

**ผลของระดับการตีข้าวต่อองค์ประกอบทางเคมี ความสามารถในการย่อยได้ของ
แป้งและดัชนีไกลซีมิก**

ลลิตา พยัคฆผล

**เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร**

สิงหาคม 2554

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

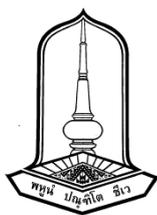
ผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อองค์ประกอบทางเคมี ความสามารถในการย่อยได้ของ
แป้งและดัชนีไกลซีมิก

ลลิตา พยัคฆผล

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร

สิงหาคม 2554

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวลลิตา พย์คัมพล
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....	ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.วัลยา สุทธิขำ)	(กรรมการบัณฑิตศึกษาประจำคณะ)
.....	กรรมการ
(ผศ.ดร.อนุชิตา มุ่งงาม)	(ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์)
.....	กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อังคณา น้อยสุวรรณ)	(กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์)
.....	กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อรอนงค์ ฐาปนพันธ์นิตกุล)	(อาจารย์บัณฑิตศึกษาภายนอกภาควิชา)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(ผศ.ดร.รำไพ เกณฑ์สาธิต)
คณบดีคณะเทคโนโลยี

.....
(รศ.ดร.ไพฑูรย์ สุขศรีงาม)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่.....เดือน..... พ.ศ. 2554

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2553 และทุนวิจัยงบประมาณรายได้ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปี 2554

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชิตา มุ่งงาม ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.อังคณา น้อยสุวรรณ กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลยา สุทธิขำ ประธานกรรมการสอบ อาจารย์ ดร.อรอนงค์ ฐาปนพันธ์นติกุล กรรมการสอบ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและศูนย์เครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ที่ให้คำแนะนำและความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือในการวิจัย

ประโยชน์และคุณค่าจากงานวิจัยนี้ ขอมอบบูชาพระคุณบิดา-มารดา ครู-อาจารย์ ที่อบรมสั่งสอนให้ผู้วิจัยเป็นคนที่มีคุณธรรม

ลลิตา พย์คพพล

ชื่อเรื่อง	ผลของระดับการสีข้าวต่อองค์ประกอบทางเคมี ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก
ผู้วิจัย	นางสาวลลิตา พัทธมพล
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยีการอาหาร
กรรมการควบคุม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชิตา มุ่งงาม อาจารย์ ดร.อังคณา น้อยสุวรรณ
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2554

บทคัดย่อ

ข้าวคือธัญพืชสำคัญและเป็นอาหารหลักของประชากรมากกว่าครึ่งโลก เนื่องจากเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญในการให้พลังงาน โดยทั่วไปข้าวที่นิยมบริโภคเป็นข้าวขาว ได้มาจากการสีข้าวเปลือก (การกะเทาะเปลือกและการขัดขาว) ระดับการสี (Degree of milling; DOM) ขึ้นกับจุดประสงค์ของการสีข้าว ดังนั้น DOM จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของข้าว เช่น โภชนาการ องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ การหุงต้ม และคุณภาพด้านการบริโภค ระดับการขัดสีที่แตกต่างกันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารอาหาร องค์ประกอบทางชีววิทยา เช่น การเปลี่ยนแปลงกิจกรรมของอะไมเลส เปปติเดส และคุณภาพด้านการหุงต้ม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของ DOM ต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง (Starch digestibility; SD) และดัชนีไกลซีมิก (Glycemic index; GI) ของข้าว โดยในการศึกษาครั้งนี้ใช้ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ทำการขัดสีที่ 6 ระดับ ได้แก่ 0 (DOM 0 หรือข้าวกล้อง), 1.75 (DOM 1.75), 4.50 (DOM 4.50), 6.50 (DOM 6.50), 8.50 (DOM 8.50) และ 10.90% (DOM 10.90) ข้าวที่ได้จากการขัดสีนำมาวิเคราะห์ (1) องค์ประกอบทางเคมี (2) คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ได้แก่ ลักษณะเนื้อสัมผัส คุณสมบัติด้านความหนืด และระดับของการเกิดเจลลาตินในเซชัน (3) SD และ GI

ผลการศึกษาพบว่า DOM มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ SD และ GI ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ($p < 0.05$) โดยข้าวกล้อง (DOM 0%) มีปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้า (8.87, 2.92, 1.12 และ 1.42% ตามลำดับ) สูงที่สุด ในทำนองเดียวกันพบว่า DOM มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ($p < 0.05$) โดยข้าวกล้อง (DOM 0%) มีค่าความแข็ง และความเหนียวที่ดี (12.27 และ 2.91N) สูงที่สุด การศึกษาผลของ DOM ต่อคุณสมบัติด้านความหนืด

พบว่าข้าวที่ DOM สูงมีค่าความหนืดสูงสุด และความหนืดต่ำสุด สูงกว่าที่ DOM ต่ำ ส่วนการศึกษา
ระดับของการเกิดเจลาตินในเซชัน พบว่าข้าวที่ DOM 10.90% มีระดับของการเกิดเจลาตินในเซชัน
(96.23%) สูงกว่าข้าวที่ DOM อื่น การศึกษาผลของ DOM ต่อค่า SD และ GI พบว่าข้าวที่ DOM
10.90% มีค่า SD และ GI (64.45 และ 87.22) สูงที่สุด

โดยสรุปเมื่อ DOM เพิ่มขึ้น องค์ประกอบทางเคมีของข้าวจะลดลง และระดับของ
การเกิดเจลาตินในเซชัน SD และ GI เพิ่มขึ้น และในการวิจัยครั้งนี้ ข้าวที่ DOM 1.75% เหมาะสมต่อ
การนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และมีคุณประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภคมากที่สุด
เนื่องจากข้าวหุงสุกที่ DOM 1.75% ให้ข้าวที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่นุ่มมากกว่าข้าวกล้อง (DOM 0%)
และมีปริมาณ โปรตีน ไขมัน และเส้นใยสูงกว่าข้าวที่ DOM อื่น นอกจากนี้ยังพบว่าค่า GI ของข้าว
ที่ DOM 1.75% (78.97) มีค่าใกล้เคียงกับข้าวกล้อง (DOM 0%) (78.15)

คำสำคัญ : ข้าวขาวดอกมะลิ 105; ระดับการสี; เจลาตินในเซชัน; ดัชนีไกลซีมิก

TITLE Effects of Degree of Milling on Chemical Compositions, Starch Digestibility and Glycemic Index of Rice

AUTHOR Miss Lalita Payakkapon

DEGREE Master Degree of Science **MAJOR** Food Technology

COMMITTEE Asst. Prof. Anuchita Moongarm, Ph.D.
Angkana Noisuwan, Ph.D.

UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2011

ABSTRACT

Rice is one of the most important cereals and the staple food of over half the world's population as the primary dietary source of carbohydrate and energy. Generally, rice is consumed as a whole kernel of white rice obtained by milling (dehulling and polishing) of rough rice. The degree of milling (DOM) depends on purposes of milling required. Therefore, DOM is one of the key factors affecting several aspects of rice quality such as nutritional, chemical, physicochemical, cooking, and eating qualities. DOM brought about variations in nutrient contents, biological components such as amylase activities, peptidase activities and cooking quality. This research aimed to investigate the effects of degree of milling (DOM) on the variations of chemical compositions and physicochemical properties, starch digestibility (SD) and glycemic index (GI) of rice. Rough rice of Jasmine rice samples (*Oryza sativa* cultivar Khao Dok Mali 105) were dehusked by a dehusker at six levels of polishing including degree of milling at 0% (DOM 0 or brown rice), 1.75% (DOM 1.75), 4.50% (DOM 4.50), 6.50% (DOM 6.50), 8.50% (DOM 8.50), and 10.90% (DOM 10.90). Milled rice were analyzed for (1) chemical compositions, (2) physicochemical properties namely texture, pasting properties and degree of gelatinization, and (3) SD and GI.

The study found that DOM statistically affected the chemical compositions. Brown rice (DOM 0 rice) indicated the highest level of protein, fat, fiber and ash (8.87, 2.92, 1.12, and 1.42%, respectively). Similar results were obtained in the study on the effect of DOM on physicochemical properties of cooked rice. Brown rice (DOM 0 rice) showed the highest level of hardness and gumminess (12.27 and 2.91N). In the study on the effect of DOM on pasting

properties, higher DOM rice indicated statistically higher level of peak viscosity and holding strength than that of lower DOM rice. For the study of the degree of gelatinization, the DOM 10.90 rice had higher degree of gelatinization (96.23%) than other DOM rice samples. In the investigation on the effect of DOM on SD and GI values, DOM 10.90 rice had the highest level of SD and GI (64.45 and 87.22).

In overall conclusion, the chemical compositions were decreased and the degree of gelatinization, SD, and GI increased with the increasing of DOM. The DOM 1.75% could be applied to food industry and to produce healthy rice due to softer in texture than that of brown rice (DOM 0%) and higher level of protein, fat, and fiber than others. In addition, the GI value of DOM 1.75% (78.97) rice was closed to that of brown rice (DOM 0%) (78.15).

Key Words: Jasmine rice; degree of milling; gelatinization; glycemic index

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพประกอบ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล	5
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว	5
2.1.1 ความหมายของข้าว	5
2.1.2 โครงสร้างของข้าว	5
2.1.3 องค์ประกอบทางเคมี	8
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว	9
2.2.1 ความหมายของสตาร์ช	9
2.2.2 องค์ประกอบของสตาร์ช	9
2.2.3 โครงสร้างของสตาร์ช	12
2.2.4 แป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์	13
2.3 คุณสมบัติของสตาร์ช	14
2.3.1 การเกิดเจลลาคีโนเซชัน	14
2.3.2 คุณสมบัติของแป้งเปียก	16
2.3.3 ความหนืด	17
2.3.4 ลักษณะเนื้อสัมผัสในอาหาร	18
2.4 ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก	20
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก	20
2.6 กระบวนการสีข้าว	22
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	29
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย	38

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	52
5.1 สรุปผล	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	55
เอกสารอ้างอิง	56
ภาคผนวก	61
ภาคผนวก ก	62
ภาคผนวก ข	64
ภาคผนวก ค	66
ภาคผนวก ง	70
ภาคผนวก จ	77
ประวัติย่อผู้วิจัย	93

สารบัญตาราง

		หน้า
ตาราง 2.1	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบของข้าวเปลือกและส่วนที่ได้จากการขัดสีที่ความชื้น 14%	8
ตาราง 4.1	องค์ประกอบทางเคมีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน	40
ตาราง 4.2	แป้งทั้งหมด แป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ และแป้งที่ย่อยได้ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน	42
ตาราง 4.3	องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน	43
ตาราง 4.4	ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับต่างกัน	45
ตาราง 4.5	คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน	47
ตาราง 4.6	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินดัชนีไกลซีมิก	51
ตาราง ข.1	การประเมินระดับของการเกิดเจลลาติโนเซชันด้วยวิธี Differential alkaline solubility ในการสร้างกราฟมาตรฐาน	65
ตาราง ง.1	การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน	71
ตาราง ง.2	การเปรียบเทียบแป้งทั้งหมด แป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ และแป้งที่ย่อยได้ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน	72
ตาราง ง.3	การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน	73
ตาราง ง.4	การเปรียบเทียบคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน	74
ตาราง ง.5	การเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน	75
ตาราง ง.6	การเปรียบเทียบระดับของการเกิดเจลลาติโนเซชันของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน	76
ตาราง ง.7	การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินดัชนีไกลซีมิกของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน	76
ตาราง จ.1	การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อปริมาณโปรตีนของข้าวขาวดอกมะลิ 105	78

	หน้า	
ตาราง จ.2	การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อปริมาณไขมัน ของข้าวขาวดอกมะลิ 105	78
ตาราง จ.3	การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อปริมาณเส้นใย ของข้าวขาวดอกมะลิ 105	79
ตาราง จ.4	การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อปริมาณเถ้า ของข้าวขาวดอกมะลิ 105	79
ตาราง จ.5	การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อปริมาณ คาร์โบไฮเดรตของข้าวขาวดอกมะลิ 105	80
ตาราง จ.6	การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อปริมาณแป้งทั้งหมด ของข้าวขาวดอกมะลิ 105	80
ตาราง จ.7	การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อปริมาณ แป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของข้าวขาวดอกมะลิ 105	81
ตาราง จ.8	การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อปริมาณ แป้งที่ย่อยได้ของข้าวขาวดอกมะลิ 105	81
ตาราง จ.9	การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อปริมาณความชื้น ของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105	82
ตาราง จ.10	การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อปริมาณ โปรตีน ของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105	82
ตาราง จ.11	การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อปริมาณไขมัน ของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105	83
ตาราง จ.12	การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อปริมาณเส้นใย ของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105	83
ตาราง จ.13	การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อปริมาณเถ้า ของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105	84
ตาราง จ.14	การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อปริมาณ คาร์โบไฮเดรตของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105	84
ตาราง จ.15	การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อความแข็งของ ข้าวขาวดอกมะลิ 105	85
ตาราง จ.16	การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อความเกาะติดกัน ของข้าวขาวดอกมะลิ 105	85

	หน้า
ตาราง จ.17 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อความเหนียวติดกัน ของข้าวขาวดอกมะลิ 105	86
ตาราง จ.18 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อความเหนียวติดยึด ของข้าวขาวดอกมะลิ 105	86
ตาราง จ.19 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อการเกี่ยวของ ข้าวขาวดอกมะลิ 105	87
ตาราง จ.20 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อความเหน็ดสูงสุด ของข้าวขาวดอกมะลิ 105	87
ตาราง จ.21 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อความเหน็ดต่ำสุด ของข้าวขาวดอกมะลิ 105	88
ตาราง จ.22 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อผลต่างของ ความเหน็ดสูงสุดกับความเหน็ดต่ำสุดของข้าวขาวดอกมะลิ 105	88
ตาราง จ.23 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อความเหน็ดสุดท้าย ของข้าวขาวดอกมะลิ 105	89
ตาราง จ.24 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อผลต่างของ ความเหน็ดสุดท้ายกับความเหน็ดต่ำสุดของข้าวขาวดอกมะลิ 105	89
ตาราง จ.25 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อระดับของการเกิด เจลลิตีในเซชันของข้าวขาวดอกมะลิ 105	90
ตาราง จ.26 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อค่า C_{∞} ของ ข้าวขาวดอกมะลิ 105	90
ตาราง จ.27 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อค่า k ของ ข้าวขาวดอกมะลิ 105	91
ตาราง จ.28 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อค่า HI ของ ข้าวขาวดอกมะลิ 105	91
ตาราง จ.29 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อค่า GI ของ ข้าวขาวดอกมะลิ 105	92

สารบัญภาพประกอบ

		หน้า
ภาพประกอบ 2.1	องค์ประกอบของเมล็ดข้าว	6
ภาพประกอบ 2.2	โครงสร้างของอะมิโลส	10
ภาพประกอบ 2.3	โครงสร้างของอะมิโลเพกติน	11
ภาพประกอบ 2.4	ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกตินที่ประกอบด้วยสาย A, B และ C	12
ภาพประกอบ 2.5	ระยะในการเกิดเจลาติโนเซชันของเม็ดแป้ง	16
ภาพประกอบ 2.6	ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA	18
ภาพประกอบ 2.7	ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ TPA	19
ภาพประกอบ 4.1	ระดับของการเกิดเจลาติโนเซชันของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน	48
ภาพประกอบ 4.2	แป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน	50
ภาพประกอบ ข.1	กราฟมาตรฐานระดับของการเกิดเจลาติโนเซชันของข้าวขาวดอกมะลิ 105	65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

ข้าวคือธัญพืชสำคัญที่เป็นอาหารหลักของประชากรมากกว่าครึ่ง โลก เนื่องจากเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญในการให้พลังงานและสารอาหาร (Hu et al., 2004) ข้าวมีปริมาณแป้งสูง (Denardin et al., 2007) และส่วนใหญ่เป็นแป้งที่ถูกย่อยและดูดซึมได้อย่างรวดเร็วหลังการบริโภค ข้าวจึงส่งผลให้ระดับน้ำตาลในเลือดสูงอย่างรวดเร็ว ระดับน้ำตาลมีบทบาทสำคัญต่อผู้บริโภคที่มีความเสี่ยงในการเกิดโรคเบาหวานหรือผู้บริโภคที่เป็นโรคเบาหวาน โดยทั่วไปข้าวขาวที่นิยมบริโภคมีค่าดัชนีไกลซีมิกสูง (>70%) (Frei et al., 2003; Hu et al., 2004) ดัชนีไกลซีมิก (Glycemic index; GI) ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น พันธุ์ข้าว อัตราส่วนของอะมิโลสต่ออะมิโลเพกติน คุณสมบัติทางเคมี ขนาดของโมเลกุล การจับกันของสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน การจับกันระหว่างโปรตีนและไขมัน ตัวยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (Goni et al., 1997) รวมถึงการแปรรูปขั้นต้น เช่น การสีข้าว แม้ว่าการสีข้าวจะมีผลต่อการย่อยได้ของแป้ง (Starch digestibility; SD) และ GI ของข้าว แต่พบว่าการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับผลของระดับการสี (Degree of milling; DOM) ข้าวต่อ SD และ GI ของข้าวยังมีอยู่น้อยมาก การสีข้าวเป็นการแปรรูปพื้นฐานก่อนนำข้าวไปบริโภคและแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ ต่อไป ทั้งนี้การสีข้าวเป็นการกะเทาะเปลือก (แกลบ) และขัดชั้นรำออกไปจากส่วนของเนื้อข้าว ระดับการขัดสีเอ้าชั้นรำออกขึ้นกับจุดประสงค์ของการสีข้าว ว่าต้องการข้าวชนิดใด เช่น ข้าวกล้อง หรือข้าวขาว (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550) ระดับการขัดสีที่แตกต่างกันทำให้ปริมาณสารอาหารต่างๆ ในข้าว เช่น โปรตีน ไขมัน วิตามินและเส้นใยอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยา เช่น การเปลี่ยนแปลงกิจกรรมของอะไมเลส เปปติเดส รวมถึงมีผลต่อคุณภาพด้านการบริโภค เช่น ความแข็งและความเหนียวของข้าว นอกจากนี้ยังมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของข้าว เช่น อุณหภูมิในการเกิดเจลาตินไนซ์ของแป้งในข้าว (Tran et al., 2004; Mohapatra and Bal., 2007) การเปลี่ยนแปลงต่างๆ เหล่านี้สามารถเกิดได้มากหรือน้อยขึ้นกับระดับการขัดสีข้าว นอกจากนี้ DOM ข้าวอาจมีผลต่อ SD และ GI ของข้าวด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อศึกษาถึงผลของ DOM ต่อองค์ประกอบทางเคมี SD และ GI ของข้าว ทั้งนี้ข้าวที่ไม่ผ่านการขัดสีหรือข้าวกล้องเป็นข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีสารออกฤทธิ์ชีวภาพที่มีผลดีต่อสุขภาพ

หลายชนิด แต่คุณภาพด้านการบริโภคและด้านการหุงยังไม่เป็นที่น่าพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวขาวที่ขัดสีพิเศษ ในขณะที่ข้าวขัดขาวก็มีคุณค่าทางโภชนาการน้อยกว่าข้าวกล้อง ผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับธุรกิจโรงสีและการสีข้าวเพื่อผลิตข้าวที่มีคุณภาพเหมาะสมทั้งในเชิงโภชนาการ การใช้เป็นอาหารสุขภาพและคุณภาพด้านการหุงต้มและการบริโภค เป็นการเพิ่มคุณค่าและมูลค่าให้กับข้าวโดยผ่านการแปรรูปเพียงเล็กน้อย คือการขัดสีในระดับที่เหมาะสม

1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของระดับการสีข้าวต่อองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไบโอมัน เส้นใย เถ้า คาร์โบไฮเดรต แป้งทั้งหมด และแป้งที่ทนทานต่อการย่อยของข้าวขาวดอกมะลิ 105

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของระดับการสีข้าวต่อคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ได้แก่ ลักษณะเนื้อสัมผัส คุณสมบัติด้านความหนืด และระดับของการเกิดเจลลาติโนเซชันของข้าวขาวดอกมะลิ 105

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของระดับการสีข้าวต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าวขาวดอกมะลิ 105

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

1.3.1 ระดับการสีข้าวที่ต่างกันส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมีของข้าวแตกต่างกัน

1.3.2 ระดับการสีข้าวที่ต่างกันส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวแตกต่างกัน

1.3.3 ระดับการสีข้าวที่ต่างกันส่งผลให้คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของข้าวแตกต่างกัน

1.3.4 ระดับการสีข้าวที่ต่างกันส่งผลให้การย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าวแตกต่างกัน

1.4 ความสำคัญของงานวิจัย

1.4.1 ทราบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของข้าวขาวดอกมะลิ 105

1.4.2 ทราบถึงการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าวที่ได้จากการสีในระดับการสีข้าวที่ต่างกัน

1.4.3 ทราบถึงผลของระดับการสีข้าวต่อองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ และแป้งที่ย่อยได้และดัชนีไกลซีมิกของข้าว ทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่เพื่อพัฒนาระดับการสีข้าวที่เหมาะสม ซึ่งเป็นทางเลือกและประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภคให้หันมาสนใจเรื่องข้าวมากขึ้น เนื่องจากข้าวเป็นอาหารหลักและเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของมนุษย์ รวมทั้งเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้ต่อไป

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ในการวิจัยครั้งนี้ใช้ตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากอำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม นำมาขัดชั้นร้าวออกที่ระดับการสีต่างๆ จากนั้นนำข้าวตัวอย่างและรำข้าวที่ได้จากแต่ละระดับการสีไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ การย่อยได้ของแป้ง และดัชนีไกลซีมิกของข้าวตัวอย่าง

1.5.2 ศึกษาการระดับการสีข้าวในระดับต่างๆ ที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ การย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก

ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่

1) ตัวแปรอิสระ

ระดับการสีข้าวซึ่งแบ่งเป็น 6 ระดับ คือ 0 (ข้าวกล้อง), 1.75, 4.50, 6.50, 8.50 และ 10.90% (ข้าวขาว) โดยวัดปริมาณน้ำหนักของข้าวที่ลดลง

