัลลิ่งสีที่อุณหภูมิต่าง ๆ ต่อการพองตัว พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้การพองตัวและการละลายมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ระหว่างที่มีการให้ความร้อนแป้งจะเกิดการพองตัวและมีการ

ชะของปริมาณอะไมโลสออกมารวมถึงองค์ประกอบทางด้านเคมีอื่น ๆ เช่น โปรตีนและเยื่อที่สามารถละลายน้ำได้ ทำให้การละลายมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



(ก)



(ข)

หมายเหตุ: ตัวอักษร a-f บ่งบอกถึงการเปรียบเทียบในทุกตัวอย่าง ตัวอักษร A-D บ่งบอกถึงการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน

ตัวอักษรที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงกำลังการพองตัว (ก) และการละลาย (ข) ของแป้งข้าวกล้องสี่

3.1.3.5 ความสามารถในการละลายโปรตีนของแป้งข้าวก้องสี

จากการศึกษาความสามารถในการละลายของโปรตีนของแป้งข้าวก้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.9 จากการศึกษาพบว่า แป้งข้าวก้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์มีการละลายของโปรตีนอยู่ที่ร้อยละ 4.043-6.525 โดยแป้งข้าวก้องสีหอมมะลิจะมีการละลายของโปรตีนสูงที่สุด แต่ไม่แตกต่างกับการละลายของโปรตีนของแป้งข้าวก้องสีแดงและแป้งข้าวก้องสีไรซ์เบอร์รี่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ซึ่งการละลายของโปรตีนที่สูงบ่งบอกถึงความสามารถในการจับกับน้ำได้ดี ซึ่งการละลายของโปรตีนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การดูดซับน้ำ ซึ่งความสามารถในการจับน้ำที่สูงบ่งบอกถึงการละลายน้ำได้ดี ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบอื่นได้ดีด้วย นอกจากนี้ปริมาณไขมันที่สูงจะเข้าไปขัดขวางการจับกับน้ำของโปรตีนได้ โปรตีนในข้าวประกอบด้วย 4 ชนิดหลัก ๆ ตามความสามารถในการละลาย ได้แก่ โปรตีนอัลบูมิน (Albumins) ละลายได้ดีในน้ำ โปรตีนโกลบูลิน (Globulins) ละลายได้ดีในเกลือ โปรตีนกลูเตลิน (Glutelins) ละลายได้ดีในสภาวะกรดหรือด่าง และโปรตีนโพรลามิน (Prolamins) ละลายได้ดีในแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 70-90 โดยอัตราส่วนของโปรตีนแบ่งเป็นร้อยละ 5: 10: 80: 5 ตามลำดับ (ณัฐพัชร์ สะอาดศรีวีระเดช และคณะ, 2556)

ตารางที่ 4.9 ความสามารถในการละลายของโปรตีนของแป้งข้าวก้องสี

แป้งข้าวก้องสี	การละลายโปรตีน (ร้อยละ)
หอมมะลิ	4.043±0.660 ^b
หอมมะลิแดง	5.933±0.784 ^a
ไรซ์เบอร์รี่	6.033±0.603 ^a
หอมนิล	6.523±0.342 ^a

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

^{a, b} ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\leq 0.05$)

4.1.3.6 ความสามารถในการเกิดอิมัลชันและความคงตัวของอิมัลชันของแป้งข้าวก้องสี

จากการศึกษาความสามารถในการเกิดอิมัลชันและความคงตัวของอิมัลชันของแป้งข้าวก้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่า แป้งข้าวก้องสีหอมมะลิจะมีความสามารถในการเกิดอิมัลชันสูงที่สุดซึ่งความสามารถในการเกิดอิมัลชันที่ดี ภายในแป้งจะต้องมีส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำซึ่งสอดคล้องกับการดูดซับน้ำและน้ำมัน (ตารางที่ 4.8) รวมถึงการละลายของโปรตีนซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถของโปรตีนที่ละลายได้ ขณะที่ความคงตัวของอิมัลชันหลังจากให้ความร้อนพบว่า แป้งข้าวก้องสีหอมมะลิจะมีความคงตัวสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวก้องสีชนิดอื่น ปริมาณโปรตีนที่มีอยู่ในแป้งข้าวก้องสีมีความสำคัญเนื่องจากบ่งบอกถึงความสามารถในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ได้ดีโดยไปลดแรงตึงผิวระหว่างเฟสทั้งสองเฟส โปรตีนที่ไม่ชอบน้ำมีอิทธิพลต่อสมบัติการเกิดอิมัลชัน (Kaushal, Kumar and Sharma, 2012; Chandra and Samsheer, 2013)

นอกจากปริมาณโปรตีนแล้วอาจจะยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเกิดอิมัลชัน เช่น คาร์โบไฮเดรต เมื่อมีการให้ความร้อน สตาร์ชในแป้งข้าวจะเกิดการพองตัว ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น และเมื่อความหนืดสูงขึ้นจะทำให้การรวมตัวกันของอนุภาคไขมันลดลง ดังนั้น แม้คาร์โบไฮเดรตที่มีอยู่ในแป้งจะไม่ใช่อิมัลซิไฟเออร์ที่ดีแต่ความหนืดจะไปขัดขวางการรวมตัวของไขมันได้บ้าง

ตารางที่ 4.10 ความสามารถในการเกิดอิมัลชันและความคงตัวของอิมัลชันของแป้งข้าวกุ้งสี

แป้งข้าวกุ้งสี	ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน (ร้อยละ)	ความคงตัวของอิมัลชัน (ร้อยละ)
หอมมะลิ	27.083±2.083 ^a	42.277±0.596 ^c
หอมมะลิแดง	24.823±3.250 ^a	67.350±2.382 ^b
ไรซ์เบอร์รี่	17.708±1.473 ^b	80.556±3.928 ^a
หอมนิล	12.936±0.541 ^c	81.197±3.701 ^a

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

^{a-c} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

4.1.3.7 ความสามารถในการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟมของแป้งข้าวกุ้งสี

เมื่อทำการศึกษาความสามารถในการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟมของแป้งข้าวกุ้งสีทั้ง 4 สายพันธุ์ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.11 พบว่า แป้งข้าวกุ้งสีหอมนิลมีความสามารถในการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟมสูงที่สุด โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโฟมมากที่สุด คือปริมาณโปรตีนที่มีอยู่และการละลายของโปรตีนของแป้งข้าวกุ้งสีแต่ละชนิด ซึ่งสอดคล้องกับการละลายของโปรตีนของแป้งข้าวกุ้งสีดังตารางที่ 4.9 เมื่อมีการตีปั่น (Whip) จะเกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กที่กระจายอยู่ในเฟสของของเหลว โดยโปรตีนที่มีอยู่ในน้ำแป้งหรือโปรตีนที่ละลายอยู่จะทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิวช่วยในการเกิดโฟมและรักษาความคงตัวของโฟมไว้ได้ (ไศรดา วัลภาและคณะ, 2555)

ตารางที่ 4.11 ความสามารถในการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟมของแป้งข้าวกุ้งสี

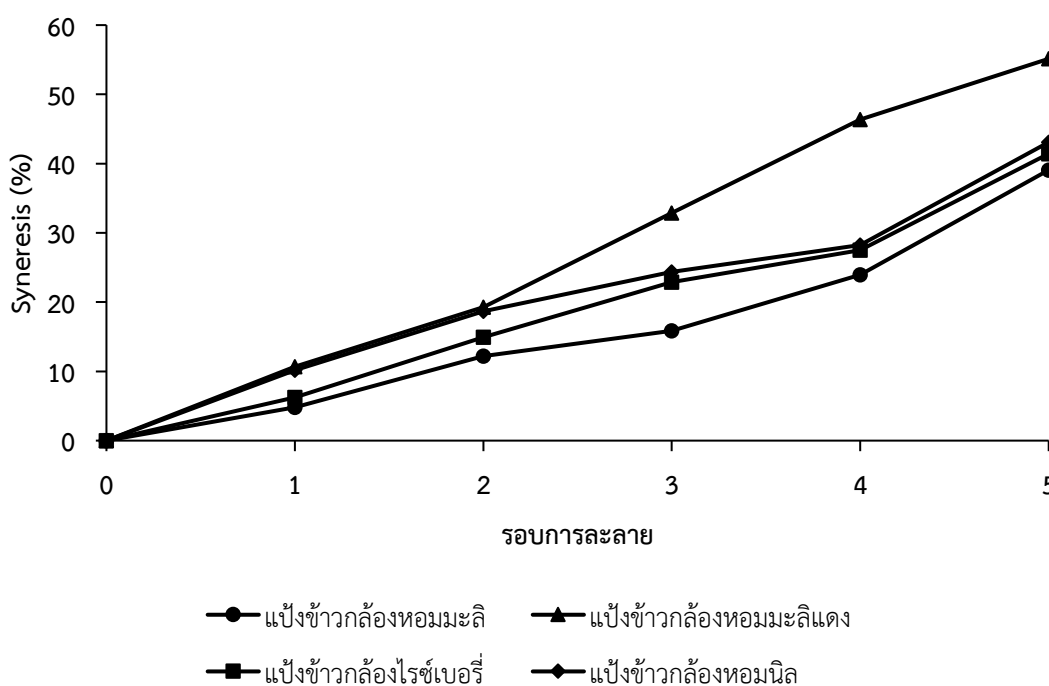
แป้งข้าวกุ้งสี	ความสามารถในการเกิดโฟม (ร้อยละ)	ความคงตัวของโฟมหลังตี 60 นาที (ร้อยละ)
หอมมะลิ	6.998±1.231 ^c	2.383±0.488 ^b
หอมมะลิแดง	7.302±0.727 ^c	2.698±0.550 ^b
ไรซ์เบอร์รี่	9.683±0.316 ^b	3.172±0.978 ^{ab}
หอมนิล	11.667±0.337 ^a	3.810±0.673 ^a

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

^{a-d} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

4.1.3.8 ความคงตัวต่อการละลายและการแช่แข็ง (Freeze–thaw stability) และค่าการสูญเสียน้ำ (Syneresis)

จากการศึกษาความคงตัวต่อการละลายและการแช่แข็ง (Freeze–thaw stability) และค่าการสูญเสียน้ำ (Syneresis) ของแป้งข้าวกล้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์ ในแต่ละรอบของการละลายทั้งหมด 5 รอบ ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.6 พบว่า แป้งข้าวกล้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์ จะมีอัตราการสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้นในเมื่อมีการเพิ่มรอบการละลาย และพบว่าแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงจะมีปริมาณอะไมโลสสูงที่สุด (ร้อยละ 18.438) จะมีค่าการสูญเสียน้ำมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแต่ละรอบการละลายและเปรียบเทียบกับแป้งข้าวกล้องสีสายพันธุ์อื่น ๆ ที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่า และเห็นได้ชัดเมื่อรอบการละลายรอบที่สาม ความคงตัวต่อการละลายและการแช่แข็งและค่าการสูญเสียน้ำมีความสัมพันธ์กับปริมาณอะไมโลสในแป้งข้าวกล้องสี โดยในระหว่างการแช่แข็ง เจลแป้งที่มีการให้ความร้อนจนเกิดเจลาติไนซ์สมบูรณ์ อะไมโลสที่อยู่ในเจลแป้งข้าวกล้องสีมีการจัดเรียงตัวกันใหม่หรือมีการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ส่งผลทำให้เกิดการขับน้ำหรือการสูญเสียน้ำ (Syneresis) ออกมา ดังนั้นแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีแนวโน้มจะส่งผลให้มีค่าการสูญเสียน้ำเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย การสูญเสียน้ำในแต่ละรอบของการละลาย สามารถบ่งบอกถึงความคงตัวของแป้งได้ โดยแป้งที่มีการสูญเสียน้ำต่ำจะมีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการถูกละลายที่สูง ซึ่งจากผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Katekhong and Charoenrein (2012) ที่ได้ทำการศึกษาค่าการสูญเสียน้ำของเจลแป้งข้าวหอมมะลิ 105 พบว่าเมื่อเพิ่มรอบการละลาย เจลแป้งข้าวจะมีแนวโน้มของการสูญเสียน้ำเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น ปริมาณของการขับน้ำออกมามีประโยชน์ในการชี้วัดการจัดเรียงตัวของสตาร์ชได้ (Karim, Norziah and Seow, 2000)



ภาพที่ 4.6 ค่าการสูญเสียน้ำ (Syneresis) ของแป้งข้าวกล้องสีในแต่ละรอบการละลาย

4.2 ศึกษาสูตร วิธีการผลิตเส้นกวยจั๊บอุบลเสริมข้าวกล้องที่เหมาะสม และคุณภาพของเส้นกวยจั๊บเสริมข้าวกล้องที่ได้

จากการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องสีทั้ง 4 สายพันธุ์ โดยพบว่า แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงมีปริมาณอะไมโลสที่สูงที่สุดรวมถึงมีสารสำคัญที่สูงกว่าแป้งข้าวกล้องสีชนิดอื่น จึงทำการนำแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงมาใช้ในการทดแทนแป้งข้าวเจ้าเพื่อศึกษาสูตร วิธีการผลิตเส้นกวยจั๊บอุบลเสริมข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่เหมาะสม และคุณภาพของเส้นกวยจั๊บเสริมข้าวกล้องที่ได้ ผลที่ได้แสดงดังนี้

4.2.1 ศึกษาสูตรการผลิตเส้นกวยจั๊บ

จากการศึกษาปริมาณของแป้งข้าวกล้องสีที่เหมาะสมในการผลิตเส้นกวยจั๊บ โดยใช้แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (RJB) ทดแทนแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง ร่วมกับการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ ทำการขึ้นรูปเป็นเส้นกวยจั๊บจากนั้นนำเส้นกวยจั๊บสุกมาวิเคราะห์คุณภาพได้แก่ สี คุณภาพการต้มสุก คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส รวมทั้งสมบัติทางความร้อน และสมบัติแป้งเปียกของแป้งผสมที่ใช้ในการผลิตเส้นกวยจั๊บ ผลที่ได้แสดงดังนี้

4.2.1.1 สมบัติแป้งเปียกของแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลังและแป้งผสม

จากการศึกษาสมบัติแป้งเปียกหรือสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลังและแป้งผสมที่ใช้ในการผลิตเส้นกวยจั๊บแต่ละสูตร โดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) จากการวิเคราะห์ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.12 พบว่า อุณหภูมิในการเกิดเพส (Pasting temperature) แป้งข้าวเจ้ามีค่าสูงที่สุด และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับแป้งมันสำปะหลังและแป้งผสม ขณะที่แป้งผสมในทุกสูตรไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แม้ว่าอุณหภูมิในการเกิดเพสของแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงจะมีค่าต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้า แต่เมื่อมีการใช้ปริมาณของแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงเพิ่มสูงขึ้นจะไม่มี ความแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม โดยแป้งที่มีอุณหภูมิในการเกิดเพสที่สูงแป้งจะมีการต้านทานการพองตัวที่สูง (Singthong and Meesit, 2017)

ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของเม็ดแป้งที่จะจับกับน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจน (Otegbayo, Oguniyan and Akinwumi, 2013) ซึ่งค่าความหนืดที่สูงส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากความแตกต่างของโครงสร้างอะไมโลเพคติน (Eliasson, 2004) ยิ่งมีค่าความหนืดสูงบ่งบอกถึงปริมาณอะไมโลเพคตินที่สูง จากการศึกษพบว่า แป้งมันสำปะหลังมีค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ที่สูงที่สุด รองลงมาคือแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง ในขณะที่แป้งข้าวเจ้ามีค่าความหนืดสูงสุดต่ำสุด และเมื่อพิจารณาค่าความหนืดสูงสุดของแป้งผสมที่ใช้ผลิตเส้นกวยจั๊บอุบลเสริมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง พบว่า เมื่อมีการเติมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนืดสูงสุดของแป้งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเมื่อพิจารณาแป้งผสมใช้ผลิตเส้นกวยจั๊บอุบลเสริมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่มีการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ พบว่า มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่มีการใส่สารไฮโดรคอลลอยด์

สำหรับค่าความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและต่ำสุดในช่วงให้ความร้อน (Breakdown) แสดงถึงค่าความหนืดหรือการเกิดเพสมีการเปลี่ยนแปลงน้อยหรือเพสมีความทนต่อ

การกวนขณะให้ความร้อนหรือความคงตัวของสตาร์ช ค่า breakdown ที่ต่ำบ่งบอกถึงความคงตัวของแป้งเปียก ขณะที่ค่า breakdown ที่สูงจะบ่งบอกถึงความคงตัวที่ต่ำเมื่อมีการกวนขณะให้ความร้อนจากการศึกษาพบว่า แป้งข้าวเจ้ามีค่า breakdown ต่ำที่สุด ส่วนแป้งมันสำปะหลังมีค่าสูงที่สุด เมื่อพิจารณาค่า breakdown ของแป้งที่ใช้ผลิตเส้นกวยจั๊บที่มีการเติมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง พบว่าค่า breakdown มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งเป็นผลมาจากค่า breakdown ของแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่สูง และเมื่อพิจารณาการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์และไม่มีการเติมพบว่าค่า breakdown มีค่าที่สูงขึ้นเมื่อมีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ โดยปกติแล้วเม็ดสตาร์ชมีความต้านทานต่ออุณหภูมิและแรงเฉือนลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายของสารไฮโดรคอลลอยด์เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดของแป้งผสมที่มีการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์เพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มแรงเฉือนในระบบ เร่งการแตกตัวของเม็ดแป้งสตาร์ช (Funami et al., 2005) สำหรับค่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) แสดงถึงความสามารถของแป้งต่อการรักษาความหนืดเมื่อเกิดเพศขณะทำให้เย็น เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสุดท้ายของแป้งที่ใช้ผลิตเส้นกวยจั๊บเสริมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง พบว่า เมื่อมีการเติมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนืดสุดท้ายของแป้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการลดลงของแป้งข้าวเจ้าที่มีสัดส่วนของอะไมโลสสูงกว่า แต่เมื่อมีการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์พบว่าไฮโดรคอลลอยด์จะไปช่วยให้ความหนืดสุดท้ายของแป้งผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่มีการเติม เนื่องจากสารไฮโดรคอลลอยด์เป็นสารเพิ่มความหนืดที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำที่ดี

เมื่อพิจารณาค่าผลต่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด (setback) พบว่า แป้งข้าวเจ้ามีค่า setback สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง แป้งที่มีค่า setback ต่ำแสดงว่าเกิดการรีโทรเกรเดชันต่ำ ซึ่งมีผลต่อการขึ้นรูปของเส้นกวยจั๊บให้ลดลงเมื่อมีค่า setback ต่ำ เมื่อพิจารณาค่า setback ของแป้งที่ใช้ผลิตเส้นกวยจั๊บเสริมข้าวกล้องหอมมะลิแดง พบว่า แป้งที่ใช้ผลิตเส้นกวยจั๊บเสริมข้าวกล้องหอมมะลิแดงมีค่า setback ลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง เนื่องจากปริมาณของอะไมโลสที่ลดน้อยลง สอดคล้องกับปริมาณอะไมโลสในแป้งผสมที่ได้ทำการศึกษาดังภาพที่ 4.7 แต่เมื่อมีการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์เปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่มีการเติมพบว่ามีความ setback สูงกว่า เนื่องจากสารไฮโดรคอลลอยด์จะช่วยเพิ่มความหนืดให้ระบบหรือเพิ่มความหนืดสุดท้ายของแป้งผสมให้สูงขึ้น โดยคุณสมบัติของสารไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ นอกจากเพิ่มความหนืด ยังสามารถเพิ่มความคงตัวและสามารถปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้ (Kaur et al., 2015)

ตารางที่ 4.12 สมบัติแป้งเปียกของแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลังและแป้งผสม

แป้ง	Pasting Temp. (°C)	Peak viscosity (cPs)	Breakdown (cPs)	Final viscosity (cPs)	Setback (cPs)
ข้าวเจ้า	77±1 ^a	2250±1 ^h	235±7 ^h	4498±44 ^a	2558±11 ^a
มันสำปะหลัง	66±1 ^c	3826±9 ^a	2323±5 ^a	2250±3 ⁱ	760±1 ^f
0% RJB	68±1 ^b	2936±7 ^g	914±19 ^g	3259±4 ^{de}	1165±1 ^d
10% RJB	68±1 ^b	3068±11 ^f	991±5 ^f	3193±7 ^{ef}	1154±8 ^d
10% RJB+GG	68±1 ^b	3292±6 ^{cd}	1171±68 ^e	3467±92 ^b	1399±91 ^b
20% RJB	69±0 ^b	3119±35 ^{ef}	1145±1 ^e	3101±25 ^{fg}	1147±37 ^d
20% RJB+GG	69±1 ^b	3302±1 ^c	1170±28 ^e	3400±8 ^{bc}	1330±36 ^{bc}
30% RJB	69±1 ^b	3133±1 ^e	1168±17 ^{de}	3028±87 ^{fg}	1111±8 ^{de}
30% RJB+GG	68±0 ^b	3321±2 ^{bc}	1195±4 ^{de}	3318±14 ^{cd}	1266±25 ^c
40% RJB	69±0 ^b	3144±6 ^e	1246±28 ^d	2833±1 ^h	1110±28 ^{de}
40% RJB+GG	69±0 ^b	3337±84 ^{bc}	1315±25 ^c	3253±3 ^{de}	1265±60 ^c
50% RJB	69±0 ^b	3200±22 ^d	1354±28 ^c	2779±42 ^h	1047±37 ^e
50% RJB+GG	69±0 ^b	3371±28 ^{ab}	1442±3 ^b	3232±70 ^{de}	1303±45 ^c

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3), แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (RJB) และสารไฮโดรคอลลอยด์ (GG)

^{a-i} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

4.2.1.2 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้งผสม

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลังและแป้งผสมที่ใช้ในการผลิตเส้นกวยจั๊บเสริมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.13 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเจ้าต่อพลังงานที่ใช้ในการเกิดเอนทัลปี (Enthalpy, ΔH) พบว่า แป้งมันสำปะหลังมีค่าสูงกว่าแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงและแป้งข้าวเจ้า แสดงว่ามีการใช้พลังงานในการทำลายพันธะของเม็ดแป้งที่สูง ซึ่งพลังงานในการเกิดเอนทัลปีขึ้นอยู่กับลักษณะเม็ดแป้ง องค์ประกอบของภายในเม็ดแป้ง รวมถึงปริมาณของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน เมื่อเปรียบเทียบแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเจ้า ต่ออุณหภูมิเริ่มการเปลี่ยนแปลง (Onset Temperature, T_o), อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (Peak Temperature, T_p) และอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสุดท้าย (End Temperature, T_e) พบว่าแป้งข้าวเจ้ามีค่าอุณหภูมิเริ่มการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสูงสุด และอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลง

สุดท้ายสูงที่สุด แตกต่างจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง และแป้งผสมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.13 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้งผสม

แป้ง	T _o	T _p	T _e	Enthalpy (J/g)
ข้าวเจ้า	73.05±0.21 ^a	77.32±0.35 ^a	82.03±1.10 ^a	9.64±0.59 ^f
มันสำปะหลัง	63.51±0.30 ^{cd}	71.63±0.87 ^{bc}	79.79±0.08 ^d	15.30±0.88 ^a
0% RJB	64.19±0.25 ^{bcd}	71.63±0.56 ^{bc}	81.92±0.29 ^{ab}	11.82±0.04 ^b
10% RJB	63.52±0.28 ^{cd}	71.39±0.27 ^c	81.44±0.13 ^{abc}	11.30±0.02 ^{bcde}
10% RJB+GG	64.12±0.44 ^{bcd}	71.84±0.22 ^{bc}	81.85±0.94 ^{ab}	11.32±0.06 ^{bcde}
20% RJB	63.54±0.54 ^{cd}	71.77±0.07 ^{bc}	80.43±0.16 ^{cd}	11.66±0.08 ^{bc}
20% RJB+GG	64.36±0.26 ^{bc}	71.81±0.27 ^{bc}	80.76±0.74 ^{bcd}	10.94±0.03 ^{cde}
30% RJB	63.43±0.04 ^d	71.81±0.12 ^{bc}	79.62±0.13 ^d	11.33±0.06 ^{bcde}
30% RJB+GG	64.66±0.42 ^b	72.42±0.12 ^b	79.93±0.29 ^d	10.77±0.24 ^{de}
40% RJB	63.53±0.41 ^{cd}	72.57±0.51 ^b	79.88±0.35 ^d	11.55±0.02 ^{bcd}
40% RJB+GG	64.64±0.45 ^b	72.27±0.57 ^{bc}	79.59±0.30 ^d	11.47±0.46 ^{bcde}
50% RJB	63.56±0.56 ^{cd}	72.22±0.45 ^{bc}	79.31±0.56 ^e	11.48±0.08 ^{bcde}
50% RJB+GG	64.69±0.13 ^b	71.88±0.23 ^{bc}	79.29±0.17 ^e	10.64±0.47 ^e

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3), แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (RJB) และสารไฮโดรคอลลอยด์ (GG)