2) ตัวแปรตาม

- (1) ปริมาณโปรตีน (Protein content)
- (2) ปริมาณไขมัน (Fat content)
- (3) ปริมาณเส้นใย (Fiber content)
- (4) ปริมาณแป้งทั้งหมด (Total Starch content; TS)
- (5) ปริมาณแป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant Starch; RS)
- (6) ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก (Texture characteristics)
- (7) คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้ง (Pasting properties)
- (8) ระดับของการเกิดเจลาตินในเซชัน (Degree of gelatinization)
- (9) ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง (Starch digestibility; SD)
- (10) ดัชนีไกลซีมิก (Glycemic Index; GI)

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.6.1 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (Khao Dok Mali 105) คือเมล็ดพืชในตระกูลหญ้า จัดอยู่ในวงศ์ Gramineae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa* L. มีรูปร่างยาวเรียวยาว ข้าวสุก เมื่อหุงสุกแล้วจะมีลักษณะนุ่มและมีกลิ่นหอม (ไสว พงษ์เก่า และคณะ, 2525)

1.6.2 ระดับการสี (Degree of milling; DOM) คือความหนักเบาหรือมากน้อยในการขัดข้าวกล้องให้เป็นข้าวสาร โดยวัดจากปริมาณรำที่ถูกขัดออกในระหว่างกระบวนการขัดสี สิ่งที่ได้จากการขัด คือรำ คัพพะ และส่วนของเนื้อเมล็ด (Saleh and Meullenet, 2007; อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)

1.6.3 ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง (Starch digestibility; SD) คือการย่อยได้ของแป้งโดยเอนไซม์ในลำไส้เล็กของร่างกาย โดยการย่อยได้ของแป้งขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่มีอยู่ในอาหารแต่ละชนิด ซึ่งส่งผลต่อค่าดัชนีไกลซีมิก (Frei et al., 2003; Chung et al., 2007)

1.6.4 ดัชนีไกลซีมิก (Glycemic index; GI) คือดัชนีที่ใช้ในการประเมินระดับน้ำตาลกลูโคสในเลือดหลังจากการบริโภคอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต โดยเปรียบเทียบกับอาหารหรือสารมาตรฐาน คือขนมปังขาวหรือกลูโคส ซึ่งมีค่าดัชนีไกลซีมิกเท่ากับ 100 (Goni et al., 1997; Frei et al., 2003)

1.6.5 สตาร์ช (Starch) คือคาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสิ่งเจือปน หมายถึง โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ จะถูกสกัดออกไปจนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

1.6.6 แป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant starch) คือแป้งและผลิตภัณฑ์ของแป้งที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารและไม่สามารถดูดซึมภายในลำไส้เล็กของมนุษย์ได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

1.6.7 อะมิโลส (Amylose) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นของดีกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก ชนิดแอลฟา 1-4 และชนิดแอลฟา 1-6 (Vandeputte and Delcour, 2004) เมื่อรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะมิโลส (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

1.6.8 เส้นใย (Fiber) คือสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่ง มีโมเลกุลขนาดใหญ่และซับซ้อน ไม่ถูกย่อยโดยเอนไซม์ในร่างกายมนุษย์ แต่อาจถูกย่อยโดยจุลินทรีย์บางชนิดในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เส้นใยอาหารที่ละลายในน้ำ และเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายในน้ำ พบได้ในถั่วเมล็ดแห้ง ข้าวซ้อมมือ รำข้าว ผักและผลไม้ (นิธิยา รัตนปานนท์, 2549)

บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว

2.1.1 ความหมายของข้าว

ข้าวเป็นอาหารหลักของประชากรในหลายประเทศ เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต พื้นฐาน มีบทบาทที่สำคัญในการให้พลังงานและสารอาหาร ข้าวเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวตระกูลหญ้า มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa* L. อยู่ในวงศ์ Gramineae ปลูกในทวีปเอเชียเป็นส่วนใหญ่ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)

2.1.2 โครงสร้างของข้าว

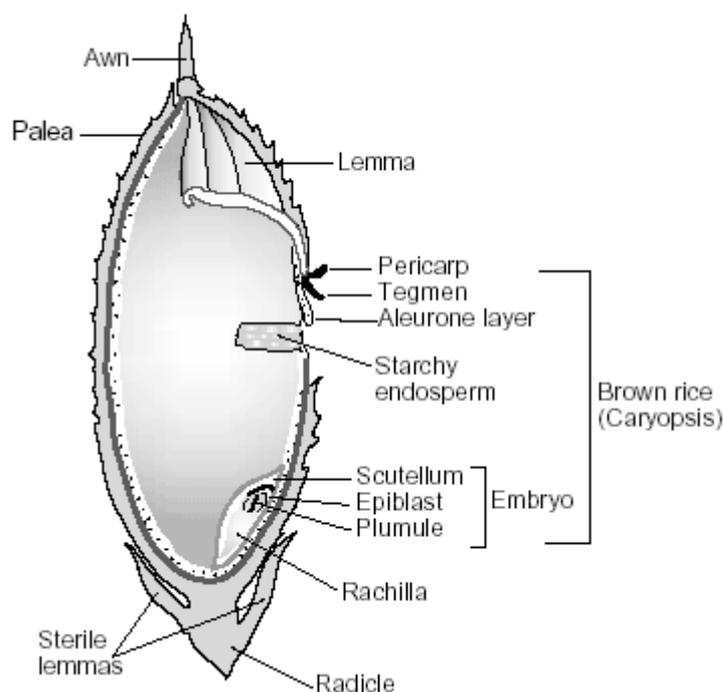
ข้าวเป็นคำทั่วไปที่ใช้เรียกเมล็ดข้าว ซึ่งทางพฤกษศาสตร์หมายถึง ผลที่มีลักษณะเป็นผลเดี่ยว เกิดจากรังไข่อันเดียวชนิดลอยตัวของดอกเดี่ยวในแต่ละดอกย่อย ที่เกิดรวมกันอยู่เป็นช่อดอก ผลเดี่ยวนี้จะติดแน่นอยู่กับผนังรังไข่ หรือเยื่อหุ้มผล (Pericarp) ซึ่งเมื่อผลสุกหรือแก่จะเป็นผลแห้งที่ไม่แตก เรียกว่าเมล็ด (Caryopsis grain) ที่มีเยื่อหุ้มผล และเปลือกหุ้มเมล็ดเชื่อมรวมกันอย่างแนบแน่น โดยตลอดผลหรือเมล็ดข้าวจะมีลักษณะแตกต่างกันตามสายพันธุ์ในด้านขนาด รูปร่าง สี การมีหาง (Awn) หรือไม่มีหางและขน หรือไม่มีขนบนเปลือกแข็ง

เมล็ดข้าวประกอบด้วย 2 ส่วน หลัก คือ (1) ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดขาว (หรือผล) เรียกว่า แกลบ (hull หรือ husk) และ (2) ส่วนเนื้อผล หรือผลแท้ (True fruit หรือ Caryopsis grain) หรือข้าวกล้อง (Caryopsis หรือ Brown rice) โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วนดังนี้

1) แกลบ ประกอบด้วย เปลือกใหญ่ (Lemma) เปลือกเล็ก (Palea) ขน หาง ข้าว เมล็ด (Rachilla) และกลีบรองเมล็ด (Strile lemmas) ซึ่งเชื่อมต่อกับก้าน (Pedicel)

(1) เปลือกใหญ่เป็นเปลือกหุ้มเนื้อผลด้านท้องมีขนาดใหญ่อาจมีหาง หรือไม่มีก็ได้ ลักษณะของเปลือกใหญ่จะมีรอยเส้นตามความยาวของเปลือกประมาณ 5 เส้น เปลือกใหญ่จะห่อหุ้มเปลือกเล็กไว้ทั้งสองด้านในลักษณะขบอยู่ด้านบนอย่างแน่นสนิทประมาณ 2/3 ของเปลือกทั้งหมดตามแนวยาวของเมล็ด

(2) เปลือกเล็กเป็นเปลือกหุ้มเนื้อผลด้านหลังที่มีขนาดเล็กกว่าเปลือกใหญ่ประมาณ 1/3 ของเปลือกทั้งหมด จะขบอยู่ใต้เปลือกใหญ่ตามแนวยาวทำให้เปลือกทั้งสองติดกันสนิทบนผิวเปลือกเล็กจะเป็นเส้นตามความยาวของเปลือกประมาณ 3 เส้น



ภาพประกอบ 2.1 องค์ประกอบของเมล็ดข้าว

ที่มา: Kennedy et al., 2002

รอยเส้นบนเปลือกใหญ่และเปลือกเล็ก อาจทำให้ข้าวกลิ้งเป็นรอยเส้นตามไปด้วย ในข้าวบางพันธุ์ถึงแม้จะผ่านกระบวนการขัดขาวแล้วยังอาจมีรอยเส้นค้างอยู่บนข้าวขาว เรียกว่าสาแหรกข้าว

(3) ขน จะขึ้นบนเปลือกใหญ่และเปลือกเล็กเป็นส่วนใหญ่ อาจมีบางพันธุ์ที่ไม่มีขน แต่เป็นส่วนน้อย ขนนี้ คือส่วนของเซลล์ผิวนอก ที่เจริญกลายเป็นขน เพื่อทำหน้าที่ลดการระเหยของน้ำ ป้องกันอันตรายต่อเมล็ดจากสภาวะภายนอกเมล็ด และเพื่อการกระจายพันธุ์ตามธรรมชาติ โดยช่วยให้เมล็ดติดไปกับคน สัตว์ หรือสิ่งของต่างๆ ที่มีโอกาสสัมผัสเมล็ด จนทำให้เมล็ดหลุดติดไปด้วย

(4) หาง เป็นส่วนปลายของเปลือกใหญ่ ที่ยาวออกมาเกินตำแหน่งยอดดอก ในบางพันธุ์อาจสั้น หรือยาว หรือ ไม่มี ทำหน้าที่ในการกระจายพันธุ์คล้ายขน

(5) ขั้วเมล็ด เป็นก้านสั้น อยู่ระหว่างกลีบรองเมล็ดกับเปลือกใหญ่ และยังคงติดอยู่กับเมล็ดข้าวเปลือก

(6) กลีบรองเมล็ด เป็นกลีบเล็ก 2 กลีบ อยู่ตรงข้ามกัน ใต้สุดของเมล็ด

2) ขี้วกล็อง หรือเนื้อผล ประกอบด้วย

(1) เยื่อหุ้มผล เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอกมีความหนาประมาณ 10 ไมครอน ห่อหุ้มผล อยู่ภายใน มีลักษณะเป็นเซลล์ที่มีผนังเซลล์เส้นใย 6 ชั้น มีสารสีหรือรงควัตถุปนอยู่ ทำให้ขี้วกล็อง มีสีต่างๆ เช่น น้ำตาลอ่อน น้ำตาลแก่ น้ำตาลแดง น้ำตาลม่วง น้ำตาลจนเกือบดำ เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีโปรตีน เสมิเซลลูโลส และเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบสำคัญ ในชั้นเยื่อหุ้มผลนี้แบ่งย่อยได้เป็น 3 ชั้นย่อย คือ

(1.1) เอพิการ์พ หรือเอกโซคาร์พ เป็นผิว หรือผนัง หรือเปลือกที่อยู่นอกสุด มีลักษณะเรียบ เหนียวและเป็นมัน ประกอบด้วยเซลล์ชั้นเดียว

(1.2) เมโซคาร์พ หรือไฮพอเดิร์ม เป็นผนังผลชั้นกลาง

(1.3) เอนโดคาร์พ เป็นเยื่อชั้นใน

(2) เยื่อหุ้มเมล็ด อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผลเข้ามา ประกอบด้วยเซลล์ 2 ชั้น รูปยาว เรียงตามขวาง และมีผนังบางกั้น (หนาประมาณ 0.5 ไมครอน) ภายในเซลล์มีไขมันและสารสี เช่นเดียวกับเยื่อหุ้มผล ทำให้ขี้วกล็องมีสี

(3) นิวเซลลัส เป็นเซลล์ชั้นที่ติดอยู่กับเนื้อเยื่อหุ้มเมล็ด แต่พันชะระหว่าง นิวเซลลัสกับเนื้อเยื่อหุ้มเมล็ดไม่ติดแน่น จึงแยกจากกันได้ง่าย มีความหนาประมาณ 0.8-2.5 ไมครอน

(4) เยื่อชั้นแอลิวโรน (Aleurone layer) เป็นเยื่อชั้นถัดจากเยื่อหุ้มเมล็ด ประกอบด้วยเซลล์ 1-7 ชั้น และมีลักษณะของเยื่อหุ้มด้านหลังของเมล็ดจะหนากว่าเยื่อหุ้มด้านท้อง ซึ่งความหนานี้จะแตกต่างตามพันธุ์ข้าว เช่น ข้าวเมล็ดป้อม-สั้น จะมีเยื่อชั้นแอลิวโรนหนากว่า ข้าวเมล็ดยาว เป็นต้น เซลล์แอลิวโรนจะไม่เชื่อมติดกับคัพภะในส่วนของใบเลี้ยงด้านท้องของเมล็ด ลงมาถึงจุดเชื่อมระหว่างใบเลี้ยงกับเยื่อหุ้มรากอ่อน ซึ่งอยู่ข้างในของเมล็ด จึงแบ่งลักษณะของเซลล์ แอลิวโรนเป็น 2 ลักษณะ คือ เซลล์ส่วนที่ห่อหุ้มเนื้อของเมล็ดจะมีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ และมีไซโทพลาสซึม อยู่อย่างหนาแน่น ในเซลล์ยังมีกลุ่มโปรตีนที่มีรูปร่าง (Protein bodies) กลุ่มไขมัน (Lipid bodies) และสารอื่นๆ เช่น นิวเคลียส ไมโทคอนเดรีย เอนโดพลาสมิกเรติคูลัม เวสิเคิล และพลาสทิด เป็นต้น ส่วนเซลล์แอลิวโรนที่ห่อหุ้มคัพภะจะบาง มีไซโทพลาสซึมน้อย รูปร่างยาว มีกลุ่มไขมันและกลุ่มโปรตีนน้อย มีเวสิเคิลมาก เป็นต้น ส่วนผนัง เซลล์จะมีโปรตีน เสมิเซลลูโลส และเซลลูโลสประกอบอยู่

(5) คัพภะ หรือเชื้อชีวิต จะอยู่ที่โคนเมล็ดด้านเปลือกใหญ่ ส่วนท้องของเมล็ด มีส่วนประกอบเป็นรากอ่อน (Radicle) ต้นอ่อน (Plumule) เยื่อหุ้มรากอ่อน (Coleorhize) เยื่อหุ้มต้นอ่อน (Coleoptile) ท่อน้ำที่อาหาร (Epiblast) และใบเลี้ยง (Scutellum) ซึ่งเป็นใบเลี้ยงเดี่ยว คัพภะเป็นแหล่งผสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของต้นอ่อน จึงอุดมด้วยโปรตีนและไขมัน ในส่วนต่างๆ

(6) เนื้อเมล็ด หรือเนื้อข้าว มีมากที่สุด ในเมล็ดข้าว (ประมาณ 80% ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด) แบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนชั้นชั้นแอลิวโรน เป็นเซลล์ 2 ชั้น อยู่ถัดจากชั้นแอลิวโรน และส่วนที่เป็นสตาร์ชในเนื้อของเมล็ด (Starchy endosperm) ในชั้นชั้นแอลิวโรนจะมีกลุ่มโปรตีนอยู่ภายใน 3 ลักษณะ คือลักษณะกลมใหญ่ (ขนาด 1-2 ไมครอน) กลมเล็ก (ขนาด 0.5-0.7 ไมครอน) และเป็นผลึกติดกันขนาด 2-3.5 ไมครอน แต่ในส่วนเนื้อของเมล็ดจะมีกลุ่มโปรตีนในลักษณะกลมใหญ่เท่านั้น แทรกอยู่ในระหว่างเม็ดสตาร์ช มีขนาด 3-9 ไมครอนที่มีอยู่มากอัดแน่นรวมเป็นกลุ่ม เม็ดสตาร์ชอยู่ภายในเซลล์พาราโคมา ที่มีผนังเซลล์บาง มีรูปร่างรี หรือสี่เหลี่ยม เข้าสู่ใจกลางเมล็ด โดยด้านนอกของเมล็ดจะรี และยาวมากกว่าด้านยาวของเมล็ด (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)

2.1.3 องค์ประกอบทางเคมี

เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวเปลือก และส่วนที่ได้จากการกะเทาะข้าวเปลือก ขัดขาว และขัดมัน พบว่าแต่ละส่วนมีองค์ประกอบทางเคมี คือ โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า คาร์โบไฮเดรต และเส้นใยอาหารแตกต่างกัน

ตาราง 2.1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบของข้าวเปลือกและส่วนที่ได้จากการขัดสี ที่ความชื้น 14% (กรัมต่อ 100 กรัม)

ส่วนของข้าว	โปรตีน (กรัม)	ไขมัน (กรัม)	เส้นใย (กรัม)	เถ้า (กรัม)	คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	เส้นใยอาหาร (กรัม)
ข้าวเปลือก	5.8-7.7	1.5-2.3	7.2-10.4	2.9-5.2	64-73	16.4-19.2
ข้าวกล้อง	7.1-8.3	1.6-2.8	0.6-1.0	1.0-1.5	73-87	2.9-3.9
ข้าวสาร	6.3-7.1	0.3-0.5	0.2-0.5	0.3-0.8	77-89	0.7-2.3
รำข้าว	11.3-14.9	15.0-19.7	7.0-11.4	6.6-9.9	34-62	24-29
แกลบ	2.0-2.8	0.3-0.8	34.5-45.9	13.2-21.0	22-34	66-74

ที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2550)

จากตาราง 2.1 แสดงให้เห็นว่าข้าวเปลือก 100 กรัม จะมีโปรตีนประมาณ 5.8-7.7 กรัม ไขมัน 1.5-2.3 กรัม เส้นใย 7.2-10.4 กรัม เถ้า 2.9-5.2 กรัม คาร์โบไฮเดรต 64-73 กรัม และเส้นใยอาหาร 16.4-19.2 กรัม เมื่อกะเทาะเปลือกออกจะได้เป็นข้าวกล้อง ทำให้มีสัดส่วนสารอาหารซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีเพิ่มขึ้น ในปริมาณโปรตีน (7.1-8.3 กรัม) ไขมัน (1.6-2.8 กรัม) และคาร์โบไฮเดรต (73-87 กรัม) แต่ทำให้ปริมาณเส้นใย (0.6-1.0 กรัม) เถ้า (1.0-1.5 กรัม)

และเส้นใยอาหาร (2.9-3.9 กรัม) ลดลง เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้มีมากในแกลบ (เปลือกแข็งหุ้มเมล็ด) ส่วนข้าวสารซึ่งได้จากการขัดขาวมีปริมาณสารอาหาร คือ โปรตีน (6.3-7.1 กรัม) ไขมัน (0.3-0.5 กรัม) เส้นใย (0.2-0.5 กรัม) เถ้า (0.3-0.8 กรัม) เส้นใยอาหาร (0.7-2.3 กรัม) ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้อง เพราะส่วนของเยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด นิวเคลลัส ชั้นแอริวโลน รวมทั้ง คัพพะหลุดออกไป ทำให้เมล็ดข้าวสารมีสีขาวขึ้นและมีปริมาณคาร์โบไฮเดรต (77-89 กรัม) เพิ่มขึ้น สำหรับผลพลอยได้จากการขัดสีข้าวเปลือกที่สำคัญคือ รำข้าว ซึ่งประกอบด้วยรำจากการขัดขาว รำจากการขัดมัน และคัพพะปนอยู่ ทำให้มีสารอาหารซึ่งมีประโยชน์ต่อร่างกายอยู่สูง คือ โปรตีน (11.3-14.9 กรัม) ไขมัน (15.0-19.7 กรัม) เส้นใย (7.0-11.4 กรัม) เถ้า (6.6-9.9 กรัม) เส้นใยอาหาร (24-29 กรัม) แต่มีคาร์โบไฮเดรต (34-62 กรัม) ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวสาร ผลพลอยได้อีกอย่างคือแกลบ (เปลือกแข็งหุ้มเมล็ด) ประกอบด้วยโปรตีน (2.0-2.8 กรัม) ไขมัน (0.3-0.8 กรัม) และ คาร์โบไฮเดรตน้อยที่สุด (22-24 กรัม) ในขณะที่มีเส้นใย (34.5-45.9 กรัม) เถ้า (13.2-21.0 กรัม) และเส้นใยอาหาร (66-74 กรัม) มากที่สุด (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว

2.2.1 ความหมายของสตาร์ช

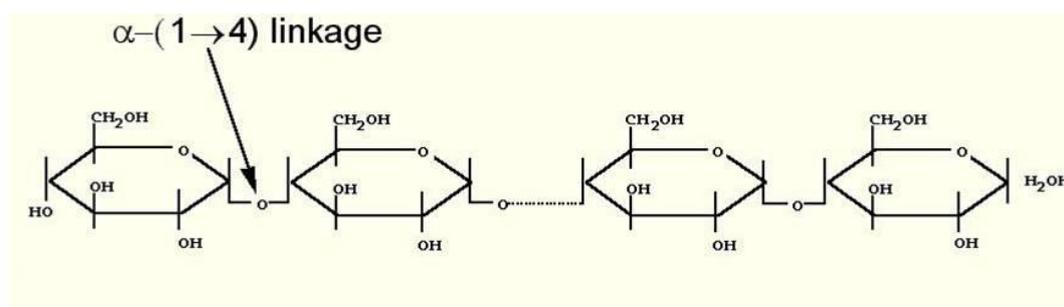
สตาร์ช หมายถึงคาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสิ่งเจือปน หมายถึง โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ จะถูกสกัดออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์ เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่าเป็นแป้งสตาร์ช เช่น สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวสาลี เป็นต้น และเนื่องจาก แป้งสตาร์ช ความบริสุทธิ์สูง แป้งสตาร์ชที่ยังไม่ได้ถูกทำการตัดแปรหรือแปรรูป นิยมเรียกว่าแป้งดิบ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับแป้งที่ถูกตัดแปรหรือแปรรูปแล้ว ที่เรียกว่าสตาร์ชตัดแปรสภาพ (Modified starch) หรือแป้งตัดแปร (กล้านรงค์ ศรีรอต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

2.2.2 องค์ประกอบของสตาร์ช

สตาร์ช เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสมาเชื่อมกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกที่คาร์บอน ตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่าปลายรีดิวซิง (Reducing and group) (กล้านรงค์ ศรีรอต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ประกอบด้วยอะมิโลส 15-20% โดยน้ำหนัก มีโมเลกุลเป็นเส้นตรง ขนาดเล็ก และอะมิโลเพกติน 80-85% โดยน้ำหนัก โมเลกุลเป็นกิ่งก้านขนาดใหญ่ โดยมีหน่วยของกลูโคสมากกว่า 1 ล้านหน่วย (Benmoussa et al., 2007)

1) อะมิโลส

อะมิโลส เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นของดีกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก ชนิดแอลฟา 1-4 และชนิดแอลฟา 1-6 เพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 0.1 %) มีจำนวนระดับของการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of polymerization; DP_n) 920-1,110 (ซึ่งแตกต่างกันเล็กน้อยระหว่างข้าว Indica และ Japonica) และมีจำนวนโมเลกุลสายโซ่ยาว (Chain lengths; CL) 250-370 (Vandeputte and Delcour, 2004) น้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^5 - 10^6 คาลตัน อะมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และไฮโดรคาร์บอน สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายในน้ำ โดยอะมิโลสจะพันเป็นเกลียวรอบสารประกอบอินทรีย์ นอกจากนี้อะมิโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะมิโลส



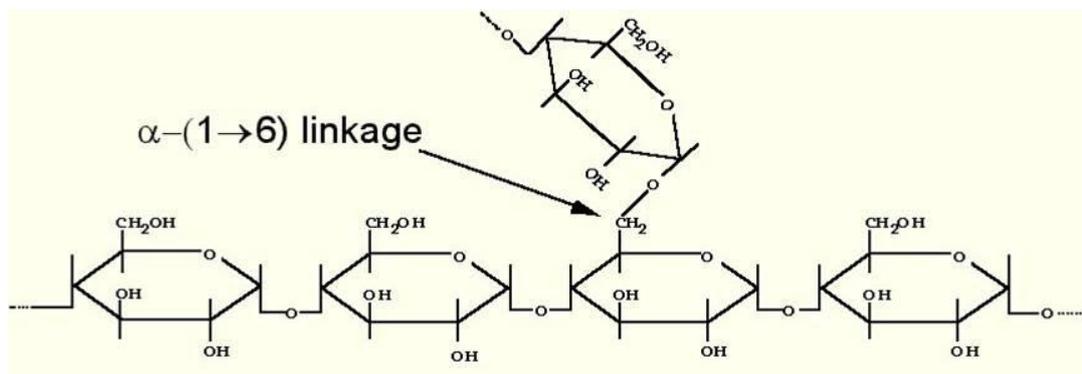
ภาพประกอบ 2.2 โครงสร้างของอะมิโลส

ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546

โครงสร้างของอะมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะมิโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิดอะมิโลสจะอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย อะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6500-160000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็งแรง (Double helix) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6500 หรือมากกว่า 160000 จะมีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

2) อะมิโลเพกติน

อะมิโลเพกติน เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา 1-4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคส สายสั้น มีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 10-60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา 1-6 (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

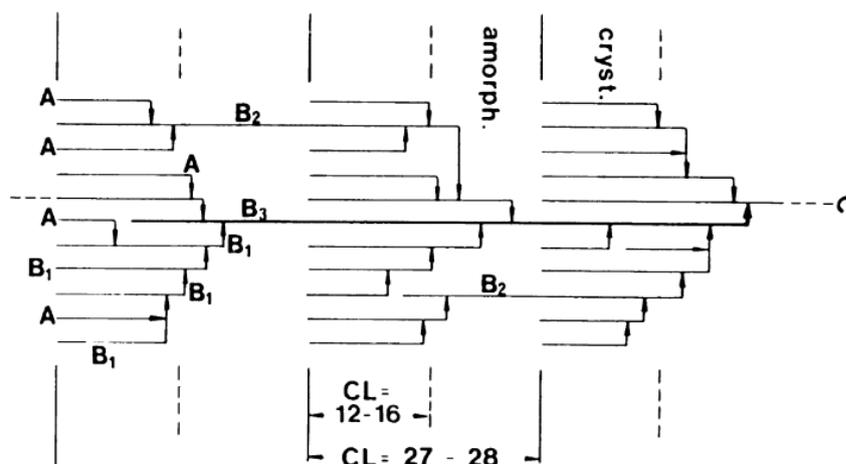


ภาพประกอบ 2.3 โครงสร้างของอะมิโลเพกติน

ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา 1-6 มีอยู่ประมาณ 5-6% ของปริมาณ หน่วยกลูโคสในอะมิโลเพกตินทั้งหมด มีจำนวน DP_n 8,200-12,800 และมีจำนวน CL 19-23 ค่าเฉลี่ยของ โมเลกุลสายยาวภายนอก (External chain lengths; ECL) เท่ากับ 11.3-15.8 และค่าเฉลี่ยของ โมเลกุลสายยาวภายใน (Internal chain lengths; ICL) เท่ากับ 3.2-5.7 เมื่อเปรียบเทียบ DP_n และ CL ระหว่างข้าว Indica และ Japonica พบว่าค่า DP_n ของข้าว Indica ต่ำกว่าข้าว Japonica แต่ CL ของข้าว Indica สูงกว่าข้าว Japonica (Vandeputte and Delcour, 2004) ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกตินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะมิโลเพกตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1000 เท่าของ อะมิโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราในการคินตัวต่ำ เนื่องจากอะมิโลเพกติน มีโครงสร้างเป็นกิ่ง ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกตินประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิด คือ

1. สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียวไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (Unbranched structure)
2. สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สายหรือมากกว่า โครงสร้างของอะมิโลเพกตินประกอบด้วยสาย A และ สาย B ในอัตราส่วน 0.8-0.9:1
3. สาย C (C-chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่อริควิง 1 หมู่ ในอะมิโลเพกตินแต่ละโมเลกุล ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น



ภาพประกอบ 2.4 ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกตินที่ประกอบด้วยสาย A, B และ C
ที่มา: Vandeputte and Delcour, 2004

สำหรับอะมิโลเพกตินของสตาร์ชข้าวเจ้า และข้าวเหนียว สายส่วนใหญ่ประมาณ 80-90% ประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยวๆ และสายที่เหลืออีก 10-20% จะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม ในแต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยสายประมาณ 22-25 สาย ทำให้เกิดเป็นส่วนผลึกของเม็ดแป้ง ในการจับกันเป็นกลุ่มของอะมิโลเพกตินทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ ซึ่งช่วยให้เม็ดแป้งมีความคงทนต่อการทำปฏิกิริยาคัซซิมและเอนไซม์ (กลูโคส 6-ฟอสเฟต, สไตรอติ และเกลือกลูโคส, 2546)

สตาร์ชจากข้าวประกอบด้วยอะมิโลส 7-33% ของน้ำหนักเมล็ดข้าวสาร หรือ 8-37% ของปริมาณสตาร์ชทั้งหมด ส่วนที่มีมาก คืออะมิโลเพกตินซึ่งอาจมีอยู่ในข้าวเหนียวเกือบ 100% แต่การเกาะรวมกันอยู่ของโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพกตินในเม็ดสตาร์ชนั้นมีลักษณะอย่างไร นักวิทยาศาสตร์ยังต้องค้นคว้าวิจัยอีกมาก แต่สันนิษฐานว่าส่วนที่ให้โครงสร้างและเป็นผลึก (Crystallinity) นั้นเกิดจากอะมิโลเพกติน เมื่อนำเม็ดสตาร์ชไปหารูปแบบโดยวิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ เป็นแบบ เอ (A-type) ทั้งข้าวเหนียวและข้าวเจ้า มีองศาของการเกิดผลึกจากรังสีเอกซ์คล้ายคลึงกัน แต่สตาร์ชจากข้าวเจ้าจะมีเส้นทึบกว่าในช่วงดิของมุม $4.37^{\circ}A$ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2538)

2.2.3 โครงสร้างของสตาร์ช

เม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลส และอะมิโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดสตาร์ชเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และส่วนอสัณฐาน (Amorphous) สายโซ่สั้นของอะมิโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ ซึ่งบางส่วนจะเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของ

อะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกติน เม็ดสตาร์ชจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้าเกิดการเรียงตัวหนาแน่นมากจะเกิดเป็นผลึกแบบ A (แบ่งจากรัศมีพีซต่างๆ) ถ้าเรียงตัวกันหลวมๆ จะเกิดผลึกแบบ B (แบ่งจากพีซหัว) ถ้าเกิดการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แบ่งจากพีซตระกูลถั่ว) (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

แหล่งเกิดของสตาร์ชจะอยู่ในเมล็ดสตาร์ชซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดห้าเหลี่ยมขนาด 3-9 ไมโครเมตร รวมกันอยู่เป็นกลุ่มภายในอะมิโลพลาสต์ (Amyloplast) ที่มีลักษณะกลมหรือรี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7-39 ไมโครเมตร โดยภายในแต่ละอะมิโลพลาสต์ที่มีเม็ดสตาร์ชเกาะรวมกันอยู่ประมาณ 20-26 เม็ด และระหว่างเม็ดสตาร์ชจะมีกลุ่มโปรตีนแทรกอยู่เห็นเป็นร่องบนเม็ดสตาร์ช (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2538)

2.2.4 แป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์

แป้งที่ทนทานต่อการย่อย (Resistant Starch; RS) หมายถึงแป้งและผลิตภัณฑ์ของแป้งที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารและไม่สามารถดูดซึมภายในลำไส้เล็กของมนุษย์ได้ (European FLAIR-Concerted Action on Resistant Starch)

แป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ แต่เป็นส่วนน้อย โดยเม็ดแป้งจะถูกห่อหุ้มอยู่ภายในร่างแหของโปรตีน หรือถูกตรึงอยู่ภายในเซลล์หุ้มเมล็ดพืช ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในเม็ดแป้งได้ ส่วนใหญ่แป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ จะได้จากการตัดแปรแป้งโดยวิธีการต่างๆ ดังนี้

1) การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง โดยการให้ความร้อนแก่น้ำแป้ง เพื่อให้แป้งสุกแล้วทิ้งให้น้ำแป้งเย็นตัวลง โมเลกุลของแป้งที่ละลายออกมาจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ได้เป็นผลึกแป้งที่แข็งแรงและสามารถถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์น้อยลง อาจทำการย่อยส่วนของโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึกอีก ด้วยเอนไซม์หรือกรด เพื่อลดปริมาณการย่อยของเอนไซม์ นิยมใช้กับแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูง

2) การใช้เอนไซม์ในการย่อยแป้งเพื่อช่วยเพิ่มอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชัน เช่น การใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส เพื่อลดขนาดโมเลกุลของแป้ง ได้เป็นมอลโทเดกซ์ทรินชนิดที่มีระดับการย่อยต่ำ การใช้เอนไซม์ตัดพันธะกิ่ง เป็นต้น เป็นการเพิ่มศักยภาพในการเตรียม RS จากแป้งชนิดอื่นที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ

3) การใช้กระบวนการความร้อนชื้น (heat-moisture treatment) เป็นการเตรียมแป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของเม็ดแป้งที่ยังไม่ผ่านการทำให้สุกและมีความชื้นประมาณ 20-45% นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90-120°C นานประมาณ 1-4 ชั่วโมง มีผลทำให้เม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงและจัดเรียงโครงสร้างภายในที่ทนทานต่อการย่อยของเอนไซม์ได้มากขึ้น

4) การใช้สารเคมีในการทำแป็งตัดแปร เช่น acetylated, แป็ง hydroxypropylated และแป็ง cross-linked เป็นต้น

เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญของ RS คือ ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้โดยเอนไซม์ในลำไส้เล็ก ดังนั้น RS จึงมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับเส้นใยอาหาร ซึ่งมีประโยชน์ต่อระบบการขับถ่าย และระบบหมุนเวียนเลือด โดย RS ที่ไม่ถูกย่อยโดยเอนไซม์ในลำไส้เล็ก จะผ่านมาถึงส่วนของลำไส้ใหญ่ และถูกหมักโดยจุลินทรีย์ภายในลำไส้ใหญ่ ได้เป็นกรดไขมันสายสั้นๆ เช่น แอซีเตท โพรพิโอเนท และบิวไทเรท และมีก๊าซเกิดร่วมออกมาด้วย กรดไขมันทั้งสามชนิดที่เกิดจะมีสัดส่วนแตกต่างกันไปตามชนิดของ RS และสามารถถูกดูดซึมภายในลำไส้ใหญ่และขนส่งไปถึงตับได้ กรดไขมันที่เกิดขึ้นจะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค เพิ่มปริมาณของเหลว และปรับสภาวะความเป็นกรด-ด่าง ภายในลำไส้ใหญ่ให้ต่ำลง บิวไทเรทที่สร้างขึ้นจะช่วยปรับสภาวะตอนปลายของลำไส้ใหญ่ให้สมบูรณ์ ยับยั้งการเจริญของเซลล์ที่ผิดปกติในสิ่งมีชีวิต ซึ่งจะมีบทบาทในการป้องกันมะเร็งลำไส้ใหญ่ได้ การเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหารในอาหารที่บริโภคเข้าไปจะทำให้ระบบขับถ่ายทำงานได้ดีขึ้น โดยช่วยเพิ่มปริมาณอุจจาระ เพิ่มความถี่ในการขับถ่าย และลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคท้องผูก โรคผนังลำไส้ใหญ่อักเสบและมะเร็งในลำไส้ใหญ่ นอกจากนี้การบริโภค RS หรือเส้นใยอาหาร จะช่วยป้องกันหรือลดภาวะโรคอ้วน และมีบทบาทในการลดปริมาณคอเลสเตอรอลในเส้นเลือด ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด โรคหัวใจ และโรคเบาหวานอีกด้วย (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

2.3 คุณสมบัติของสตาร์ช

2.3.1 การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

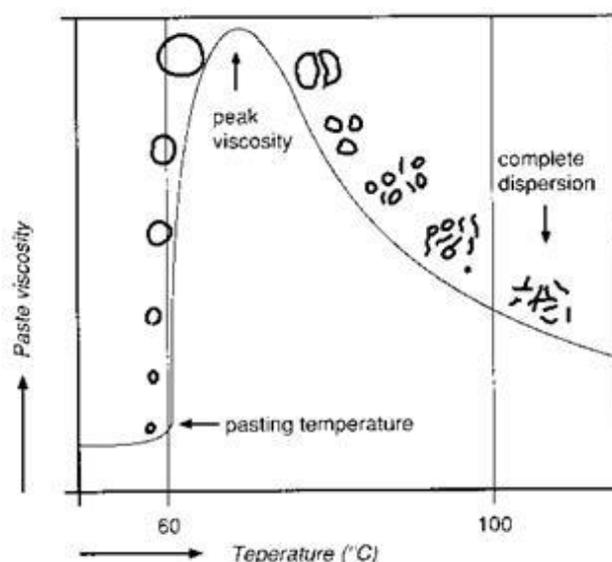
เม็ดสตาร์ชมีคุณสมบัติเป็น Optical birefringence คือสามารถบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ สมบัตินี้บ่งชี้ว่าสตาร์ชมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ หรืออยู่ในรูปผลึก การจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดสตาร์ชไม่ละลายในน้ำเย็น โดยสามารถดูดน้ำเย็นและพองตัวได้เล็กน้อย ความสามารถในการดูดน้ำของเม็ดสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เม็ดสตาร์ชจะพองตัวออกมากและมีอะมิโลสส่วนที่ละลายน้ำได้หลุดออกมาด้วย ทำให้ได้ส่วนผสมของน้ำแป้งที่มีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้มากขึ้น เม็ดสตาร์ชจะพองตัวมากขึ้นจนมีขนาดใหญ่และแตกออกได้เป็นสารละลายขุ่นหนืด ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่ละลายได้ของอะมิโลสและบางส่วนของอะมิโลเพกติน และเรียกกระบวนการนี้ว่า เจลาตินในเซชัน การเกิดเจลาตินในเซชันจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆ ได้ดีกว่า

การเกิดเจลลิตินในเซชันของเม็ดสตาร์ชแบ่งได้ 3 ระยะ (แสดงคิงภาพประกอบ 2.5) คือระยะแรกเม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดสตาร์ชยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสลงระนาบโพลาริซซ์ได้ เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลายของสตาร์ชจนถึงประมาณ 65°C (อุณหภูมิแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดสตาร์ชจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดสตาร์ชจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามาก และเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสลงระนาบโพลาริซซ์ได้ ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล

อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลลิตินซ์ เมื่อตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดความหนืด มักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดและองค์ประกอบของแป้ง เช่น ปริมาณไขมัน สัดส่วนของอะมิโลส และอะมิโลเพกติน การจัดเรียงตัวและขนาดของเม็ดสตาร์ช เป็นต้น สำหรับความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ในระหว่างเจลลิตินซ์มีการแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของสตาร์ช โดยพบว่า สตาร์ชมันฝรั่งจะให้ความหนืดสูงสุดสูงที่สุด และมีความสามารถในการทำให้ข้นหนืดสูงด้วย ในขณะที่สตาร์ชจากข้าวโพดและข้าวสาลีจะมีความหนืดสูงสุดต่ำ เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีกำลังการพองตัวอยู่ในระดับปานกลาง

การเกิดเจลลิตินซ์ไม่ได้เกิดเฉพาะอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง แต่เกิดเป็นช่วงอุณหภูมิประมาณ $8-12^{\circ}\text{C}$ การตรวจสอบกระบวนการเจลลิตินในเซชัน นอกจากการใช้การสังเกตการเปลี่ยนโครงสร้างการบิดระนาบแสงโพลาริซซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แล้ว สามารถตรวจสอบโดยเครื่องมือที่วัดและบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการซึ่งเครื่องมือที่นิยมในปัจจุบันนี้คือเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุในรูปฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ปกติพอลิเมอร์ต่างๆ ในรูปผลึกและอสัณฐาน จะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะได้เมื่อได้รับความร้อน สตาร์ชก็เช่นเดียวกันในสภาพที่มีน้ำน้อย เมื่อให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิหลอมละลายที่สูงมาก กล่าวคือในช่วงของ $160-200^{\circ}\text{C}$ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้น อุณหภูมิของการหลอมละลายก็จะลดลง เมื่อปริมาณน้ำมีประมาณ 70 ส่วนหรือมากกว่าการหลอมละลายก็คือการเกิดเจลลิตินในเซชัน ช่วงของอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (Onset temperature) และอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (Peak temperature) ของความร้อน

คือช่วงอุณหภูมิของเจลาตินเซชัน สำหรับการวัดลักษณะของการเกิดเจลาตินเซชันของแป้ง โดยใช้เครื่อง DSC จึงทำได้โดยการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างสารผสมแป้งกับน้ำในอัตรา 30:70 จนถึงอุณหภูมิที่คาดว่าเลขช่วงในการเกิดเจลาตินเซชันจะได้ เทอร์โมแกรม ซึ่งเป็นกราฟระหว่าง Heat flow และอุณหภูมิ พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาตินเซชัน (Enthalpy, cal/g) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยน้ำหนักแป้งตัวอย่าง แป้งแต่ละชนิดจะมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินเซชันต่างๆ กัน (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)



ภาพประกอบ 2.5 ระยะในการเกิดเจลาตินเซชันของเม็ดแป้ง
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546

2.3.2 คุณสมบัติของแป้งเปียก

คุณสมบัติของแป้งเปียกจากแป้งแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง ปริมาณแป้ง กระบวนการให้ความร้อน อุณหภูมิ ความเป็นกรดเบส เวลาในการให้ความร้อน การกวน และเครื่องมือที่ใช้ คุณสมบัติที่สำคัญของแป้งเปียก ได้แก่ ความหนืด เนื้อสัมผัส ความโปร่งใสของแป้งเปียก และความคงทนต่อแรงเฉือน

ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืด ได้แก่ ชนิดของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน และปริมาณแป้ง แป้งเปียกของแป้งมันฝรั่งจะมีความหนืดสูงมากเนื่องจากมีกลุ่มฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ แป้งมันฝรั่งที่มีปริมาณฟอสเฟตสูงก็จะมีค่าความหนืดสูง สำหรับแป้งจากส่วนราก (มันสำปะหลัง) และแป้งข้าวเหนียวมีความหนืดสูงกว่าแป้งจากธัญพืช (ข้าวโพด ข้าวสาลี)

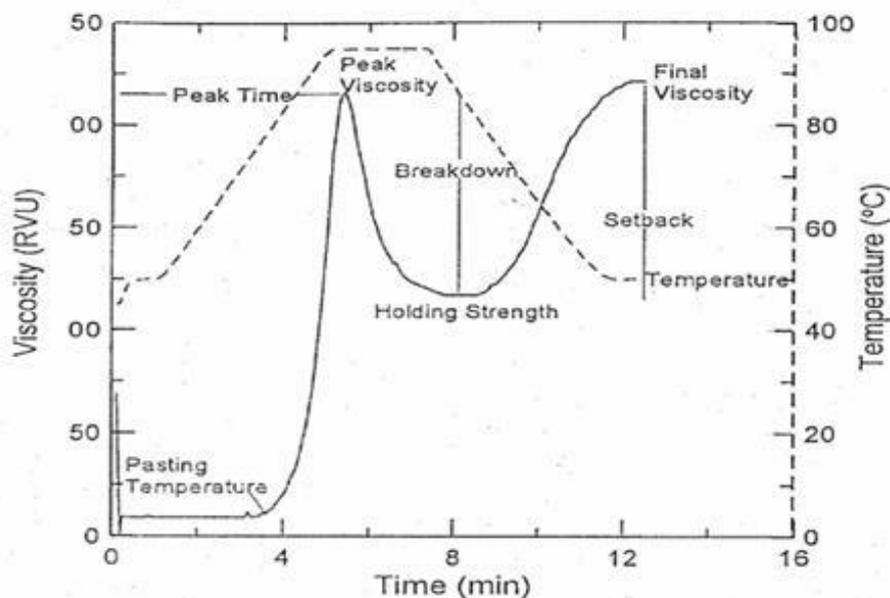
ในการกวนหรือการผสมแป้งเปียก แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะตัดเม็ดแป้งที่พองตัวบางส่วน ทำให้ความหนืดของแป้งลดลง ดังนั้นแป้งที่มีพันธะครอสลิงจะสามารถทนต่อแรงเฉือนได้ดี เมื่อให้ความร้อนพร้อมๆ กับการกวน (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

2.3.3 ความหนืด

เป็นคุณสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้ง ทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและมีความหนืดมากขึ้น พฤติกรรมความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัว และแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่งแขวนลอยในน้ำได้รับความร้อน จนถึงระดับหนึ่งจะพองตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเร็วมาก อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า อุณหภูมิแป้งเปียก ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด จากนั้น อาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง การที่แป้งมีความหนืดสูงสุดเนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้น และมีชิ้นส่วนของเม็ดแป้ง หรือ โมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินบางส่วนที่แตกสลาย ออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลายและละลายออกมามีมากกว่าการพองตัวที่เพิ่มขึ้น ความหนืดจะเริ่มลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเมื่ออยู่ในช่วงการหุงต้มที่ 95°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้น ค่าความหนืดของน้ำแป้งสุกจะเป็นผลมาจากการพองตัวของเม็ดแป้ง และการแตกหักของเม็ดแป้ง ร่วมกับการละลายออกมาของโมเลกุลแป้ง