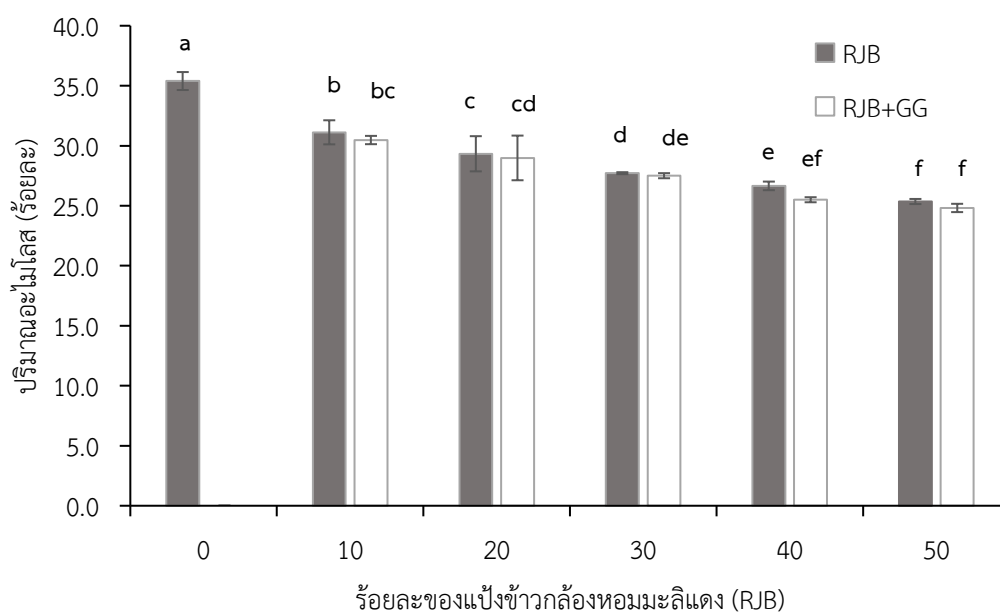
^{a-f} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติไนซ์ของแป้งที่ใช้ผลิตเส้นกวยจั๊บน้ำร้อน แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง พบว่า เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ทดแทนแป้งข้าวเจ้า จะส่งผลให้ค่าเอนทาลปีที่ใช้ในการเกิดเจลมีความแตกต่างกันเล็กน้อย แต่มีค่าสูงกว่าเอนทาลปีของแป้งข้าวเจ้าซึ่งสัมพันธ์กับค่าเอนทาลปีแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ทำการวิเคราะห์ได้ และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิเริ่มการเปลี่ยนแปลงและอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของแป้งที่ใช้ผลิตเส้นกวยจั๊บน้ำร้อน แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง พบว่า จะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง อาจเนื่องมาจากองค์ประกอบของโปรตีน ไขมัน และเยื่อใยที่มีอยู่ในแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง ที่จะไปขัดขวางการพองตัวของเม็ดแป้ง ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการทำให้เกิดเจลลาติไนซ์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ของ Reddy et al. (2017) ที่ได้ศึกษาสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวสาลีที่ทำการขัดสีและไม่ขัดสีพบว่า แป้งข้าวที่ไม่ทำขัดสีจะใช้อุณหภูมิในการเกิด

เจลาตินในเซชันและค่าเอนทาลปีสูงกว่า นอกจากนี้อาจเป็นผลมาจากขณะที่อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสุดท้ายของแป้งที่ใช้ผลิตเส้นกวยจั๊บเสริมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงมีแนวโน้มลดน้อยลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง

4.2.1.3 ปริมาณอะไมโลสในแป้งผสม

จากการศึกษาปริมาณอะไมโลสของแป้งผสมรวมกับการใช้ไฮโดรคอลลอยด์และไม่ใช่สารไฮโดรคอลลอยด์ ผลแสดงดังภาพที่ 4.7 พบว่า การเพิ่มขึ้นของแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงจะส่งผลให้ปริมาณอะไมโลสลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการลดลงของแป้งข้าวเจ้าที่ถูกทดแทนด้วยแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง เมื่อพิจารณาผลของสารไฮโดรคอลลอยด์ต่อปริมาณอะไมโลส พบว่า สารไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ในการศึกษาไม่มีผลต่อปริมาณอะไมโลสเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณของแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ปริมาณเท่ากันพบว่า แป้งผสมที่มีการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์จะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่มีการเติมเล็กน้อย แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) การลดลงของปริมาณอะไมโลสในแป้งผสมสอดคล้องกับค่า peak viscosity และ setback ที่ลดลงที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติแป้งเปียกของแป้งผสม รวมทั้งค่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บที่ได้ ซึ่งส่งผลให้ค่าเนื้อสัมผัสมีความเหนียวและความยืดหยุ่นลดลง



หมายเหตุ: แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (RJB) และสารไฮโดรคอลลอยด์ (GG) (n=3)

^{a-f} ตัวอักษรที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ภาพที่ 4.7 ปริมาณอะไมโลสในแป้งผสม

4.2.1.4 คุณภาพการต้มสุกของเส้นกวยจั๊บน้ำ

จากการศึกษาคุณภาพการต้มสุกของเส้นกวยจั๊บน้ำ โดยทำการศึกษาระยะเวลาในการต้มสุก (Cooking time), ร้อยละผลผลิตการต้มสุก (%Cooking yield), ร้อยละการดูดซับน้ำ (%Water absorption) และร้อยละการสูญเสียระหว่างการหุงต้ม (%Cooking loss) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.14 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาในการต้มสุก ผลผลิตการต้มสุกและการดูดซับน้ำ ของเส้นกวยจั๊บน้ำแต่ละสูตรมีแนวโน้มลดลง ขณะที่การสูญเสียระหว่างการหุงต้มมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์และไม่มี การเติมสารไฮโดรคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บน้ำเสริมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงในสูตรเดียวกัน ต่อค่าคุณภาพการต้มสุก พบว่า การเติมสารไฮโดรคอลลอยด์จะส่งผลให้ผลผลิตการต้มสุก การดูดซับน้ำ และการสูญเสียระหว่างการหุงต้ม มีแนวโน้มลดลงแต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) การเติมไฮโดรคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บน้ำจะช่วยให้การสูญเสียระหว่างการหุงต้มลดลง เนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์มีความสามารถในการจับกับน้ำที่ดี สามารถเพิ่มความหนืด และช่วยเพิ่มความคงตัวให้กับผลิตภัณฑ์อาหาร (Mudgil, Barak and Khatkar, 2011).

ตารางที่ 4.14 คุณภาพการต้มสุกของเส้นกวยจั๊บน้ำแต่ละสูตร

เส้นกวยจั๊บน้ำ	Cooking time (min)	Cooking yield (%)	Water absorption (%)	Cooking loss (%)
0% RJB	5:30	189.986±2.284 ^a	89.986±2.284 ^a	0.678±0.013 ^{cd}
10% RJB	5:00	185.336±4.445 ^a	85.336±4.445 ^a	0.683±0.045 ^{cd}
10% RJB+GG	5:00	185.053±3.187 ^a	85.053±3.187 ^a	0.712±0.014 ^{bcd}
20% RJB	4:00	178.191±0.819 ^b	78.191±0.819 ^b	0.720±0.007 ^{bcd}
20% RJB+GG	4:00	173.933±1.187 ^{bc}	73.933±1.187 ^{bc}	0.711±0.046 ^{bcd}
30% RJB	3:30	173.907±2.455 ^{bc}	73.907±2.455 ^{bc}	0.676±0.023 ^{cd}
30% RJB+GG	3:30	170.056±1.044 ^{cd}	70.056±1.044 ^{cd}	0.653±0.023 ^d
40% RJB	3:00	163.012±6.390 ^e	63.012±6.390 ^e	0.834±0.083 ^a
40% RJB+GG	3:00	166.329±1.546 ^{de}	66.329±1.546 ^{de}	0.755±0.080 ^{bc}
50% RJB	2:30	154.206±0.528 ^f	54.206±0.528 ^f	0.852±0.028 ^a
50% RJB+GG	2:30	154.210±1.597 ^f	54.210±1.597 ^f	0.780±0.041 ^{ab}

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3), แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (RJB) และสารไฮโดรคอลลอยด์ (GG)

^{a-f} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\leq 0.05$)

4.2.1.5 คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำแข็ง

จากการศึกษาคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งแต่ละสูตร โดยการทดสอบแรงดึง (tensile test) ด้วยเครื่อง Texture analyzer ซึ่งทำการวิเคราะห์ค่าความเหนียวนุ่ม (hardness) และความยืดหยุ่น (springiness) ของเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งหลังต้มสุก ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.15 พบว่า ค่าความเหนียวนุ่มและค่าความยืดหยุ่นของเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ยกเว้นเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งที่เติมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ร้อยละ 10 ทั้งสูตรที่ไม่ใส่และใส่สารไฮโดรคอลลอยด์ มีค่าไม่แตกต่างกับสูตรควบคุม (0%) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อพิจารณาการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์และไม่เติมสารไฮโดรคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บน้ำแข็งเสริมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงในสูตรเดียวกันต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส พบว่ามีค่าความเหนียวนุ่มและค่าความยืดหยุ่นที่สูงกว่าสูตรที่ไม่มีการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์ แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ค่าความยืดหยุ่นของเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งสูตรที่มีการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์จะมีค่าสูงกว่าสูตรที่ไม่มีการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์ โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าสารไฮโดรคอลลอยด์จะมีหน้าที่ช่วยในการจับกับน้ำได้ดี เพิ่มความคงตัว ความชื้น และกระจายตัวได้ดีในผลิตภัณฑ์ที่มีระบบของเหลวและของแข็ง (Mudgil, Barak and Khatkar, 2011). นอกจากนี้ยังช่วยให้สตาร์ชมีปริมาณ amylose leaching ลดลง การเติมสารไฮโดรคอลลอยด์ทำให้ห่อหุ้มโมเลกุลที่เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการจัดเรียงโครงสร้างใหม่หรือการเกิดรีโตรีเกรเดชันลดลง ทำให้เส้นกวยจั๊บน้ำแข็งมีความแข็งแรงลดลงและความยืดหยุ่นจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

4.2.1.6 ค่าสีของเส้นกวยจั๊บน้ำแข็ง

จากการศึกษาค่าสีของเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งในแต่ละสูตร โดยนำเส้นไปต้มให้สุกตามระยะเวลาการต้มสุกจากนั้นนำมาวิเคราะห์ค่าสี โดยประกอบไปด้วยค่า L^* โดยแสดงถึงค่าความขาวหรือความสว่าง (+) และสีดำหรือความมืด (-) ของผลิตภัณฑ์ ค่า a^* แสดงถึงค่าสีแดง (+) และสีเขียว (-) และค่า b^* แสดงถึงค่าสีเหลือง (+) และสีน้ำเงิน (-) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.16 และภาพที่ 4.8 พบว่า เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง จะส่งผลให้ค่าความสว่างลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ขณะที่ค่าสีแดงและค่าสีเหลืองมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ค่าสีแดงที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากรงควัตถุที่อยู่ในส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวของข้าวกล้องหอมมะลิแดง ซึ่งเป็นสารประเภทกลุ่มฟีนอลิก โดยสีแดงของข้าวกล้องหอมมะลิแดงผลมาจากโปรแอนโทไซยานินที่พบในสีแดงของข้าว (Anggraini et al., 2015) เมื่อพิจารณาค่าสีเหลืองพบว่าเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งมีค่าสีเหลืองอยู่ในช่วง 6.84-8.95 ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการใช้แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับค่าสีแดง ซึ่งเป็นผลมาจากเบต้าแคโรทีน (Beta-carotene) ที่เป็นวิตามินชนิดหนึ่ง จัดเป็นกลุ่มรงควัตถุ (Pigment) ที่มีสีส้ม-สีเหลืองอยู่ในกลุ่มแคโรทีนอยด์ (Carotenoid) จัดเป็นแคโรทีนอยด์พวกที่เป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ (Pro vitamin A) โดยมีการรายงานว่าการใช้แป้งข้าวกล้องที่มีสีแดงจะพบสารเบต้าแคโรทีนอยู่ที่ 0.02-0.03 ไมโครกรัมต่อกรัม (Melini et al., 2019)

4.2.1.7 คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อน

จากการศึกษาคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนแต่ละสูตร โดยทำการศึกษาคุณภาพด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ความเหนียวนุ่ม และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีทดสอบความชอบ 9-point Hedonic scale จากตารางที่ 4.17 พบว่า การเติมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงเพิ่มสูงขึ้น มีแนวโน้มส่งผลให้คะแนนการยอมรับในด้านต่าง ๆ ลดลง แต่ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนสูตรที่มีการเติมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงร้อยละ 10 ร่วมกับการใช้ไฮโดรคอลลอยด์มากที่สุดในทุกด้าน เมื่อพิจารณาผลของการเติมไฮโดรคอลลอยด์ พบว่าจะมีแนวโน้มของคะแนนการยอมรับสูงกว่าสูตรที่ไม่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ จากการศึกษาสูตร วิธีการผลิตเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนเสริมข้าวกล้องที่เหมาะสมและคุณภาพของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนเสริมข้าวกล้องที่ได้ สามารถสรุปได้ว่าการเติมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงร้อยละ 10 ร่วมกับการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ จะมีค่าคุณภาพในด้านสี กลิ่น รสชาติ ความเหนียวนุ่มและความชอบโดยรวม ไม่แตกต่างและใกล้เคียงกับสูตรควบคุมมากที่สุด ซึ่งจะเป็นสูตรที่เหมาะสมที่จะใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.15 คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนแต่ละสูตร

เส้นกวยจั๊บน้ำร้อน	Hardness (N)	Springiness (mm)
0% RJB	0.102±0.011 ^a	57.706±9.745 ^a
10% RJB	0.074±0.008 ^b	55.740±5.471 ^a
10% RJB+GG	0.076±0.006 ^b	57.315±8.413 ^a
20% RJB	0.067±0.008 ^b	50.100±9.800 ^{abc}
20% RJB+GG	0.067±0.003 ^b	54.544±8.859 ^{ab}
30% RJB	0.055±0.005 ^c	40.885±5.147 ^{cde}
30% RJB+GG	0.057±0.003 ^c	45.462±5.425 ^{bcd}
40% RJB	0.042±0.008 ^d	37.743±4.039 ^{def}
40% RJB+GG	0.042±0.006 ^d	38.925±5.843 ^{def}
50% RJB	0.034±0.006 ^{de}	30.034±6.607 ^f
50% RJB+GG	0.031±0.004 ^e	32.416±3.619 ^{ef}

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=10), แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (RJB) และสารไฮโดรคอลลอยด์ (GG)

^{a-f} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.16 ค่าสีของเส้นกายจับแต่ละสูตร

เส้นกายจับ	ค่าสี		
	L*	a*	b*
0% RJB	57.87±0.04 ^a	-2.67±0.02 ^f	0.89±0.09 ^d
10% RJB	43.57±0.01 ^b	5.84±0.18 ^e	6.84±0.08 ^c
10% RJB+GG	43.39±0.03 ^b	5.90±0.05 ^e	6.93±0.03 ^c
20% RJB	37.48±0.23 ^c	9.44±0.46 ^d	8.49±0.11 ^b
20% RJB+GG	37.57±0.22 ^c	9.72±0.09 ^d	8.46±0.12 ^b
30% RJB	34.14±0.22 ^d	10.27±0.28 ^c	8.83±0.36 ^{ab}
30% RJB+GG	34.01±0.19 ^d	10.35±0.12 ^c	8.70±0.28 ^{ab}
40% RJB	32.91±0.75 ^e	10.55±0.27 ^{bc}	8.82±0.07 ^{ab}
40% RJB+GG	32.70±0.19 ^e	10.83±0.10 ^b	8.86±0.21 ^a
50% RJB	31.73±0.76 ^f	11.44±0.26 ^a	8.95±0.09 ^a
50% RJB+GG	32.02±0.18 ^f	11.42±0.05 ^a	8.91±0.36 ^a

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=5), แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (RJB) และ สารไฮโดรคอลลอยด์ (GG)

^{a-f} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.17 คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของเส้นกวยจั๊บแต่ละสูตร

เส้นกวยจั๊บ	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่น	รสชาติ	ความเหนียวนุ่ม	ความชอบโดยรวม
0% RJB	6.85±1.39 ^{ab}	6.56±1.62 ^{ab}	6.17±1.32 ^{ab}	6.66±1.37 ^{ab}	7.05±1.36 ^{ab}	7.10±1.19 ^{ab}
10% RJB	6.29±1.45 ^{bc}	6.39±1.48 ^{ab}	5.78±1.41 ^{bc}	6.32±1.55 ^{bc}	7.10±1.39 ^{ab}	6.85±1.00 ^{abc}
10% RJB+GG	6.93±1.45 ^a	6.76±1.56 ^a	6.54±1.55 ^a	6.95±1.13 ^a	7.22±1.26 ^a	7.27±1.19 ^a
20% RJB	6.22±1.65 ^c	6.29±1.55 ^{abc}	5.83±1.34 ^{bc}	6.37±1.22 ^{bc}	6.80±1.55 ^{ab}	6.63±1.37 ^{bcd}
20% RJB+GG	6.27±1.31 ^{bc}	6.63±1.37 ^a	6.15±1.32 ^{ab}	6.41±1.08 ^{abc}	6.73±1.21 ^{abc}	6.71±1.19 ^{bcd}
30% RJB	5.85±1.70 ^{cd}	5.98±1.39 ^{bcd}	5.85±1.41 ^{bc}	5.95±1.43 ^{cd}	6.15±1.65 ^c	6.29±1.33 ^d
30% RJB+GG	6.34±1.62 ^{bc}	6.20±1.44 ^{abc}	5.93±1.44 ^{bc}	6.00±1.72 ^{cd}	6.49±1.77 ^{bc}	6.41±1.64 ^{cd}
40% RJB	5.61±1.46 ^{de}	5.71±1.27 ^{cde}	5.78±1.52 ^{bc}	5.66±1.46 ^{de}	5.54±1.47 ^d	5.71±1.31 ^e
40% RJB+GG	5.24±1.60 ^{ef}	5.41±1.64 ^{de}	5.85±1.49 ^{bc}	5.46±1.59 ^{de}	5.15±1.73 ^{de}	5.46±1.45 ^{ef}
50% RJB	4.73±1.61 ^f	5.32±1.60 ^e	5.71±1.60 ^{bc}	5.32±1.83 ^e	5.00±1.89 ^{de}	5.20±1.50 ^f
50% RJB+GG	5.15±1.63 ^{ef}	5.24±1.74 ^e	5.61±1.54 ^c	4.78±1.76 ^f	4.80±1.86 ^e	5.05±1.58 ^f

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=40), แบ่งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (RJB) และสารไฮโดรคอลลอยด์ (GG)

^{a-f} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 4.8 เส้นกวยจั๊บน้ำใสที่สูตรต่าง ๆ โดย (ก)-(ฉ) คือแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงร้อยละ 0-50: หมายเลข (1) ไม่มีการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์ และ (2) มีการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์

4.2.2 การศึกษาอายุการเก็บรักษาของเส้นกวยจั๊บน้ำแข็ง

จากการศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งเสริมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง ทำให้ทราบถึงสูตรการทำเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งสูตรเสริมแป้งข้าวกล้องที่เหมาะสม โดยมีการใช้แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงร้อยละ 10 ร่วมกับการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ จากนั้นจึงนำมาทำการศึกษาอายุการเก็บรักษาเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งสูตรที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม (0% RJB) โดยทำการเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ 2 ชนิด ได้แก่ ถุงโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) และถุงสุญญากาศ (Vacuum) และทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิเย็น (4-10 องศาเซลเซียส) ทำการตรวจวิเคราะห์คุณภาพทุกสัปดาห์ และที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส) ทำการตรวจวิเคราะห์ทุกสองวัน โดยมีการวิเคราะห์ค่าคุณภาพของเส้นกวยจั๊บน้ำแข็ง ได้แก่ ค่าสี คุณลักษณะเนื้อสัมผัส (ความนุ่มและความยืดหยุ่น) ปริมาณความชื้น water activity ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์ และรา ผลที่ได้แสดงดังนี้

4.2.2.1 อายุการเก็บรักษาของเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งอุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส)

1) ค่าคุณภาพของเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งสูตรที่เหมาะสมที่อุณหภูมิห้อง

เมื่อทำการศึกษาค่าคุณภาพของเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งสูตรควบคุมเปรียบเทียบกับสูตรที่เหมาะสม ที่มีการใช้บรรจุภัณฑ์ต่างกันในสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.18 และภาพที่ 4.9 พบว่า ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บน้ำแข็งสูตรควบคุมและสูตรที่เหมาะสมมีค่าใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วงร้อยละ 37.25-40.14 และมีค่าใกล้เคียงกันแม้จะมีอายุการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับค่าวอเตอร์แอคทิวิตีที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วง 0.99-1.00 แต่เมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งที่ทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของกวยจั๊บน้ำแข็งทั้งสองสูตรมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุการเก็บเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 6 วัน และเมื่อพิจารณาบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการเก็บรักษา พบว่าบรรจุภัณฑ์ประเภทถุงสุญญากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ให้ลดลงกว่าบรรจุภัณฑ์ประเภทถุงโพลีโพรพิลีน การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ลดลง เกิดจากการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่มแล็กติกแอซิดแบคทีเรีย (Lactic acid bacteria) ที่สามารถเจริญได้โดยไม่ต้องใช้อากาศ มักเป็นจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายองค์ประกอบที่เป็นคาร์โบไฮเดรตอย่างแป้งและน้ำตาล เกิดสารประกอบพวกกรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) เป็นต้น ทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความเป็นกรดต่างลดลง (บุญศรี จงเสรี จิตต์, 2552)

2) คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งที่อุณหภูมิห้อง

จากการศึกษาคูณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งสูตรควบคุมเปรียบเทียบกับสูตรที่เหมาะสม ที่มีการใช้บรรจุภัณฑ์ต่างกันในสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.19 และภาพที่ 4.10 จากการศึกษพบว่า เมื่อทำการเก็บที่ระยะเวลานานขึ้น จะไม่ส่งผลต่อค่าความเหนียวนุ่ม (Hardness) ของผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บน้ำแข็งที่ตัวอย่างเดียวกัน ($p \leq 0.05$) แต่จะส่งผลต่อค่าความยืดหยุ่น (Springiness) ลดลงแต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในทุกตัวอย่าง

ตารางที่ 4.18 ค่าคุณภาพของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส)

วัน	บรรจุภัณฑ์	ตัวอย่าง	ความชื้น (ร้อยละ)	Water activity	pH
0	-	ควบคุม	38.53 ± 0.48^a	0.99 ± 0.00^{de}	6.47 ± 0.03^b
		10% RJB+GG	37.58 ± 0.07^b	0.99 ± 0.00^f	6.63 ± 0.05^a
2	vacuum	ควบคุม	38.51 ± 0.05^a	1.00 ± 0.00^{ab}	5.51 ± 0.04^e
		10% RJB+GG	37.49 ± 0.10^b	1.00 ± 0.00^{bcde}	5.48 ± 0.02^e
	polypropylene	ควบคุม	37.25 ± 0.05^b	0.99 ± 0.00^{ef}	6.27 ± 0.13^c
		10% RJB+GG	37.27 ± 0.11^b	1.00 ± 0.00^{abcde}	6.17 ± 0.09^d
4	vacuum	ควบคุม	38.63 ± 0.60^a	1.00 ± 0.00^a	4.66 ± 0.01^f
		10% RJB+GG	40.14 ± 0.12^b	0.99 ± 0.00^{cde}	4.54 ± 0.02^g
6	vacuum	ควบคุม	38.26 ± 0.24^a	1.00 ± 0.00^{abcd}	4.31 ± 0.01^h
		10% RJB+GG	37.57 ± 0.16^b	1.00 ± 0.00^{abc}	4.12 ± 0.02^i

หมายเหตุ: ตัวอย่างที่เริ่มมีการเสื่อมเสียจะไม่ทำการวิเคราะห์, ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3), แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (RJB) และสารไฮโดรคอลลอยด์ (GG)

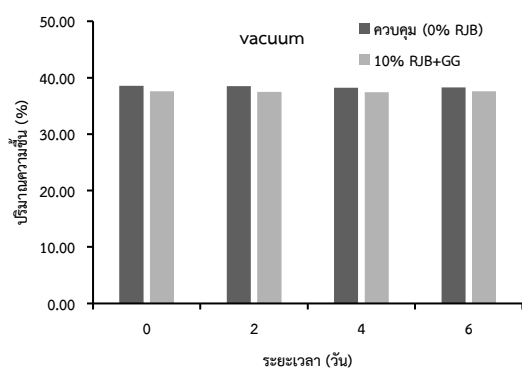
^{a-i} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\leq 0.05$)

ตารางที่ 4.19 คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส)

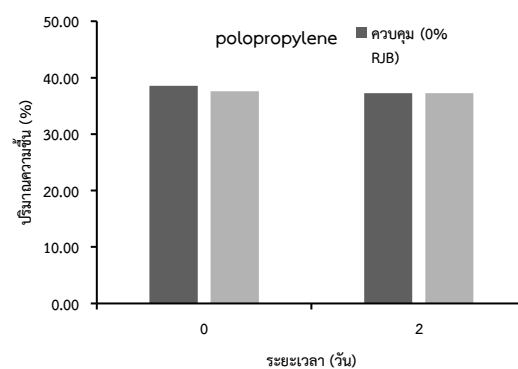
วัน	บรรจุภัณฑ์	ตัวอย่าง	Hardness (N)	Springiness (mm)
0	-	ควบคุม	0.111 ± 0.014^a	57.556 ± 8.517^a
		10% RJB+GG	0.081 ± 0.009^b	56.680 ± 9.891^a
2	vacuum	ควบคุม	0.113 ± 0.013^a	57.899 ± 8.149^a
		10% RJB+GG	0.080 ± 0.005^b	56.834 ± 7.915^a
	polypropylene	ควบคุม	0.113 ± 0.017^a	57.871 ± 4.061^a
		10% RJB+GG	0.084 ± 0.010^b	57.740 ± 5.212^a
4	vacuum	ควบคุม	0.104 ± 0.006^a	56.009 ± 6.273^a
		10% RJB+GG	0.086 ± 0.003^b	55.200 ± 8.961^a
6	vacuum	ควบคุม	0.107 ± 0.011^a	55.152 ± 7.963^a
		10% RJB+GG	0.082 ± 0.006^b	49.479 ± 7.963^a

หมายเหตุ: ตัวอย่างที่เริ่มมีการเสื่อมเสียจะไม่ทำการวิเคราะห์, ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=10), แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (RJB) และสารไฮโดรคอลลอยด์ (GG)

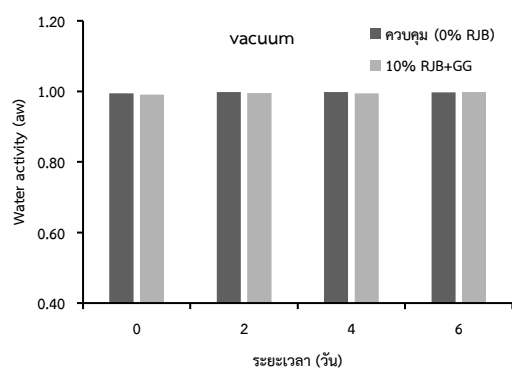
^{a, b} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\leq 0.05$)