เมื่อลดอุณหภูมิลง โมเลกุลอิสระที่กระจัดกระจายออกมา (โดยเฉพาะส่วนของอะมิโลส) ถ้ามีขนาดโมเลกุลที่เหมาะสมคือ ไม่สั้นและยาวเกินไปก็จะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกัน และกักน้ำ ไว้ได้ทำให้ความหนืดสูงขึ้นอีก ความหนืดที่กลับสูงขึ้นนี้อีกนี้เรียกว่า Setback และปรากฏการณ์นี้ ก็คือการคืนตัวของแป้ง (Retrogradation) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดได้แก่ ชนิดของแป้ง ขนาดอนุภาค สัดส่วนของอะมิโลสต่ออะมิโลเพกติน อุณหภูมิ แรงเฉือน เป็นต้น แต่ที่มีผลมากที่สุด ได้แก่ ชนิดของแป้ง

เครื่อง Rapid visco analyser (RVA) เป็นเครื่องมือที่ได้รับการพัฒนามาเพื่อติดตาม พฤติกรรมความหนืดของแป้งอีกแบบหนึ่ง คุณสมบัติพิเศษของเครื่องนี้คือ สามารถเปลี่ยนระดับ อุณหภูมิทั้งการทำให้ร้อนและเย็นได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ควบคู่ไปกับความสามารถในการรักษา อุณหภูมิให้คงที่ ทำให้สามารถหา Pasting curve ได้ภายใน 13 นาที เนื่องจากมีกลไกในการส่งผ่าน ความร้อนที่ดีและยังใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่าด้วย การทำงานของเครื่อง RVA คล้ายกับ เครื่อง Brabender viscoamylograph โดยใช้แป้งประมาณ 3 กรัม เติมน้ำ 25 มิลลิลิตร รักษาอุณหภูมิไว้ ที่ 50 หรือ 60°C ให้ความร้อนด้วยอัตราประมาณ 12°C ต่อนาที จนได้อุณหภูมิ 90°C ปล่อยให้ 2-3 นาที ทำให้เย็นลงด้วยอัตราประมาณ 12°C ต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิ 50°C หรือต่ำกว่าเป็นเวลา 2 นาที เครื่องจะทำการบันทึกอุณหภูมิและ Viscosity profile ที่เปลี่ยนไปกับเวลา ดังภาพประกอบ 2.6 (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)



ภาพประกอบ 2.6 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546

ค่าที่เครื่องจะแสดงผลอ่านได้บนจอคอมพิวเตอร์โดยความหนืดมีหน่วยเป็น RVU ดังนี้

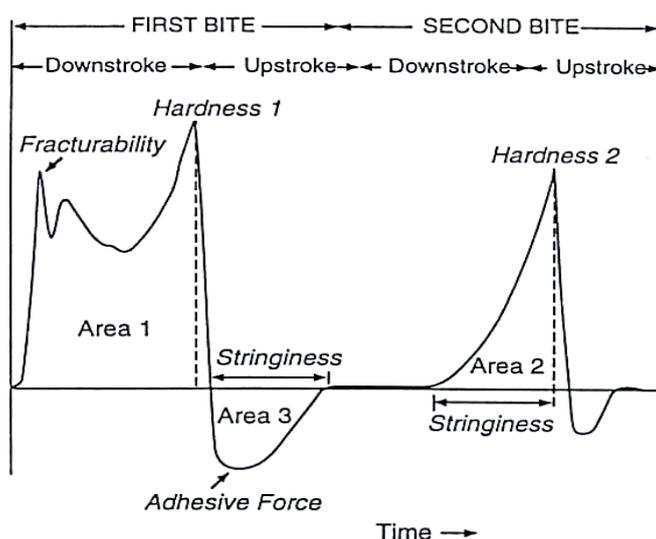
- 1) Peak Time = เวลาที่เกิด peak ของความหนืด (นาที)
 - 2) Pasting Temperature = อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืด หรืออุณหภูมิที่มีความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ใน 20 วินาที (°C)
 - 3) Peak Temperature = อุณหภูมิที่เกิด peak (°C)
 - 4) Holding Strength = ความหนืดที่ต่ำที่สุดระหว่างการทำให้เย็น (RVU)
 - 5) Breakdown = ผลต่างของความหนืดสูงสุดกับความหนืดต่ำสุด (RVU)
 - 6) Final Viscosity = ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง (RVU)
 - 7) Setback Form Peak = ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุด peak (RVU)
 - 8) Setback Form Trough = ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (RVU)
- (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

2.3.4 ลักษณะเนื้อสัมผัสในอาหาร

เนื้อสัมผัสอาหารใช้เป็นตัวชี้ถึงลักษณะของส่วนประกอบและโครงสร้างภายในอาหาร ซึ่งอธิบายหรือแสดงผลออกมาในรูปแบบของพฤติกรรมกลไกหรือการสูญเสียรูปร่างของอาหาร

จากแรงกลจากการบดเคี้ยว หรือการกดทับของแรงจากเครื่องมือ ความสำคัญของเนื้อสัมผัสในอาหารสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินแรงต้านทานของผลิตภัณฑ์ต่อแรงทางกลที่มากระทำ เช่น กระบวนการในระหว่างการเก็บเกี่ยว ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของการไหลของผลิตภัณฑ์อาหารในระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษา และใช้เป็นตัวแทนในการกำหนดพฤติกรรมในการเคี้ยวอาหารของผู้บริโภค

การวัดค่าเนื้อสัมผัสด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) โดยใช้เครื่องมือนี้ จะคล้ายกับการทำ Texture Profile ด้วยวิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัส กล่าวคือจะมีการพรรณนาคำศัพท์เกี่ยวกับเนื้อสัมผัสของอาหาร โดย TPA จะเป็นการวัดค่าพารามิเตอร์ของเนื้อสัมผัสของอาหารที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีแรงมากระทำ หลักการพื้นฐาน คือเครื่องมือที่ใช้ในการวัดมีการออกแบบการเคี้ยวภายในปาก (Friedman, 1963) ซึ่งลักษณะของ Texture Profile ที่ได้จากการใช้เครื่องวัดค่าเนื้อสัมผัสจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับตัวอย่างต่อเวลา ผ่านการกดของหัววัด 2 ครั้ง ดังภาพประกอบ 2.7 โดยความสูงของกราฟ คือแรงกดที่กระทำในแต่ละครั้ง ซึ่งจะแสดงค่าความแข็งของตัวอย่าง (Hardness) นอกจากนี้กราฟที่ได้ยังแสดงถึงแรงกดที่กระทำครั้งแรกซึ่งทำให้เกิดการแตกหักหรือเสียรูปของชิ้นงาน (Fracturability), ขอบเขตของวัสดุที่สามารถเสียรูปก่อนที่จะเกิดการแตกหัก (Cohesiveness), อัตราการคืนรูปของวัสดุหลังจากถูกกด (Springiness), แรงที่ใช้ในการแยกตัวอย่างที่เป็นกึ่งแข็งจนกระทั่งเสียรูป (Gumminess), แรงที่ใช้ในการบดตัวอย่างจนกระทั่งเสียรูป (Chewiness) และงานที่ใช้ในการเอาชนะแรงระหว่างพื้นผิวของตัวอย่างกับพื้นผิวของวัสดุ (Adhesiveness) (ชัยบุญภรณ์ ศิริเลิศ, 2549)



ภาพประกอบ 2.7 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ TPA

ที่มา: ชัยบุญภรณ์ ศิริเลิศ, 2549

2.4 ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก

SD คือการย่อยได้ของแป้งโดยเอนไซม์อะไมเลสที่ลำไส้เล็กในร่างกาย ถ้าการย่อยเกิดขึ้นช้าจะทำให้ร่างกายสามารถควบคุมปริมาณน้ำตาลในเลือดให้อยู่ในระดับปกติได้ง่ายกว่า การย่อยอย่างรวดเร็ว การย่อยแตกต่างกันตามชนิดของอาหารที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบและเกี่ยวข้องกับผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวานที่ไม่ขึ้นอยู่กับการควบคุมระดับอินซูลิน (Frei et al., 2003) ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่า GI ส่วน GI คือ ดัชนีที่ใช้ในการประเมินระดับน้ำตาลกลูโคสในเลือดหลังจากการบริโภคอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต โดยเปรียบเทียบกับอาหารมาตรฐาน คือ ขนมปังขาวหรือกลูโคส ซึ่งมีค่า GI เท่ากับ 100 (Goni et al., 1997)

GI เกี่ยวข้องกับอาหารที่ใช้ในการอ้างอิง โดยทั่วไปคือ ขนมปังขาวหรือกลูโคส ซึ่งได้มาจากการตอบสนองของน้ำตาลกลูโคสในเลือดที่เพิ่มขึ้นหลังจากการกินอาหารเข้าไป โดยสอดคล้องกับการผลิตกลูโคสหลังจากการได้รับอาหารอ้างอิงที่มีคาร์โบไฮเดรตในปริมาณเท่ากัน ซึ่งความแตกต่างของ SD และ GI พบได้ทั้งแหล่งของพืชที่ต่างกันและแหล่งของพืชชนิดเดียวกัน (Hu et al., 2004) จากการศึกษาพบว่าอาหารที่มี GI สูงจะมีระดับกลูโคสในเลือดเริ่มต้นสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาประมาณ 30 นาที หลังจากการบริโภคอาหาร หลังจากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนคงที่ GI เกี่ยวข้องกับการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน โรคหัวใจ และโรคอ้วน โดยอาหารที่มี GI ต่ำ จะเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพมากกว่า (Benmoussa et al., 2007) นอกจาก GI แล้ว ปริมาณ RS มีความสำคัญในการวัดลักษณะเฉพาะของการย่อยได้ของแป้ง โดย RS จะเกิดกระบวนการหมักในลำไส้ใหญ่ซึ่งคล้ายกับคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่สตาร์ชโดยเกี่ยวข้องกับการป้องกันโรคติดเชื้อทางอาหาร เช่น มะเร็งลำไส้ใหญ่ นอกจากนี้ยังมีสหสัมพันธ์เชิงลบกับ GI ด้วย (Frei et al., 2003)

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก

ข้าวเป็นอาหารหลักที่สำคัญและจัดว่ามีคาร์โบไฮเดรตสูง (Hu et al., 2004) มีการนำข้าวมาทำเป็นสตาร์ชโดยการแยกส่วนของโปรตีน ไขมัน เกลือแร่ ออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์ เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่าเป็นแป้งสตาร์ช (กล้านรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) เนื่องจากสตาร์ชเป็นอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตซึ่งเกี่ยวข้องกับผู้ป่วยโรคเบาหวานและโรคอื่นๆ อีกหลายชนิด จึงมีการศึกษาคุณสมบัติการย่อยได้ของแป้งรวมถึงค่าดัชนีไกลซีมิกของข้าว

ซึ่งเป็นดัชนีวัดระดับน้ำตาลในเลือดของอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตหลังจากได้รับเข้าไปแล้ว (Frei et al., 2003)

จากการศึกษาพบว่ามีปัจจัยมากมายทั้งภายนอกและภายในที่มีผลต่อ SD ได้แก่ ปริมาณอะมิโลส โดยข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ จะย่อยได้เร็วกว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง ส่งผลต่อค่า GI คือข้าวที่ย่อยได้เร็วจะมีค่า GI สูงกว่าข้าวที่ย่อยได้ช้า ทำให้การเปลี่ยนแปลงน้ำตาลในเลือดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงมาก แต่ข้าวที่มีค่า GI ต่ำ จะมีการปลดปล่อยน้ำตาลเข้าสู่กระแสเลือดอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ ทำให้ร่างกายสามารถควบคุมปริมาณน้ำตาลในเลือดให้อยู่ในระดับปกติได้ง่ายกว่า (Hu et al., 2004) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นอีกด้วยที่มีผลต่อ SD ได้แก่ สภาพการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ โดยเมื่อหุงข้าวสุกแล้วนำไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่มีอุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้ข้าวเกิดการคืนตัว ทำให้กระบวนการย่อยแป้งเกิดช้าและค่า GI ลดลง (Sasaki et al., 2009) โครงสร้างโดยละเอียดของอะมิโลเพกติน พบว่าข้าวที่มีส่วนของอะมิโลเพกตินสายโซ่ยาว และอะมิโลเพกตินสายโซ่ปานกลางและสายโซ่สั้นสูง และมีส่วนของอะมิโลเพกตินสายโซ่สั้นมากต่ำ จะทำให้ปริมาณแป้งที่ย่อยได้เร็ว (Rapidly digestible starch; RDS) ลดลง และปริมาณแป้งที่ย่อยได้ช้า (Slowly digestible starch; SDS) เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ค่า GI ต่ำ (Benmoussa et al., 2007) คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ จะมีผลต่อการทำนาย GI โดยข้าวที่ใช้อุณหภูมิในการเกิดเจลลาตินในเซชัน และใช้เวลาในการหุงต้มสูง และวัดค่า Amylograph viscosity และปริมาตรของข้าวที่ขยายตัว (%) จะส่งผลให้ค่า GI ของข้าวต่ำ (Panlasigui et al., 1991) และกระบวนการแปรรูปข้าวด้วยวิธีต่างๆ เช่น การทำแห้งด้วยวิธี High-temperature fluidized bed drying พบว่าสามารถทำให้ GI ลดลง เนื่องจากเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Amylose-lipid complex) ของแป้งข้าว เมื่อให้อุณหภูมิในการอบแห้งสูง ทำให้น้ำระเหยออกเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความแข็งแรงมากขึ้น เป็นผลให้อ่อนนุ่มย่อยแป้งได้ยากทำให้ข้าวที่ผ่านการอบแห้งมี GI ต่ำ (Jaisut et al., 2008) และการหุงสุกด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ การหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า, เตาอบไมโครเวฟ, หม้อนึ่งความดันไอ และหม้อดินในข้าว (*Oryza sativa*) และถั่วเหลือง [*Glycine max* (L.) Merr.] พบว่ากระบวนการหุงสุกทุกวิธีเหนี่ยวนำให้ตัวอย่างมีปริมาณ RS ลดลง เนื่องจากในกระบวนการหุงสุกมีการให้ความร้อนเหนี่ยวนำให้แป้งส่วนที่ย่อยได้ยากให้สามารถย่อยได้ อีกทั้งความร้อนทำให้ชั้นผนังเซลล์ของเส้นใยเกิดการละลายเป็นผลทำให้การย่อยแป้งสูงขึ้น (Han et al., 2008) ซึ่งปัจจัยดังกล่าวนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เกี่ยวกับกระบวนการเผาผลาญน้ำตาลในเลือดของคนที่เป็นโรคเบาหวานได้

2.6 กระบวนการสีข้าว

มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกเปลือก รำ และคัพภะออกจากเนื้อเมล็ดข้าว ได้เป็นข้าวสารที่มีปริมาณเต็มเมล็ดมากที่สุด หรือมีข้าวหักน้อยที่สุด ผ่านกระบวนการ 4 ขั้นตอนพื้นฐาน คือการทำความสะอาด การกะเทาะ การขัดขาว และการคัดแยก โดยชนิดของเครื่องสีข้าวและการปรับตั้งเครื่องสี นับเป็นปัจจัยสำคัญ เนื่องจากหากใช้เครื่องสีข้าวไม่เหมาะสมกับชนิดและลักษณะของเมล็ดข้าว หรือการปรับเครื่องไม่เหมาะสมในการกะเทาะและการขัดขาวก็จะทำให้เกิดข้าวหักมาก เป็นผลต่อคุณภาพการสีมาก โดยเฉพาะในด้านปริมาณข้าวเต็มเมล็ดที่ได้ กระบวนการสีข้าวประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก คือ

2.6.1 การทำความสะอาด เพื่อกำจัดใบข้าว เมล็ดลีบ กรวด หิน ดิน ทราย เมล็ดวัชพืช และสิ่งสกปรกต่างๆ ออกจากข้าวเปลือก

2.6.2 การกะเทาะ เพื่อแยกเปลือกหุ้มแข็งออกจากเมล็ด สิ่งที่ได้รับ คือเกลบ เป็นส่วนผสมของเปลือก เมล็ด หาง กลีบเลี้ยง และข้าวเมล็ด มีประมาณ 20-24% ของข้าวเปลือก และข้าวกล้อง ซึ่งมีเยื่อหุ้มชั้นนอกติดอยู่

2.6.3 การขัดขาว เพื่อขัดเยื่อหุ้มเมล็ดและทำให้คัพภะหลุดออกจากเมล็ดข้าวกล้อง สิ่งที่ได้รับคือ รำ เป็นส่วนผสมของเยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด เยื่อแอลิวโรน คัพภะ และผิวนอกของข้าวสาร มีประมาณ 8-10% ของข้าวเปลือก และมีข้าวสารประมาณ 68-70% ของข้าวเปลือก

2.6.4 การคัดแยก เพื่อแยกข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว และข้าวหัก ซึ่งแต่ละส่วนจะมีมากน้อยขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้าวเปลือกก่อนสี

ดังนั้นคุณภาพการสีธรรมดา หมายถึง ประสิทธิภาพการสี และระดับการสี ให้ได้ข้าวสารตามความต้องการ

1) ประสิทธิภาพการสี หมายถึง ปริมาณผลผลิตจากข้าวเปลือกที่ได้เป็นข้าวสารเต็มเมล็ดและต้นข้าว ถ้าได้ข้าวสารเต็มเมล็ดและต้นข้าวมาก แสดงว่ามีประสิทธิภาพการสีดี ซึ่งขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว การปฏิบัติการก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว และกระบวนการสีข้าว ในกระบวนการสีข้าวจะได้ผลผลิตจากข้าวเปลือกดังนี้

ข้าวเปลือกสะอาด	100%	จะได้
เกลบ	20-30%	
รำ	8-11%	
ข้าวสารรวม	66-72%	

โดยในส่วนข้าวสารรวม ประกอบด้วย ข้าวเต็มเมล็ด, ต้นข้าว, ข้าวหัก และปลายข้าว และประเมินประสิทธิภาพการสีดังกล่าวจากเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบต่างๆ ของเมล็ดที่ได้จากการสี ซึ่งเป็นกระบวนการขจัดเปลือก รำ และคัพพะออกจากข้าวเปลือก โดยให้มีข้าวสารหักน้อยที่สุด ดังนี้

$$\% \text{ แกลบ} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก} - \text{น้ำหนักข้าวกล้อง}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100$$

$$\% \text{ รำ} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวกล้อง} - \text{น้ำหนักข้าวสาร}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100$$

$$\% \text{ ข้าวสาร} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวสารรวม}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100$$

$$\% \text{ ข้าวหัก} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวสารรวม} - \text{น้ำหนักข้าวเต็มเมล็ด}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100$$

2) ระดับการสี หรือ ชั้นของการสี (Degree of milling; DOM) หมายถึงความหนักเบา หรือมากน้อยในการขัดข้าวกล้องให้เป็นข้าวสาร สิ่งที่ได้จากการขัด คือรำ คัพพะ และส่วนของเนื้อเมล็ด โดยแบ่งระดับการสีออกเป็น 4 ระดับ คือ

- (1) สีดีพิเศษ หมายถึงการสี ขัดรำออกทั้งหมด จนเมล็ดข้าวสวยงามเป็นพิเศษ
- (2) สีดี หมายถึงการสี ขัดรำออกทั้งหมด จนเมล็ดข้าวสวยงามดี
- (3) สีดีปานกลาง หมายถึงการสี ขัดรำออกเป็นส่วนมาก จนเมล็ดข้าวสวยงาม

พอควร

- (4) สีธรรมดา หมายถึงการสี ขัดรำออกแต่เพียงบางส่วน

ระดับการสีนี้ยังสามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์รำที่ขัดออก หรือข้าวสารหลังการขัดสี ซึ่งตรวจสอบได้หลายวิธี ได้แก่

(1.1) ตามมาตรฐานของ ISO ประเทศอินเดียและมาเลเซีย จากสูตร

$$\% \text{ น้ำหนักรำ (ที่หายไป)} = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \times 100$$

โดย m_1 = น้ำหนักข้าวกล้อง, m_2 = น้ำหนักข้าวสาร
และนำค่าที่คำนวณได้มาเป็นเกณฑ์ของระดับการสี ดังนี้

สีดีพิเศษ หมายถึง 8% ของน้ำหนักรำที่หายไปหรือมากกว่า

สีดี หมายถึง 7-7.9% ของน้ำหนักรำที่หายไป

สีดีปานกลาง หมายถึง 6-6.9% ของน้ำหนักรำที่หายไป

สีธรรมดา หมายถึง 5-5.9% ของน้ำหนักรำที่หายไป

(1.2) ตามมาตรฐานของประเทศไต้หวัน คัดจากเปอร์เซ็นต์ข้าวสาร
หลังการขัดสี

$$\text{ระดับการขัดสี} = \frac{\text{น้ำหนักของข้าวสาร}}{\text{น้ำหนักของข้าวเปลือก}} \times 100$$

ระดับที่อยู่ในเกณฑ์ปกติ คือ 88%

(1.3) ตามปริมาณไทอะมินหรือวิตามินบีที่วิเคราะห์ได้จากรำที่ขัดออกจาก
ข้าวกล้อง ถ้ามีปริมาณมาก แสดงว่าขัดรำออกได้มาก อยู่ในระดับสีดีพิเศษ เป็นต้น

(1.4) ตามสีข้อมเมล็ดข้าว โดยการใส่สารเคมีบางชนิด เช่น ซูแดน 4
(Sudan IV) ทำปฏิกิริยากับไขมันที่ติดอยู่กับเมล็ดข้าวสาร จะกลายเป็นสีแดง ดังนั้นถ้าเมล็ดข้าวสาร
มีสีแดงติดอยู่มาก แสดงว่ายังมีไขมันซึ่งเป็นองค์ประกอบของรำอยู่มาก ระดับการสีจึงยังไม่ดี
มีรำติดอยู่กับเมล็ดมาก (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 ผลของระดับการสีข้าวต่อองค์ประกอบทางเคมีของข้าว

Park et al (2001) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของข้าวเมล็ดสั้นสายพันธุ์ Dong-Jin ของประเทศเกาหลี ที่ผ่านการขัดสีในระดับที่แตกต่างกัน ดังนี้ 8.0, 9.5, 11.0, 12.5 และ 14% นำมาบดและร่อนผ่านตะแกรง แล้วนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้า พบว่าปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้าลดลงเมื่อ DOM เพิ่มขึ้น เนื่องจากเชื้อหุ้มเมล็ด และชั้นเอนโดสเปิร์มหลุดออก ซึ่งมีปริมาณสูงในเถ้า ไขมัน และเส้นใย

Lamberts et al (2007) ศึกษาปริมาณ โปรตีน เกลือแร่ของข้าวเมล็ดยาวสายพันธุ์ Puntal ของประเทศสเปน ที่ผ่านการขัดสีเป็นเวลา 0-100 วินาที จนทำให้ได้ DOM ระหว่าง 0-25% โดยแบ่ง DOM ออกเป็น 4 กลุ่ม คือกลุ่มที่เป็นรำ (DOM 0-9%), กลุ่มที่เป็นเอนโดสเปิร์มด้านนอก (DOM 9-15%) กลุ่มที่เป็นของเอนโดสเปิร์มส่วนกลาง (DOM 15-25%) และกลุ่มที่เป็นเอนโดสเปิร์มส่วนในสุด และเกลือแร่ พบว่า ที่ DOM 0% มีปริมาณโปรตีน 9.2% โดยปริมาณโปรตีนจะลดลงเมื่อระดับการสีเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณโปรตีนจะลดลงจากเอนโดสเปิร์มด้านนอกไปด้านในสุด แสดงให้เห็นว่าเอนโดสเปิร์มด้านนอกมีความเข้มข้นของโปรตีนสูงที่สุด และที่ DOM 0% มีปริมาณเกลือแร่ 1.6% โดยปริมาณเกลือแร่จะลดลงจากชั้นรำไปยังเอนโดสเปิร์มด้านนอก และคงที่เมื่อระดับการสีมากกว่า 15% (เอนโดสเปิร์มส่วนกลาง) แสดงให้เห็นว่าเอนโดสเปิร์มส่วนกลาง และเอนโดสเปิร์มด้านในสุดมีปริมาณเกลือแร่ค่อนข้างเหมือนกัน โดยปริมาณเกลือแร่ส่วนใหญ่จะพบในส่วนของชั้นรำ (61%) เอนโดสเปิร์มด้านนอก (23.7%) เอนโดสเปิร์มส่วนกลาง (3.7%) และ 11.6% พบในเอนโดสเปิร์มด้านในสุด

2.7.2 ผลของระดับการสีข้าวต่อคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์

Tran et al (2004) ศึกษาคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวสายพันธุ์ Nipponbare ของประเทศญี่ปุ่น ที่ผ่านการขัดสีให้ได้ผลผลิตของการขัดสี (Milling Yield; MY) เป็น 100 (ข้าวกล้อง), 90, 90, 85 และ 80% หลังจากนั้นจึงบดและร่อนผ่านตะแกรง แล้วนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติของแป้งเปียกด้วยเครื่อง RVA พบว่าค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด และความหนืดสุดท้ายของข้าวกล้อง (100% MY) มีค่าต่ำที่สุด และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผลผลิตของการขัดสีลดลง สังเกตได้ว่าค่าความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อระดับการสีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากชั้นนอกของข้าวกล้องมีองค์ประกอบคล้ายขี้ผึ้งเคลือบอยู่ เมื่อนำข้าวทั้งเมล็ดมาบดจึงมีส่วนของรำข้าวผสมอยู่ ส่งผลให้มีส่วนของแป้งต่ำกว่าข้าวที่มีผลผลิตของการขัดสีต่ำ

Mohapatra et al (2006) ศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก 3 สายพันธุ์ ได้แก่ Pusa Basmati ที่มีเมล็ดยาวรีและมีกลิ่นหอม Swarna ที่มีเมล็ดปานกลาง และ ADT37 ที่มีเมล็ดป้อมและสั้นของประเทศอินเดีย โดยข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ผ่านการขัดสีด้วยเครื่องขัดสีเป็นเวลา 15-180 วินาที ได้ข้าวที่ DOM 2-18% แล้วนำมาหุงสุกโดยต้มในบิกเกอร์ที่อุณหภูมิ 100°C จนกระทั่งสีขาวตรงส่วนกลางของเมล็ดข้าวหายไป และนำไปวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกด้วยวิธี TPA พบว่าค่าความแข็งของข้าวหุงสุกที่ DOM เริ่มแรกมีค่าสูงที่สุดและลดลงเป็นเส้นตรงเมื่อ DOM เพิ่มขึ้นในทุกสายพันธุ์ เนื่องจากที่ DOM เริ่มต้นยังมีชั้นของรำข้าวอยู่ ซึ่งจะช่วยให้มีความแน่นให้กับเมล็ดข้าว ค่าความเกาะติดกันจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อ DOM เพิ่มขึ้น โดยค่าความเหนียวติดกันมีความสัมพันธ์กับ DOM อย่างชัดเจนและมีความตรงกันข้ามกับความหนาของเมล็ดข้าว ซึ่ง DOM มีอิทธิพลต่อลักษณะเฉพาะนี้เป็นอย่างมาก โดยความหนาของเมล็ดข้าวที่น้อยที่สุดมีอิทธิพลต่อค่าความเกาะติดกันเช่นเดียวกับคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสส่วนใหญ่ได้รับผลกระทบจากองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ด ส่วนค่าความเหนียวติดกันจะลดลงเป็นเส้นตรงเมื่อ DOM เพิ่มขึ้น โดยปริมาณโปรตีน ไขมัน กลีโอะแร และเถ้าที่ลดลง และสตาร์ชที่พบเมื่อมีการขัดสีเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับชั้นแอลลิวโรน เพอริคาร์พ และเยื่อหุ้มเมล็ดที่หลุดออกในขั้นตอนการขัดสี จะส่งผลกระทบต่อค่าความเหนียวติดกันของข้าวหุงสุก

Park et al (2001) ศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเมล็ดสั้นสายพันธุ์ Dong-Jin ของประเทศเกาหลี ที่ผ่านการขัดสีที่ระดับการสีแตกต่างกัน ดังนี้ 8.0, 9.5, 11.0, 12.5 และ 14% นำมาบดและร่อนผ่านตะแกรง แล้วนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใยและเถ้า และลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกด้วยมือหุงข้าวไฟฟ้า พบว่าค่าความแข็ง ความยืดหยุ่น (Springiness) และการเคี้ยว (Chewiness) มีค่าลดลงในขณะที่ค่าความเหนียวติดกันเพิ่มขึ้นเมื่อ DOM เพิ่มขึ้น ด้วยวิธี TPA เนื่องจากข้าวที่มีโปรตีนสูงกว่าจะมีค่าความเหนียวติดกันต่ำกว่า ความแข็งของข้าวหุงสุกได้รับผลกระทบจากปริมาณกลีโอะแรและไขมัน จากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของข้าวจากการขัดสีที่แตกต่างกัน

2.7.3 ปัจจัยที่มีผลต่อ SD และ GI ของข้าว

Frei et al (2003) ศึกษา SD และ GI ของข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกัน 6 สายพันธุ์ของประเทศฟิลิปปินส์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม คือการทดลองแรก จะวิเคราะห์ทันทีหลังการหุงสุก การทดลองที่สอง จะนำข้าวหุงสุกไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งส่งผลให้ข้าวเกิดการคืนตัว การวิเคราะห์จะใช้วิธีการย่อยโดยเอนไซม์ พบว่าค่า GI แตกต่างกันในระหว่างข้าวแต่ละสายพันธุ์ ค่า GI ของข้าวหุงสุกที่ได้อยู่ในช่วง 68-109 และข้าวที่มีการคืนตัวอยู่ในช่วง 64-87 โดยข้าวสายพันธุ์ข้าวเหนียวจะย่อยแบ่งเร็วกว่าข้าวสายพันธุ์ที่มีอะมิโลสสูง

และการเก็บข้าวหุงสุกแล้วไว้ในตู้เย็นจะทำให้ค่า GI ลดลงในทุกสายพันธุ์ สำหรับสายพันธุ์ข้าวเหนียว การย่อยแป้งจะลดลงสูงที่สุดหลังจากเก็บไว้ในตู้เย็น

Hu et al (2004) ศึกษาการย่อยได้ของแป้งและประเมินค่าระดับไกลซีมิกของข้าว 3 ชนิด ได้แก่ อินดิซ่า จาปอนิก้า และข้าวลูกผสม ซึ่งข้าวแต่ละชนิดจะมีปริมาณอะมิโลสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือปริมาณอะมิโลสสูง ปานกลาง ต่ำ และต่ำมาก โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มแรก นำข้าวที่หุงสุกแล้วมาวิเคราะห์ทันที และกลุ่มที่สอง จะนำข้าวที่หุงสุกแล้วไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง การวิเคราะห์จะใช้วิธีการย่อยโดยเอนไซม์ พบว่าปริมาณอะมิโลสมีผลกระทบต่อค่า GI และ RS โดยปริมาณ RS จะเพิ่มขึ้นเมื่ออะมิโลสเพิ่มขึ้น ในข้าวชนิดเดียวกัน ซึ่งข้าวจาปอนิก้ามีปริมาณ RS ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวอินดิซ่าและข้าวลูกผสม ที่มีปริมาณอะมิโลสใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) การกินตัวของข้าวที่หุงสุกจะทำให้ค่า HI และ GI ลดลงในทุกสายพันธุ์ โดยพบว่าสายพันธุ์ข้าวเหนียวและสายพันธุ์ที่มีอะมิโลสต่ำ จะย่อยแป้งได้เร็วกว่าข้าวสายพันธุ์ที่มีอะมิโลสปานกลางและสูง

Tran et al (2004) ศึกษาคุณสมบัติด้านความเหนียวของข้าวสายพันธุ์ Nipponbare ของประเทศญี่ปุ่น ที่ผ่านการขัดสีให้ได้ผลผลิตของการขัดสี (Milling Yield; MY) เป็น 100 (ข้าวกล้อง), 90, 90, 85 และ 80% หลังจากนั้นจึงบดและร่อนผ่านตะแกรง แล้วนำมาวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ พบว่ากิจกรรมของแอลฟาไกลูโคซิเดสต่ำ ในขณะที่กิจกรรมของโปรติเอส แอลฟาอะไมเลส และเบต้าอะไมเลสสูงเมื่อผลผลิตของการขัดสีต่ำ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากความเข้มข้นของกรดอะมิโนและน้ำตาลในข้าว ซึ่งในส่วนของจมูกข้าวมีปริมาณกรดอะมิโนสูงกว่า ส่วนของเมล็ดข้าว

Benmoussa et al (2007) ศึกษาโครงสร้างของอะมิโลเพกตินที่มีผลต่ออัตราการย่อยได้ของแป้งในข้าวสายพันธุ์ต่างๆ 12 สายพันธุ์ พบว่าปริมาณแป้งที่ย่อยได้เร็วและช้ามีความสัมพันธ์กับสายโซ่ของอะมิโลเพกติน คือสายพันธุ์ที่มีส่วนของอะมิโลเพกตินสายโซ่ยาว (FrI) และอะมิโลเพกตินสายโซ่ปานกลางและสั้น (FrII) สูงที่สุด และส่วนของอะมิโลเพกตินสายโซ่สั้นมาก (FrIII) ต่ำที่สุด ได้แก่ สายพันธุ์ CHNR และ CCDR จะมีปริมาณ RDS ต่ำที่สุด แต่มีปริมาณ SDS สูงที่สุด ซึ่งจะมีผลทำให้ค่า GI ต่ำและการปล่อยกลูโคสเข้าไปในกระแสเลือดช้า ทำให้ร่างกายสามารถควบคุมระดับกลูโคสในเลือดให้เป็นปกติได้ง่าย

Sasaki et al (2009) ศึกษาการย่อยได้ของสตาร์ชเจล ซึ่งใช้แป้งข้าวเหนียวที่แตกต่างกัน 3 สายพันธุ์ ได้แก่ Koganemochi (Kog), Hakuchomochi (Hak) และ Kantomochi 172 (K172) โดยเตรียมสตาร์ชเจลจากสารละลายสตาร์ช 40% โดยน้ำหนัก (ต่อน้ำหนักแห้ง) แล้วนำไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 5°C เป็นเวลา 1 และ 7 วัน นำสตาร์ชที่ยังไม่ผ่านการเก็บไว้ในตู้เย็นมาวิเคราะห์จำแนกหาความยาวของสายโซ่อะมิโลเพกตินโดยวิธี High-Performance Anion Exchange Chromatography with Pulsed

Amperometric Detection (HPAE-PAD) พบว่าสายพันธุ์ K172 มีเปอร์เซ็นต์ของ A chain แตกต่างจากสายพันธุ์อื่น คือมีอะมิโนเพกตินสายโซ่สั้นจำนวนน้อย และมีอะมิโนเพกตินสายโซ่ปานกลางและสายโซ่ยาวจำนวนมากกว่าสตาร์ชเจลสายพันธุ์อื่น และวิเคราะห์การย่อยได้ของสตาร์ชเจลโดยใช้แอลฟาอะไมเลส (ชุดทดสอบของ Megazyme) พบว่าสตาร์ชเจลสายพันธุ์ K172 ทนทานต่อการย่อยสูงกว่าสายพันธุ์อื่น เนื่องจากมีส่วนของ อะมิโนเพกตินสายโซ่สั้นต่ำกว่า และใช้พลังงานและอุณหภูมิในการทำให้แข็งสูงสุด เมื่อนำสตาร์ชเจลที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 5°C เป็นเวลา 1 และ 7 วันมาวิเคราะห์ พบว่าสตาร์ชเจลสายพันธุ์ K172 เกิดการคืนตัวเร็วกว่าและมากกว่าสายพันธุ์อื่น ซึ่งมีผลทำให้ย่อยได้ช้ากว่าสายพันธุ์อื่น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของระดับการสีข้าวต่อองค์ประกอบทางเคมีของข้าวและรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ได้จากการสีที่ระดับต่างๆ นอกจากนั้นยังศึกษาถึงผลของระดับการสีข้าวต่อคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง และดัชนีไกลซีมิกโดยแบ่งระดับการสีข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการขัดสีที่ระดับต่างๆ การศึกษาในครั้งนี้มีการดำเนินการ 5 ขั้นตอน คือ

3.1 การวางแผนการวิจัย

3.2 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณ โปรตีน ไขมัน เส้นใย แป้งทั้งหมด และแป้งที่ทนทานต่อการย่อยในข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่มีระดับการสี 6 ระดับ ได้แก่ 0 (ข้าวกล้อง), 1.75, 4.50, 6.50, 8.50 และ 10.90% (ข้าวขาว)

3.3.2 ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ได้แก่ เนื้อสัมผัส คุณสมบัติด้านความหนืด และระดับของการเกิดเจลลาติในเซชันของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างๆ

3.3.3 ศึกษาความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าว โดยการหาจลนพลศาสตร์ของการย่อยแป้ง (ใช้เอนไซม์ในการย่อย) ซึ่งอัตราการย่อยแป้งที่เหมาะสมตามเปอร์เซ็นต์ของปริมาณแป้งทั้งหมดที่เวลาแตกต่างกัน คือ 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที หลังจากนั้นจึงนำมาคำนวณหาดัชนีไกลซีมิกตามแบบจำลองของ Goni et al (1997)

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

3.5 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

รายละเอียดของการศึกษาทั้ง 5 ขั้นตอน เป็นดังนี้

3.1 การวางแผนการวิจัย

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของข้าวและรำข้าวที่ได้จากการสีที่ระดับต่างๆ 6 ระดับ ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าวที่มีระดับการสี 6 ระดับ และทดสอบสมมติฐานของงานวิจัยนี้โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว ออกแบบการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely randomized design; CRD) ชนิดอิทธิพลกำหนด

(Fixed effect model) มี 1 ปัจจัย คือระดับการสีข้าวซึ่งมี 6 ระดับ ได้แก่ 0 (ข้าวกล้อง), 1.75, 4.50, 6.50, 8.50 และ 10.90% (ข้าวขาว) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ รวมหน่วยการทดลองทั้งสิ้น 18 หน่วยการทดลอง

3.2 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 วัตถุดิบ

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากอำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม

3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์

- 1) เครื่องแก้วต่างๆ (PYREX; GERMANY)
- 2) เครื่องชั่งละเอียด (PRESICA 25A; SWISS)
- 3) ตะแกรงร่อนขนาด 70 mesh (STANDARD SIEVE; USA)
- 4) Magnetic stirrer bar
- 5) Thermometer
- 6) Micro-pipett (VIPR)
- 7) Moisture can
- 8) Crucible (VELP; SCIENTIFIC)
- 9) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) (SCHUTZART)
- 10) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Shaking water bath) (UMAC; THAILAND)
- 11) เครื่องบ่มแบบเขย่า (Shaking incubator) (LAB TECH; KOREA)
- 12) เครื่อง UV-spectrophotometer (SHIMADZU; JAPAN)
- 13) เครื่อง Magnetic stirrer
- 14) เครื่อง pH Meter (METTLER TOLEDO)
- 15) เครื่องปั่นผสม (Vortex mixer) (HAMONY; JAPAN)
- 16) เครื่องเหวี่ยงแยก (Centrifuge) (UNIVERSAL 320R; GERMANY)
- 17) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) (BINDER)
- 18) เครื่องวิเคราะห์โปรตีน (GERHARDT)
- 19) เครื่องวิเคราะห์ไขมัน (BUCHI E-816, SWITZERLAND)
- 20) เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (VELP; SCIENTIFIC)
- 21) เครื่อง muffle furnace (CARBOLITE)
- 22) เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) (NEWPORT SCIENTIFIC, SYDNEY,

AUSTRALIA)

23) เครื่อง Texture Analyzer (TA-XT2i, Texture Technologies Corp., Scarsdale, NY/Stable Micro Systems, Godalming, Surrey, UK)

24) หม้อหุงข้าวไฟฟ้า (SHARP; JAPAN)

25) โถดูดความชื้น (Desiccator)

3.2.3 สารเคมี

1) Sulfuric acid (Caro erba)

2) Sodium hydroxide (UNIVAR; AUSTRALIA)

3) Hydrochloric acid (J.T. Baker; THAILAND)

4) Potassium sulphate (UNIVAR; AUSTRALIA)

5) Copper sulphate (ANALAR; ENGLAND)

6) Borric acid (RANKEM; INDIA)

7) Petroleum ether (RCI Labscan; THAILAND)

8) N-octanol (BDH)

9) Potassium hydroxide (BDH)

10) Acetone (NORMAPUR; CE-EMB45053)

11) Calcium chloride dihydrate (ANALAR; ENGLAND)

13) Sodium azide (ANALAR; ENGLAND)

14) Glacial acetic acid (Caro erba)

15) Ethanol (ANALAR; ENGLAND)

16) Thermostable α -amylase (SIGMA; GERMANY)

17) Amyloglucosidase (SIGMA; DENMARK)

18) Glucose oxidase-peroxidase (GOPOD Reagent Enzymes) (MEGAZYME; IRELAND)

19) D-glucose standard solution (SIGMA; USA)

20) Pepsin solution (SIGMA; GERMANY)

21) Maleic acid (ANALAR; ENGLAND)

22) Pancreatic α -amylase (SIGMA; GERMANY)

23) Iodine solution

24) HCl-KCl buffer (pH 1.5)

25) Pepsin (SIGMA ALDRICH; USA)

26) Sodium acetate (UNIVAR; AUSTRALIA)

27) α -amylase (SIGMA ; GERMANY)

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำข้าวเปลือกจากข้าวสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 มากะเทาะเปลือกและแยกแกลบออก โดยใช้เครื่องสีข้าวที่สร้างขึ้นเองของภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนศาสตร์ จนได้เป็นข้าวกล้อง จากนั้นนำข้าวกล้องที่ได้ไปขัดสี 6 ระดับ ได้แก่ ที่ระดับการขัดสี 0 (ข้าวกล้อง), 1.75, 4.50, 6.50, 8.50 และ 10.90% (ข้าวขาว) นำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 70 mesh แล้วจึงนำไปบรรจุใส่ถุงพลาสติก และเก็บไว้ในตู้แช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ส่วนรำข้าวที่ได้จากการขัดสีที่ระดับต่างๆ นำไปบรรจุใส่ถุงพลาสติก แล้วเก็บไว้ในตู้แช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อนำไปวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีต่อไป

3.2.2 การเตรียมข้าวหุงสุก

นำข้าวกล้องที่ได้ไปขัดสี 6 ระดับ ได้แก่ ที่ระดับการขัดสี 0 (ข้าวกล้อง), 1.75, 4.50, 6.50, 8.50 และ 10.90% (ข้าวขาว) ซึ่งตัวอย่างข้าวดิบเต็มเมล็ดมา 50 มิลลิกรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 30 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 4 มิลลิลิตร นำไปหุงที่อุณหภูมิ 180°C ด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำ (Autoclave) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกทันที

3.3.3 การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีในข้าวดอกมะลิ 105

- 1) การวิเคราะห์ความชื้น (AOAC. 2000) (ภาคผนวก ค)
- 2) การวิเคราะห์โปรตีนด้วยวิธีเจลดาล์ (AOAC. 2000) (ภาคผนวก ค)
- 3) การวิเคราะห์ไขมันด้วยวิธีซ็อกซ์เลท (AOAC. 2000) (ภาคผนวก ค)
- 4) การวิเคราะห์เส้นใย (AOAC. 2000) (ภาคผนวก ค)
- 5) การวิเคราะห์เถ้า (AOAC. 2000) (ภาคผนวก ค)
- 6) การวิเคราะห์ปริมาณแป้งทั้งหมด (Megazyme International Ireland, 2009)

ซึ่งตัวอย่างข้าวดิบที่บดเป็นผงและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 70 mesh มา 100 มิลลิกรัม เติมหาทานอลความเข้มข้น 80% 5 มิลลิลิตร แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 80-85°C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 5 นาที ผสมให้เข้ากัน และเติมหาทานอลความเข้มข้น 80% 5 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3000 rpm เป็นเวลา 10 นาที แล้วเทส่วนใสทิ้ง ใส่ magnetic bar และเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ 2 มิลลิลิตร หมุนกวนด้วยเครื่อง magnetic stirrer เป็นเวลา 20 นาที ในกล่องที่มีน้ำแข็งบรรจุอยู่ เพื่อละลายแป้ง หลังจากนั้นจึงเติมโซเดียมอะซิเตทบัฟเฟอร์