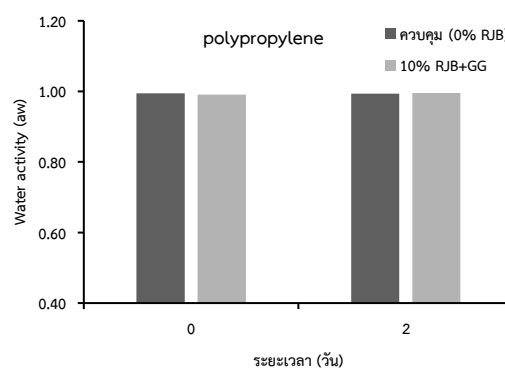
(ก1)



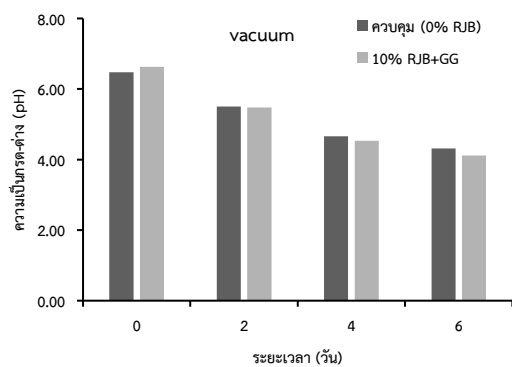
(ก2)



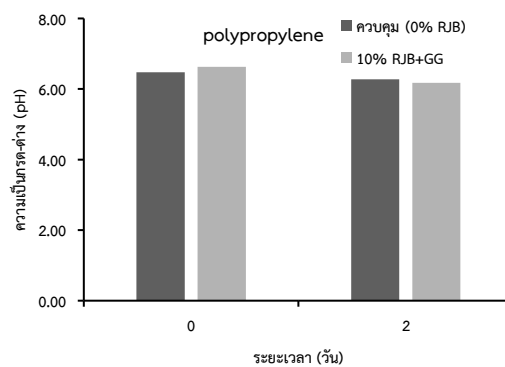
(ข1)



(ข2)

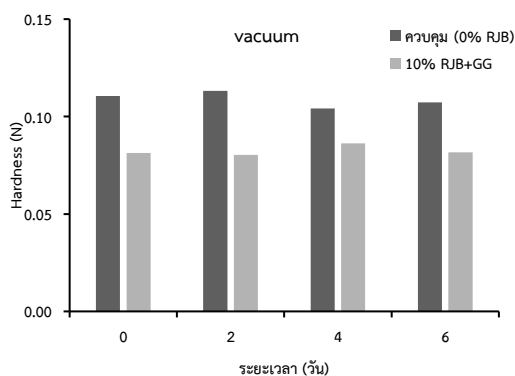


(ค1)

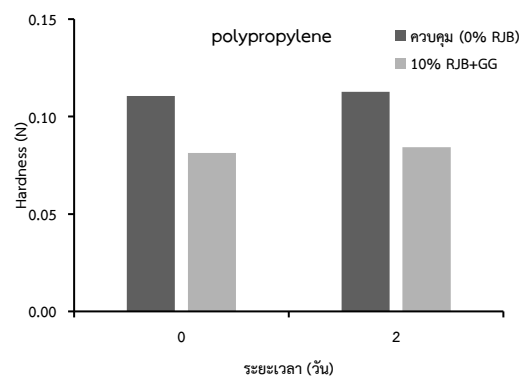


(ค2)

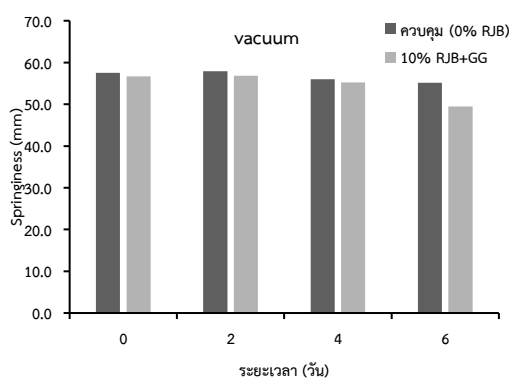
ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงค่าคุณภาพของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนหมัก โดย (ก) ปริมาณความชื้น (ข) water activity และ (ค) pH: หมายเลข (1) บรรจุภัณฑ์สุญญากาศ (Vacuum) และ (2) บรรจุภัณฑ์โพรพิลีน (Polypropylene)



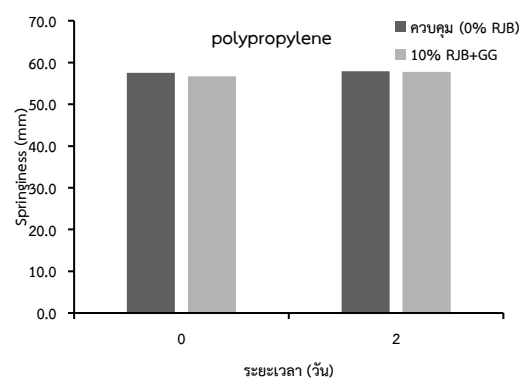
(ก1)



(ก2)



(ข1)



(ข2)

ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจี๊ที่อุณหภูมิห้อง โดย (ก) ความเหนียวนุ่ม (Hardness) และ (ข) ความยืดหยุ่น (Springiness): หมายเลข (1) บรรจุภัณฑ์สุญญากาศ (Vacuum) และ (2) บรรจุภัณฑ์โพรลีน (Polypropylene)

3) ค่าสีของเส้นกวยจั๊บสูตรที่เหมาะสมที่อุณหภูมิห้อง

จากการศึกษาค่าสีของเส้นกวยจั๊บสูตรควบคุมเปรียบเทียบกับสูตรที่เหมาะสม ที่มีการใช้บรรจุภัณฑ์ต่างกันในสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.20 และภาพที่ 4.11จากการศึกษาพบว่า เมื่อทำการเก็บที่ระยะเวลานานขึ้น เส้นกวยจั๊บสูตรควบคุมและสูตรที่เหมาะสมจะมีค่าความสว่าง (L^*) เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ส่วนค่าความเป็นสีแดงจะมีค่าลดลงในสูตรที่เหมาะสม ขณะที่ค่าความเป็นสีเหลืองจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในสูตรที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.20 ค่าสีของเส้นกวยจั๊บที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส)

วัน	บรรจุภัณฑ์	ตัวอย่าง	ค่าสี		
			L^*	a^*	b^*
0	-	ควบคุม	65.26 ± 0.35^{bc}	-1.83 ± 0.06^g	5.31 ± 0.22^e
		10% RJB	48.94 ± 0.12^g	7.08 ± 0.07^a	8.30 ± 0.23^d
2	vacuum	ควบคุม	65.13 ± 0.27^c	-1.84 ± 0.03^g	5.40 ± 0.05^e
		10% RJB	48.86 ± 0.10^g	6.56 ± 0.05^b	8.81 ± 0.10^c
	polypropylene	ควบคุม	64.33 ± 0.18^d	-1.61 ± 0.06^e	5.37 ± 0.07^e
		10% RJB	47.38 ± 0.13^h	7.06 ± 0.04^a	8.88 ± 0.10^c
4	vacuum	ควบคุม	65.58 ± 0.15^{ab}	-1.70 ± 0.05^f	4.55 ± 0.07^f
		10% RJB	50.96 ± 0.81^e	6.43 ± 0.06^c	10.51 ± 0.06^a
6	vacuum	ควบคุม	65.70 ± 0.10^a	-2.32 ± 0.06^h	4.66 ± 0.13^f
		10% RJB	49.80 ± 0.12^f	6.34 ± 0.06^d	10.24 ± 0.15^b

หมายเหตุ: ตัวอย่างที่เริ่มมีการเสื่อมเสียจะไม่ทำการวิเคราะห์

ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n=5$), แบ่งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (RJB) และสารไฮโดรคอลลอยด์ (GG)

^{a-h} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

4) จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราของเส้นกวยจั๊บสูตรที่อุณหภูมิห้อง

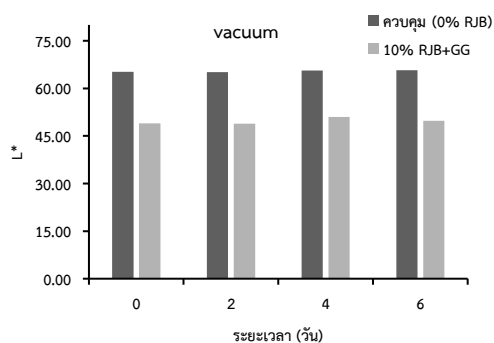
จากการศึกษาจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราของเส้นกวยจั๊บสูตรควบคุมเปรียบเทียบกับสูตรที่เหมาะสม ที่มีการใช้บรรจุภัณฑ์ต่างกันในสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง โดยยึดมาตรฐานอาหารประเภทเส้นสด จะมีค่าจำนวนจุลินทรีย์ น้อยกว่า 5×10^5 (CFU/กรัม) และจำนวนยีสต์และรา น้อยกว่า 500 (CFU/กรัม) (กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 2560) ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.21 และภาพที่ 4.12-4.13 พบว่า จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดที่พบในช่วงวันที่ 0 ถึง 6 มีค่าไม่เกินตามที่มาตรฐานกำหนด แต่ยีสต์และราพบในวันที่สองของการเก็บรักษาในตัวอย่างสูตรที่เหมาะสม ส่วนสูตรควบคุมจะพบเกินมาตรฐานในวันที่สาม ดังนั้น ที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องตัวอย่างเส้นกวยจั๊บเส้นสดสามารถเก็บรักษาได้ไม่เกิน 3 วัน เพื่อที่จะไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดและเพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค

ตารางที่ 4.21 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราของเส้นกวยจั๊บที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส)

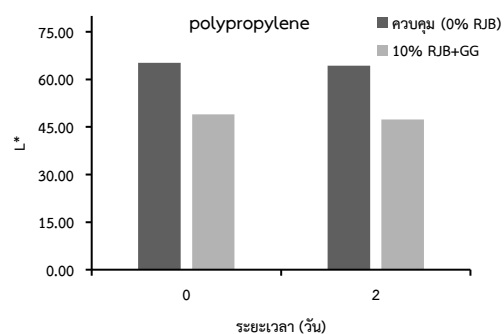
วัน	บรรจุภัณฑ์	ตัวอย่าง	Total plate count (CFU/g)	Yeast and mold (CFU/g)
0	-	ควบคุม	2.37×10^3	ไม่พบ
		10% RJB+GG	2.10×10^3	ไม่พบ
2	vacuum	ควบคุม	1.03×10^5	ไม่พบ
		10% RJB+GG	1.53×10^5	ไม่พบ
	polypropylene	ควบคุม	2.43×10^5	3.63×10^3
		10% RJB+GG	3.10×10^5	3.97×10^3
4	vacuum	ควบคุม	1.07×10^5	4.00×10^3
		10% RJB+GG	1.60×10^5	2.07×10^4
	polypropylene	ควบคุม	7.6×10^5	4.00×10^5
		10% RJB+GG	9.33×10^5	1.27×10^6
6	vacuum	ควบคุม	1.03×10^5	1.33×10^4
		10% RJB+GG	1.67×10^5	2.93×10^4

หมายเหตุ: ตัวอย่างที่เริ่มมีการเสื่อมเสียจะไม่ทำการวิเคราะห์

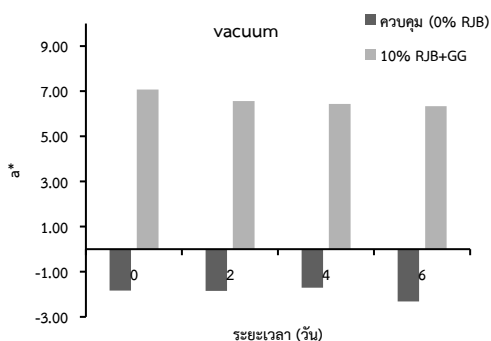
แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (RJB) และสารไฮโดรคอลลอยด์ (GG)



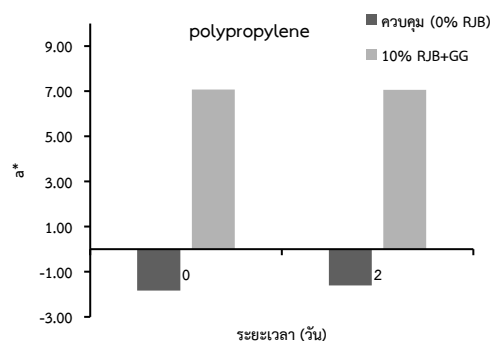
(ก1)



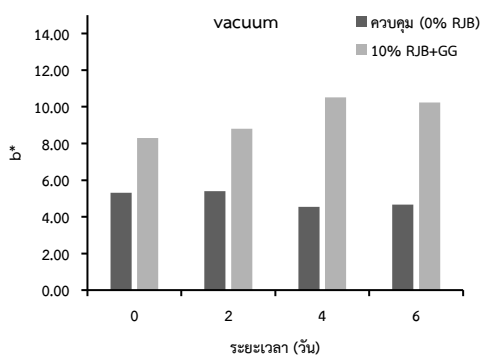
(ก2)



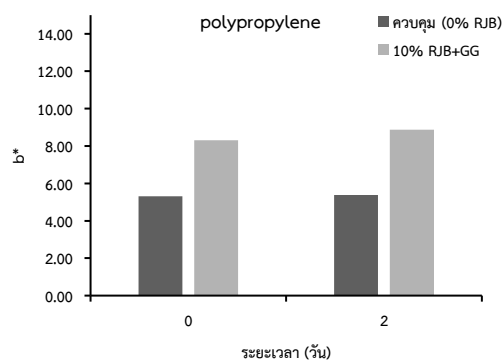
(ข1)



(ข2)

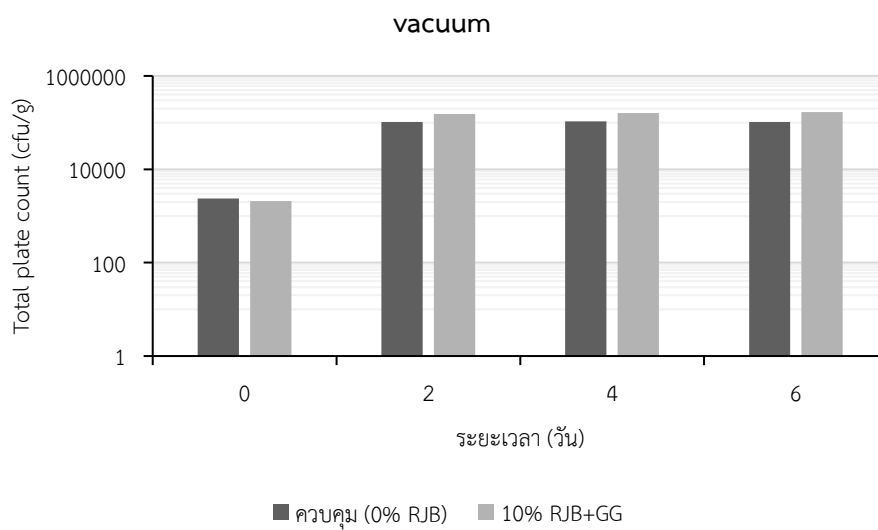


(ค1)

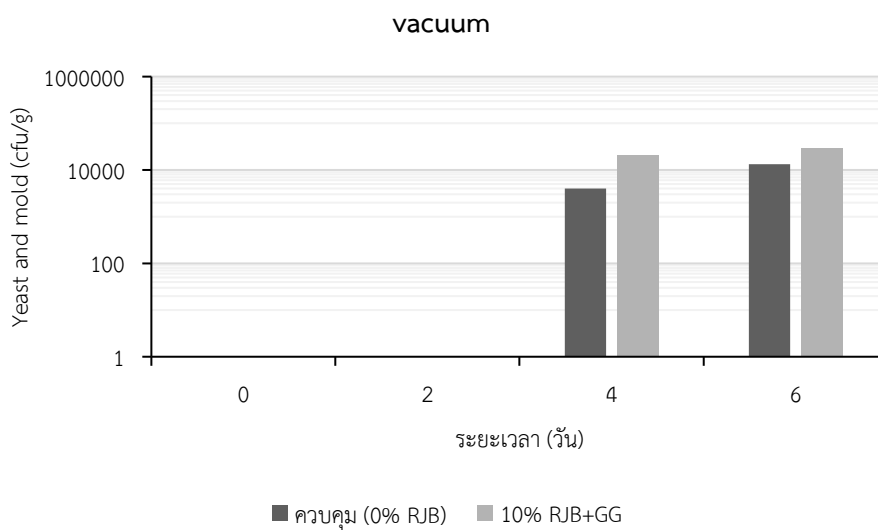


(ค2)

ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงค่าสีของเส้นกล้วยดิบที่อุณหภูมิห้อง โดย (ก) L* (ข) a* และ (ค) b*
 หมายเลข (1) บรรจุภัณฑ์สุญญากาศ (Vacuum) และ (2) บรรจุภัณฑ์โพรลีนโพรพิลีน
 (Polypropylene)

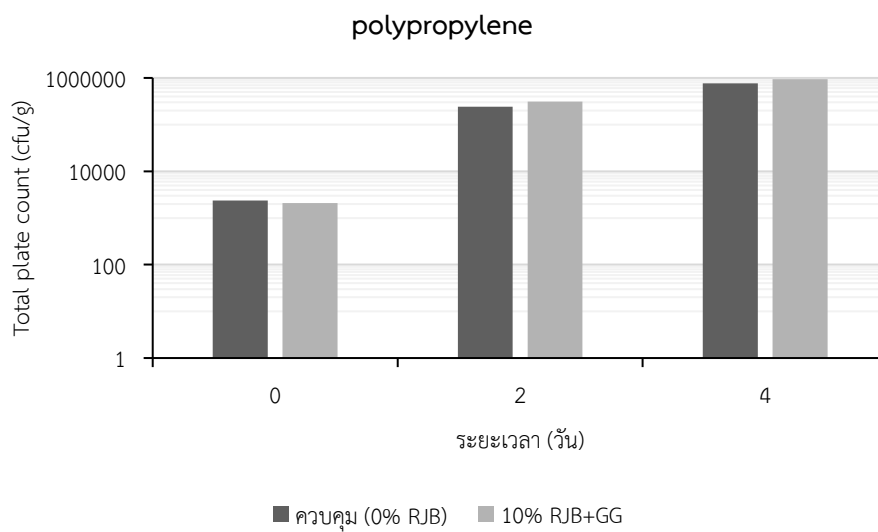


(ก)

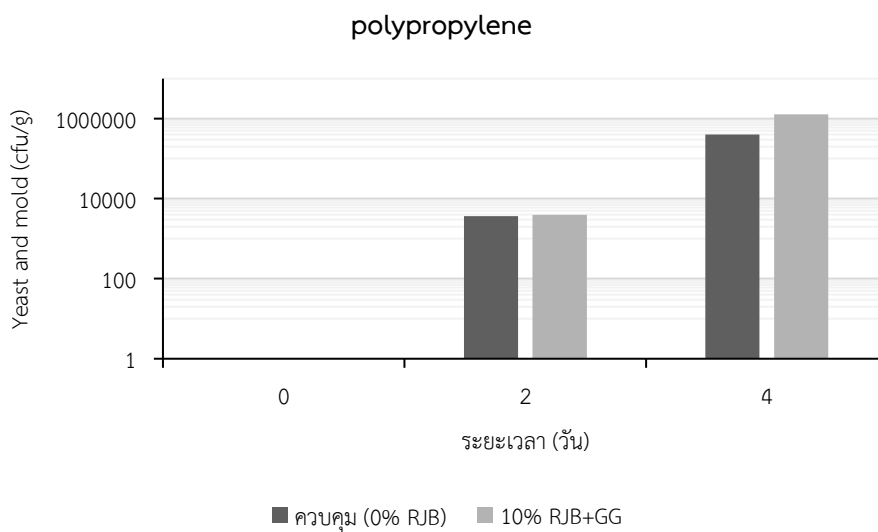


(ข)

ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อน โดย (ก) บรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศ (Vacuum) และ (ข) บรรจุภัณฑ์แบบโพลีโพรพิลีน (Polypropylene)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงจำนวนยีสต์และราของเส้นกาวจับที่อุณหภูมิห้อง โดย (ก) บรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศ (Vacuum) และ (ข) บรรจุภัณฑ์แบบโพลีโพรพิลีน (Polypropylene)

4.2.2.2 อายุการเก็บรักษาของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนที่อุณหภูมิตู้เย็น (4-10 องศาเซลเซียส)

1) ค่าคุณภาพของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนที่อุณหภูมิตู้เย็น

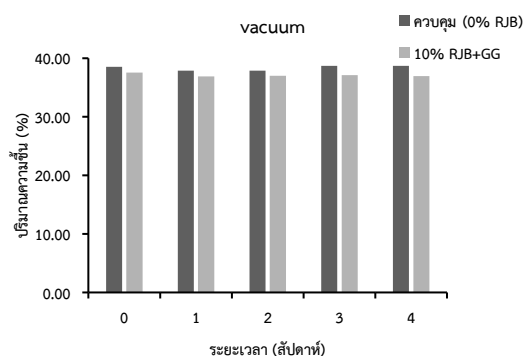
เมื่อทำการศึกษาค่าคุณภาพของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนสูตรควบคุมเปรียบเทียบกับสูตรที่เหมาะสม ที่มีการใช้บรรจุภัณฑ์ต่างกันในสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิตู้เย็น ผลแสดงดังตารางที่ 4.22 และภาพที่ 4.14 พบว่า ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บน้ำร้อนสูตรควบคุมและสูตรที่เหมาะสมมีค่าใกล้เคียงกันตลอดช่วงของระยะเวลาการเก็บรักษา คืออยู่ในช่วงร้อยละ 36.49-38.72 เช่นเดียวกับค่าวอเตอร์แอคทิวิตีที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วง 0.99-1.00 ส่วนค่ากรด-ด่าง ของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนที่ทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิตู้เย็นพบว่า ค่าความเป็นกรดต่างของกวยจั๊บน้ำร้อนทั้งสองสูตรมีค่าใกล้เคียงกันและมีการเปลี่ยนแปลงของค่ากรดต่างเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากจุลินทรีย์ในกลุ่มแลคติกแบคทีเรียจะเจริญได้ดีที่อุณหภูมิสูง (20-45 องศาเซลเซียส) แตกต่างกันตามสกุล (ดวงรัตน์ สาริภาวษ์ และนันทพล สุทธิพันธ์, 2539) อุณหภูมิมีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ อุณหภูมิที่ต่ำจะส่งผลทำให้จุลินทรีย์มีการเจริญช้าลง ส่งผลให้ค่าความเป็นกรดต่างไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงช้ากว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.22 ค่าคุณภาพของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนที่อุณหภูมิตู้เย็น (4-10 องศาเซลเซียส)

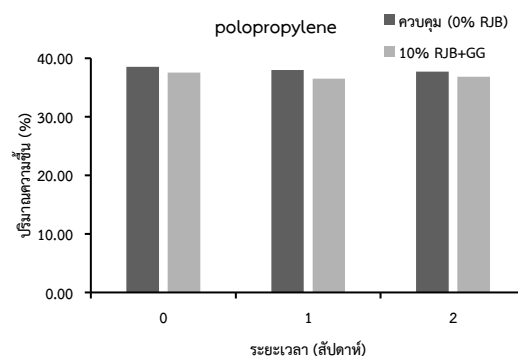
ลำดับ	บรรจุภัณฑ์	ตัวอย่าง	ความชื้น (ร้อยละ)	Water activity	pH
0	-	ควบคุม	38.53±0.48 ^{ab}	0.99±0.00 ^{de}	6.47±0.03 ^f
		10% RJB+GG	37.58±0.07 ^{cd}	0.99±0.00 ^f	6.63±0.05 ^{cd}
1	vacuum	ควบคุม	37.86±0.09 ^c	1.00±0.00 ^{abc}	6.50±0.11 ^{ef}
		10% RJB+GG	36.91±0.28 ^{ef}	1.00±0.00 ^{cde}	6.69±0.03 ^{ab}
	polypropylene	ควบคุม	37.99±0.23 ^{bc}	1.00±0.00 ^{bcd}	6.49±0.02 ^{ef}
		10% RJB+GG	36.49±0.27 ^f	0.99±0.00 ^e	6.70±0.01 ^{ab}
2	vacuum	ควบคุม	37.87±0.24 ^c	1.00±0.00 ^{cde}	6.57±0.06 ^{de}
		10% RJB+GG	36.99±0.08 ^{ef}	1.00±0.00 ^{cde}	6.74±0.03 ^{ab}
	polypropylene	ควบคุม	37.74±0.31 ^c	1.00±0.00 ^{bcd}	6.63±0.07 ^{cd}
		10% RJB+GG	36.84±0.01 ^{ef}	1.00±0.00 ^{cde}	6.76±0.03 ^a
3	vacuum	ควบคุม	38.71±0.87 ^a	1.00±0.00 ^a	6.37±0.07 ^g
		10% RJB+GG	37.13±0.09 ^{de}	1.00±0.00 ^{ab}	6.61±0.04 ^{cd}
4	vacuum	ควบคุม	38.72±0.04 ^a	0.99±0.00 ^{de}	6.27±0.09 ^h
		10% RJB+GG	36.96±0.07 ^{ef}	1.00±0.00 ^{cde}	6.65±0.05 ^{bcd}

หมายเหตุ: ตัวอย่างที่เริ่มมีการเสื่อมเสียจะไม่ทำการวิเคราะห์, ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3), แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (RJB) และสารไฮโดรคอลลอยด์ (GG)

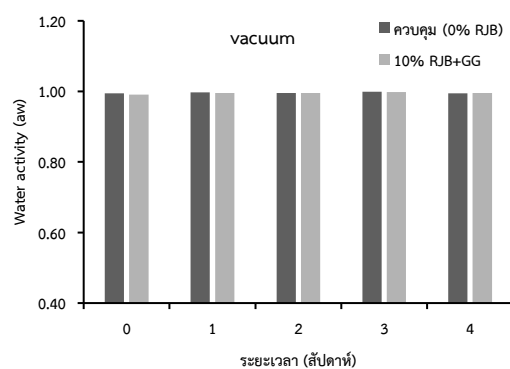
^{a-h} ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)



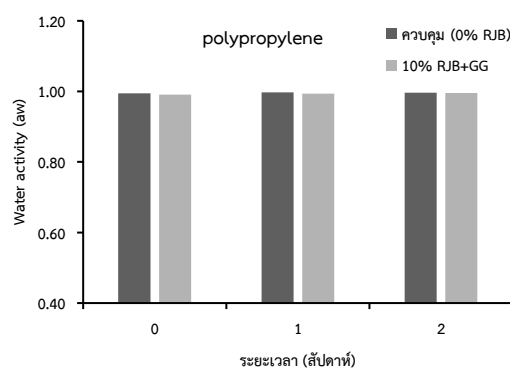
(ก1)



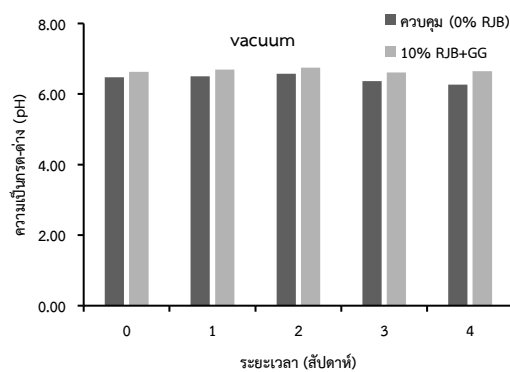
(ก2)



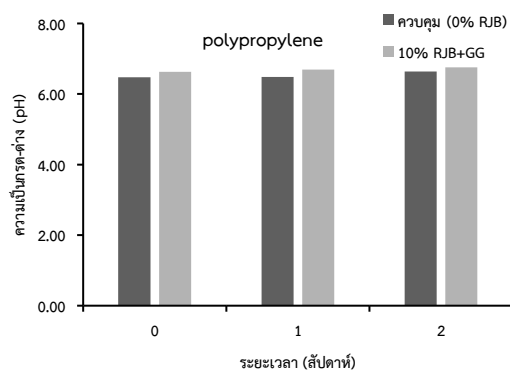
(ข1)



(ข2)



(ค1)



(ค2)

ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงค่าคุณภาพของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนหมักด้วย (ก) ปริมาณความชื้น (ข) water activity และ (ค) pH: หมายเลข (1) บรรจุภัณฑ์สุญญากาศ (Vacuum) และ (2) บรรจุภัณฑ์โพรลีน (Polypropylene)

2) คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนที่อุณหภูมิห้อง

จากการศึกษาคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนที่อุณหภูมิห้องเปรียบเทียบกับสูตรที่เหมาะสม ที่มีการใช้บรรจุภัณฑ์ต่างกันในสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.23 และภาพที่ 4.15 จากการศึกษาพบว่า เมื่อทำการเก็บรักษาที่ระยะเวลาขึ้นจนถึง 4 สัปดาห์ จะไม่ส่งผลต่อค่าความเหนียวนุ่ม (Hardness) และค่าความยืดหยุ่น (Springiness) ($p>0.05$) ของผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บน้ำร้อนที่ตัวอย่างเดียวกัน ดังนั้นในการแช่เย็นหรือการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องในช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา (4-10 องศาเซลเซียส) จะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและไม่ส่งผลต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

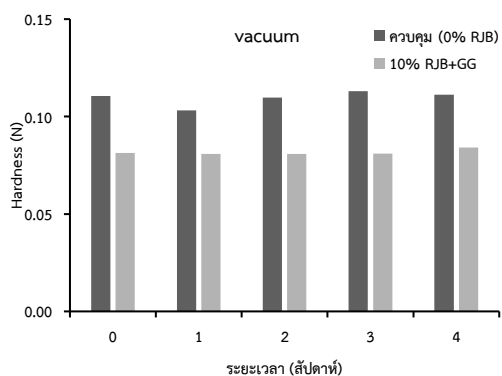
ตารางที่ 4.23 คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนที่อุณหภูมิห้อง (4-10 องศาเซลเซียส)

สัปดาห์	บรรจุภัณฑ์	ตัวอย่าง	Hardness (N)	Springiness (mm)
0	-	ควบคุม	0.111±0.014 ^a	57.556±8.517 ^a
		10% RJB+GG	0.081±0.009 ^b	56.680±9.891 ^a
1	vacuum	ควบคุม	0.103±0.012 ^a	57.666±5.794 ^a
		10% RJB+GG	0.081±0.006 ^b	56.120±2.826 ^a
	polypropylene	ควบคุม	0.102±0.010 ^a	57.486±5.274 ^a
		10% RJB+GG	0.082±0.008 ^b	56.388±5.861 ^a
2	vacuum	ควบคุม	0.110±0.016 ^a	57.475±7.768 ^a
		10% RJB+GG	0.081±0.004 ^b	55.811±7.411 ^a
	polypropylene	ควบคุม	0.105±0.010 ^a	56.951±10.000 ^a
		10% RJB+GG	0.88±0.002 ^b	57.099±8.227 ^a
3	vacuum	ควบคุม	0.113±0.014 ^a	57.021±7.856 ^a
		10% RJB+GG	0.081±0.006 ^b	54.614±4.966 ^a
4	vacuum	ควบคุม	0.111±0.018 ^a	58.704±8.137 ^a
		10% RJB+GG	0.084±0.009 ^b	56.756±5.292 ^a

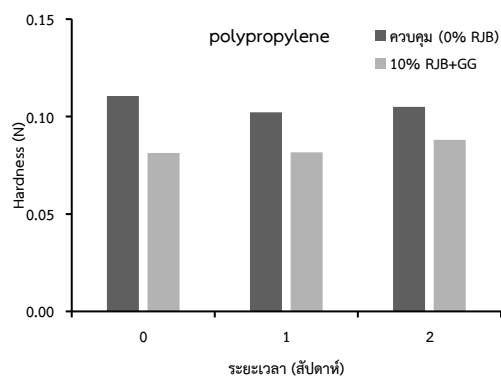
หมายเหตุ: ตัวอย่างที่เริ่มมีการเสื่อมเสียจะไม่ทำการวิเคราะห์

ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=10), แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (RJB) และสารไฮโดรคอลลอยด์ (GG)

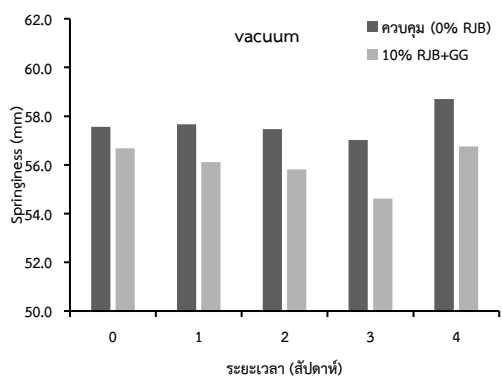
^{a, b} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\leq 0.05$)



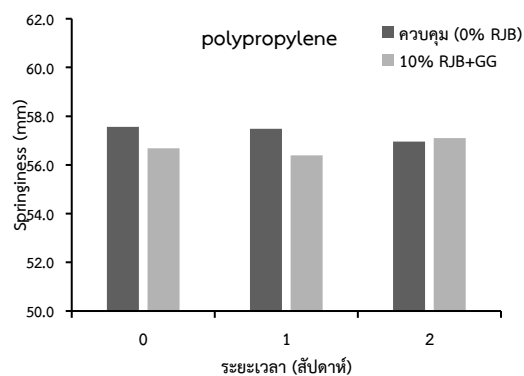
(ก1)



(ก2)



(ข1)



(ข2)

ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจี๊ที่อุณหภูมิตู้เย็น โดย (ก) ความเหนียวนุ่ม (Hardness) และ (ข) ความยืดหยุ่น (Springiness): หมายเลข (1) บรรจุภัณฑ์สุญญากาศ (Vacuum) และ (2) บรรจุภัณฑ์โพรลีโอพิลีน (Polypropylene)

3) ค่าสีของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูง

จากการศึกษาค่าสีของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูงเปรียบเทียบกับสูตรที่เหมาะสม ที่มีการใช้บรรจุภัณฑ์ต่างกันในสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.24 และภาพที่ 4.16 จากการศึกษาพบว่า เมื่อทำการเก็บที่ระยะเวลานานขึ้น เส้นกวยจั๊บน้ำร้อนควบคุมและสูตรที่เหมาะสมจะมีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

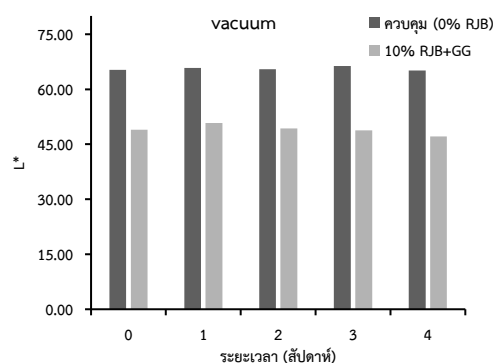
ตารางที่ 4.24 ค่าสีของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูง (4-10 องศาเซลเซียส)

สัปดาห์	บรรจุภัณฑ์	ตัวอย่าง	ค่าสี		
			L^*	a^*	b^*
0	-	ควบคุม	65.26 ± 0.35^c	-1.83 ± 0.06^e	5.31 ± 0.22^d
		10% RJB+GG	48.94 ± 0.12^{ef}	7.08 ± 0.07^{bc}	8.30 ± 0.23^b
1	vacuum	ควบคุม	65.80 ± 0.11^b	-1.74 ± 0.07^e	5.35 ± 0.06^d
		10% RJB+GG	50.77 ± 0.48^d	7.11 ± 0.08^b	8.61 ± 0.12^a
	polypropylene	ควบคุม	65.40 ± 0.14^c	-1.91 ± 0.05^e	5.00 ± 0.06^e
		10% RJB+GG	48.26 ± 0.28^g	7.07 ± 0.08^{bc}	7.93 ± 0.16^c
2	vacuum	ควบคุม	65.43 ± 0.15^c	-1.83 ± 0.26^e	4.75 ± 0.20^f
		10% RJB+GG	49.27 ± 0.11^e	6.89 ± 0.15^{cd}	8.20 ± 0.15^b
	polypropylene	ควบคุม	65.34 ± 0.19^c	-1.77 ± 0.21^e	4.68 ± 0.24^f
		10% RJB+GG	49.04 ± 0.09^{ef}	6.75 ± 0.06^d	8.14 ± 0.20^{bc}
3	vacuum	ควบคุม	66.35 ± 0.39^a	-1.74 ± 0.08^e	5.12 ± 0.09^{de}
		10% RJB+GG	48.81 ± 0.14^f	8.47 ± 0.06^a	8.39 ± 0.15^{ab}
4	vacuum	ควบคุม	65.15 ± 0.18^c	-1.75 ± 0.28^e	5.04 ± 0.31^e
		10% RJB+GG	47.13 ± 0.43^h	6.76 ± 0.22^d	8.15 ± 0.24^{bc}

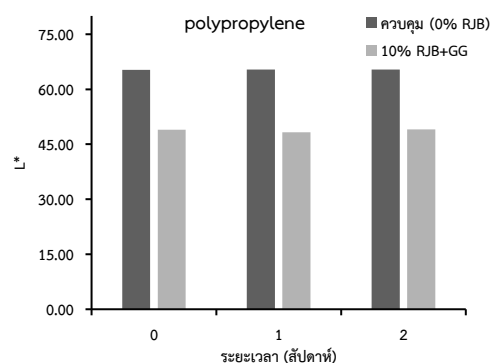
หมายเหตุ: ตัวอย่างที่เริ่มมีการเสื่อมเสียจะไม่ทำการวิเคราะห์

ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n=5$) , แบ่งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (RJB) และสารไฮโดรคอลลอยด์ (GG)

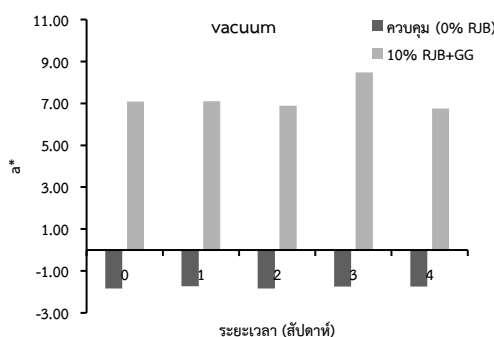
^{a-h} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)



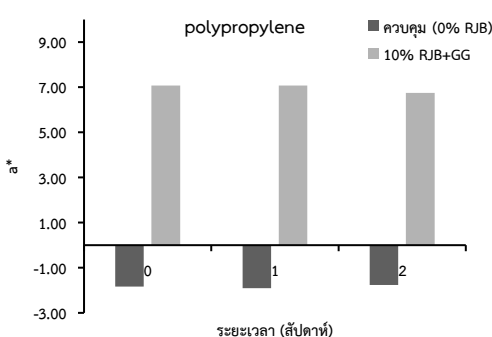
(ก1)



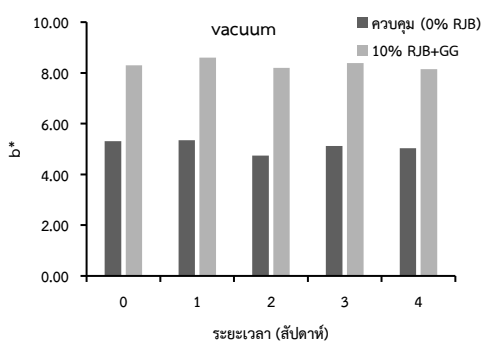
(ก2)



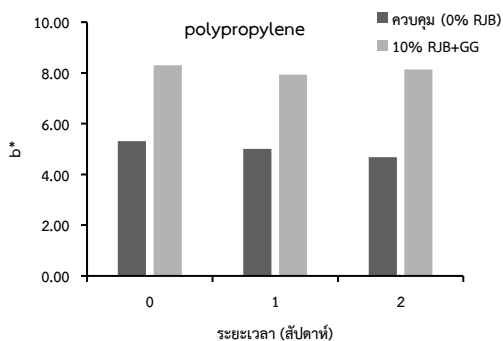
(ข1)



(ข2)



(ค1)



(ค2)

ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงค่าสีของเส้นกวยจั๊บสุตรที่อุณหภูมิตู้เย็น โดย (ก) L^* (ข) a^* และ (ค) b^* หมายเลข (1) บรรจุภัณฑ์สุญญากาศ (Vacuum) และ (2) บรรจุภัณฑ์โพรลีน (Polypropylene)

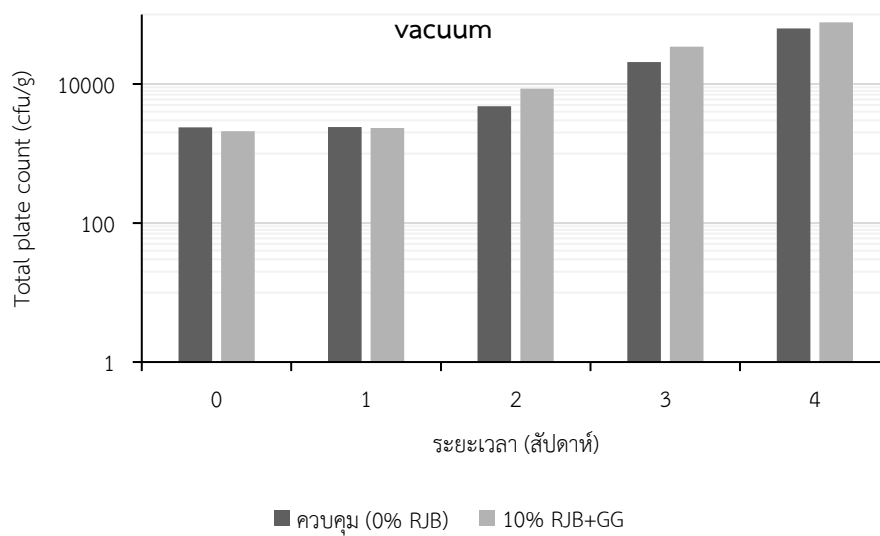
4) จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์ และราของเส้นกวยจั๊บที่อุณหภูมิตู้เย็น
จากการศึกษาจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราของเส้นกวยจั๊บสุตร
ควบคุมเปรียบเทียบกับสุตรที่เหมาะสม ที่มีการใช้บรรจุภัณฑ์ต่างกันในสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ

ตู้เย็น โดยยึดมาตรฐานอาหารประเภทเส้นสด จะมีค่าจำนวนจุลินทรีย์ น้อยกว่า 5×10^5 (CFU/กรัม) และจำนวนยีสต์และรา น้อยกว่า 500 (CFU/กรัม) (กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 2560) ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.25 และภาพที่ 4.17-4.18 พบว่า ที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิตู้เย็น 0 ถึง 4 สัปดาห์ พบจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกินตามที่มาตรฐานกำหนด ในทุกตัวอย่าง แต่เมื่อพิจารณาบรรจุภัณฑ์ที่ใช้พบว่าบรรจุภัณฑ์ประเภท polypropylene จะมีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดสูงกว่าการใช้บรรจุภัณฑ์ประเภท vacuum สำหรับยีสต์และราไม่พบจนกระทั่งเข้าสู่การเก็บรักษาที่ระยะเวลาสัปดาห์ที่ 2 แต่เมื่อเข้าสู่สัปดาห์ที่ 3 พบว่าเกินมาตรฐานที่ตัวอย่างสูตรควบคุมและสูตรที่เหมาะสมเมื่อมีการใช้บรรจุภัณฑ์ประเภท polypropylene ดังนั้น เส้นกวยจั๊บเส้นสดที่ทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิตู้เย็นสามารถเก็บรักษาหรือมีอายุการเก็บรักษาไม่เกิน 3 สัปดาห์ เพื่อให้ปลอดภัยต่อการบริโภค ประเภทของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้มีผลต่อการเกิดจุลินทรีย์และการเสื่อมเสีย โดยบรรจุภัณฑ์ชนิด vacuum จะมีอากาศในบรรจุภัณฑ์น้อยกว่า ซึ่งต่างจากบรรจุภัณฑ์ประเภท polypropylene ที่ยังคงหลงเหลืออากาศภายในถุง โดยอากาศภายในบรรจุภัณฑ์จะมีปริมาณออกซิเจนอยู่ ซึ่งมีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์

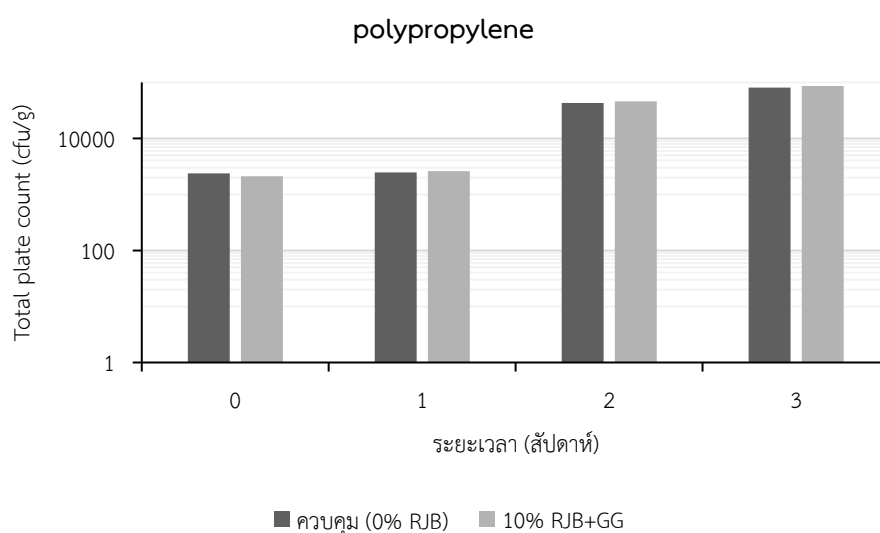
ตารางที่ 4.25 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราของเส้นกวยจั๊บที่อุณหภูมิตู้เย็น (4-10 องศาเซลเซียส)

สัปดาห์	บรรจุภัณฑ์	ตัวอย่าง	Total plate count (CFU/g)	Yeast and mold (CFU/g)
0	-	ควบคุม	2.37×10^3	ไม่พบ
		10% RJB+GG	2.10×10^3	ไม่พบ
1	vacuum	ควบคุม	2.40×10^3	ไม่พบ
		10% RJB+GG	2.33×10^3	ไม่พบ
	polypropylene	ควบคุม	2.47×10^3	ไม่พบ
		10% RJB+GG	2.60×10^3	ไม่พบ
2	vacuum	ควบคุม	4.80×10^3	ไม่พบ
		10% RJB+GG	8.57×10^3	ไม่พบ
	polypropylene	ควบคุม	4.30×10^4	ไม่พบ
		10% RJB+GG	4.57×10^4	ไม่พบ
3	vacuum	ควบคุม	2.07×10^4	3.50×10^2
		10% RJB+GG	3.43×10^4	5.00×10^2
	polypropylene	ควบคุม	8.10×10^4	8.00×10^3
		10% RJB+GG	8.57×10^4	7.50×10^3
4	vacuum	ควบคุม	6.30×10^4	2.67×10^4
		10% RJB+GG	7.70×10^4	3.00×10^4

หมายเหตุ: ตัวอย่างที่เริ่มมีการเสื่อมเสียจะไม่ทำการวิเคราะห์, แบ่งข้าวกล้องหอมมะลิแดง (RJB) และสารไฮโดรคอลลอยด์ (GG)

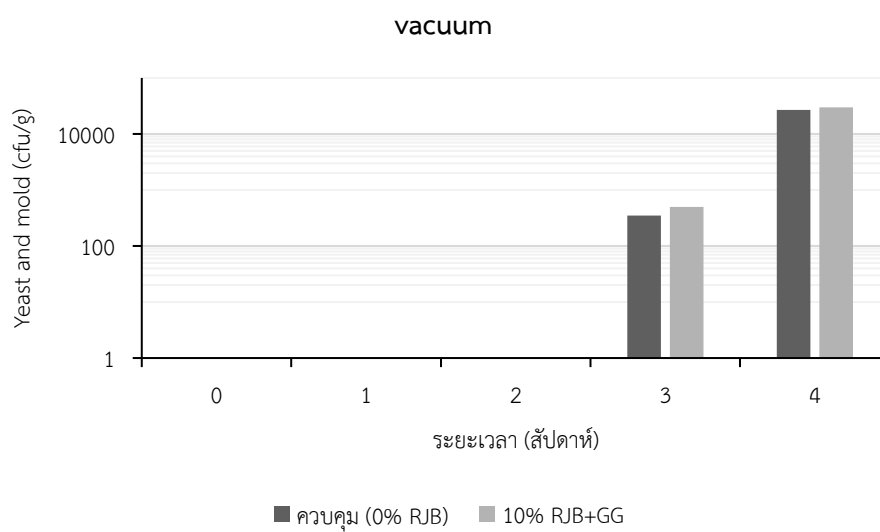


(ก)

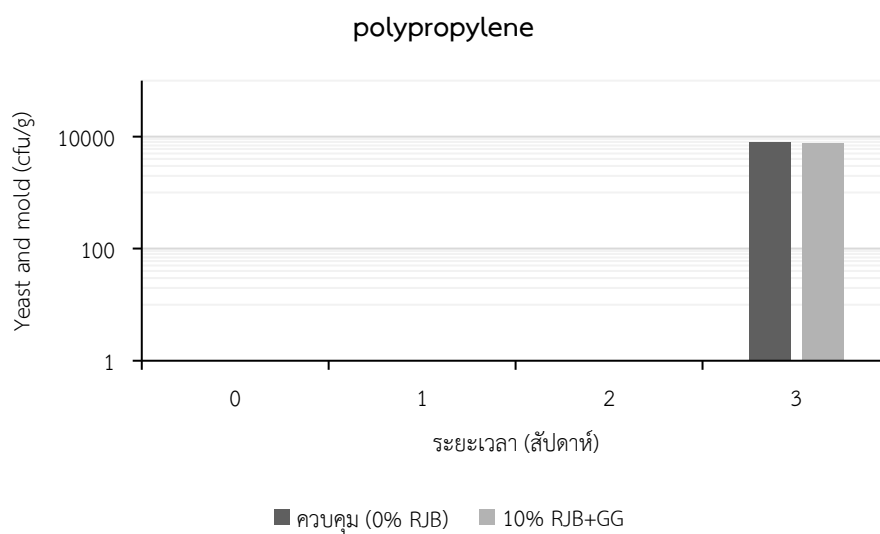


(ข)

ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนที่อุณหภูมิตู้เย็น โดย (ก) บรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศ (Vacuum) และ (ข) บรรจุภัณฑ์แบบโพลีโพรพิลีน (Polypropylene)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงจำนวนยีสต์และราของเส้นกวยจั๊บน้ำร้อนที่อุณหภูมิตู้เย็น โดย (ก) บรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศ (Vacuum) และ (ข) บรรจุภัณฑ์แบบโพลีโพรพิลีน (Polypropylene)

4.2.3 กระบวนการผลิตเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูป

จากการศึกษาสูตรการผลิตเส้นกวยจั๊บบลเสริมข้าวกล้อง ทำให้ทราบถึงสูตรการทำเส้นกวยจั๊บบลเสริมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่เหมาะสม โดยเส้นกวยจั๊บลสูตรที่เหมาะสมคือ การใช้แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงร้อยละ 10 ทดแทนแป้งข้าวเจ้าที่มีการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์ ส่งผลให้คุณภาพการต้มสุก คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส และคะแนนการยอมรับของผู้บริโภคมีค่าใกล้เคียงกับสูตรควบคุมมากที่สุด จากนั้นจะนำเส้นกวยจั๊บลที่ได้มาทำให้สุก นำเส้นไปแช่แข็ง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3, 2.5, 2 และ 1.5 ชั่วโมงตามลำดับ เพื่อให้มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง อาหารกึ่งสำเร็จรูป (ฉบับที่ 210) พ.ศ. 2543 (กระทรวงสาธารณสุข, 2543) และทำการวิเคราะห์คุณภาพ ได้แก่ ปริมาณความชื้น ค่าสี คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส (ความนุ่มและความยืดหยุ่น) คุณภาพการต้มสุก และคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส ผลที่ได้เป็นดังนี้

4.2.3.1 ปริมาณความชื้นของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากการศึกษาปริมาณความชื้นของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่ทำการอบโดยใช้ อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณความชื้นหลังจากการอบมีค่าอยู่ในช่วง 9.441-9.681 ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) และมีค่าไม่เกินตามมาตรฐานอาหารกึ่งสำเร็จรูป (ประกาศกระทรวงสาธารณสุข, 2543)

ตารางที่ 4.26 ปริมาณความชื้นของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณความชื้นของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูป ^{ns}
50	9.68±0.09
60	9.69±0.22
70	9.44±0.12
80	9.61±0.13