(pH 3.8) ความเข้มข้น 1.2 โมลาร์ 8 มิลลิลิตร พร้อมทั้งหมุนกวนในกล่องที่มีน้ำแข็ง แล้วเติมแอลฟาอะไมเลสที่ทนความร้อน 0.1 มิลลิลิตร และอะไมโลกลูโคซิเดส 0.1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน บ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 30 นาที เอาออกมาเขย่าเป็นช่วงๆ 1-2 ครั้ง นำสารที่ได้เทใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร แล้วปั่นเหวี่ยงหรือตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้น ปิเปตตัวอย่างที่ได้มา 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง ทำ 2 ซ้ำ เติมกลูโคสออกซิเดส-เปอร์ออกซิเดส (GOPOD Reagent) 3 มิลลิลิตร แล้วทำเบลนค์ โดยนำน้ำกลั่น 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ GOPOD Reagent 3 มิลลิลิตร และทำสารละลายกลูโคสมาตรฐาน โดยปิเปต D-glucose 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ GOPOD Reagent 3 มิลลิลิตร หลังจากนั้น จึงนำตัวอย่าง เบลนค์ และกลูโคสมาตรฐานมาบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 20 นาที นำมาวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร แล้วนำไปคำนวณตามสูตรของ Megazyme

7) การวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่ทนทานต่อการย่อย (Megazyme International Ireland, 2009)

ซึ่งตัวอย่างข้าวดิบที่บดเป็นผงและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 70 mesh มา 100 มิลลิกรัม ใส่ในหลอดทดลองฝาเกลียว เติมอะไมโลกลูโคซิเดสที่ผสมกับแอลฟาอะไมเลส 4 มิลลิลิตร ปิดฝาให้แน่นแล้วปั่นผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นผสมและวางหลอดให้อยู่ในแนวนอนในอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่าที่อุณหภูมิ 37°C ความเร็ว 200 stroke ต่อนาที เป็นเวลา 16 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาแล้ว เติมเอทานอลความเข้มข้น 99% 4 มิลลิลิตร และเขย่าอย่างแรงด้วยเครื่องปั่นผสม หลังจากนั้น นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบประมาณ 3000 rpm เป็นเวลา 10 นาที เทของเหลวด้านบนออก แล้วเติมเอทานอลความเข้มข้น 50% 2 มิลลิลิตร เขย่าอย่างแรงด้วยเครื่องปั่นผสมนำไปปั่นเหวี่ยงอีกครั้งที่ความเร็วรอบประมาณ 3000 rpm เป็นเวลา 10 นาที แล้วเทส่วนใสออก ใส่ magnetic bar และเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ 2 มิลลิลิตร หมุนกวนด้วยเครื่อง magnetic stirrer 20 นาที ในกล่องที่บรรจุน้ำแข็ง เติมโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ (pH 3.8) ความเข้มข้น 1.2 โมลาร์ ซึ่งหมุนกวนอยู่ และเติมอะไมโลกลูโคซิเดส 0.1 มิลลิลิตร ทันทีก่อนให้เข้ากัน นำไปให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 30 นาที โดยเอาออกมาเขย่าเป็นช่วงๆ ด้วยเครื่องปั่นผสมนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 rpm เป็นเวลา 10 นาที แล้วปิเปต 0.1 มิลลิลิตรใส่ในหลอดทดลอง เติม GOPOD Reagent 3 มิลลิลิตร ทำเบลนค์ โดยนำโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ (pH 4.5) ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ มา 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ GOPOD Reagent 3 มิลลิลิตร และทำกลูโคสมาตรฐาน โดยปิเปต D-glucose 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ GOPOD Reagent 3 มิลลิลิตร หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่าง เบลนค์ และกลูโคสมาตรฐานมาบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 20 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

แล้วนำไปคำนวณตามสูตรของ Megazyme

3.3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์

1) การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก (ปรับปรุงจากวิธีของ Bao et al., 2004 และวิธีของ Mohapatra et al., 2006)

ซึ่งตัวอย่างข้าวดิบบดที่ระดับการสีแต่ละระดับมา 80 กรัม ผสมกับน้ำ 200 กรัม นำไปหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (SHARP; JAPAN) วัดเนื้อสัมผัสของข้าวสุกด้วยเครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA-XT2i ใช้ cylinder probe ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร โดยตั้งระยะที่ probe กดลงไปตัวอย่างข้าวเท่ากับ 10 mm/min และใช้ความเร็ว 2 mm/min หลังจากนั้นจึงชั่งตัวอย่างข้าวสุกใส่ในกระบอกวัดเนื้อสัมผัส 40 กรัม เครื่องมือที่ใช้ในการวัด มีการออกแบบการเคี้ยวภายในปาก ลักษณะของ Texture Profile ที่ได้จากการใช้เครื่องวัดค่าเนื้อสัมผัสจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับตัวอย่างต่อเวลา ผ่านการกดของหัววัด 2 ครั้ง ดังนี้ ค่าความแข็ง (Hardness), ความสามารถในการทำให้แตกหัก (Fracturability), ความเกาะติดกัน (Cohesiveness), ความเหนียวติดกัน (Adhesiveness), ความยืดหยุ่น (Springiness), ความเหนียวติดยึด (Gumminess) และการเคี้ยว (Chewiness)

2) การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้ง (ปรับปรุงจากวิธีของ Cheng et al., 2005 และวิธีของ Zaidul et al., 2007)

ซึ่งตัวอย่างข้าวดิบที่บดเป็นผงและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 70 mesh มาจำนวนหนึ่ง โดยจำนวนของตัวอย่างขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่างและความชื้น ในกรณีที่ตัวอย่างมีความชื้น 14% ให้ตวงน้ำกลั่นปริมาตร 25.00 ± 0.05 มิลลิลิตร ใส่ลงในแคนของเครื่อง RVA ปริมาณของตัวอย่างและน้ำที่ใช้ควรคำนึงถึงค่าความชื้นของตัวอย่างด้วย โดยสามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$S = \frac{(28 \times C)}{(100 - M)}$$

$$W = 28 - S$$

เมื่อ S = น้ำหนักตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับแป้งแต่ละชนิด

C = ความเข้มข้นของสารละลายแป้งที่ต้องการ คิดเป็นน้ำหนักแห้ง (%)

M = ปริมาณความชื้นของแป้ง (%)

W = ปริมาณน้ำที่ถูกต้อง (กรัม)

จากนั้นให้ใส่แป้งลงในแกนที่มีน้ำอยู่ ใส่พาย (Paddle) ลงในแกน หมุนพายไปมาแรงๆ และดึงขึ้นลง เพื่อกวนตัวอย่างไม่ให้จับเป็นก้อนที่ผิวน้ำหรือติดอยู่ที่พาย นำแกนที่ใส่พายเข้าเครื่อง RVA กดมอเตอร์ลงเพื่อให้ RVA ทำงาน โดย hold ไว้ที่ 50°C นาน 3.45 นาที หลังจากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95°C ที่อัตราการให้ความร้อน 12°C/นาที hold ไว้ที่ 50°C นาน 2.5 นาที แล้วทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิ 50°C ที่อัตราการให้ความร้อน 12°C/นาที hold ไว้ที่ 50°C นาน 5.45 นาที ความเร็วรอบเริ่มต้นที่ 960 rpm และลดลงจนถึง 160 rpm ทั้งกระบวนการ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในช่วง 50-95°C และใช้เวลาในการทดสอบ 13 นาที จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดต่อเวลาที่ได้อ่านและบันทึกค่าต่างๆ ดังนี้ ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (Holding strength) ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (Breakdown) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (Setback) เวลาในการให้ค่าความหนืดสูงสุด (Peak time) และอุณหภูมิแป้งเปือก (Pasting temperature)

3) การวิเคราะห์ระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชัน (Birch and Priestley, 1973)

(1) การเตรียมตัวอย่างเพื่อหากราฟมาตรฐาน

เตรียมตัวอย่างข้าวที่มีระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน 0% โดยบดข้าวและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 70 mesh การเตรียมตัวอย่างข้าวที่มีระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน 100% โดยนำข้าวคิบมาทำให้สุกและทำให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 58°C บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 70 mesh และเตรียมตัวอย่างข้าวที่มีระดับการเกิดเจลลิตีในเซชันต่างๆ โดยนำแป้งข้าวที่เกิดเจลลิตีในเซชัน 0% และแป้งข้าวที่เกิดเจลลิตีในเซชัน 100% ผสมกันตามอัตราส่วนการเกิดเจลลิตีในเซชัน ส่วนตัวอย่างที่ผ่านการสีในแต่ละระดับการสีนำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 70 mesh เมื่อได้ตัวอย่างครบแล้วนำมาวิเคราะห์ระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชัน

(2) การวิเคราะห์ระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชัน

ชั่งตัวอย่างแป้งข้าวมา 0.2 กรัม เติมน้ำกลั่น 98 มิลลิลิตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน 5 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 rpm ปิเปิดส่วนโสมมา 1 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ 0.4 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 10 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น เติมสารละลายไอโอดีน 0.1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ทำซ้ำโดยเติมน้ำกลั่น 95 มิลลิลิตรและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ 2 มิลลิลิตร ทำให้เป็นกลางด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากค่าที่มีความเข้มข้น 0.2 โมลาร์หารด้วยค่าที่ได้จากค่าที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ แล้วนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐาน ส่วนตัวอย่างที่ระดับการสี 6 ระดับ ให้ทดลองเหมือนกับการทำกราฟมาตรฐาน แล้วนำไปแทนค่าหารระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชันในสมการเส้นตรง

3.3.5 การวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก

(Goni et al., 1997)

ซึ่งตัวอย่างข้าวมา 50 มิลลิกรัม ผสมกับไฮโดรคลอริกโพแทสเซียมคลอไรด์บัฟเฟอร์ (pH 1.5) 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายเปปซิน (Pepsin) 0.2 มิลลิลิตร ลงในสารละลายไฮโดรคลอริกโพแทสเซียมคลอไรด์บัฟเฟอร์ (pH 1.5) 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปใส่ในแต่ละตัวอย่างให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่าที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 60 นาที ปรับปริมาตรให้ครบ 25 มิลลิลิตร ด้วยทริสมาลิออบัฟเฟอร์ (pH 6.9) ที่ผสมกับ แอลฟาอะไมเอสลงในแต่ละตัวอย่าง แล้วนำไปให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่าที่อุณหภูมิ 37°C เขย่าปานกลาง ปิดเตาสารละลายจากแต่ละขวดทุก 30 นาที จนครบ 180 นาที (0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที) 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง หยุดการทำงานของแอลฟาอะไมเอสทันที โดยนำไปต้มในอ่างควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นจึงเติม โซเดียมอะซีเตตบัฟเฟอร์ (pH 4.75) 0.4 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร และอะไมโลกลูโคซิเดสจาก *Aspergillus niger* 30 ไมโครลิตร ในขั้นตอนนี้แป้งจะถูกย่อยกลายเป็นกลูโคส นำตัวอย่างไปบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 45 นาที เมื่อครบเวลาแล้วจึงเปิดสารละลายที่ได้มา 0.1 มิลลิลิตร เติม GOPOD Reagent 3 มิลลิลิตร แล้วทำแบลนด์โดยนำน้ำกลั่น 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ GOPOD Reagent 3 มิลลิลิตร และทำกลูโคสมาตรฐาน โดยเปิด D-glucose 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ GOPOD Reagent 3 มิลลิลิตร หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่าง แบลนด์ และกลูโคสมาตรฐาน มาบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 20 นาที นำมาวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร วิเคราะห์ 3 ซ้ำ คำนวณค่าการดูดกลืนแสงให้เป็นการย่อยแป้ง (%) แล้วนำมาแทนค่าในแบบจำลองของ Goni et al (1997)

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการขัดรำออกที่ระดับการสี 6 ระดับ ได้แก่ 0 (ข้าวกล้อง), 1.75, 4.50, 6.50, 8.50 และ 10.90% (ข้าวขาว) โดยเก็บรวบรวมข้อมูลเชิงปริมาณจากเครื่องมือวิเคราะห์ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และนำเสนอข้อมูลในรูปแบบค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และทดสอบสมมติฐาน โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว ตรวจสอบข้อมูลเพื่อวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล

3.5. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

3.5.1 สถิติพื้นฐาน ได้แก่

- 1) ร้อยละ (Percentage)
- 2) ค่าเฉลี่ย (Mean)
- 3) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

3.5.2 สถิติที่ใช้ คือ F-test (One-way ANOVA) แผนการทดลองแบบ CRD และวิเคราะห์ข้อมูลโดยทดสอบสมมติฐานด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS version 16.0 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล

ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการวิเคราะห์และแปลผลข้อมูลเป็นลำดับขั้นตอนดังนี้

- 4.1 สัญลักษณ์ที่ใช้นำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล
- 4.2 ลำดับขั้นในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล
- 4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล

4.1. สัญลักษณ์ที่ใช้นำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล

สัญลักษณ์ที่ใช้นำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับแปลความหมายข้อมูลมีดังนี้

\bar{x} แทนค่าเฉลี่ย

SD แทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

n แทนจำนวนซ้ำการทดลอง

F แทนสถิติทดสอบที่ใช้พิจารณาใน F-distribution

4.2 ลำดับขั้นในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยกำหนดลำดับขั้นในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

ตอนที่ 1 ผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อองค์ประกอบทางเคมีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการขัดสีออกที่ระดับการใส่ 6 ระดับ คือ 0 (ข้าวกล้อง), 1.75, 4.50, 6.50, 8.50 และ 10.90% (ข้าวขาว) ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า คาร์โบไฮเดรต แป้งทั้งหมด และแป้งที่ทนทานต่อการย่อย

ตอนที่ 2 ผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อองค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ได้จากการขัดสีออกที่ระดับการใส่ 6 ระดับ คือ 0 (ข้าวกล้อง), 1.75, 4.50, 6.50, 8.50 และ 10.90% (รำข้าวขาว) ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า คาร์โบไฮเดรต

ตอนที่ 3 ผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ได้แก่ ลักษณะเนื้อสัมผัส คุณสมบัติด้านความหนืด และระดับของการเกิดเจลลาติโนเซชันของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการใส่ต่างกัน 6 ระดับ

ตอนที่ 4 ผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง และดัชนีไกลซีมิกของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการใส่ต่างกัน 6 ระดับ โดยการหาจุดนพลศาสตร์ของการย่อยแป้ง (ใช้เอนไซม์ในการย่อย) และคำนวณอัตราการย่อยแป้งที่เวลาแตกต่างกัน คือ 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที หลังจากนั้นจึงนำมาคำนวณหาดัชนีไกลซีมิกตามแบบจำลองของ Goni et al (1997) โดยใช้สมการดังนี้

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

เมื่อ C คือ การย่อยแป้งที่เวลาใดๆ (%)

C_{∞} คือ ความสมดุลของการย่อยแป้งหลัง 180 นาที (%)

k คือ ค่าคงที่

t คือ เวลา (นาที)

เมื่อได้ค่า C_{∞} แล้วนำมาแทนค่าหาพื้นที่ใต้กราฟการย่อย โดยคำนวณตามสมการ

$$AUC = C_{\infty} (t_f - t_0) - (C_{\infty} / k) [1 - \exp[-k(t_f - t_0)]] \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ C_{∞} คือ ความสมดุลของการย่อยแป้งหลัง 180 นาที (%)

t_f คือ เวลาสุดท้าย (180 นาที)

t_0 คือ เวลาเริ่มต้น (0 นาที)

k คือ ค่าคงที่

โดยดัชนีการย่อยได้มาจากพื้นที่ใต้กราฟของแต่ละตัวอย่างนำไปเปรียบเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟของตัวอย่างอ้างอิง จะได้ดัชนีการย่อยแล้วนำมาใช้ในการคำนวณหาดัชนีไกลซีมิก โดยใช้สมการ

$$GI = 39.71 + (0.549 \times HI) \quad \text{สมการที่ 3}$$

4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล

4.3.1 ตอนที่ 1 ผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อองค์ประกอบทางเคมีของข้าว

1) ผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อองค์ประกอบทางเคมี

ผลการศึกษาร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากกระบวนการจัดสีที่ระดับต่างกัน 6 ระดับ คือ 0 (ข้าวกล้อง), 1.75, 4.50, 6.50, 8.50 และ 10.90% (ข้าวขาว) (ตาราง 4.1) พบว่าระดับการใส่ไม่มีผลต่อความชื้นของข้าวดอกมะลิ 105 ($p > 0.05$) (ตาราง ง.1 ภาคผนวก ง)

ตาราง 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน

ระดับการสี (%)	องค์ประกอบทางเคมี (% น้ำหนักแห้ง)					
	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	เส้นใย	เถ้า	คาร์โบไฮเดรต
0	11.44±0.06	8.87±0.06	2.92±0.03	1.12±0.04	1.42±0.08	74.23±0.02
1.75	11.46±0.04	8.49±0.06	2.21±0.04	0.99±0.01	1.16±0.04	75.69±0.06
4.50	11.48±0.07	7.94±0.04	1.71±0.01	0.75±0.04	1.04±0.03	77.08±0.16
6.50	11.42±0.02	7.63±0.05	1.27±0.02	0.66±0.01	0.97±0.02	78.04±0.03
8.50	11.48±0.02	7.19±0.0	0.91±0.05	0.50±0.01	0.60±0.02	79.31±0.17
10.90	11.45±0.04	6.87±0.14	0.63±0.02	0.35±0.01	0.36±0.02	80.36±0.18

แสดงผลในรูปแบบของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

โดยค่าเฉลี่ยของปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 11.42-11.48% สอดคล้องกับงานวิจัยของ Deepa et al (2008) ที่รายงานว่า การเก็บรักษาข้าวไว้ภายใต้สภาวะเดียวกันจะส่งผลให้ข้าวนั้นมีปริมาณความชื้นใกล้เคียงกัน

ในขณะที่ระดับการสีมีผลต่อปริมาณ โปรตีน ไขมัน และเส้นใย ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.1 ภาคผนวก ง) โดยที่ระดับการสี 1.75% มีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเส้นใยของข้าวมากกว่าที่ระดับการสีอื่นๆ แต่น้อยกว่าข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) (ตาราง จ.1, ตาราง จ.2 และตาราง จ.3 ภาคผนวก จ)

ระดับการสีมีผลต่อปริมาณเถ้าของข้าวขาวดอกมะลิ 105 อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.1 ภาคผนวก ง) โดยที่ระดับการสี 1.75% มีปริมาณเถ้ามากกว่าที่ระดับการสีอื่นๆ ยกเว้นไม่แตกต่างจากที่ระดับการสี 4.50% แต่น้อยกว่าข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) (ตาราง จ.4 ภาคผนวก จ)

จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่ากระบวนการขัดสีส่งผลให้ปริมาณ โปรตีน ไขมัน และเส้นใยของข้าวลดลงเมื่อระดับการขัดสีเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากชั้นรำข้าวมีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเส้นใยในปริมาณมากกว่าภายในเมล็ดข้าว และปริมาณโปรตีน ไขมัน และเส้นใยที่ลดลงเกิดจากส่วนของจมูกข้าวหลุดออกในระหว่างกระบวนการขัดสีข้าว โดยปริมาณโปรตีน ไขมัน และเส้นใยที่ยังคงอยู่ขึ้นอยู่กับความหนักเบาในการขัดสีเอาชั้นรำออกจากเมล็ดข้าว

(Sotelo et al., 1990; Anjum et al., 2007) และสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Anjum et al (2007) ที่รายงานว่าข้าวมีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วง 6.11-10.73% ไขมัน 0.73-9.72% เส้นใย 0.21-2.30% และเถ้า 0.54-5.91%

ในส่วนของคาร์โบไฮเดรต พบว่าระดับการสีมีผลต่อปริมาณคาร์โบไฮเดรตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.1 ภาคผนวก ง) โดยที่ระดับการสี 10.90% มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตมากกว่าที่ระดับการสีอื่นๆ (ตาราง จ.5 ภาคผนวก จ)

จากการศึกษาผลของ DOM ต่อองค์ประกอบทางเคมี พบว่า DOM ที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยที่ยังคงคุณสมบัติประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภคมากที่สุด คือข้าวที่ได้จากการสีที่ DOM 1.75% เนื่องจากมีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเส้นใยสูงเมื่อเทียบกับข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) โดยข้าวที่ระดับการสี 1.75% มีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเส้นใยลดลง 4.28%, 24.32% และ 11.61% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%)

2) ผลของระดับการสีข้าวต่อปริมาณแป้งทั้งหมด แป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ และแป้งที่ย่อยได้

ผลการวิเคราะห์แป้งทั้งหมด แป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ และแป้งที่ย่อยได้ของข้าวที่ผ่านการขัดสี 6 ระดับ (ตาราง 4.2) พบว่าระดับการสีมีผลต่อปริมาณแป้งทั้งหมดของข้าวขาวดอกมะลิ 105 อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.2 ภาคผนวก ง) โดยข้าวที่ระดับการสี 10.90% มีปริมาณแป้งทั้งหมดมากกว่าข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) และ 1.75% (ตาราง จ.6 ภาคผนวก จ) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lamberts et al (2007) ที่พบว่าปริมาณแป้งทั้งหมดของข้าวเพิ่มขึ้น เมื่อมีการขัดรำออกมากขึ้น เนื่องจากส่วนของชั้นรำหลุดออกไปในระหว่างกระบวนการสี ดังนั้นเมล็ดข้าวจึงเหลือแต่ส่วนของเอนโดสเปิร์ม จึงทำให้เมล็ดข้าวมีปริมาณแป้งทั้งหมดสูง

ระดับการสีมีผลต่อปริมาณแป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.2 ภาคผนวก ง) โดยข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) มีปริมาณแป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มากกว่าที่ระดับการสีอื่นๆ ยกเว้นไม่แตกต่างจากที่ระดับการสี 1.75% (ตาราง จ.7 ภาคผนวก จ) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Goni et al (1997) ที่รายงานว่าข้าวมีปริมาณแป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์เท่ากับ 2.53% ทั้งนี้แป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์เหล่านั้นเกิดจากการบดเมล็ดข้าวก่อนนำมาวิเคราะห์ ซึ่งการบดเมล็ดข้าวนั้นส่งผลให้โครงสร้างของเม็ดแป้งถูกทำลายไปบางส่วน แล้วไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ นอกจากนี้ยังเกิดจากการรวมตัวและเกิดอันตรกิริยากันระหว่างแป้งกับโปรตีนภายในเมล็ดข้าว ทำให้การทำงานของเอนไซม์ถูกจำกัด (Walter et al., 2005)