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

^{ns} แสดงถึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p>0.05$)

4.2.3.2 คุณภาพการต้มสุกของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากการศึกษาคุณภาพการต้มสุกของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่ทำการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษาระยะเวลาในการต้มสุก (cooking time) ร้อยละผลผลิตการต้มสุก (%Cooking yield) ร้อยละการดูดซับน้ำ (%Water absorption) และร้อยละการสูญเสียระหว่างการหุงต้ม (%Cooking loss) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.27 พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิการอบที่เพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ระยะเวลาในการต้มสุกใช้ระยะเวลาไม่แตกต่างกัน ส่วนผลผลิตการต้มสุกและการดูดซับน้ำ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) สอดคล้องกับการศึกษาของ Cheevitsopon and Noomhorm (2011) ที่ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการ

อบแห้งข้าวกล้องงอกที่ผ่านกระบวนการนึ่งแล้วนำไปทำแห้ง พบว่า เมื่อนำมาทำให้สุกข้าวกล้องงอกที่ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงจะมีค่าการดูดซับน้ำ เพิ่มขึ้น ขณะที่การสูญเสียระหว่างการหุงต้มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้อุณหภูมิการอบที่เพิ่มขึ้นแต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) การใช้อุณหภูมิในการอบที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้โครงสร้างของเส้นกวยจั๊บมีความเป็นรูพรุนที่สูงและมีขนาดใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างของเส้นกวยจั๊บอบที่ทำการอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ภาพที่ 4.21) ซึ่งโครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จะสามารถดูดซึมน้ำได้ง่ายและเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.27 คุณภาพการต้มสุกของเส้นกวยจั๊บสำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	Cooking time (min)	Cooking yield (%)	Water absorption (%)	Cooking loss (%)
50	4	252.900±3.102 ^c	154.669±1.699 ^c	0.155±0.051 ^a
60	4	284.479±3.676 ^b	184.479±3.676 ^b	0.189±0.036 ^a
70	4	286.659±13.434 ^b	186.659±13.434 ^b	0.245±0.055 ^a
80	4	333.878±4.618 ^a	233.878±4.618 ^a	0.248±0.063 ^a

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

^{a-c} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\leq 0.05$)

4.2.3.3 คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บสำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากการศึกษาคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บสำเร็จรูปที่ทำการโดยใช้อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส โดยการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ด้วยเครื่อง Texture analyzer ซึ่งทำการวิเคราะห์ค่าความเหนียวนุ่ม (Hardness) และความยืดหยุ่น (Springiness) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.28 พบว่า เมื่อมีการใช้อุณหภูมิในการอบที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเหนียวนุ่มลดน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) แต่ที่อุณหภูมิการอบแห้งที่ 60-80 องศาเซลเซียส จะมีค่าความเหนียวนุ่มไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ขณะที่ค่าความยืดหยุ่นของอุณหภูมิการอบที่ 50-70 องศาเซลเซียสไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่เพิ่มสูงขึ้น ค่าความเหนียวนุ่มและความยืดหยุ่นของเส้นมีความสัมพันธ์กับค่าคุณภาพการต้มสุก โดยการเพิ่มขึ้นของผลผลิตการต้มสุกและการดูดซับน้ำ เมื่อมีการใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้น จะส่งผลให้คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บสำเร็จรูปมีความเหนียวและความยืดหยุ่นลดลงเนื่องจากมีการดูดน้ำเข้าไปในระหว่างการทำสุกมาก ทำให้เส้นที่ได้มีความเปราะและขาดง่ายขึ้นเมื่อทดสอบ

ตารางที่ 4.28 คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	Hardness (N)	Springiness (mm)
50	0.139±0.014 ^a	51.765±7.397 ^a
60	0.114±0.009 ^{ab}	52.002±9.587 ^a
70	0.100±0.026 ^b	49.325±7.524 ^a
80	0.096±0.026 ^b	36.528±5.789 ^b

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=10)

^{a-b} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

4.2.3.4 ค่าสีของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากการศึกษาค่าสีของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่ทำการอบโดยใช้อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส โดยนำไปต้มให้สุกตามระยะเวลาการต้มสุกจากนั้นนำมาวิเคราะห์ค่าสีโดยประกอบไปด้วยค่า L* โดยแสดงถึงค่าความขาวหรือความสว่าง (+) และสีดำหรือความมืด (-) ของผลิตภัณฑ์ ค่า a* แสดงถึงค่าสีแดง (+) และสีเขียว (-) และค่า b* แสดงถึงค่าสีเหลือง (+) และสีน้ำเงิน (-) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.29 และภาพที่ 4.19 จากการศึกษพบว่า ค่าความขาวหรือความสว่างมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงในการทำแห้งส่งผลให้มีค่าการดูดซับน้ำที่สูง ค่าความสว่างจึงเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ขณะที่ค่าสีแดงและสีเหลืองมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยการใช้อุณหภูมิที่สูงจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่าง สารสีหรือรงควัตถุที่อยู่ในแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงคือโปรแอนโทไซยานิน จัดเป็นแอนโทไซยานินชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่มสารฟลาโวนอยด์ ซึ่งจะไม่เสถียรต่อความร้อนที่สูง ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความเสถียรของแอนโทไซยานินและรงควัตถุต่าง ๆ ในอาหารจะลดลง (สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2553)

4.2.3.5 คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากการศึกษาคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่ทำการอบโดยใช้อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษาคูณภาพด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ความเหนียวนุ่ม และความชอบโดยรวม จากการศึกษพบว่า เส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่มีการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ผู้ทดสอบจะให้คะแนนความชอบในด้านสีและกลิ่นของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปมากที่สุด ขณะที่ความชอบในด้านลักษณะปรากฏ รสชาติ ความเหนียวนุ่ม และความชอบโดยรวมของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่มีการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสมากที่สุด ทั้งนี้แม้ว่าความชอบในด้านรสชาติและความเหนียวนุ่มของเส้นในทุกอุณหภูมิจะมีคะแนนการยอมรับไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) แต่ปัจจัยในด้านของเวลาการทำแห้ง รวมถึงค่าคุณภาพด้านต่าง ๆ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการอบโดยใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตเส้นกวยจั๊บบลเสริมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงกึ่งสำเร็จรูป โดยส่งผลให้ค่าคุณภาพการต้มสุก คุณลักษณะเนื้อสัมผัส และการยอมรับของผู้บริโภคมีค่าสูงและมีค่าใกล้เคียงกับเส้นกวยจั๊บลเส้นสด

ตารางที่ 4.29 ค่าสีของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	ค่าสี		
	L*	a*	b*
50	45.83±0.01 ^d	8.60±0.01 ^a	10.53±0.06 ^a
60	47.02±0.09 ^c	8.26±0.05 ^b	10.19±0.07 ^b
70	47.19±0.05 ^b	8.22±0.09 ^c	9.76±0.09 ^c
80	48.18±0.03 ^a	7.89±0.05 ^d	9.55±0.04 ^d

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=5)

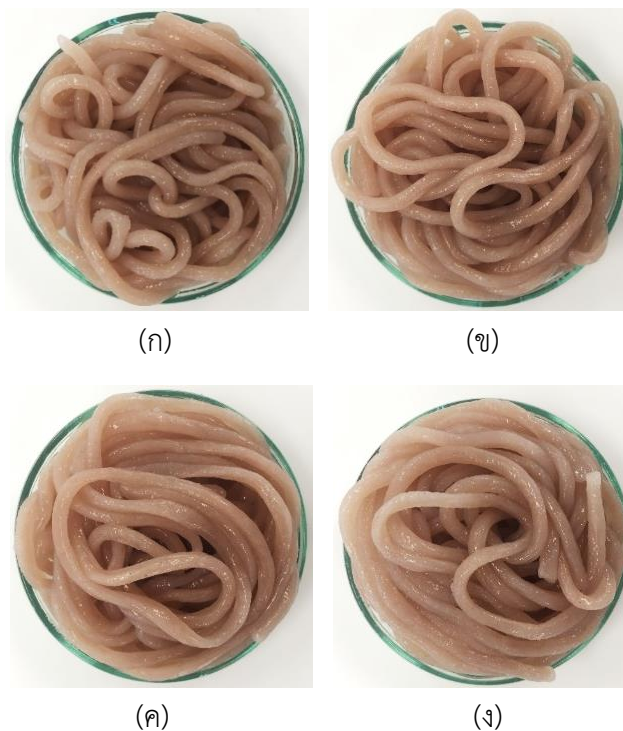
^{a-d} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.30 คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ

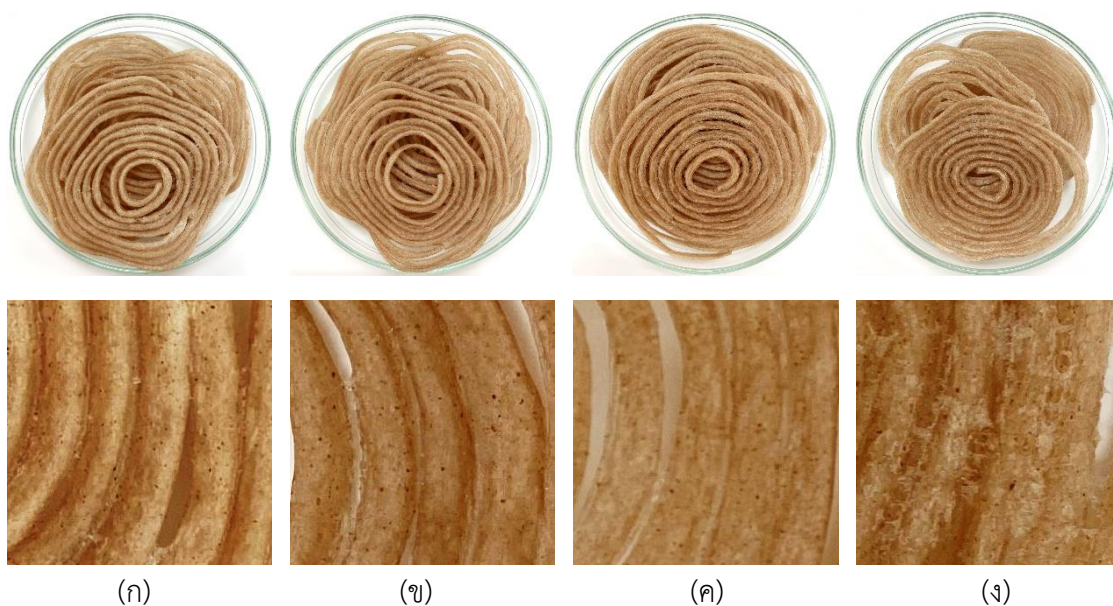
คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส	อุณหภูมิ (°C)			
	50	60	70	80
ลักษณะปรากฏ	6.55±1.36 ^a	6.58±1.31 ^a	6.06±1.26 ^b	5.52±1.23 ^c
สี	6.74±1.44 ^a	6.52±1.31 ^a	6.32±1.47 ^a	5.84±1.63 ^b
กลิ่น	6.65±1.20 ^a	6.26±1.18 ^b	6.16±1.16 ^b	6.10±1.27 ^b
รสชาติ	6.48±1.34 ^a	6.74±1.06 ^a	6.58±1.29 ^a	6.39±1.41 ^a
ความเหนียวนุ่ม	6.35±1.28 ^a	6.52±1.59 ^a	6.48±1.41 ^a	5.94±1.59 ^a
ความชอบโดยรวม	6.71±1.22 ^a	6.97±1.14 ^a	6.52±1.43 ^{ab}	6.16±1.49 ^b

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=40)

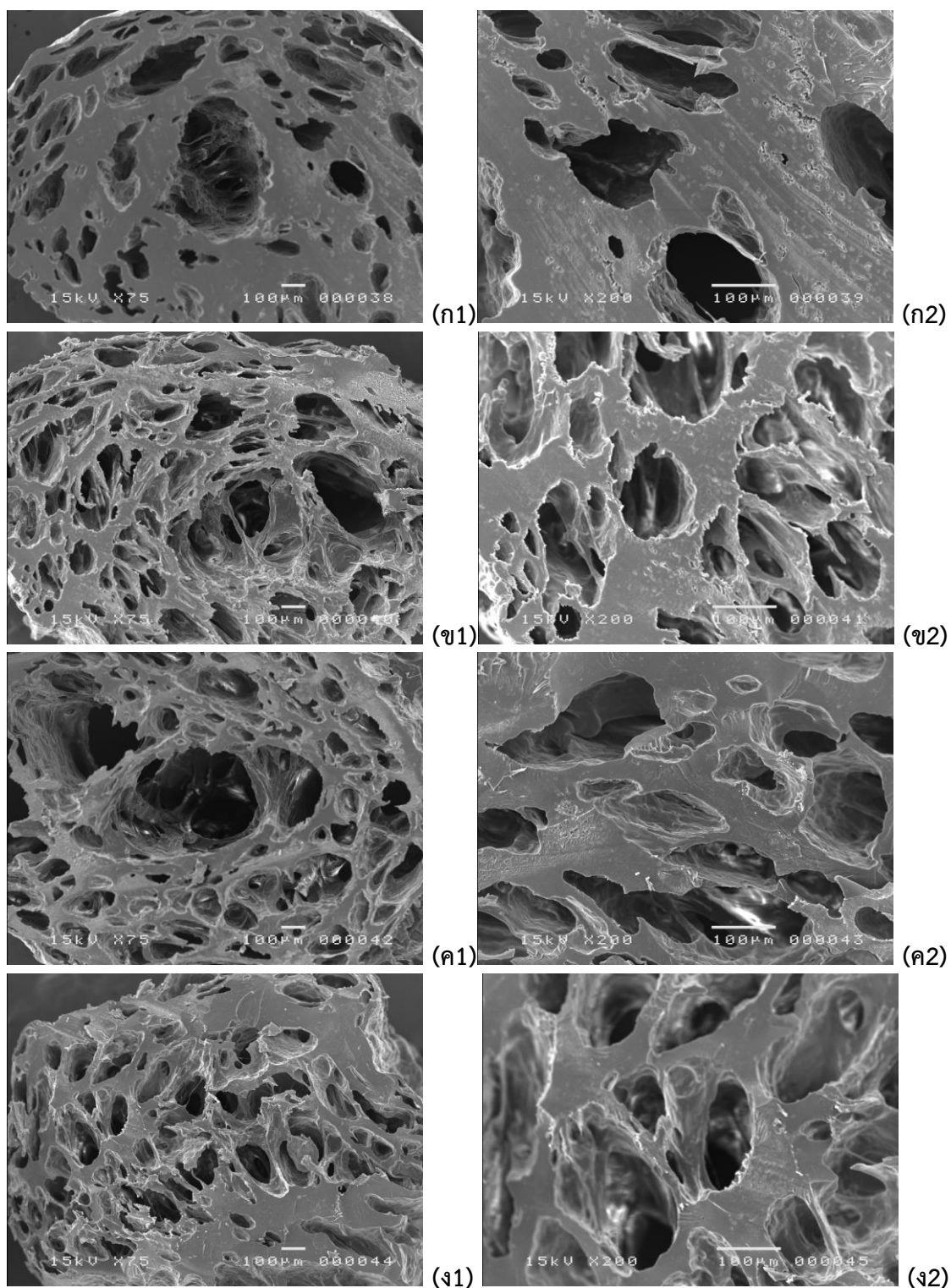
^{a-c} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 4.19 เส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดย (ก) 50 °C (ข) 60 °C (ค) 70 °C และ (ง) 80 °C



ภาพที่ 4.20 ลักษณะของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่อบที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดย (ก) 50 °C (ข) 60 °C (ค) 70 °C และ (ง) 80 °C



ภาพที่ 4.21 โครงสร้างตัดขวางของเส้นใยจิปถึงสำเร็จรูปที่อบที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้ SEM :
 (ก)-(ง) อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส, (1) และ (2) กำลังขยายที่ 75 เท่า (75x) และ 200 เท่า (200x)

4.2.3.6 ลักษณะทางโครงสร้างของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างของเส้นกวยจั๊บน้ำแข็งแช่แข็งแล้วทำการวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) ผลแสดงดังภาพที่ 4.21 จากการศึกษาพบว่าการใช้อุณหภูมิในการอบที่ 50 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ลักษณะทางโครงสร้างของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปมีความแน่นและปรากฏรูพรุนที่น้อยกว่าการใช้ อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะสามารถระเหย น้ำที่อยู่ในเส้นกวยจั๊ได้อย่างรวดเร็วกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้โครงสร้างของเส้นกวยจั๊บกึ่ง สำเร็จรูปมีความเป็นรูพรุนที่สูง จากการศึกษาพบว่า การใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส จะปรากฏรูพรุนที่มากและสม่ำเสมอว่าการอบที่อุณหภูมิอื่น ๆ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ ส่งผลต่อ คุณภาพการต้มสุก คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสในด้านความเหนียวนุ่ม และค่าสีของเส้นกวยจั๊บกึ่ง สำเร็จรูป การใช้อุณหภูมิในการอบที่สูงเกินกว่าจุดที่เกิดเจลในซีเซชันของสตาร์ช (สูงกว่า 70 องศา เซลเซียส) จะส่งผลให้เส้นกวยจั๊บกึ่งมีลักษณะขรุขระและมีการหดตัวที่สูงกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ ซึ่ง สังเกตได้จากผิวนอกของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปหลังอบ ดังภาพที่ 4.20

4.2.4 การคินตัวของเส้นกวยจั๊บบลสูตรที่เหมาะสม

จากการศึกษากระบวนการผลิตเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูป ทำให้ทราบถึงกระบวนการผลิต เส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่เหมาะสม โดยเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศา เซลเซียส โดยพิจารณาจากค่าคุณภาพ คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสและคะแนนการยอมรับจากผู้บริโภค ที่สูง รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบสั้น โดยไม่ส่งผลต่อค่าคุณภาพด้านต่าง ๆ จากนั้นจึงจะนำมาทำ การคินตัวด้วยน้ำร้อน (น้ำเดือดอุณหภูมิประมาณ 95 ± 2 องศาเซลเซียส) ที่ระยะเวลา 3, 5 และ 7 นาที และไม่โครเวฟ (กำลังไฟ 800 วัตต์) ที่ระยะเวลา 2, 4 และ 6 นาที แล้วนำเส้นที่ผ่านการคินตัวทั้ง 2 วิธีมาศึกษาคุณภาพ ได้แก่ คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส (ความนุ่มและความยืดหยุ่น) คุณภาพการต้ม สุกและคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส ผลที่ได้แสดงดังนี้

4.2.4.1 คุณภาพการต้มสุกเส้นกวยจั๊บบลสูตรที่เหมาะสม

จากการศึกษาการคินตัวของเส้นกวยจั๊บบลสูตรที่เหมาะสมด้วยน้ำร้อนและ ไมโครเวฟต่อคุณภาพการต้มสุก ซึ่งประกอบไปด้วยระยะเวลาในการต้มสุก (Cooking time) ร้อยละ ผลผลิตการต้มสุก (%Cooking yield) ร้อยละการดูดซับน้ำ (%Water absorption) และร้อยละการ สูญเสียระหว่างการหุงต้ม (%Cooking loss) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.31 พบว่า การคินตัวด้วยน้ำ ร้อนที่ระยะเวลาเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้มีค่าผลผลิตการต้มสุก การดูดซับน้ำ และการสูญเสียระหว่างการ หุงต้มที่เพิ่มสูงขึ้นไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปเมื่อให้ความร้อนจะมีการดูดซับน้ำ เพิ่มขึ้นและมีการพองตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาที่นานขึ้น แม้ว่าการสูญเสียระหว่างการหุงต้มที่มีการ คินตัวด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 5 นาทีจะมีค่าที่สูงที่สุดแต่ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทาง สถิติ ($p > 0.05$) กับการคินตัวด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 7 นาทีเมื่อทำการคินตัวด้วยไมโครเวฟ พบว่าที่ ระยะเวลา 4 นาที จะส่งผลให้ผลผลิตการต้มสุกและการดูดซับน้ำ มีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การ คินตัวด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลาอื่น ส่วนการสูญเสียระหว่างการหุงต้มพบว่า ยิ่งเพิ่มเวลานานขึ้นจะ ส่งผลให้มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย การคินตัวด้วยไมโครเวฟจะใช้เวลาที่สั้นกว่าการคินตัวด้วยน้ำร้อน

เนื่องจากการใช้ไมโครเวฟจะส่งผลให้น้ำมีความร้อนที่สูงกว่าการใช้น้ำร้อน จึงส่งผลให้ร้อยละผลผลิตการต้มสุก ร้อยละการดูดซับน้ำ และร้อยละการสูญเสียระหว่างการหุงต้มมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำร้อน

4.2.4.2 คุณลักษณะเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บอุบลสูตรที่เหมาะสม

จากการศึกษาการคั่วตัวของเส้นกวยจั๊บอุบลสูตรที่เหมาะสมด้วยน้ำร้อนและไมโครเวฟต่อคุณภาพการต้มสุก โดยการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ด้วยเครื่อง Texture analyzer ซึ่งทำการวิเคราะห์ค่าความเหนียวนุ่ม (Hardness) และความยืดหยุ่น (Springiness) ผลแสดงดังตารางที่ 4.32 พบว่า การคั่วด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 5 นาที และการคั่วด้วยไมโครเวฟ 4 นาที เส้นจะมีการสุกที่พอเหมาะ ส่งผลให้ค่าความเหนียวนุ่มและค่าความยืดหยุ่นมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาอื่น ๆ ขณะที่การคั่วด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 3 นาที และการคั่วด้วยไมโครเวฟ 2 นาที เส้นจะยังไม่สุกดีและมีความแข็ง ส่วนการคั่วด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 7 นาที และการคั่วด้วยไมโครเวฟ 6 นาที เส้นกวยจั๊บจะมีการดูดน้ำเข้าไปมากส่งผลให้เส้นมีความเหนียวนุ่มและความยืดหยุ่นลดลง

ตารางที่ 4.31 คุณภาพการต้มสุกเส้นของกวยจั๊บอุบลสูตรที่เหมาะสม

การคั่วตัว	เวลา (นาที)	Cooking yield (%)	Water absorption (%)	Cooking loss (%)
น้ำร้อน	3	263.723±2.107 ^d	163.723±2.107 ^d	0.0700.019 ^d
	5	288.670±2.570 ^c	188.670±2.570 ^c	0.161±0.004 ^c
	7	311.191±5.447 ^b	211.1915.447 ^b	0.144±0.042 ^c
ไมโครเวฟ	2	270.547±12.318 ^d	170.547±12.318 ^d	0.109±0.020 ^{cd}
	4	354.309±6.859 ^a	254.309±6.859 ^a	0.326±0.057 ^b
	6	324.473±9.838 ^b	224.473±9.838 ^b	0.447±0.030 ^a

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

^{a-d} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

4.2.4.3 คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของเส้นกวยจั๊บสำเร็จรูป

จากการศึกษาการคั่วตัวของเส้นกวยจั๊บสำเร็จรูปที่คั่วด้วยน้ำร้อนและไมโครเวฟต่อคุณภาพการต้มสุกและคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส พบว่าเส้นกวยจั๊บสำเร็จรูปที่คั่วด้วยน้ำร้อนและไมโครเวฟ โดยใช้น้ำร้อนที่ระยะเวลา 5 นาทีและไมโครเวฟ 4 นาที มีค่าคุณภาพที่ใกล้เคียงกับเส้นกวยจั๊บสูตรที่เหมาะสม จึงได้นำมาทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส โดยการทดสอบชิม โดยทำการศึกษาคูณภาพด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติความเหนียวนุ่มและความชอบโดยรวมผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.33 และภาพที่ 4.22 จากการศึกษพบว่า ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนการ

ยอมรับของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่มีการคั่วด้วยน้ำร้อนและไมโครเวฟ โดยใช้ความร้อนที่ระยะเวลา 5 นาทีและไมโครเวฟ 3 นาที ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังนั้น เส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปสูตรที่เหมาะสมสามารถทำการคั่วด้วยน้ำร้อนและไมโครเวฟได้โดยไม่ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค

ตารางที่ 4.32 คุณลักษณะเนื้อสัมผัสของเส้นกวยจั๊บลสูตรที่เหมาะสม

การคั่ว	เวลา (นาที)	Hardness (N)	Springiness (mm)
น้ำร้อน	3	0.171±0.026 ^a	30.807±3.157 ^d
	5	0.189±0.022 ^a	57.777±7.074 ^a
	7	0.103±0.014 ^b	30.268±5.974 ^d
ไมโครเวฟ	2	0.135±0.030 ^b	47.562±6.096 ^{bc}
	4	0.195±0.047 ^a	52.675±1.570 ^{ab}
	6	0.112±0.013 ^b	41.861±4.289 ^c

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=10)

^{a-d} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\leq 0.05$)

ตารางที่ 4.33 คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่คั่วด้วยน้ำร้อนและไมโครเวฟ

คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส	การคั่ว	
	น้ำร้อน 5 นาที ^{ns}	ไมโครเวฟ 4 นาที ^{ns}
ลักษณะปรากฏ	6.47±1.07	6.50±1.31
สี	6.77±0.90	6.73±1.08
กลิ่น	6.60±1.07	6.63±1.10
รสชาติ	6.50±1.14	6.40±1.16
ความเหนียวนุ่ม	6.30±1.39	6.57±1.36
ความชอบโดยรวม	6.90±0.96	6.97±1.27

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=40)

^{ns} แสดงถึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p>0.05$)



ภาพที่ 4.22 เส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปที่มีการคินตัวด้วยน้ำร้อนและไมโครเวฟที่เวลาต่าง ๆ โดย (ก) การคินตัวด้วยน้ำร้อน และ (ข) การคินตัวด้วยไมโครเวฟ: หมายเลข (2)-(6) คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการคินตัว

4.2.5 คุณค่าทางโภชนาการของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูป

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของเส้นกวยจั๊บบดผสมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงกึ่งสำเร็จรูปสูตรที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน เยื่อใย และคาร์โบไฮเดรต ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.34 จากผลการวิเคราะห์พบว่าการผสมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงในเส้นกวยจั๊บบดกึ่งสำเร็จรูปจะส่งผลให้เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มสูงขึ้นได้

จากการศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปสูตรที่เหมาะสม โดยทำการศึกษาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ โดยใช้วิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH), ferric reducing antioxidant power (FRAP) และ 2, 2-azobis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.34 พบว่ามีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด 0.039 (mg GAE/g sample) ปริมาณฟลาโวนอยด์ 0.696 (mg QE/g sample) DPPH 0.669 (mg TEAC/g sample) FRAP 0.296 (mg Fe²⁺/g sample) และ ABTS 0.121 (mg TEAC/g sample) ขณะที่แอนโทไซยานินไม่สามารถตรวจพบได้ จากการศึกษารองของ Melini et al. (2019) ที่ได้ทำการศึกษาปริมาณของสารแคโรทีนอยด์ (carotenoids) ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (total phenolic compounds) และปริมาณแอนโทไซยานิน (anthocyanins) ในข้าวสาลีดำและแดงก่อนปรุงให้สุกและหลังทำให้สุกพบว่าปริมาณสารสำคัญยังคงหลงเหลืออยู่หลังปรุงสุก แสดงให้เห็นว่ากระบวนการผลิตเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปยังคงส่งผลให้มี

ปริมาณสารสำคัญในเส้นกวยจั๊บน้ำหรือยังคงมีคุณค่าทางโภชนาการแก่ผู้บริโภค ดังนั้นการผสมแป้งข้าวก่ำลือหอมมะลิแดงในการผลิตเส้นกวยจั๊บน้ำเส้นกวยจั๊บน้ำจะส่งผลให้กวยจั๊บน้ำสำเร็จรูปมีคุณค่าและสารอาหารเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นกวยจั๊บน้ำที่จำหน่ายตามท้องตลาด

ตารางที่ 4.34 คุณค่าทางโภชนาการของเส้นกวยจั๊บน้ำสำเร็จรูป

องค์ประกอบ	กวยจั๊บน้ำอบลเสริมแป้งข้าวก่ำลือหอมมะลิแดง กึ่งสำเร็จรูป
ปริมาณความชื้น (wb.)	6.725±0.188
เถ้า (db.)	0.278±0.022
ไขมัน (db.)	0.291±0.078
โปรตีน (db.)	3.438±0.028
เยื่อใย (db.)	0.162±0.027
คาร์โบไฮเดรต	89.093±0.086
Total phenolic (mg GAE/g sample)	0.039±0.014
Total flavonoid (mg QE/g sample)	0.696±0.157
Total anthocyanin (mg CyE/g sample)	ND
DPPH (mg TEAC/g sample)	0.669±0.001
FRAP (mg Fe ²⁺ /g sample)	0.296±0.045
ABTS (mg TEAC/g sample)	0.121±0.009

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

mg GAE/g sample คือ mg gallic acid equivalent/g ตัวอย่าง

mg TEAC/g sample คือ mg trolox equivalent antioxidant capacity/g ตัวอย่าง

mg CyE /g sample คือ mg cyanidin-3-glucoside equivalent/g ตัวอย่าง

mg QE/g sample คือ mg quercetin equivalent/g ตัวอย่าง

ND คือ ไม่พบหรือไม่สามารถตรวจสอบได้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้อง 4 สายพันธุ์ พบว่า แป้งข้าวกล้องมีปริมาณโปรตีน ไขมัน เยื่อใยและคาร์โบไฮเดรตที่สูง ในแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงจะมีปริมาณอะไมโลสสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวกล้องสีชนิดอื่น ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้ง ไม่ว่าจะเป็นสมบัติแป้งเปียก สมบัติทางด้านความร้อน การพองตัว การละลาย ความคงต่อการละลายและการแช่แข็ง การสูญเสียน้ำ การละลายของโปรตีน ความสามารถในการเกิดโฟม ความคงตัว ความสามารถในการเกิดอิมัลชันและความคงตัวของอิมัลชัน นอกจากนี้ค่าดัชนีน้ำตาลของแป้งข้าวกล้องสีแต่ละชนิดมีค่าดัชนีน้ำตาลอยู่ในระดับปานกลาง เมื่อทำการศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องสี พบว่าในแป้งข้าวกล้องสีแต่ละชนิดมีสารสำคัญที่สูงและแตกต่างกัน โดยสารสำคัญที่ศึกษาส่วนใหญ่จะพบในแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงสูงที่สุด ยกเว้นปริมาณแอนโทไซยานินที่จะพบในแป้งข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่และหอมนิล จากการศึกษาศักยภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้อง 4 สายพันธุ์ พบว่าแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงเหมาะต่อการนำไปผลิตเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปรวมทั้งมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สูงจะสามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการได้จากการศึกษาการประยุกต์ใช้แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงในผลิตภัณฑ์เส้นกวยจั๊บล พบว่า การเติมแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลต่อคุณภาพในด้านต่าง ๆ ลดลง และเมื่อมีการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์พบว่าส่งผลให้การสูญเสียระหว่างหุงต้มลดลงและมีลักษณะเนื้อสัมผัสและการยอมรับทางประสาทสัมผัสที่สูงขึ้น การใช้แป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ร้อยละ 10 ร่วมกับการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ จะส่งผลต่อค่าคุณภาพการต้มสุก คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส และการยอมรับทางประสาทสัมผัสใกล้เคียงกับสูตรควบคุม เมื่อศึกษาการเก็บรักษาเส้นกวยจั๊บลเส้นสดสูตรที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม โดยใช้ถุงสุญญากาศและถุงโพลีโพรพิลีน และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องและตู้เย็น พบว่าสามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้มากที่สุดไม่เกิน 3 วันและที่อุณหภูมิตู้เย็นไม่เกิน 3 สัปดาห์ โดยการใช้ถุงสุญญากาศจะสามารถยืดอายุการเก็บรักษาและไม่ส่งผลต่อค่าคุณภาพของเส้นกวยจั๊บลได้ดีกว่าถุงโพลีโพรพิลีน จากการศึกษากระบวนการผลิตเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูป โดยใช้อุณหภูมิการอบ 50-80 องศาเซลเซียส พบว่าการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสจะส่งผลให้เส้นกวยจั๊บลมีค่าคุณภาพใกล้เคียงกับเส้นสดมากที่สุด โดยในการคั่วตัวสามารถคั่วตัวได้ทั้งน้ำร้อนและไม่โครเวฟรวมถึงผู้บริโภคให้การยอมรับ และเมื่อทำการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างของเส้นกวยจั๊บลที่อุณหภูมิการอบแตกต่างกัน พบว่า เส้นกวยจั๊บลที่มีการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสจะมีรูพรุนจำนวนมากและมีขนาดใหญ่กว่าการใช้อุณหภูมิอื่น ๆ

ดังนั้น ในการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องจะเป็นข้อมูลสำคัญในการนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ การใช้แป้งข้าว

กล้องสีสามารถเป็นทางเลือกหนึ่งทางที่จะปรับปรุงคุณภาพของเส้นกวยจั๊บอุบลในด้านโภชนาการและช่วยเพิ่มมูลค่าของเส้นกวยจั๊บอุบลให้มีมูลค่าสูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรนำแป้งข้าวกล้องสีสายพันธุ์อื่นมาใช้ทดแทนแป้งข้าวเจ้าในการผลิตเส้นกวยจั๊บอุบล นอกเหนือจากแป้งข้าวกล้องหอมมะลิแดง

5.2.2 ควรมีการนำแป้งข้าวกล้องสีไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ นอกเหนือจากเส้นกวยจั๊บ

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงสาธารณสุข. **อาหารกึ่งสำเร็จรูป**. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 210) พ.ศ.2543. 19 กันยายน, 2543.
- การะเวก. (2551). “ใครชอบกวยจั๊บอุบล เชิญมาแวะจ้า”, **กันครัว**. <http://topicstock.pantip.com/food/topicstock/2008/01/D6289009/D6289009.html>. 3 พฤษภาคม, 2562.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.
- กิตติพัฒน์ โสภิตธรรมคุณ และปานทิพย์ รัตนศิลป์ภัลลชาญ. “การสกัดและวิธีวัดความสามารถต้านอนุมูลอิสระในพืชสมุนไพร”, **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ห้วเฉียวเฉลิมพระเกียรติ**. 3(1): 86-94; มกราคม-มิถุนายน, 2560.
- กรมการข้าว. (2560). “ข้าวไรซ์เบอร์รี่”, **ศูนย์ข้อมูลข้าวตลาดเฉพาะ**. <https://www.rice-detail.php?id=15>. 23 พฤษภาคม, 2562.
- _____. (2560). “ข้าวหอมนิล”, **ศูนย์ข้อมูลข้าวตลาดเฉพาะ**. <https://www.rice-detail.php?id=15>. 23 พฤษภาคม, 2562.
- กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. **เกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของอาหารและภาชนะสัมผัสอาหาร ฉบับที่ 3**. กรุงเทพฯ: พิทู ดีไซน์ แอนด์ พรินท์, 2560.
- งามชื่น คงเสรี. **การปรับปรุงพันธุ์ข้าว**. กรุงเทพฯ: จีรวัฒน์เอ็กเพรส, 2542.
- _____. “การสร้างคำแนะนำการหุงต้มข้าวหอมมะลิไทย”, ใน **เอกสารวิชาการฉบับพิเศษคุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย**. น.63-73. กรุงเทพฯ: จีรวัฒน์เอ็กเพรส, 2547.
- จิตรา สิงห์ทอง. **รายงานวิจัยผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อการปรับปรุงคุณภาพเส้นกวยจั๊บอุบล**. อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2556.
- ณัฐพัชร์ สะอาดศรีวีระเดช และคณะ. “อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและระยะเวลาตากที่มีผลต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก”, ใน **การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 14 และระดับนานาชาติครั้งที่ 6**. น.480-487. ประจวบคีรีขันธ์: โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์พลาซ่า, 2556.
- ณัฐนี ตั้งศรีอนุกุล. **ผลของวิธีการทำแห้งและภาวการณ์เก็บรักษาต่อปริมาณของสารกลุ่มฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดง *Oryza sativa* L.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551
- ดุขฎิ อดุภาพ และน้องนุช เจริญกุล. (2548) “เคมีและสมบัติของแป้ง”, **เทคโนโลยีของคาร์โบไฮเดรต**. <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/contact.html>. 2 กรกฎาคม, 2563.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- ดวงรัตน์ สารีภาวษ์ และนันทพล สุทธิพันธ์. การแยกและคัดเลือกแบคทีเรียแลคติกที่สามารถสร้างสารยับยั้งจุลชีพจากอาหารหมัก. ปรินญาณพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2539.
- ตามพงศ์ เหลืองบริบูรณ์ (2561). “คาร์โบไฮเดรตกับค่าดัชนีน้ำตาล (Glycemic Index)”, องค์การพิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ. <http://www.nsm.or.th/other-service/1757-online-science/knowledge-inventory/sci-article/science-article-nsm/2823-คาร์โบไฮเดรตกับค่าดัชนีน้ำตาล-glycemic-index.html>. 2 มกราคม, 2564.
- รัชชัย ตระกูลเลิศยศ. (2560). “สารต้านอนุมูลอิสระ คืออะไรแน?”, อนุมูลอิสระ และสารต้านอนุมูลอิสระ (Free radical and Antioxidant). <http://uatscimath.ipst.ac.th/article-biology/item/6903-2017-05-14-06-44-33>. 23 พฤษภาคม, 2562.
- นิธยา รัตนานนท์. เคมีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์, 2557.
- บุญศรี จงเสรีจิตต์. จุลชีววิทยาทางอาหาร. นครปฐม: มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2552.
- พิชญาดา เจริญจิต. (2561). “อาหารถั่ว ถั่วเขียว ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ถั่วแดง ถั่วดำ ถั่วขาว ถั่วเขียว ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ถั่วแดง ถั่วดำ ถั่วขาว ถั่วเขียว ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ถั่วแดง ถั่วดำ ถั่วขาว”, เทคโนโลยีชาวบ้าน. https://www.technologychaoban.com/bullet-news-today/article_45667. 23 พฤษภาคม, 2562.
- วรวิทย์ วงษ์เยี่ยม. การเสริมคุณค่าแป้งข้าวเจ้าด้วยโปรตีนที่สกัดจากกากงาดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2552.
- ศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว. (มปป.). “ข้าวไรซ์เบอร์รี่”, ข้าวไรซ์เบอร์รี่ (Riceberry). <http://www.dna.kps.ku.ac.th/index.php/news-articles-rice-rsc-rgdu-knowledge/rice-breeding-lab/riceberry-variety>. 23 พฤษภาคม, 2562.
- สมิคร ยิ่งยง, ลือชัย อารยะรังสฤษฏ์ และสมทรง โชติชื่น. (2562). “สุดยอดข้าวไทย”, สุดยอดข้าวไทย กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. <https://pubhtml5.com/wrfu/qtoo/basic>. 23 พฤษภาคม, 2562.
- สารานุกรมเสรี. (2562). “ข้าว”, ข้าว. https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%82%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%A7#cite_note-prodstat-1. 23 พฤษภาคม, 2562.
- สุนันทา วงศ์ปิยชน และคณะ. รายงานวิจัยดัชนีน้ำตาลของข้าวพันธุ์ไทย 8 สายพันธุ์. ปทุมธานี: ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี, 2558.
- สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งข้าวเจ้า. มอก. 638-2529, 2529.
- _____. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเส้นกวยจั๊บ. มผช. 141-2546, 2546.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. **มาตรฐานสินค้าเกษตรข้าวหอมมะลิไทย**. มกษ. 4000-2560, 2546.
- _____. **มาตรฐานสินค้าเกษตรข้าวสีไทย**. มกษ. 4006-2560, 2546.
- สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2553). “แอนโทไซยานิน”, **ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้**. <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR21.pdf>. 23 พฤษภาคม, 2562.
- หทัยชนก ศรีประไพ, ฉัตรชนก บุญไชย และยศสินี หัวดวง. “การพัฒนาผลิตภัณฑ์พาสต้าสดจากแป้งข้าวกล้อง”, **Thai Journal of Science and Technology**. 7(1): 56-69; มกราคม-เมษายน, 2561.
- อธิป สกฤตผือก. (2559). “อนุมูลอิสระและสารต้านอนุมูลอิสระ”, **ศูนย์การศึกษาต่อเนื่องทางเภสัชศาสตร์**. <http://ccpe.pharmacycouncil.org/showfile.php?file=204>. 23 พฤษภาคม, 2562.
- อริสรา รอดมัย. “การผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวจากแป้งข้าวหอมนิล”, **วารสารเทคโนโลยีการอาหาร**. 5(1): 64-71; มิถุนายน, 2552.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. **ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน, 2547.
- โอภา วัชรคุปต์. **สารต้านอนุมูลอิสระ (Radical scavenging agents)**. กรุงเทพฯ: พี.เอส.พรินท์ จำกัด, 2549.
- AACC. **Approved methods of the American association of cereal chemists**. 10thed. MN: America Association of Cereal Chemists., 2000.
- Alcázar-Alay, S. C. and Meireles, M. A. A. “Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources”, **Food Science and Technology (Campinas)**. 35(2): 215–236; June, 2015.
- Al-Farga, A. and et al. “Proximate composition, functional properties, amino acid, mineral and vitamin contents of a novel food: Alhydwan (Boerhavia elegans Choisy) seed flour”, **Food Chemistry**. 211: 268–273; November, 2016.
- AOAC. **Official Methods of Analysis of Analytical chemists**. 17th ed. Maryland: The Association of Official Analytical. Chemists, 2000.
- _____. **Official Methods of Analysis of Analytical chemists**. 18th ed. Maryland: The Association of Official Analytical. Chemists, 2005.
- _____. **Official Methods of Analysis of Analytical chemists**. 20th ed. Maryland: The Association of Official Analytical. Chemists, 2016.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Amagliani, L. and et al. “Characterisation of the physicochemical properties of intact and hydrolysed rice protein ingredients”, **Journal of Cereal Science**. 88: 16–23; July, 2019.
- Bao, J. and Bergman, C.J. “Rice flour and starch functionality”, In **Starch in Food**. 2nd ed. Sjöö, M. and Nilsson, L. Editors. p. 373–419. Duxford: Woodhead Publishing, 2018.
- Bewley, J.D. and Black, M. **Seed: Physiology of development and germination**. 2nd ed. New York: Plenum Publishing Corporation, 1994.
- Chandra, S. and Samsher. “Assessment of functional properties of different flours”, **African Journal of Agricultural Research**. 8(38): 4849–4852; October, 2013.
- Cham, S. and Suwannaporn, P. “Effect of hydrothermal treatment of rice flour on various rice noodles quality”, **Journal of Cereal Science**. 51(3): 284–291; May, 2010.
- Cheevitsopon, E. and Noomhorm, A. “Effects of parboiling and fluidized bed drying on the physicochemical properties of germinated brown rice”, **International Journal of Food Science & Technology**. 46(12): 2498–2504; December, 2011.
- Dureja, A. and Dhiman, K. “Free radical scavenging potential and total phenolic and flavonoid content of Ziziphus mauritiana and Ziziphus nummularia fruit extracts”, **International Journal of Green Pharmacy**. 6(3): 187; July, 2012.
- Eliasson, A. C. **Starch in: Food Structure, Function and Applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2004.
- Eliasson, A. C. and Krog, N. “Physical properties of amylose-monoglyceride complexes”, **Journal of Cereal Science**. 3(3): 239–248; July, 1985.
- Englyst, K.N. and et al. “Rapidly available glucose in foods: an invitro measurement that reflects the glycemic response” **The American Journal of Clinical Nutrition**. 69(3): 448–454; March, 1999.
- Falade, K.O. and Christopher, A.S. “Physical, functional, pasting and thermal properties of flours and starches of six Nigerian rice cultivars”, **Food Hydrocolloid**. 44: 478–490; February, 2015.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Funami, T. and et al. “Food hydrocolloids control the gelatinization and retrogradation behavior of starch. 2b. Functions of guar gums with different molecular weights on the gelatinization behavior of corn starch”, **Food Hydrocolloids**. 19(1): 15–24; January, 2005.
- Goñi, I., Garcia-Alonso, A. and Saura-Calixto, F. “A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index”, **Nutrition Research**. 17(3): 427–437; March, 1997.
- Harvard Health Publishing. (2015). “Measuring carbohydrate effects can help glucose management”, **Glycemic index for 60+ foods**.
<https://www.health.harvard.edu/diseases-and-conditions/glycemic-index-and-glycemic-load-for-100-foods>. 2 January, 2021.
- Hasjim, J., Li, E. and Dhital, S. “Milling of rice grains: The roles of starch structures in the solubility and swelling properties of rice flour”, **Starch – Stärke**. 64(8): 631–645; August, 2012.
- Hernández-Rodríguez, P., Baquero L.P. and Larrota, H.R. “Flavonoids: Potential therapeutic agents by their antioxidant capacity”, In **Bioactive compounds**. Maira R.S.C. Editors. p. 265–288. Oxford: Woodhead Publishing, 2019.
- Ismail, H., Irani, M and Ahmad, Z. “Starch-Based Hydrogels: Present Status and Applications”, **International Journal of Polymeric Materials**. 62(7): 411–420; March, 2013.
- Jang, H. Lim, Bae, I. Young and Lee, H. Gyu. “In vitro starch digestibility of noodles with various cereal flours and hydrocolloids”, **LWT - Food Science and Technology**, 63(1): 122–128; September, 2015.
- Jarnsuwan, S and Thongngam, M. “Effects of Hydrocolloids on Microstructure and Textural Characteristic of Instant Noodles”, In **proceeding in the Asean Food Conference 2011**. p.632–635. Bangkok: Bitech, 2011.
- Jitngarmkusol, S., Hongsuwankul, J and Tananu Wong, K. “Chemical compositions, functional properties, and microstructure of defatted macadamia flours”, **Food Chemistry**. 110(1): September; 23–30, 2008.
- Juliano, B.O. “A Simplified Assay for Milled-Rice Amylose”, **Cereal Science Today**. 16(11): 334–340; November, 1971.
- Juliano, B. O. and Tũaño, A. P. P. “Gross structure and composition of the rice grain”, In **Rice: Chemistry and Technology**. 4th ed. Jinsong Bao Editors. p. 31–53. United Kingdom: Elsevier Inc. in cooperation, 2019.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Karim, A. Alias, Norziah, M. H., and Seow, C. C. “Methods for the study of starch Retrogradation”, **Food Chemistry**. 71(1): 9–36; October, 2000.
- Katekhong, W and Charoenrein, S. “The effect of rice aging on the freeze–thaw stability of rice flour gels”, **Carbohydrate Polymers**. 89(3): 777–782; July, 2012.
- Kaur, A. and et al. “Effect of guar gum and xanthan gum on pasting and noodle-making properties of potato, corn and mung bean starches”, **Journal of Food Science and Technology**. 52(12): 8113–8121; July. 2015.
- Kaushal, P., Kumar, V and Sharma, H. K. “Comparative study of physicochemical, functional, antinutritional and pasting properties of taro (*Colocasia esculenta*), rice (*Oryza sativa*) flour, pigeonpea (*Cajanus cajan*) flour and their blends”, **LWT - Food Science and Technology**. 48(1): 59–68; September, 2012.
- Khoo, H. Eng and et al. “Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits”, **Food & Nutrition Research**. 61(1): 1361779; January, 2017.
- Kraithong, S., Lee, S. and Rawdkuen, S. “Physicochemical and functional properties of Thai organic rice flour”, **Journal of Cereal Science**. 79: 259–266; January, 2018.
- Lamberts, L. and et al. “Effect of milling on colour and nutritional properties of rice”, **Food Chemistry**. 100(4): 1496–1503; January, 2007.
- MedThai. (2557). “แร่ธาตุ”, **16 ประโยชน์ของเกลือแร่ ! (Minerals)**. <https://medthai.com/%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B8%A5%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B9%81%E0%B8%A3%E0%B9%88/>. 3 January, 2021.
- Melini, V and et al. “Bioactive compounds in rice on Italian market: pigmented varieties as a source of carotenoids, total phenolic compounds and anthocyanins, before and after cooking”, **Food Chemistry**. 277: 119–127; March, 2019.
- Morales-Martínez, L. Elizabeth and et al. “Morphometric, Physicochemical, Thermal, and Rheological Properties of Rice (*Oryza sativa* L.) Cultivars Indica x Japonica”, **Food and Nutrition Sciences**. 05(03): 271–279; January, 2014.
- Mudgil, D., Barak, S. and Khatkar, B. S. “Guar gum: processing, properties and food applications—A Review”, **Journal of Food Science and Technology**. 51(3): 409–418; October, 2011.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Otegbayo, B., Oguniyan, D and Akinwumi, O. “Physicochemical and functional characterization of yam starch for potential industrial applications”, **Starch – Stärke**. 66(3-4): 235–250; March, 2013.
- Pang, Y. and et al. “Bound phenolic compounds and antioxidant properties of whole grain and bran of white, red and black rice”, **Food Chemistry**. 240: 212–221; February, 2018.
- Pengkumsri, N. and et al. “Physicochemical and antioxidative properties of black, brown and red rice varieties of northern Thailand”, **Food Science and Technology (Campinas)**. 35(2): 331–338; June, 2015.
- Pérez-Cruz, K. and et al. “Synthesis and antioxidant study of new polyphenolic hybrid-coumarins”, **Arabian Journal of Chemistry**. 11(4): 525–537; May, 2018.
- Pramai, P. and Jiamyangyuen, S. “Chemometric classification of pigmented rice varieties based on antioxidative properties in relation to color”, **Songklanakarin J. Sci. Technol.** 38: 463–472; September-October, 2016.
- Reddy, C. Koteswara, and et al. “Effects of Polishing on Proximate Composition, Physico-Chemical Characteristics, Mineral Composition and Antioxidant Properties of Pigmented Rice”, **Rice Science**. 24(5): 241–252; September, 2017.
- Shen, Y. and et al. “Total phenolics, flavonoids, antioxidant capacity in rice grain and their relations to grain color, size and weight”, **Journal of Cereal Science**. 49(1): 106–111; January, 2009.
- Singh, N. and et al. “Relationship between the degree of milling, ash distribution pattern and conductivity in brown rice”, **Food Chemistry**. 69(2): 147–151; May, 2000.
- Singthong, J. and Meesit, U. “Characteristic and functional properties of Thai lotus seed (*Nelumbo nucifera*) flours”, **International Food Research Journal**. 24(4): 1414–1421; August, 2017.
- Sultan, N., Wani, I. Ahmed, and Masoodi, F. Ahmad. “Moisture mediated effects of γ -irradiation on physicochemical, functional, and antioxidant properties of pigmented brown rice (*Oryza sativa* L.) flour”, **Journal of Cereal Science**. 79: 399–407; January, 2018.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Sun, Y. and et al. “Physicochemical characterization of rice, potato, and pea starches, each with different crystalline pattern, when incorporated with Konjac glucomannan”, **Food Hydrocolloids**. 101: 105499; April, 2020.
- Sutheevess, S., Chai-Uea P. and Thirathumthavorn, D. “Impact of hydrocolloids on the physico-chemical and sensory properties of gluten-free instant noodles from rice flour and mung bean starch”, **Italian Journal of Food Science**. 32(2): 438-449; May, 2020.
- Tangsrianugul, N., Wongsagonsup, R. and Suphantharika, M. “Physicochemical and rheological properties of flour and starch from Thai pigmented rice cultivars”, **International Journal of Biological Macromolecules**. 137: 666–675; September, 2019.
- THAI-THAIFOOD.COM. (2017). “ข้าวหอมมะลิแดง”, ัญพืช <https://www.thai-thaifood.com/th/%e0%b8%82%e0%b9%89%e0%b8%b2%e0%b8%a7%e0%b8%ab%e0%b8%ad%e0%b8%a1%e0%b8%a1%e0%b8%b0%e0%b8%a5%e0%b8%b4%e0%b9%81%e0%b8%94%e0%b8%87/>. 23 May, 2019.
- Thiranusornkij, L. and et al. “Physicochemical properties of Hom Nil (*Oryza sativa*) rice flour as gluten free ingredient in bread”, **Foods**. 7(10): 159-171; September, 2018.
- _____. “Comparative studies on physicochemical properties, starch hydrolysis, predicted glycemic index of Hom Mali rice and Riceberry rice flour and their applications in bread”, **Food Chemistry**. 283: 224–231; January, 2019.
- Thitipramote, N. and et al. “Bioactive compounds and antioxidant activities of red (Brown Red Jasmine) and black (Kam Leum Pua) native pigmented rice”, **International Food Research Journal**. 23(1): 410-414; January, 2016.
- Yasumatsu, K. and et al. “Whipping and Emulsifying Properties of Soybean Products”, **Agricultural and Biological Chemistry**. 36(5): 719–727; May, 1972.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์ทางกายภาพ