ระดับการสีมีผลต่อปริมาณแป้งที่ย่อยได้ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.2 ภาคผนวก ง) โดยข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) และ 1.75% มีปริมาณแป้งที่ย่อยได้ไม่แตกต่างกัน แต่น้อยกว่าที่ระดับการสี 8.50 และ 10.90% (ตาราง จ.8 ภาคผนวก จ)

ตาราง 4.2 แป้งทั้งหมด แป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ และแป้งที่ย่อยได้ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน

ระดับการสี (%)	แป้งทั้งหมด (TS; %)	แป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (RS; %)	แป้งที่ย่อยได้ (DS; %)
0	83.96±0.46	2.67±0.02	81.29±0.45
1.75	84.01±0.26	2.65±0.01	81.36±0.27
4.50	84.37±0.28	2.61±0.01	81.76±0.27
6.50	84.61±0.48	2.58±0.01	82.03±0.48
8.50	85.06±0.49	2.55±0.01	82.51±0.05
10.90	85.11±0.27	2.51±0.01	82.60±0.27

แสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.3.2 ตอนที่ 2 ผลของระดับการสีข้าวต่อองค์ประกอบทางเคมีของรำข้าว

ผลการศึกษาร่วมองค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากกระบวนการขัดสีที่ระดับการสีต่างกัน 6 ระดับ คือ 0, 1.75, 4.50, 6.50, 8.50 และ 10.90% (ตาราง 4.3) พบว่าระดับการสีมีผลต่อความชื้นของรำข้าว ($p>0.05$) (ตาราง ง.3 ภาคผนวก ง) โดยทุกระดับการสีมีปริมาณความชื้นไม่แตกต่างกัน แต่มากกว่าข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) (ตาราง จ.9 ภาคผนวก จ)

ในขณะที่ระดับการสีมีผลต่อปริมาณโปรตีนและไขมันของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) (ตาราง ง.3 ภาคผนวก ง) โดยรำข้าวที่ได้จากการขัดสีที่ระดับการสี 1.75% มีปริมาณโปรตีนและไขมันมากกว่าที่ระดับการสีอื่นๆ ยกเว้นไม่แตกต่างจากที่ระดับการสี 4.50% (ตาราง จ.10 และตาราง จ.11 ภาคผนวก จ)

ระดับการสีมีผลต่อปริมาณเส้นใยและเถ้าของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) (ตาราง ง.3 ภาคผนวก ง) โดยรำข้าวที่ได้จากการขัดสีที่ระดับการสี 1.75 % มีปริมาณเส้นใยและเถ้ามากกว่าที่ระดับการสี 8.50 และ 10.90% แต่น้อยกว่าข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) (ตาราง จ.12 และตาราง จ.13 ภาคผนวก จ)

ระดับการขัดสีข้าวที่เพิ่มขึ้น มีผลให้ปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้าของชั้นรำลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการปนเปื้อนของข้าวหักและส่วนของชั้นเอนโดสเปิร์มมากับรำข้าวในระหว่างกระบวนการสีข้าว ซึ่งทำให้ปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้าของรำข้าวมีปริมาณลดลง นอกจากระดับการสีแล้วปัจจัยอื่นที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของรำข้าว ได้แก่ สายพันธุ์ข้าว ชนิดของ

ระบบการสี และส่วนที่ปนเปื้อนมากับรำข้าวในระหว่างการสี (Orthofer, 2005) จากผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Orthofer (2005) และ Choi et al (2009) ที่พบว่ารำข้าวที่ได้จากการขัดสีที่มีระดับการสี 0-10% มีปริมาณโปรตีนในช่วง 16.7-17.0% ไขมัน 14.2-17.7% เส้นใย 5.7-10.5% และเถ้า 7.5-9.8%

ในส่วนของการโบไฮเดรต พบว่าระดับการสีมีผลต่อปริมาณคาร์โบไฮเดรตของรำข้าวขาวดอกมะลิ 105 อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.3 ภาคผนวก ง) โดยรำข้าวที่ได้จากการขัดสีที่ระดับการสี 10.90% มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตมากกว่าที่ระดับการสีอื่นๆ ยกเว้นไม่แตกต่างจากที่ระดับการสี 8.50% (ตาราง จ.14 ภาคผนวก จ)

ตาราง 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน

ระดับการสี (%)	องค์ประกอบทางเคมี (% น้ำหนักแห้ง)					
	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	เส้นใย	เถ้า	คาร์โบไฮเดรต
0 (แกลบ)	9.79±0.56	5.05±0.11	0.97±0.10	41.78±1.73	23.25±0.59	19.17±3.02
1.75	12.43±0.50	14.85±0.24	17.74±0.64	11.25±0.19	9.66±0.18	34.06±1.05
4.50	12.43±0.35	14.69±0.27	17.21±0.28	10.86±0.05	9.25±0.40	35.57±0.42
6.50	12.41±0.36	13.86±0.11	16.60±0.23	9.80±0.27	8.63±0.15	38.52±0.62
8.50	12.40±0.58	13.60±0.20	16.60±0.24	8.69±0.41	8.61±0.23	40.10±0.43
10.90	12.40±0.08	12.79±0.02	15.48±0.05	8.67±0.02	7.64±0.14	43.01±0.11

แสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.3.3 ตอนที่ 3 ผลของระดับการสีข้าวต่อคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ โดยมีรายละเอียดในการศึกษาดังนี้

1) ผลของระดับการสีข้าวต่อลักษณะเนื้อสัมผัส

ลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารเป็นตัวบ่งชี้ถึงลักษณะของส่วนประกอบ และโครงสร้างภายในอาหาร ซึ่งอธิบายหรือแสดงผลออกมาในรูปแบบของพฤติกรรมการไหลหรือการสูญเสียรูปร่างของอาหารจากแรงกลของการบดเคี้ยว หรือการกดทับของแรงจากเครื่องมือ ความสำคัญของเนื้อสัมผัสในอาหารสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินแรงต้านทานของผลิตภัณฑ์ต่อแรงทางกลที่มักกระทำ เช่น ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของการไหลของผลิตภัณฑ์อาหาร

ในระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษา และใช้เป็นตัวแทนในการกำหนดพฤติกรรมในการเลี้ยวอาหารของผู้บริโภค โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ค่าความแข็ง ความเกาะติดกัน ความเหนียวติดกัน ความยืดหยุ่น ความเหนียวติดยึด และการเคี้ยว (ตาราง 4.4) ดังนี้

ระดับการสีมีผลต่อค่าความแข็งของข้าวอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.4 ภาคผนวก ง) โดยที่ระดับการสี 1.75% ข้าวมีค่าความแข็งมากกว่าที่ระดับการสีอื่นๆ แต่น้อยกว่าข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) (ตาราง จ.15 ภาคผนวก จ) ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Gujral and Kumar (2003) ที่พบว่าข้าวที่ไม่ผ่านการขัดสี (ข้าวกล้อง) มีความแข็งมากกว่าข้าวที่ผ่านการขัดสี (ข้าวขาว) เพราะข้าวที่ไม่ผ่านการขัดสีมีเส้นใยที่อยู่ในชั้นรำห่อหุ้มเมล็ดข้าวไว้ และข้าวที่มีระดับการสีต่ำ มีส่วนของชั้นรำช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเมล็ดข้าว ส่งผลให้ข้าวมีความแข็งมากกว่าข้าวที่มีระดับการสีสูง (Mohapatra and Bal, 2006)

สำหรับความเกาะติดกันของข้าว พบว่าระดับการสีที่แตกต่างกันมีผลต่อความเกาะติดกันของข้าวอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.4 ภาคผนวก ง) โดยที่ระดับการสี 4.50, 6.50, 8.50 และ 10.90% ข้าวมีค่าความเกาะติดกันไม่แตกต่างกัน แต่มากกว่าข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) และ 1.75% (ตาราง จ.16 ภาคผนวก จ) จากผลการทดลองตอนที่ 1.1 พบว่าการขัดสีเมล็ดข้าวส่งผลให้ปริมาณ โปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้าของข้าวลดลง สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Mohapatra and Bal (2006) ที่พบเช่นกันว่าปริมาณ โปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้าของข้าวลดลง เมื่อมีการขัดสีเพิ่มขึ้น เนื่องจากชั้นแกล้ว โรน เพอริคาร์พ และเยื่อหุ้มเมล็ดหลุดออกในระหว่างที่มีการสีข้าว การลดลงขององค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อค่าความเกาะติดกันของข้าว

ระดับการสีมีผลต่อความเหนียวติดกันของข้าวขาวดอกมะลิ 105 อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.4 ภาคผนวก ง) โดยข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) มีค่าความเหนียวติดกันน้อยกว่าที่ระดับการสีอื่นๆ ยกเว้น ไม่แตกต่างจากที่ระดับการสี 1.75% (ตาราง จ.17 ภาคผนวก จ)

ระดับการสีไม่มีผลต่อค่าความยืดหยุ่นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตาราง ง.4 ภาคผนวก ง) โดยค่าเฉลี่ยของค่าความยืดหยุ่นอยู่ในช่วง 0.29-0.53 mm

ตาราง 4.4 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับต่างกัน

ระดับ	ลักษณะเนื้อสัมผัส						
	การสี (%)	ความแข็ง (N)	ความเกาะ ติดกัน	ความเหนียว ติดกัน (N.s)	ความ ยืดหยุ่น (mm)	ความเหนียว ติดยึด (N)	การเคี้ยว (N.mm)
0		12.27±1.08	0.24±0.00	-0.44±0.10	0.53±0.27	2.91±0.26	1.57±0.81
1.75		9.67±0.39	0.24±0.10	-0.72±0.06	0.46±0.07	2.34±0.17	1.07±0.16
4.50		8.34±0.39	0.28±0.00	-1.02±0.02	0.42±0.43	2.30±0.12	0.97±0.07
6.50		6.82±0.80	0.29±0.01	-1.23±0.17	0.38±0.05	1.93±0.24	0.74±0.20
8.50		6.19±0.59	0.30±0.00	-1.7±0.12	0.37±0.04	1.82±0.14	0.68±0.12
10.50		4.99±0.67	0.30±0.02	-2.24±0.13	0.29±0.07	1.51±0.27	0.42±0.03

แสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ในการทำงานเดียวกันกับค่าความแข็ง พบว่าระดับการสีมีผลต่อความเหนียวติดยึด อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.4 ภาคผนวก ง) โดยที่ระดับการสี 1.75 และ 4.50% ข้าวมีค่าความเหนียวติดยึดมากกว่าที่ระดับการสีอื่นๆ แต่น้อยกว่าข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) (ตาราง จ.18 ภาคผนวก จ) ผลงานวิจัยของ Mohapatra and Bal (2006) กล่าวว่าค่าความเหนียวติดกัน มีสหสัมพันธ์เชิงลบ ($r = 0.333$) กับความเหนียวติดยึดของเมล็ดข้าว ($p < 0.05$) และมีสหสัมพันธ์เชิงบวก ($r = 0.883$) กับระดับการสีข้าว ($p < 0.01$) นอกจากนี้ผลงานวิจัยของ Park et al (2001) กล่าวว่า ค่าความแข็งต่ำและค่าความเกาะติดกันของข้าวสูงเมื่อระดับการสีเพิ่มขึ้น มีความเกี่ยวข้องกับปริมาณ โปรตีน โดยโปรตีนที่ไม่สามารถละลายได้จะขัดขวางการดูดซึมน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้ง ในระหว่างการหุงข้าว

ระดับการสีมีผลต่อค่าการเคี้ยวอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.4 ภาคผนวก ง) โดยข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) มีค่าการเคี้ยวมากกว่าที่ระดับการสี 10.90% (ตาราง จ.19 ภาคผนวก จ)

2) ผลของระดับการสีข้าวต่อคุณสมบัติด้านความเหน็ด

ความเหน็ดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง โดยเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่ง แหวนลอยในน้ำได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ความเหน็ดเพิ่มขึ้น

เร็วมาก อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนืด หรืออุณหภูมิแป็งเปือก ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิที่ทำให้ความหนืดของน้ำแป้งเพิ่มขึ้น 2 RVU ในเวลา 20 วินาที ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด จากนั้นอาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง เมื่อลดอุณหภูมิลง โมเลกุลอิสระที่ระจัดกระจายออกมา โดยเฉพาะส่วนของอะมิโลส ถ้ามีขนาด โมเลกุลที่เหมาะสม คือไม่สั้นและยาวเกินไปจะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกัน และกักน้ำไว้ได้ ทำให้ความหนืดสูงขึ้นอีก ความหนืดที่กลับสูงขึ้นนี้อีกนี้เรียกว่า ความหนืดต่ำสุด โดยค่าพารามิเตอร์ ที่ได้จากการวัดคุณสมบัติด้านความหนืด ได้แก่ ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity), ความหนืดต่ำสุด (Holding Strength), ผลต่างของความหนืดสูงสุดกับความหนืดต่ำสุด (Breakdown), ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity), ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (Setback), เวลาในการให้ค่า ความหนืดสูงสุด (Peak time) และอุณหภูมิแป็งเปือก (Pasting temperature) ผลของระดับการสีข้าว ต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งจากข้าวขาวดอกมะลิ 105 (ตาราง 4.5) พบว่า

ระดับการสีมีผลต่อค่าความหนืดสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.5 ภาคผนวก ง) โดยที่ระดับการสี 10.90% ข้าวมีค่าความหนืดสูงสุดมากกว่าที่ระดับการสีอื่นๆ (ตาราง จ.20 ภาคผนวก จ)

ระดับการสีมีผลต่อค่าความหนืดต่ำสุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.5 ภาคผนวก ง) โดยที่ระดับการสี 10.90% ข้าวมีค่าความหนืดต่ำสุดมากกว่าที่ระดับการสีอื่นๆ ยกเว้นไม่แตกต่างจากที่ระดับการสี 8.50% (ตาราง จ.21 ภาคผนวก จ)

ในทำนองเดียวกันกับค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด พบว่าระดับการสี มีผลต่อค่าผลต่างของความหนืดสูงสุดกับความหนืดต่ำสุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.5 ภาคผนวก ง) โดยที่ระดับการสี 8.50% ข้าวมีค่าผลต่างของความหนืดสูงสุดกับความหนืดต่ำสุด มากกว่าข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) และ 1.75% ยกเว้นไม่แตกต่างจากที่ระดับการสี 4.50 และ 6.50% แต่น้อยกว่าที่ระดับการสี 10.90% (ตาราง จ.22 ภาคผนวก จ)

ระดับการสีมีผลต่อค่าความหนืดสุดท้ายอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.5 ภาคผนวก ง) โดยที่ระดับการสี 8.50% ข้าวมีค่าความหนืดสุดท้ายมากกว่าที่ระดับการสีอื่นๆ ยกเว้นไม่แตกต่างจากที่ระดับการสี 6.50% แต่น้อยกว่าที่ระดับการสี 10.90% (ตาราง จ.23 ภาคผนวก จ)

ระดับการสีมีผลต่อค่าผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.5 ภาคผนวก ง) โดยที่ระดับการสี 6.50 และ 8.50% ข้าวมีค่าผลต่าง ของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุดมากกว่าที่ระดับการสีอื่นๆ แต่น้อยกว่าที่ระดับการสี 10.90% (ตาราง จ.24 ภาคผนวก จ)

ระดับการสีข้าวที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ผลต่างของความหนืดสูงสุดกับความหนืดต่ำสุด ความหนืดสุดท้าย ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างกระบวนการเกิดเจล ข้าวที่มีระดับการสีต่ำจะมีชั้นรำที่หุ้มเมล็ดข้าวปนเปื้อนไปในตัวอย่าง ทำให้ปริมาณแป้งโดยรวมน้อยลง ซึ่งในชั้นรำข้าวมีโปรตีน และไขมันมากกว่าส่วนของเมล็ดข้าวทำหน้าที่จำกัดการดูดซึมน้ำ นอกจากนี้โปรตีนและไขมันเกิดอันตรกิริยากับสตาร์ช โดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโปรตีนกับสตาร์ชและไขมันกับสตาร์ช ซึ่งไปจำกัดการดูดซึมน้ำ ทำให้ตัวอย่างทำปฏิกิริยากับน้ำได้ไม่เต็มที่ (Park et al., 2001; Saleh & Meullenet, 2007)

ในขณะที่ระดับการสีไม่มีผลต่อเวลาในการให้ค่าความหนืดสูงสุดและอุณหภูมิแป้งเป็ยก (ตาราง ง.5 ภาคผนวก ง) โดยค่าเฉลี่ยของเวลาในการให้ค่าความหนืดสูงสุดอยู่ในช่วง 5.31-5.46 นาที และอุณหภูมิแป้งเป็ยกอยู่ในช่วง 73.98-77.53°C

ตาราง 4.5 คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน

DOM (%)	Pasting behaviour (RVU)						Pasting temperature (°C)
	Peak viscosity	Holding strenght	Breakdown	Final viscosity	Setback	Peak time (min)	
0	244.22±7.01	133.72±1.71	110.50±8.33	207.03±4.51	73.31±3.74	5.44±0.10	77.53±0.08
1.75	303.89±2.72	159.28±9.62	144.55±9.71	240.86±7.43	76.06±3.88	5.38±0.14	76.40±3.68
4.50	315.42±0.46	158.78±4.84	156.64±5.15	248.53±2.43	81.58±2.19	5.31±0.03	75.88±1.63
6.50	364.97±3.55	184.31±8.13	175.61±11.43	272.56±8.07	88.25±0.76	5.43±0.09	74.85±0.80
8.50	385.64±2.34	210.03±13.43	180.67±5.68	303.00±18.05	89.75±2.42	5.43±0.10	74.60±0.52
10.90	428.42±6.11	236.83±13.88	191.58±16.93	312.89±17.75	92.64±5.10	5.43±0.07	73.98±0.46

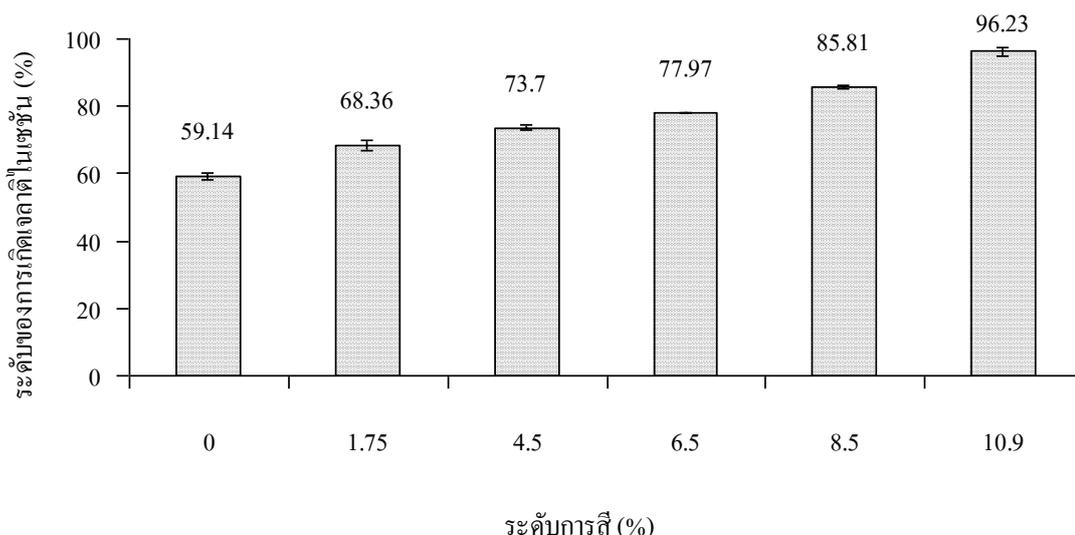
แสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลของระดับการสีต่อคุณสมบัติด้านความหนืดที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Tran et al. (2004) และ Sompong et al. (2011) ที่รายงานว่าค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด ความหนืดสุดท้าย และผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุดของแป้งข้าวเพิ่มขึ้นเมื่อระดับการสีเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าข้าวที่ระดับการสีต่ำ จะมีความหนืดต่ำ มีความทนต่อการกวนได้ดี และมีความสามารถในการเกิดเจลต่ำ

3) ผลของระดับการสีข้าวต่อระดับของการเกิดเจลลิตินในเซชัน

เมล็ดสตาร์ชมีคุณสมบัติเป็น Optical birefringence ก็สามารบิคแสวงระนาบโพลาไรซ์ได้ สมบัตินี้บ่งชี้ว่าสตาร์ชมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ หรืออยู่ในรูปผลึก การจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เมล็ดสตาร์ชไม่ละลายในน้ำเย็น โดยสามารถคูดน้ำเย็นและพองตัวได้เล็กน้อย ความสามารถในการคูดน้ำของเมล็ดสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เม็ดสตาร์ชจะพองตัวออกมาก อะมิโลสส่วนที่ละลายน้ำจะหลุดออกมามากด้วย มีผลให้ส่วนผสมของน้ำแป้งมีความหนืดและความใสมากขึ้น

จากการนำข้าวที่ผ่านการขัดสีทั้ง 6 ระดับ มาวิเคราะห์ระดับของการเกิดเจลลิตินในเซชัน (ภาพประกอบ 4.1) พบว่าระดับการสีมีผลต่อระดับของการเกิดเจลลิตินในเซชันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.6 ภาคผนวก ง) โดยระดับการสีที่ 10.90% มีระดับของการเกิดเจลลิตินในเซชันมากกว่าที่ระดับการสีอื่นๆ (ตาราง จ.25 ภาคผนวก จ) อาจเนื่องมาจากชั้นนอกของเมล็ดข้าวที่มีระดับการสีต่ำมีองค์ประกอบที่เป็นสารคล้ายขี้ผึ้งห่อหุ้มอยู่ จึงขัดขวางการคูดซึมน้ำในกระบวนการเกิดเจลลิตินในเซชัน (Tran et al., 2004) นอกจากนี้เมล็ดข้าวประกอบด้วยโปรตีนที่แทรกอยู่ระหว่างเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งคูดซึมน้ำและพองตัวในระหว่างการผลิตเจลลิตินในเซชันได้ยาก ในส่วนของชั้นรำที่พบมากในข้าวซึ่งผ่านการสีที่ระดับการสีต่ำอุดมไปด้วยโปรตีน ไขมัน และเส้นใย ที่เป็นตัวขัดขวางการคูดซึมน้ำ ซึ่งส่งผลให้การเกิดเจลลิตินในเซชันต่ำ (Birch and Priestley, 1973)