ก.1 การวิเคราะห์ลักษณะ รูปร่าง และขนาดของเม็ดแป้ง ด้วยกล้องจุลทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM) ดัดแปลงตามวิธีการของ Thiranusornkij et al. (2019)

สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ เตรียมสารละลายแป้งข้าวกล้องความเข้มข้นร้อยละ 0.5 วางบนสไลด์ และส่องด้วยกล้องไปยังพื้นที่ทั้งหมดของตัวอย่างที่อยู่บนสไลด์ บันทึกและวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเม็ดแป้งที่สังเกตได้จากกล้องจุลทรรศน์

สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด นำแป้งข้าวกล้องสีโรยลงบน Aluminum specimen mount ที่ทาด้วย Silver conductive paint (บาง ๆ) เคาะเศษแป้งส่วนเกินออกเล็กน้อย จากนั้นนำตัวอย่างไปเคลือบทองคำ 2-4 นาที่ ส่องตัวอย่างด้วยกล้อง SEM ด้วยกำลังไฟฟ้า 10 kv กำลังขยายขยาย 50-200 เท่า แล้วทำการบันทึกภาพที่ถ่ายได้

ก.2 การวัดค่าสีแป้งข้าวด้วยเครื่อง

การวัดค่าสีระบบ CIELAB โดยค่าสี L^* เป็นค่าความสว่าง (Lightness) a^* เป็นค่าสีแดง และสีเขียว (Redness/Greenness) และ b^* เป็นค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน (Yellowness/ blueness) โดยนำ ตัวอย่างใส่ลงในภาชนะหรือกระบอกใส่ตัวอย่าง แล้ววางไว้ที่ตำแหน่งแสงผ่านและปิดด้วยฝาครอบ จากนั้นทำการวัดสีแป้งด้วยเครื่องวัดสี

เมื่อ L^* มีค่าน้อย (0) จะมีความสว่างน้อย	L^* มีค่ามาก (100) จะมีความสว่างมาก
a^* มีค่าบวก เป็นสีแดง	a^* มีค่าลบ เป็นสีเขียว
b^* มีค่าบวก เป็นสีเหลือง	b^* มีค่าลบ เป็นสีน้ำเงิน

ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์ทางเคมี

ข.1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ (Proximate analysis) ตามวิธีของ AOAC (2005)

1) การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture content)

อบถั่วอะลูมิเนียมสำหรับใส่ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักถั่วอะลูมิเนียม จากนั้นชั่งตัวอย่าง 3-5 กรัม ในถั่วอะลูมิเนียมแล้วบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน นำตัวอย่างในข้อ 3 ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่ คำนวณปริมาณความชื้นได้ดังนี้

$$\text{ความชื้น (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)} - \text{น้ำหนักหลังอบ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)}} \times 100$$

2) การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Crude lipid)

เตรียมตัวอย่างโดยบดละเอียดประมาณ 3-5 กรัม ชั่งน้ำหนัก Thimble ที่อบแห้งแล้ว ตักตัวอย่างที่เตรียมไว้ใน Thimble ประมาณ 3-5 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ใช้สำลีปิด Thimble เพื่อป้องกันตัวอย่างลอย ชั่งและบันทึกน้ำหนักของกระบอกแก้วที่อบแห้งแล้ว (ในโถดูดความชื้น) เท Petroleum ether ลงในกระบอกแก้ว 60 มิลลิลิตร นำ thimble และกระบอกแก้วไปประกอบใส่เครื่องสกัดไขมัน Soxhlet แล้วเปิดน้ำเข้าระบบ condenser เดินเครื่องเพิ่มสกัดไขมัน เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อให้ไขมันถูกสกัดออกมาหมด หยุดสกัดโดยการกดปุ่ม recovery เพื่อให้ ether ระบายออกจากกระบอกแก้วควมแน่นและหยดลงในถังเก็บจนเหลือในกระบอกแก้ว 2-3 มิลลิลิตร (อย่าให้แห้งเพราะจะไหม้) นำกระบอกแก้วพร้อมไขมันเข้าอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ Petroleum ether ระบายออกมาหมด นำกระบอกแก้วพร้อมไขมันมาใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งและบันทึกน้ำหนัก คำนวณปริมาณไขมันได้ดังนี้

$$\text{ไขมัน (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักกระบอกแก้วและไขมันทั้งหมด (กรัม)} - \text{น้ำหนักกระบอกแก้ว (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)}} \times 100$$

3) การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (Crude protein) ตามวิธี Kjeldahl method

ชั่งน้ำหนักตัวอย่างให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอนใส่กระดาศที่ปราศจากไนโตรเจน ประมาณ 0.5-2.2 กรัม พับกระดาศเพื่อห่อตัวอย่างลงใน Kjeldahl Digestion flask เตรียม Blank ควบคุมไปด้วย โดยใส่กระดาศซึ่งสารแต่ไม่ต้องใส่ตัวอย่าง เติมน้ำ Catalyst mixture (anh. CuSO_4 1 ส่วน และ anh. K_2SO_4 20 ส่วน โดยน้ำหนัก) จำนวน 2 กรัม เทกรดซัลฟูริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร โดย ค่อย ๆ เทลง ตัวอย่างที่ติดข้างพลาสติกลงไปด้วย เขย่าอย่างระมัดระวังให้ผสมเข้ากัน นำไปย่อยโดยเครื่องสำหรับย่อย โดยวาง Kjeldahl flask ให้เอียงเล็กน้อย พร้อมทั้งเปิดระบบดูดไอน้ำกรดให้เรียบร้อยก่อนจึงเปิดสวิตซ์ให้ความร้อนต้มให้เดือดเบา ๆ จนกระทั่งไม่มีฟองจึงเพิ่มความร้อนให้สูงขึ้น เขย่าเป็นครั้งคราวย่อยจนส่วนผสมใส (ประมาณ 2 ชั่วโมง) จากนั้นหยุดให้ความร้อนและปล่อยให้เย็นเพื่อรอกการกลั่นต่อไป เตรียมขวดบรรจุกรดบอริก โดยบีเบตสารละลายกรดบอริก 4% w/v ประมาณ 75

มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติม Screen Methyl Red Indicator 4 หยด นำไปต่อเข้ากับเครื่องกลั่นโปรตีน โดยให้ปลายด้าน Condenser จุ่มลงในขวดรูปชมพู่และอยู่ใต้ระดับ สารละลายกรดบอริก เปิดน้ำไหลผ่าน Condenser ในชุดเครื่องกลั่นโปรตีนให้เย็น เติมน้ำกลั่นลงใน ฟลาสก์ จำนวน 400 มิลลิลิตร อย่างระมัดระวัง พยายามชะล้างสารที่อยู่ข้างหลอดให้ไหลลง เติม 50% w/v NaOH 80 มิลลิลิตร แล้วต่อเข้ากับฟลาสก์ Condenser ทันที เปิดสวิทช์ให้ความร้อน ทำ การกลั่นให้ได้ distillate ประมาณ 300 มิลลิลิตร จึงหยุดให้ความร้อน เลื่อนฟลาสก์ออกมาเล็กน้อย ปลดยंत्रไว้สักรูเพื่อปล่อยให้ตัวอย่างที่ตกค้างในปลายท่อไหลออกมาให้หมด ฉีดน้ำกลั่นล้างออกมา ให้หมดและฉีดน้ำกลั่นล้างปลายท่อก่อนนำฟลาสก์ออกมา นำไปไตเตรทหาปริมาณไนโตรเจนกับ กรดซัลฟูริก 0.1 N จะได้จุดยุติสีชมพู (ใช้ Blank เป็นตัวเทียบสี) คำนวณปริมาณโปรตีนได้โดย คำนวณหาไนโตรเจน

$$\text{ไนโตรเจน (ร้อยละ)} = \frac{(S-B) \times 0.014 \times N \times 100}{W}$$

เมื่อ S = ปริมาณกรดที่ใช้ไตเตรทตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
 B = ปริมาณกรดที่ใช้ไตเตรท Blank (มิลลิลิตร)
 N = ความเข้มข้นของสารละลายกรดมาตรฐาน (Normal)
 W = น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)

$$\text{โปรตีน (ร้อยละ)} = \text{ไนโตรเจน (ร้อยละ)} \times \text{ค่าคงที่ (5.95)}$$

4) การวิเคราะห์เยื่อใย (Crude fiber)

ชั่งน้ำหนัก fiber bag ที่ผ่านการอบแห้งแล้ว ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ลงในถุง fiber bag ที่มี spacer แล้วนำถุง fiber bag ดังกล่าวใส่ลงใน carousel ใส่ carousel ดังกล่าวลงใน กระบอกแก้ว เติมสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1.25% w/v 360 มิลลิลิตร. ลงในกระบอกแก้ว ต้ม ย่อยตัวอย่างนาน 30 นาที ล้างด้วยน้ำร้อน 3 ครั้ง เพื่อกำจัดสารละลายกรดซัลฟูริกให้หมด เติม สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.25% w/v 360 มิลลิลิตร. ลงในกระบอกแก้ว ต้มย่อยตัวอย่างนาน 30 นาที ล้างด้วยน้ำร้อน 3 ครั้ง เพื่อล้างโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้หมด ล้างด้วยแอลกอฮอล์ 95% v/v นำตัวอย่างใส่ถ้วย crucible ที่อบและทราบน้ำหนักแน่นอนแล้วนำ crucible ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือ 135 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในตู้ ความชื้นและชั่งน้ำหนัก (A) นำไปเผาในเตาอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้เถ้าสีขาว ทิ้งให้ เย็นในโถดูดความชื้น (B) คำนวณหาปริมาณเยื่อใย (Total Crude Fiber) ได้ดังนี้

$$\text{เยื่อใย (ร้อยละ)} = \frac{(A-B) \times 100}{W}$$

เมื่อ $A =$ น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง+น้ำหนักกากหลังอบแห้งแล้ว
 $B =$ น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง+น้ำหนักกากหลังเผาแล้ว
 $W =$ น้ำหนักตัวอย่างแห้งเริ่มต้น

5) การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Crude ash)

นำถ้วยกระเบื้องไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2-3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่างประมาณ 2-5 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน นำตัวอย่างไปเผาบน hot plate จนหมดควันดำ แล้วจึงนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้เถ้าสีขาว (ใช้เวลาประมาณ 5-8 ชั่วโมง) ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปเผาต่ออีก 30 นาที ทิ้งให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้ง หากน้ำหนักลดลงให้เผาซ้ำจนน้ำหนักคงที่คำนวณเพื่อหาร้อยละเถ้า

$$\text{เถ้า (ร้อยละ)} = \frac{(A-B) \times 100}{W}$$

เมื่อ $A =$ น้ำหนักถ้วยกระเบื้องและเถ้าทั้งหมด
 $B =$ น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง
 $W =$ น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น

6) การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต

$$\text{คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)} = 100 - (\text{โปรตีน} + \text{ไขมัน} + \text{เยื่อใย} + \text{เถ้า} + \text{ความชื้น})$$

ข.2 การวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity, a_w)

ทำการ calibration เครื่องโดยใช้น้ำกลั่น ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ผ่านการบดหรือสับให้ละเอียดประมาณ 3 กรัม โดยต้องให้ตัวอย่างปิดพื้นที่กั้นภาชนะ และให้ปริมาณตัวอย่างอยู่สูงระดับครึ่งของภาชนะที่ใส่ตัวอย่าง เปิดฝาครอบเครื่องวัด water activity โดยเลื่อนคันโยกไปทางขวามือ นำตัวอย่างมาวางในเครื่องวัด water activity เครื่องจะทำการวิเคราะห์ค่าให้อัตโนมัติ จดบันทึกค่าที่ได้

ข.3 การวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส ตามวิธีของ Juliano (1971)

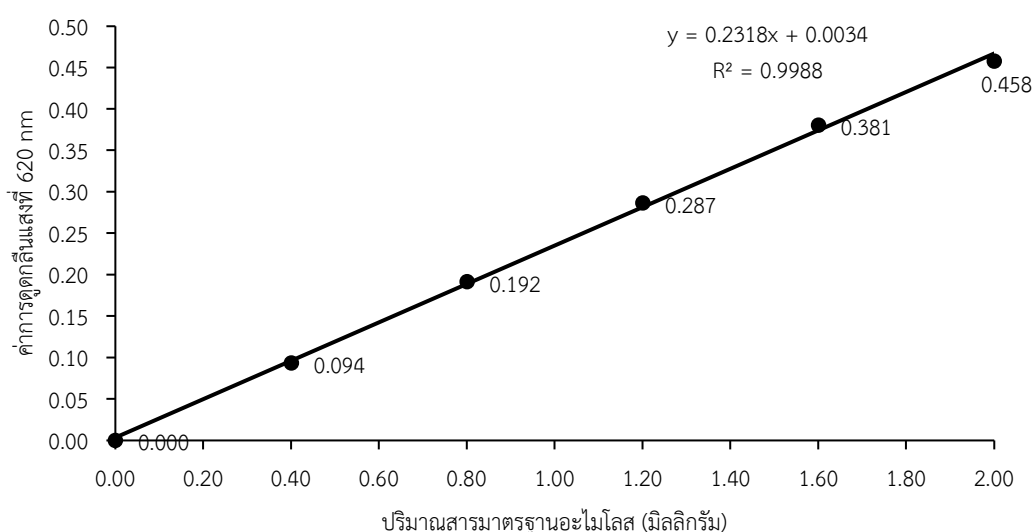
ชั่งตัวอย่างแบ่ง 0.1000 กรัมใส่ใน flask ขนาด 50 มิลลิลิตรที่แห้งสนิท เติมน้ำ 95% Ethanol 1 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ เพื่อเกลี่ยแบ่งให้กระจายออกกระจ่างอย่าให้แบ่งขึ้นมาเกาะตามผนัง ขวด จากนั้นเติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1N จำนวน 9 มิลลิลิตร พร้อมทั้งล้างแบ่งที่เกาะอยู่ ตามผนังขวด นำแบ่งไปให้ความร้อนในอ่างน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็น แล้วถ่ายแบ่ง ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยใช้น้ำล้าง 2-3 ครั้ง เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตร ให้ได้ 100 มิลลิลิตร และผสมให้เข้ากัน ดูดน้ำแบ่งปริมาณ 5 มิลลิลิตร ลงในขวดกำหนดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกรดแอสติกกลั่น (Glacial acetic acid) ความเข้มข้น 1N จำนวน 1 มิลลิลิตร และ

สารละลายไอโอดีนจำนวน 2 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร เขย่า และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที ทำ Blank โดยนำขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร มาเติมกรดแอสติกกลั่นความเข้มข้น 1N ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และเติมสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปรับค่าของ blank เป็น 0 นำค่าการดูดกลืนแสงไปคำนวณหาปริมาณอะไมโลสโดยเทียบกับกราฟมาตรฐานด้วยอะไมโลสบริสุทธิ์

การเขียนกราฟมาตรฐาน (Standard curve) โดยชั่งอะไมโลสบริสุทธิ์ จำนวน 0.0400 กรัม ใส่ในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1N จำนวน 9 มิลลิลิตร พร้อมทั้งล้างแบ่งที่เกาะอยู่ตามผนังขวด นำแบ่งไปให้ ความร้อนในอ่างน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ใช้เป็นสารละลาย มาตรฐาน จากนั้นปิเปตแบ่งสารละลายมาตรฐาน 1, 2, 3, 4, และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมกรดแอสติกกลั่นความเข้มข้น 1N ปริมาณ 0.2.0.4.0.6. 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ลงใน ขวดแก้วที่มีสารละลายมาตรฐานตามลำดับ เติมสารละลายไอโอดีน 2.0 มิลลิลิตร และปรับปริมาตร เป็น 100 มิลลิลิตรด้วยการเติมน้ำกลั่น เขย่าและตั้งทิ้งไว้นาน 20 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร เขียนกราฟ ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายอะไมโลสมาตรฐาน (แกน X) และค่าการดูดกลืนแสง (แกน Y) เพื่อหาความเข้มข้นของ อะไมโลสจากกราฟมาตรฐาน แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณอะไมโลสโดย

ปริมาณอะไมโลส (ร้อยละ)

$$= \frac{\text{ความเข้มข้นที่อ่านได้จากสารละลายอะไมโลสมาตรฐาน (มิลลิกรัม)} \times 100 \times 20}{\text{น้ำหนักแบ่งแห้ง (กรัม)}}$$



ภาพที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของอะไมโลสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ข.4 การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาล ดัดแปลงตามวิธีการของ Englyst et al. (1996) และ Goñi, Garcia-Alonso and Saura-Calixto (1997)

ชั่งตัวอย่างแป้งข้าวกล้อง 0.50 กรัมลงในหลอด centrifuge tube ขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลาย pepsin 10 มิลลิลิตร นำไปอุ่นที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ในเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (water bath shaker) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติม 0.25 mol/L sodium acetate 10 มิลลิลิตร และ glass ball ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm เขย่าด้วย vortex เป็นเวลา 30 วินาที แล้วเติม enzyme mixture 5 มิลลิลิตร นำไปอุ่นที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ในเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นดูดตัวอย่างมา 0.2 มิลลิลิตร แล้วนำไปใส่ใน 66% ethanol 4 มิลลิลิตร เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ นำหลอดตัวอย่างเดิมไปอุ่นที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ในเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ จนกระทั่งครบเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที และทำการดูดตัวอย่างมา 200 ไมโครลิตร แล้วนำไปใส่ใน 66% ethanol 4 มิลลิลิตร

นำตัวอย่างที่ได้มาทำการวิเคราะห์ปริมาณของ D-glucose โดยใช้ D-Glucose Assay Kit (GOPOD-FORMAT) โดยดูดสารละลายตัวอย่าง 0.1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติม GOPOD reagent 3 มิลลิลิตร นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร แล้วทำการคำนวณค่า กลูโคสที่วิเคราะห์ได้ดังนี้

$$\text{D-Glucose (ไมโครกรัม/0.1 มิลลิลิตร)} = \frac{\Delta A_{\text{sample}} \times 100}{\Delta A_{\text{D-glucose (100 ไมโครกรัม)}}$$

เมื่อทำการคำนวณข้างต้นแล้วจะได้ค่าปริมาณน้ำตาลกลูโคส จากนั้นนำค่าปริมาณกลูโคสที่ได้ที่ได้จากการย่อยที่ระยะเวลาต่าง ๆ มาคำนวณหาค่า HI และค่า eGI ได้ โดยหาค่าดัชนีการย่อย (HI) โดยมีวิธีคำนวณ ดังต่อไปนี้

หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่เวลาต่าง ๆ (20-180.นาที) โดยแสดงผลเป็นกราฟ จากกราฟจะได้ค่า C_{∞} , C และ t นำมาแทนในสมการเพื่อหาค่า k ได้ดังนี้

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

โดยที่ C = ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ที่เวลาต่าง ๆ

C_{∞} = ค่าสมมูลของปริมาณน้ำตาลกลูโคส

k = ค่าคงที่ของจลนศาสตร์

t = เวลา (นาที)

จากนั้นหาค่าดัชนีการย่อย (Hydrolysis index, HI) ได้ดังนี้ โดยใช้ 1% D-glucose เป็นตัวอย่างอ้างอิง

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

โดยที่ AUC คือ พื้นที่ใต้กราฟ สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

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

C_{∞} = ค่าสมดุลของปริมาณการย่อยของสตาร์ช

t_f = เวลาสุดท้าย (180 นาที)

t_0 = เวลาเริ่มต้น (0 นาที)

k = ค่าคงที่ของจลนศาสตร์

ค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (Estimate Glycemic Index, eGI) คำนวณได้โดย

$$eGI = 39.71 + (0.549 \times HI)$$

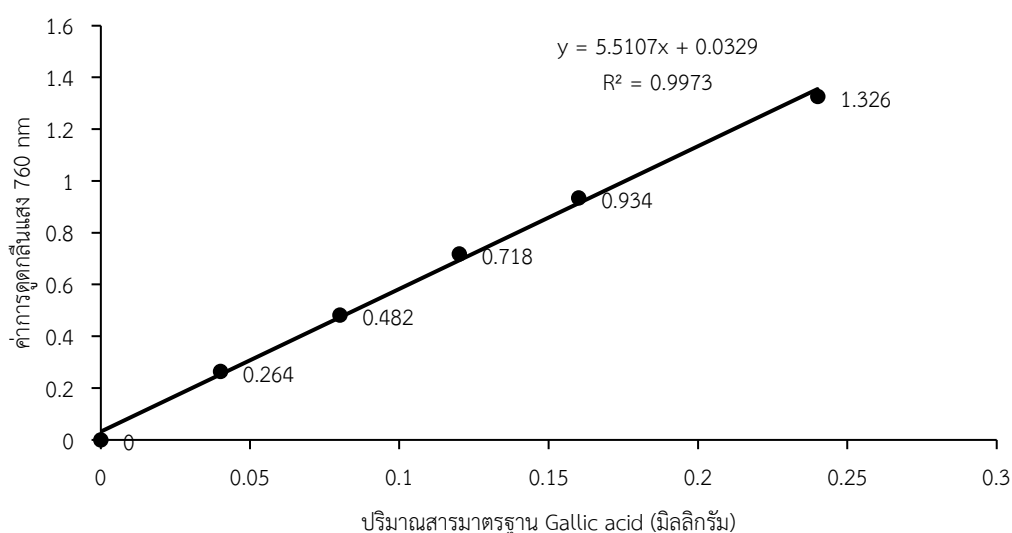
ภาคผนวก ค
สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวกล้องสี

ค.1 การสกัดตัวอย่าง ดัดแปลงตามวิธีการของ Sultan, Wani and Masoodi (2018)

ซึ่งตัวอย่างแป้งข้าวกล้อง 1.0 กรัม นำไปสกัดด้วย 80% Ethanol 25 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยทิ้งไว้ในที่มืด นำไปปั่นเหวี่ยง โดยใช้ความเร็วรอบ 4100 x g อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที นำส่วนใสที่ได้บรรจุในขวดสีชา ทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4-10 องศาเซลเซียส เพื่อรอการวิเคราะห์ (สารสกัดที่สกัดได้ควรเก็บไว้ไม่เกิน 7 วัน)

ค.2 การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ดัดแปลงตามวิธีการของ Thiranusornkij et al. (2018)

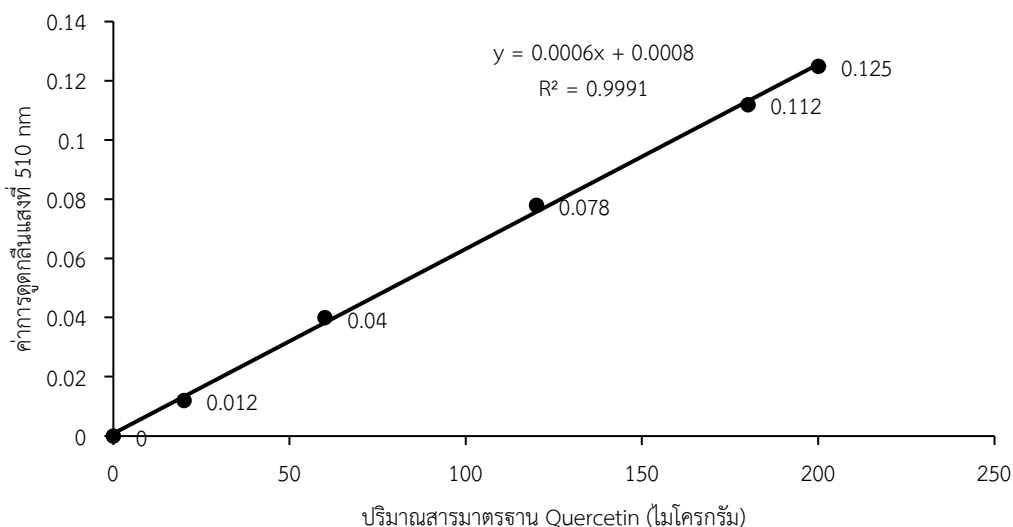
นำสารสกัดที่สกัดได้จำนวน 10 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลาย Folin-Ciocalteu reagent (เจือจาง 10 เท่า และใช้ภายใน 5 นาที) 100 ไมโครลิตร นำไปเขย่าด้วย Vortex meter จากนั้นเติม 1M Na₂CO₃ 80 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 760 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงไปคำนวณหาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด โดยเทียบกับกราฟมาตรฐาน Gallic acid



ภาพที่ ค.1 กราฟมาตรฐานของกรดแกลลิกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ค.3 การวิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด ดัดแปลงตามวิธีของ Pengkumsri et al. (2015)

นำสารสกัดที่สกัดได้จำนวน 500 ไมโครลิตร ผสมกับ 5% Sodium nitrite 150 ไมโครลิตร และน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติม 10% Aluminium chloride hexahydrate solution 150 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 นาที เติม 1M Sodium hydroxide 1 มิลลิลิตร และทำการปรับปริมาตรให้ได้ 5 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 510 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงไปคำนวณหาปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Quercetin



ภาพที่ ค.2 กราฟมาตรฐานของ Quercetin ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ค.4 การวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมด ดัดแปลงตามวิธีของ Sultan, Wani and Masoodi (2018)

เตรียมสารละลาย Buffer pH 1.0 (1.49% KCl) และสารละลาย Buffer pH 4.5 (1.64% Sodium acetate) ที่ปรับค่า pH โดยใช้ HCl นำสารที่สกัดได้ 2 มิลลิลิตร มาปรับด้วยสารละลาย Buffer pH 1.0 และ Buffer pH 4.5 โดยใช้ขวดปรับปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้น นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 520 นาโนเมตร และ 700 นาโนเมตร คำนวณปริมาณแอนโธไซยานินโดย

$$\text{Cyaniding-3-glucoside equivalent (mg/L)} = A \times \text{MW} \times \text{DF} \times 1000 / (\epsilon \times L)$$

เมื่อ A (Absorbance) = (A_{520nm}-A_{700nm}) pH 1.0 - (A_{520nm}-A_{700nm}) pH 4.5

MW = molecular weight ของ cyanidin-3-glucoside (449.2 g/mol),

DF = dilution factor

ϵ = molar absorbance ของ cyanidin-3-glucoside (26, 900 L/ (cm x mol))

L = ความกว้างของ cuvette (1 cm)

1000 = conversion factor from milliliter to liter.

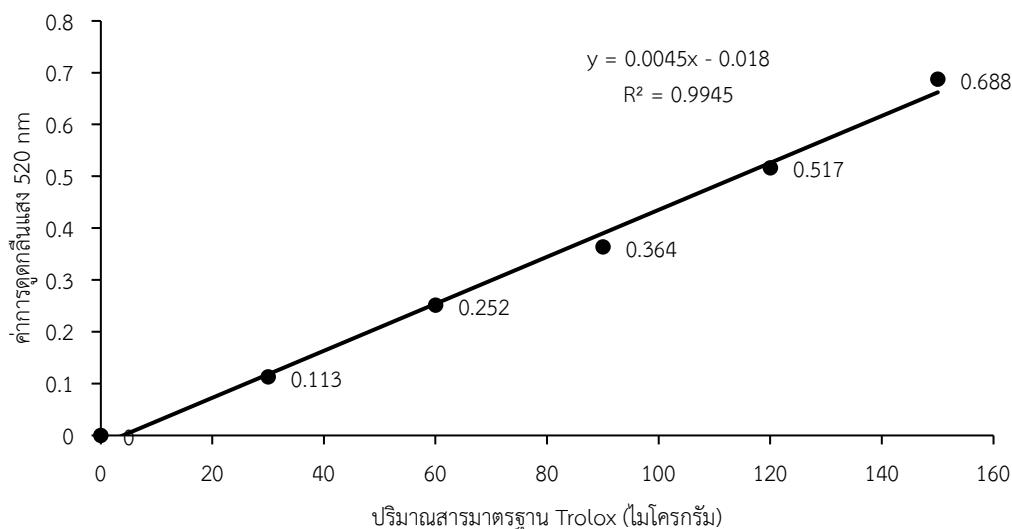
ค.5 การวิเคราะห์ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ

1) วิธี DPPH ดัดแปลงตามวิธีของ Sultan, Wani and Masoodi (2018)

เตรียมสารละลาย DPPH ให้มีความเข้มข้น 6×10^{-5} โมลาร์ ใน 95% ethanol เก็บไว้ในขวดสีชา (ควรเตรียมทันทีก่อนใช้ และเก็บที่ 4 °C)

ดูดสารที่สกัดได้ 1 มิลลิลิตร. ใส่หลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลายของ DPPH ในหลอดทดลองที่มีสารละลายตัวอย่าง 2 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วย vortex ให้สารผสมเข้ากันดี ตั้งทิ้งไว้เป็น

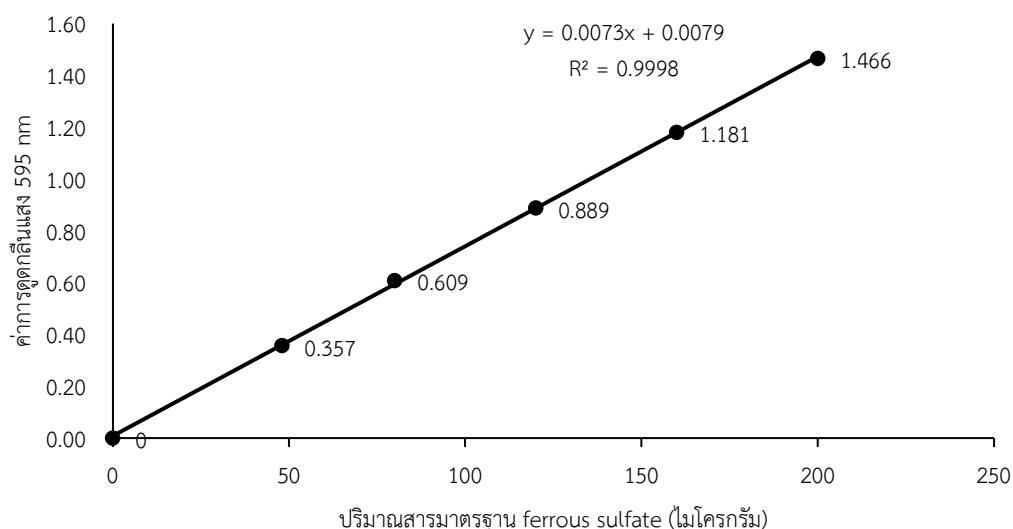
เวลา 30 นาที ในที่มืด จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ทำการคำนวณปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระทั้งหมด โดยนำค่าการดูดกลืนแสงของ blank ลบด้วยค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง คำนวณความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระเทียบกับความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของสารละลายมาตรฐาน Trolox (หน่วยเป็น Trolox equivalent antioxidant capacity: TEAC)



ภาพที่ ค.3 กราฟมาตรฐานของ Trolox ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

2) วิธี FRAP ดัดแปลงตามวิธีการของ Thiranusornkij et al. (2018)

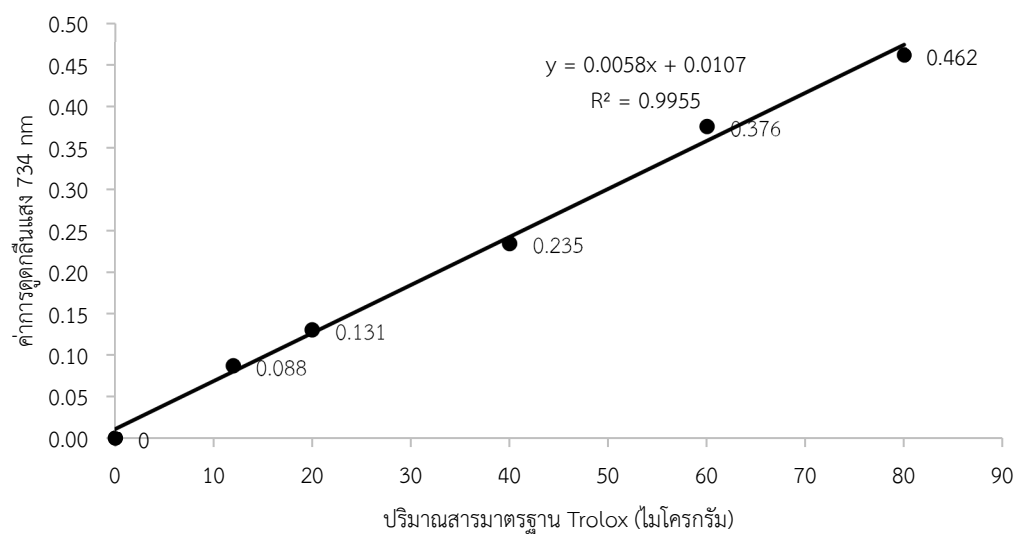
โดยทำการเตรียมสารละลาย FRAP จากสารละลาย Acetate buffer (pH 3.6), TPTZ 10 mM ใน HCl เข้มข้น 40 mM และสารละลาย Ferrous chloride เข้มข้น 20 mM ในอัตราส่วน 10:1:1 (v/v) ตามลำดับ สารละลาย FRAP จะต้องเตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนใช้งาน และนำไปอุ่นในอ่างควบคุมที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะนำมาใช้ ใช้สารสกัดปริมาณ 10 ไมโครลิตร แล้วเติมสารละลาย FRAP ปริมาตร 90 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน เก็บไว้ในที่มืดเป็น ระยะเวลาเวลา 4 นาที นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 595 นาโนเมตร โดยทำการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลาย Ferrous sulfate ที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 100-2000 μM



ภาพที่ ค.4 กราฟมาตรฐานของ Ferrous sulfate ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

3) ABTS assay (2,2'-Azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ดัดแปลงตามวิธีการของ Shen et al. (2009)

เตรียมสารละลาย ABTS cation radical โดยการผสมสารละลาย ABTS 14 mM 5 มิลลิลิตร และ 4.9 mM Potassium persulfate ($K_2S_2O_8$) 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ก่อนใช้น้ำสารละลาย ABTS มาเจือจางด้วยเอทานอลให้มีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 0.700 ที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร จากนั้นปีปตสารละลาย ABTS 950 ไมโครลิตร ผสมกับสารสกัดตัวอย่างหรือสารมาตรฐาน 50 ไมโครลิตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็น blank ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 6 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร โดยใช้ Trolox เป็นชุดควบคุม



ภาพที่ ค.5 กราฟมาตรฐานของ Trolox ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ภาคผนวก ง
การวิเคราะห์สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งข้าวกลีงสี

ง.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

เตรียมแป้งข้าวกล้องสี 5 มิลลิกรัม ใส่เข้าไปใน Aluminium pan แล้วเติมน้ำกลั่น 15 มิลลิกรัม จากนั้นปิดฝา pan ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมงก่อนการวิเคราะห์ตัวอย่างเข้าสู่ภาวะสมดุลหรือเกิดการดูดน้ำสมบูรณ์ เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำตัวอย่างไปวิเคราะห์โดยตั้งโปรแกรมให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วยอัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 30-110 องศาเซลเซียส แล้ววิเคราะห์ค่าสมบัติทางความร้อนของแป้ง คือ ค่าอุณหภูมิเริ่มการเปลี่ยนแปลง (Onset Temperature, T_o) ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสูงสุด (Peak temperature, T_p) และค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสุดท้าย (End temperature, T_e) และค่าเอนทาลปี (Enthalpy, ΔH)

ง.2 การวิเคราะห์สมบัติแป้งเปียก (Pasting properties) โดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA)

ชั่งน้ำหนักแป้ง 3 กรัม (ความชื้นร้อยละ 14) ละลายในน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที โดยควบคุมการให้ความร้อนและการให้ความเย็นภายใต้แรงเหวี่ยงคงที่ โดยเริ่มต้นคงอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที และเพิ่มความร้อนจาก 50-95 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 12 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงไว้ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 2.7 นาที ทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสด้วยอัตราเร็ว 12 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที โดยให้อัตราการหมุนของใบพาย (Paddle) ครั้งแรกที่เริ่มหมุนให้ใบหมุนอย่างรวดเร็วด้วยอัตรา 960 rpm เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อกระจายตัวอย่าง ต่อมาหมุนด้วย เร็วคงที่ 160 rpm ตลอดการวิเคราะห์ และบันทึกค่า Pasting temperature, Peak viscosity, Final viscosity, Breakdown และ Setback ของแป้งข้าวกล้องสี

ง.3 การวิเคราะห์ดัชนีการดูดซับน้ำ (Water absorption index, WAI) และดัชนีการละลาย (Water solubility index, WSI) ตามวิธีการของ Kraithong, Lee and Rawdkuen. (2018)

ละลายแป้งข้าวกล้องสี 1 กรัมในน้ำปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปให้ความร้อน 30 ± 2 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากนั้นนำสารละลายแป้งมาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3000 rpm เป็นเวลา 10 นาที ชั่งน้ำหนักสารละลายส่วนใสและส่วนตะกอนเปียก และนำส่วนใสไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ และคำนวณหาดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลายจาก

$$\text{ดัชนีการดูดซับน้ำ (กรัม/กรัม)} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนหลังการปั่นเหวี่ยง (กรัม)}}{\text{น้ำหนักแป้งแห้ง (กรัม)}}$$

$$\text{ดัชนีการละลาย (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักของส่วนใสทั้งหมดที่ผ่านการทำให้แห้ง (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักแป้งแห้ง (กรัม)}}$$

ง.4 การวิเคราะห์ดัชนีการดูดซับน้ำมัน (Oil absorption index, OAI) ตามวิธีการของ Kraithong, Lee and Rawdkuen. (2018)

นำแป้งข้าวกล้องสี 1 กรัมผสมกับน้ำมันเมล็ดถั่วเหลือง ปริมาตร 10 มิลลิลิตรในหลอด Centrifuge tube ผสมตัวอย่างให้เข้ากันนาน 30 วินาที ด้วยเครื่อง Voltex จากนั้นตั้งสารละลายที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลานำมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4000 rpm เป็นเวลา 20 นาทีด้วยเครื่อง Centrifuge แล้ว คำนวณหาปริมาตรส่วนใส (Supernatant) ที่ได้หลังจากการปั่นเหวี่ยง โดยความสามารถในการดูดซับไขมันของแป้งข้าวกล้องสี คือ ปริมาตรน้ำมัน (มิลลิลิตร) ที่ถูกดูดซับโดยแป้ง 1 กรัม

ง.5 การวิเคราะห์ค่าการพองตัว (Swelling power) และค่าการละลายน้ำ (Water solubility) ดัดแปลงวิธีการของ Thiranusornkij et al. (2019)

นำแป้งข้าวกล้องสี 0.25 กรัม ผสมกับน้ำ 10 มิลลิลิตร จากนั้นให้ความร้อนที่ 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 นาที นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm เป็นเวลา 20 นาทีด้วยเครื่อง Centrifuge น้ำส่วนใสไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่

$$\text{กำลังการพองตัว (กรัม/กรัม)} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนเปียก (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)} \times (100 - \text{ค่าการละลายน้ำ})}$$

$$\text{ค่าการละลายน้ำ (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำหลังอบแห้ง (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)}}$$

ง.6 การวิเคราะห์ความสามารถในการละลายของโปรตีน ดัดแปลงตามวิธีการของ Amagliani et al. (2019)

เตรียมสารละลายแป้งข้าวกล้องสี โดยชั่งแป้งมา 1 กรัมผสมกับ น้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ปรับ pH ของสารละลายแป้งให้ได้ 7 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1N หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1N จากนั้นนำสารละลายแป้งที่ได้ไปทำการปั่นผสมด้วย Magnetic stirrer ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำสารละลายแป้งไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง ความเร็วรอบ 1000g เป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 20 °C จากนั้นนำสารละลายส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์หาไนโตรเจนที่ละลายโดยวิธี Kjeldahl method แล้วคำนวณหาความสามารถในการละลายของโปรตีน

$$\text{การละลายของโปรตีน (ร้อยละ)} = \frac{\text{ปริมาณโปรตีนในสารละลาย (ร้อยละ)} \times 100}{\text{ปริมาณโปรตีนในแป้งข้าวกล้องสี (ร้อยละ)}}$$

ง.7 การวิเคราะห์ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน (Emulsion capacity, EC) และ ความคงตัวของอิมัลชัน (Emulsion stability, ES) ดัดแปลงตามวิธีการของ Sultan, Wani and Masoodi (2018) และ Yasumatsu et al. (1972)

ชั่งแป้งข้าวกล้องสีมา 1 กรัม ละลายกับน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตรและน้ำมันถั่วเหลือง (Soy bean oil) 10 มิลลิลิตร ปั่นผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง homogenizer ความเร็ว 10,000 rpm เป็นเวลา 1 นาที แล้ววัดความสูงของปริมาตรทั้งหมด จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2000g เป็นเวลา 5 นาที แล้วความสูงของชั้นที่เกิดอิมัลชัน (Emulsified layer) คำนวณหาความสามารถในการเกิดอิมัลชันได้โดย

$$\text{ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน (ร้อยละ)} = \frac{\text{ความสูงของชั้นที่เกิดอิมัลชัน} \times 100}{\text{ความสูงของปริมาตรทั้งหมด}}$$

จากนั้นนำอิมัลชันไปให้ความร้อนของที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำมาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2000g เป็นเวลา 5 นาที วัดความสูงของของชั้นที่เกิดอิมัลชันหลังให้ความร้อน แล้วคำนวณหาความคงตัวของอิมัลชัน

$$\text{ความคงตัวของอิมัลชัน (ร้อยละ)} = \frac{\text{ความสูงของชั้นที่เกิดอิมัลชันหลังการให้ความร้อน} \times 100}{\text{ความสูงของชั้นที่เกิดอิมัลชันก่อนให้ความร้อน}}$$

ง.8 การวิเคราะห์ความสามารถในการเกิดโฟม (Foaming capacity, FC) และความคงตัวของโฟม (Foaming stability, FS) ดัดแปลงตามวิธีการของ Sultan, Wani and Masoodi (2018)

นำแป้งข้าวกล้องสี 5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร (5% w/v) แล้วนำมาปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นผสม (Blender) ด้วยความเร็ว (Speed) 2 เป็นเวลา 2 นาที บันทึกปริมาตรก่อนและหลังการตีจนขึ้นฟู แล้วคำนวณหาความสามารถในการเกิดโฟม

$$\text{ความสามารถในการเกิดโฟม (ร้อยละ)} = \frac{(V_{\text{โฟม}} - V_{\text{เริ่มต้น}}) \times 100}{V_{\text{เริ่มต้น}}}$$

เมื่อ $V_{\text{เริ่มต้น}}$ = ปริมาตรสารละลายเริ่มต้น

$V_{\text{โฟม}}$ = ปริมาตรสารละลายหลังตีให้เกิดโฟม

ส่วนค่าความคงตัวของโฟมคำนวณจากปริมาตรของโฟมที่ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยแสดงเป็นร้อยละของปริมาตรโฟมเริ่มต้นแล้วคำนวณหาความคงตัวของโฟม

$$\text{ความคงตัวของโฟม (ร้อยละ)} = \frac{V_{\text{โฟมหลังตีที่ 60 นาที}} \times 100}{V_{\text{เริ่มต้น}}}$$

เมื่อ $V_{\text{เริ่มต้น}}$ = ปริมาตรสารละลายเริ่มต้น

$V_{\text{โฟมหลังตีที่ 60 นาที}}$ = ปริมาตรสารละลายหลังตีให้เกิดโฟม

ง.9 การวิเคราะห์ความคงตัวต่อการละลายและการแช่แข็ง (Freeze–thaw stability) และค่าการสูญเสียน้ำ (Syneresis) ดัดแปลงตามวิธีการของ Katekhong and Charoenrein (2012)

เตรียมสารละลายแป้งข้าวกล้องสี ให้มีความเข้มข้นร้อยละ 12 (น้ำหนักแห้ง) ทำการปั่นผสมด้วย Magnetic stirrer ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความเร็ว 250 rpm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิและปั่นผสมด้วย Magnetic stirrer ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 200 rpm เป็นเวลา 25 นาที จากนั้นรินลงหลอด Centrifuge ขนาด 50 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำหลอด Centrifuge ไปแช่แข็งที่ อุณหภูมิ -20 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำมาละลายที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งถือเป็น 1 รอบการละลายและแช่แข็ง ถ่ายตัวอย่างลงใน syringe ขนาด 20 มิลลิลิตร 15 กรัม ที่รองด้วยกระดาษกรอง (Whatman No. 41) นำไปใส่ในหลอด Centrifuge ขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นเหวี่ยงตัวอย่างด้วยความเร็ว 100g เป็นเวลา 15 นาที แล้ววัดปริมาณน้ำที่ออก (ร้อยละ) หลังจากการปั่นเหวี่ยง ซึ่งวัดทั้งหมด 5 รอบ (Cycle) ส่วนน้ำหนักน้ำที่แยกออกหลังจากการละลาย และแช่แข็งในแต่ละรอบสามารถนำมาคำนวณร้อยละการสูญเสียน้ำ ได้ดังนี้

$$\text{การสูญเสียน้ำ (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำที่แยกออก (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างทั้งหมด (กรัม)}}$$

ภาคผนวก จ
การวิเคราะห์คุณภาพเส้นกวยจั๊บเสริมข้าวกล้อง

จ.1 การวิเคราะห์คุณภาพการต้มสุก ดัดแปลงจาก AACC (2000)

1) ระยะเวลาในการต้มสุก (Cooking time) โดยนำตัวอย่าง 5 กรัม ต้มในน้ำเดือด ประมาณ 200 มิลลิลิตร จับเวลาจนกว่าเส้นจะสุก สังเกตจากการนำกระจกนาฬิกามาส่องจนเส้นกวยจับ มีลักษณะใสขึ้นจนไม่มีไตภายในเส้น ทำการบันทึกเวลา

2) ร้อยละผลผลิตการต้มสุก (%Cooking yield) และร้อยละการดูดซับน้ำ (%Water absorption) ทำได้โดยนำตัวอย่าง 40 กรัม ต้มในน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร ตามระยะเวลาการต้มสุก นำกระจกนาฬิกามาปิดเพื่อป้องกันการระเหยออกของน้ำ จากนั้นกรองตัวอย่างด้วยตะแกรง ทิ้งให้ตัวอย่างสะเด็ดน้ำ นานประมาณ 5 นาที แล้วชั่งน้ำหนัก นำน้ำที่กรองแยกออกจากตัวอย่าง ไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ 5 นาที จากนั้นนำน้ำที่กรองได้จากการวิเคราะห์ร้อยละผลผลิตการต้มสุกและการดูดซับน้ำ ไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอนแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ และคำนวณร้อยละการสูญเสียระหว่างการหุงต้ม (%Cooking loss)

$$\text{ผลผลิตการต้มสุก (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังต้ม (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)}}$$

$$\text{การดูดซับน้ำ (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังต้ม (กรัม)} - \text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)}}$$

$$\text{การสูญเสียหลังจากทำสุก (ร้อยละ)} = \frac{\text{ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักน้ำเริ่มต้น (กรัม)}}$$

จ.2 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (ความเหนียวนุ่ม) โดยใช้เครื่อง Texture analyzer

โดยวัดค่า Hardness และค่า Springiness โดยเตรียมตัวอย่างเส้นกวยจับอุบลที่ต้มสุกแล้วมาพันรอบ test cells ทั้งสองด้าน และกำหนดระยะห่าง 5 เซนติเมตร, test speed 70 mm/min ทำการวัด โดยเครื่องจะทำการวัดจนเส้นกวยจับขาดออกจากกัน

จ.3 การวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (AOAC, 2016)

วิธีการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ ชั่ง Plate count agar 23.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่นร้อน 1 ลิตร หรือต้มด้วยไฟอ่อนจนกระทั่งละลาย บรรจุลงในขวดดูแรนหรือขวดเก็บมีเดีย (Media bottle) หลังจากนั้นนำไปฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งความดัน (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเป็น เวลา 15 นาที

เตรียมสารละลายเจือจางโดยชั่งตัวอย่าง 25 กรัม ซึ่งใช้ช้อนสแตนเลสที่ฆ่าเชื้อแล้วตักใส่ถุงพลาสติกที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วสำหรับใช้ปั่นตัวอย่างด้วยเครื่อง stomacher เติมน้ำ diluent (0.1% peptone water) ลงไป ประมาณ 100 มิลลิลิตร ตีปั่นนาน 1 นาที แล้วเติมน้ำ peptone water ที่เหลืออีก 125 มิลลิลิตร ตีปั่นต่อ อีก 30 วินาที จะได้ dilution 1 : 10 แล้ว ทำ dilution ต่อเป็น 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} ปิเปตสารละลายเจือจางของผลิตภัณฑ์ที่ dilution 10^{-2} 10^{-3} 10^{-4} อย่างละ 1 มิลลิลิตร ใส่ในจานเลี้ยงเชื้อ dilution ละ 3 จาน เท Plate count agar (ที่ 40–45 องศาเซลเซียส)

ลงในจานเลี้ยงเชื้อ ประมาณจานละ 15-20 มิลลิลิตร pour plate แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น นำจานเลี้ยงเชื้อไปบ่มที่ 35 ± 0.5 องศาเซลเซียส นาน 3-2 วัน ตรวจนับจำนวนจุลินทรีย์แล้วรายงานผลเป็นจำนวนโคโลนีต่อผลิตภัณฑ์ 1 กรัม (CFU/ g)

จ.4 การวิเคราะห์ปริมาณยีสต์และรา (AOAC, 2016)

วิธีการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ ชั่ง Potato dextrose agar 39.0 กรัม ละลายในน้ำกลั่นร้อน 1 ลิตร หรือต้มด้วยไฟอ่อนจะกระทั่งละลาย บรรจุลงในขวดดูแรนหรือขวดเก็บมีเดีย (Media bottle) หลังจากนั้นนำไปฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งความดัน (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นปรับ pH ด้วย tartaric acid ที่ปลอดเชื้อ (ความเข้มข้นร้อยละ 10 ปริมาตร 1.6 มิลลิลิตร ต่อ potato dextrose agar 100 มิลลิลิตร จะได้ pH 3.7-4.0) เท potato dextrose agar ลงในจานเลี้ยงเชื้อจานละ 15 - 20 มิลลิลิตร แล้วทิ้งให้แข็งตัว

1) ชั่งตัวอย่าง 25 กรัม ใส่ลงในถุงพลาสติกที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วสำหรับใช้ตีปั่นตัวอย่างด้วยเครื่อง stomacher เติมน้ำ 0.1% peptone water) 225 มิลลิลิตร ตีปั่นนาน 30 วินาที ทำ dilution 10^{-1} 10^{-2} 10^{-3} และ 10^{-4}

2) เทอาหารเลี้ยงเชื้อ potato dextrose agar ที่อุณหภูมิ 42-45 องศาเซลเซียส ใส่ลงในจานเพาะเชื้อ 20 มิลลิลิตร ทิ้งไว้จนอาหารเพาะเชื้อแข็งตัว

3) ปิเปิดตัวอย่างที่ dilution ต่าง ๆ 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในจานเพาะเชื้อ PDA ใช้ spreader จุ่มในแอลกอฮอล์จนไฟแล้วปล่อยให้เย็น จากนั้นเกลี่ยตัวอย่างกระจายตัวไปทั่วผิวน้ำของอาหารเลี้ยงเชื้อ

4) บ่มที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส) 3-5 วัน ตรวจนับจำนวนเชื้อ แล้วรายงานผลเป็นโคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม (CFUs/ g)

จ.5 การวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างของเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูป

นำเส้นกวยจั๊บกึ่งสำเร็จรูปมาทำการตัดให้มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร จากนั้นนำตัวอย่างมาติดตัวอย่างลงใน Stub นำตัวอย่างไปเคลือบทองคำนาน 4 นาที ส่องตัวอย่างด้วยกล้อง SEM ด้วยกำลังไฟฟ้า 10 kv กำลังขยาย 50-200 เท่า แล้วทำการบันทึกภาพ

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวปฐมพร แวว์คุ้ม
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2557-2561 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผลงานทางวิชาการ	Patomporn Waewkum and Jittra Singthong, Effect of Red Jasmine Brown Rice Flour on Quality of Gluten-Free Noodles. Oral presentation in Innovation for future food and nutrition security The 22 nd food innovation Asia conference 2020. 18 – 19 June 2020. Bangkok, Thailand.