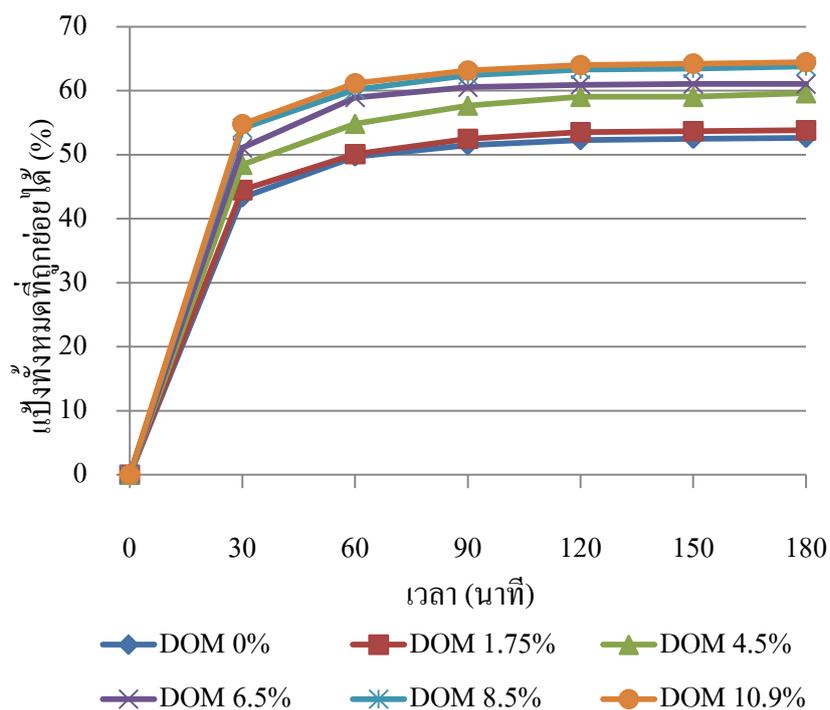
ภาพประกอบ 4.1 ระดับของการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน

4.3.4 ตอนที่ 4 ผลของระดับการสีต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก

1) ผลของระดับการสีต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง

ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งแตกต่างกันตามปริมาณและคุณภาพของคาร์โบไฮเดรตในอาหารแต่ละชนิด เช่น ข้าวเหนียวหรือข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ มีความสามารถในการย่อยได้ของแป้งสูงกว่าข้าวเจ้าหรือข้าวที่มีอะมิโลสสูง (Hu et al., 2004) นอกจากนี้ การเก็บรักษาข้าวที่หุงสุกไว้ที่อุณหภูมิแช่เย็นก่อนนำมาวิเคราะห์การย่อยได้ของแป้ง จะทำให้ข้าวเกิดการคืนตัว เมื่อนำมาวิเคราะห์การย่อยได้ของแป้ง พบว่าการย่อยได้ของแป้งจะสูง ส่งผลให้ค่าดัชนีไกลซีมิกสูง ปัจจัยดังกล่าวมีความสำคัญต่อผู้ป่วยโรคเบาหวานและเกี่ยวข้องกับการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดให้มีความสมดุล และส่งผลกระทบต่อค่าดัชนีไกลซีมิกด้วย จากงานวิจัยของ Frei et al (2003) และ Hu et al (2004) พบว่าข้าวจัดเป็นอาหารที่มีดัชนีไกลซีมิกสูง (มากกว่า 70%) งานวิจัยนี้ นำข้าวที่ผ่านการขัดสีทั้ง 6 ระดับ มาวิเคราะห์การย่อยได้ของแป้ง ที่เวลาต่างๆ โดยใช้เอนไซม์เปปซินย่อยโปรตีนออกก่อน จากนั้นใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดสในการย่อยแป้งให้เปลี่ยนไปเป็นกลูโคส แล้วสุ่มตัวอย่างออกมาทุกๆ 30 นาที จนครบ 180 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณกลูโคส การย่อยได้ของแป้งของข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากการขัดสีที่ระดับต่างกัน (ภาพประกอบ 9) พบว่าข้าวแต่ละระดับการสี มีการย่อยแป้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 30 นาทีแรก โดยมีปริมาณแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้ 43.32-54.80% และการย่อยแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนการย่อยสมบูรณ์ที่เวลา 120 นาที ปริมาณแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้เพิ่มขึ้นเป็น 52.28-64.02% โดยข้าวที่มีระดับการสี 10.90% มีปริมาณแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้สูงที่สุดคือ 54.80% ที่เวลาในการย่อย 30 นาที และ 64.45% ที่เวลาในการย่อย 180 นาที ส่วนข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) มีปริมาณแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้ต่ำที่สุดคือ 43.32% ที่เวลาในการย่อย 30 นาที และ 52.63% ที่เวลาในการย่อย 180 นาที

จากกราฟการวิเคราะห์ปริมาณแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้ ทำให้แบ่งข้าวที่ได้จากการสีที่ระดับต่างๆ ออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้ต่ำและกลุ่มที่มีแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้สูง โดยกลุ่มที่มีแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้ต่ำ คือข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) และ 1.75% มีแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้ 43.32% และ 44.49% ที่เวลาในการย่อย 30 นาที และ 52.63% และ 53.82% ที่เวลาในการย่อย 180 นาที ตามลำดับ ส่วนกลุ่มที่มีแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้สูง คือข้าวที่มีระดับการสี 4.50, 6.50, 8.50 และ 10.90% มีปริมาณแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้ 48.44%, 51.07%, 54.13% และ 54.80% ที่เวลาในการย่อย 30 นาที และ 59.62%, 61.05%, 63.82% และ 64.45% ที่เวลาในการย่อย 180 นาที ตามลำดับ



ภาพประกอบ 4.2 แฉ่งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน DOM คือระดับการสี (%)

2) ผลของระดับการสีต่อ GI

จากการนำข้าวที่ผ่านการขัดสีทั้ง 6 ระดับ มาวิเคราะห์แฉ่งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้ที่เวลาต่างๆ แล้วนำค่าที่ได้มาสร้างสมการเอ็กซ์โปเนนเชียล ดังสมการที่ 1 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ 2 ชนิด คือความสมดุลของแฉ่งที่ถูกย่อยได้ของแป้งหลังเวลา 180 นาที (C_{∞}) และค่าคงที่ของสมการ (k) และนำมาคำนวณหาดัชนีการย่อย (Hydrolysis index; HI) และดัชนีไกลซีมิกตามแบบจำลองของ Goni et al (1997) โดยใช้สมการที่ 2 และสมการที่ 3

ผลการคำนวณตามสมการที่ 1, 2 และ 3 (ตาราง 4.6) พบว่าระดับการสีมีผลต่อค่า C_{∞} อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.7 ภาคผนวก ง) โดยที่ระดับการสี 10.90% มีค่า C_{∞} มากกว่าที่ระดับการสีอื่นๆ ยกเว้น ไม่แตกต่างจากที่ระดับการสี 8.50% (ตาราง จ.26 ภาคผนวก จ)

ระดับการสีมีผลต่อค่า k อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.7 ภาคผนวก ง) โดยที่ระดับการสี 10.90% มีค่า k มากกว่าที่ระดับการสี 0, 1.75 และ 4.50% (ตาราง จ.27 ภาคผนวก จ)

ในการทำงานเดียวกันกับค่า C_{∞} พบว่าระดับการสีมีผลต่อ HI และ GI อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง.7 ภาคผนวก ง) โดยที่ระดับการสี 10.90% มีค่า HI และ GI มากกว่าที่ระดับการสีอื่นๆ (ตาราง จ.28 และตาราง จ.29 ภาคผนวก จ) จากผลการทดลองตอนที่ 3 (3) และ 4 (1) ข้าวที่มีระดับการสีต่ำ มีระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันและการย่อยได้ของแป้งต่ำ ดังนั้นจึงส่งผลต่อค่า GI ของข้าวเหล่านี้ ในปี ค.ศ.1991 Panlasigui et al รายงานว่าข้าวที่มีอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินในเซชันสูง มักมีค่า GI ต่ำ ในขณะที่ Trout et al (1993) พบความสัมพันธ์ที่แปรผกผันกันระหว่างค่า GI และปริมาณเส้นใย โพรตีน และไขมันของข้าว Frei et al. (2003) กล่าวว่า การเกิดเจลลิตินในเซชันที่ไม่สมบูรณ์ของข้าว เกิดเนื่องจากปริมาณน้ำมีจำกัดและส่งผลให้ข้าวมี GI ต่ำ เช่นเดียวกับ Sasaki et al (2009) รายงานว่าโมเลกุลของเม็ดแป้งจะถูกทำลายในระหว่างกระบวนการเกิดเจลลิตินในเซชัน ทำให้ข้าวถูกย่อยได้ง่ายและข้าวนั้นจะให้ค่า GI สูง

ตาราง 4.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินดัชนีไกลซีมิก

ระดับการสี (%)	C_{∞}	k	HI	GI
0	52.17±0.23	0.058±0.002	70.02±0.51	78.15±0.28
1.75	53.22±0.13	0.058±0.001	71.51±0.25	78.97±0.13
4.50	58.69±0.57	0.056±0.003	78.51±0.31	82.81±0.17
6.50	60.80±0.26	0.061±0.001	82.07±0.22	84.77±0.12
8.50	63.05±0.04	0.063±0.001	85.51±0.05	86.65±0.03
10.90	63.81±0.29	0.064±0.002	86.54±0.21	87.22±0.11

แสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากตาราง 4.6 พบว่าค่า C_{∞} , HI และ GI เพิ่มขึ้นเมื่อระดับการสีเพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ค.7 ภาคผนวก ค) โดยค่า C_{∞} และ HI แปรผันโดยตรงกับ GI ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Goni et al (1997) รายงานว่าข้าวเจ้ามีค่า C_{∞} เท่ากับ 55.34 HI เท่ากับ 77 และ GI เท่ากับ 81

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของระดับการสีข้าวที่ระดับการสี 6 ระดับ คือ 0, 1.75, 4.50, 6.50, 8.50 และ 10.90% ต่อองค์ประกอบทางเคมีของข้าวและรำข้าวจากข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ได้จากการสีที่ระดับต่างๆ นอกจากนี้ยังศึกษาผลของระดับการสีข้าวต่อคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง และดัชนีไกลซีมิกของข้าวเหล่านั้น ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผล

5.1.1 ตอนที่ 1 ผลของระดับการสีข้าวต่อองค์ประกอบทางเคมีของข้าว

1) ผลของระดับการสีข้าวต่อองค์ประกอบทางเคมี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการสี 6 ระดับ พบว่าระดับการสีไม่มีผลต่อปริมาณความชื้น ($p>0.05$) ของข้าวขาวดอกมะลิในการทดลองนี้ ทั้งนี้ความชื้นมีค่าอยู่ในช่วง 11.42-11.48% ระดับการสีข้าวที่แตกต่างกันมีผลต่อปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้าของข้าวอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) พบว่าข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) มีปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้า สูงที่สุดเท่ากับ 8.87% 2.92% 1.12% และ 1.42% ตามลำดับ และมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตต่ำที่สุดเท่ากับ 74.23% ส่วนข้าวที่ระดับการสี 10.90% มีปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้าต่ำที่สุดเท่ากับ 6.87% 0.63% 0.35% และ 0.36% ตามลำดับ และมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงที่สุดเท่ากับ 80.36%

2) ผลของระดับการสีข้าวต่อปริมาณ TS, RS และ DS

จากการศึกษาผลของระดับการสีข้าวต่อปริมาณ TS, RS และ DS ของข้าว สามารถสรุปได้ว่าข้าวที่ระดับการสี 0% มีปริมาณ TS และ DS ต่ำที่สุดเท่ากับ 83.96 และ 81.29% ตามลำดับ และมีปริมาณ RS สูงที่สุดเท่ากับ 2.67% ส่วนข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) มีปริมาณ TS และ DS ต่ำที่สุดเท่ากับ 85.11 และ 82.60% ตามลำดับ และมีปริมาณ RS ต่ำที่สุดเท่ากับ 2.51% ($p<0.05$)

5.1.2 ตอนที่ 2 ผลของระดับการสีข้าวต่อองค์ประกอบทางเคมีของรำข้าว

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวรำขาวดอกมะลิ 105 ที่ได้จากการสีข้าว 6 ระดับ พบว่าระดับการสีไม่มีผลต่อปริมาณความชื้น ($p>0.05$) ของรำข้าวขาวดอกมะลิในการทดลองนี้มีค่าอยู่ในช่วง 12.40-12.43% รำข้าวที่ได้จากการขัดสีที่แตกต่างกันมีผลต่อปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้าของรำข้าวอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) พบว่ารำข้าวที่ได้จากการขัดสีที่ระดับ 1.75% มีปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้าสูงที่สุดเท่ากับ 14.85, 17.74, 11.25 และ 9.66% ตามลำดับ และมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตต่ำที่สุดเท่ากับ 34.06% ส่วนรำข้าวที่ได้จากการขัดสีที่ระดับ 10.90% มีปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้าต่ำที่สุดเท่ากับ 12.79, 15.48, 8.67 และ 7.64% ตามลำดับ และมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงที่สุดเท่ากับ 43.01%

5.1.3 ตอนที่ 3 ผลของระดับการสีข้าวต่อคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์

1) ผลของระดับการสีข้าวต่อลักษณะเนื้อสัมผัส

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการสี 6 ระดับ พบว่าข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) มีความแข็ง ความยืดหยุ่น ความเหนียวติดยึด และการเคี้ยวสูงที่สุดเท่ากับ 12.27 N, 0.53 mm, 2.91 N และ 1.57 N.mm ตามลำดับ และมีความเกาะติดกันและความเหนียวติดกันต่ำที่สุดเท่ากับ 0.24 และ -0.44 N.s ตามลำดับ ส่วนข้าวที่ระดับการสี 10.90% มีความแข็ง ความยืดหยุ่น ความเหนียวติดยึด และการเคี้ยวต่ำที่สุดเท่ากับ 4.99 N, 0.29 mm, 1.51 N และ 0.42 N.mm ตามลำดับ และมีความเกาะติดกันและความเหนียวติดกันสูงที่สุดเท่ากับ 0.30 และ -2.24 N.s ตามลำดับ

2) ผลของระดับการสีข้าวต่อคุณสมบัติด้านความหนืด

จากการศึกษาผลของระดับการสีข้าวต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าว สามารถสรุปได้ว่าข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) มีค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด ความหนืดสุดท้าย ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุดต่ำที่สุดเท่ากับ 244.22, 133.72, 110.50 และ 207.03 RVU ตามลำดับ และอุณหภูมิแป้งเปียกสูงที่สุดเท่ากับ 77.53°C ส่วนข้าวที่ระดับการสี 10.90% มีค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด ความหนืดสุดท้าย ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุดสูงที่สุดเท่ากับ 428.42, 236.83, 191.58, 312.89 และ 92.64 RVU ตามลำดับ และมีอุณหภูมิแป้งเปียกต่ำที่สุดเท่ากับ 73.98°C ตามลำดับ

3) ผลของระดับการสีข้าวต่อระดับของการเกิดเจลาตินในเซชัน

จากการวิเคราะห์ระดับของการเกิดเจลาตินในเซชันของข้าว พบว่าข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) มีระดับของการเกิดเจลาตินในเซชันต่ำที่สุดเท่ากับ 59.14% ส่วนข้าวที่ระดับการสี 10.90% มีระดับของการเกิดเจลาตินในเซชันสูงที่สุดเท่ากับ 96.23% โดยระดับของการเกิดเจลาตินในเซชันของข้าวสุกเพิ่มขึ้นเมื่อระดับการสีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

5.1.4 ตอนที่ 4 ผลของระดับการสีข้าวต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก

1) ผลของระดับการสีข้าวต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง

ผลการวิเคราะห์แป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการสี 6 ระดับ พบว่าข้าวที่มีระดับการสี 10.90% มีแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้สูงที่สุดคือ 54.80% ที่เวลาในการย่อย 30 นาที และ 64.45% ที่เวลาในการย่อย 180 นาที ส่วนข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) มีแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้ต่ำที่สุด คือ 43.32% ที่เวลาในการย่อย 30 นาที และ 52.63% ที่เวลาในการย่อย 180 นาที โดยแบ่งข้าวที่ได้จากการสีที่ระดับต่างๆ ออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้ต่ำและกลุ่มที่มีแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้สูง โดยกลุ่มที่มีแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้ต่ำ คือข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) และ 1.75% มีแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้ 43.32% และ 44.49% ที่เวลาในการย่อย 30 นาที และ 52.63% และ 53.82% ที่เวลาในการย่อย 180 นาที ตามลำดับ ส่วนกลุ่มที่มีแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้สูง คือข้าวที่มีระดับการสี 4.50, 6.50, 8.50 และ 10.90% มีแป้งทั้งหมดที่ถูกย่อยได้ 48.44%, 51.07%, 54.13% และ 54.80% ที่เวลาในการย่อย 30 นาที และ 59.62%, 61.05%, 63.82% และ 64.45% ที่เวลาในการย่อย 180 นาที ตามลำดับ

2) ผลของระดับการสีข้าวต่อดัชนีไกลซีมิก

จากการศึกษาผลของระดับการสีข้าวต่อดัชนีไกลซีมิกของข้าวสามารถสรุปได้ว่าข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) มีค่า C_{50} , HI และ GI ต่ำที่สุดเท่ากับ 52.17 70.02 และ 78.15 ตามลำดับ ส่วนข้าวที่ระดับการสี 10.90% มีค่า C_{50} , HI และ GI สูงที่สุดเท่ากับ 63.81 86.54 และ 87.22 ตามลำดับ

โดยสรุปจากการศึกษาผลการวิจัยครั้งนี้ พบว่าระดับการสีที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยที่ยังคงคุณประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภคมากที่สุดคือข้าวที่ได้จากการสีที่ระดับการสี 1.75% เนื่องจากมีค่าความแข็งน้อยกว่า แต่มีค่าความหนืดสูงสุด และระดับของการเกิดเจลาตินในเซชันมากกว่า แสดงว่าข้าวที่ระดับการสี 1.75% มีความนุ่มที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) เพราะชั้นรำข้าวถูกขัดสีออกบางส่วน ในขณะที่เดียวกัน ปริมาณโปรตีน ไขมันและเส้นใยของข้าวมีปริมาณมากกว่าที่ระดับการสีอื่น นอกจากนี้ยังพบว่าค่า GI ของข้าวที่ระดับการสี 1.75% มีค่าใกล้เคียงกับข้าวกล้อง (ระดับการสี 0%) ซึ่งแตกต่างจากข้าวที่ระดับการสีอื่น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะทั่วไป

การเลือกบริโภคข้าวกล้อง ซึ่งมีค่าดัชนีไกลซีมิกต่ำจะประโยชน์ต่อสุขภาพสำหรับ ผู้บริโภคที่ป่วยเป็นโรคเบาหวาน ซึ่งเกี่ยวข้องกับระดับน้ำตาลในเลือด

5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์

- 1) องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้นำไปประยุกต์ใช้ในธุรกิจการผลิตผลิตภัณฑ์ข้าว เพื่อสุขภาพโดยผ่านกระบวนการแปรรูปขั้นต้นที่มีระดับการสีที่เหมาะสม
- 2) ควรศึกษาถึงความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าว สายพันธุ์อื่นที่ไม่ผ่านการขัดสี
- 3) ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของระดับการสีข้าวต่อ โครงสร้างของอะมิโลเพกติน และปริมาณแป้งที่ย่อยได้เร็วและแป้งที่ย่อยได้ช้าอย่างละเอียด
- 4) ควรศึกษาถึงผลของเส้นใยในชั้นรำต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง และดัชนีไกลซีมิก
- 5) การศึกษาความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าวควรเลือกใช้ ข้าวที่ได้จากวิธีการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า
- 6) ควรศึกษาถึงการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวหุงสุกที่ระดับการสีข้าว ต่างๆ
- 7) ควรศึกษาผลของระดับการสีในช่วง 0-1.75% ต่อดังต่อไปนี้ประกอบทางเคมี ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง และดัชนีไกลซีมิก เพื่อให้ผู้บริโภคได้รับคุณประโยชน์มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). *เทคโนโลยีของแป้ง*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นิธิยา รัตนปานนท์. (2549). *เคมีอาหาร*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ัญญาภรณ์ ศิริเลิศ. การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสในอาหาร. *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม*, 6-13.
- ไสว พงษ์เก่า และคณะ. (2525). *พืชเศรษฐกิจ เล่ม 1*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: ภาควิชาพืชไร่ นา คณะเกษตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2538). *เคมีทางัญญาอาหาร*. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2550). *ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Anjum, F. M., Pasha, I., Bugti, M.A., & Butt, M. S. (2007). Mineral composition of different rice varieties and their milling fractions. *Agricultural Science*, 44, 332-336.
- AOAC (2000). *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 17th ed. Washington, D.C.: Association of Official Analytical Chemist.
- Bao, J., Sun, M., Zhu, L., & Corke, H. (2004). Analysis of quantitative trait loci for some starch properties of rice (*Oryza sativa* L.): thermal properties gel texture and swelling volume. *Cereal Science*, 39, 379-385.
- Benmoussa, M., Moldenhauer, K. A. K., & Hamaker, B. R. (2007). Rice amylopectin fine structure variability affect starch digestion properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 1475-1479.
- Birch, G. G., & Priestley, R. J. (1973). Degree of gelatinization of cooked rice. *Die Starke*, 25, 98-101.
- Cheng, F. M., Zhong, L. J., Wang, F., & Zhang, G. P. (2005). Differences in cooking and eating properties between chalky and translucent parts in rice grains. *Food Chemistry*, 90, 39-46.
- Choi, Y. S., Choi, J. H., Han, D. J., Kim, H. Y., Lee, M. A., Kim, H. W., Jeong, J. Y., & Kim, C. J. (2009). Characteristics of low-fat meat emulsion systems with pork fat replaced by vegetable oils and rice bran fiber. *Meat Science*, 82, 266-271.

- Chung, H-J., Lim, H. S., Lim, S-T. (2006). Effect of partial gelatinization and retrogradation on the enzymatic digestion of waxy rice starch. *Journal of Cereal Science*, 43, 353-359.
- Chung, H-J., Liu, Q., & Lim, S-T. (2007). Texture and in vitro digestibility of white rice cooked with hydrocolloids. *Cereal Chemistry*, 84, 246-249.
- Deepa, G., Singh, V., & Naidu, K. A. (2008). Nutrient composition and physicochemical properties of Indian medicinal rice-Njavara. *Food Chemistry*, 106, 165-171.
- Denardin, C.C., Walter, M., Silva, L.P., Souto, G.D., & Fagundes, C.A.A. (2007). Effect of amylose content of rice varieties on glycemic metabolism and biological responses in rats. *Food Chemistry*, 105, 1474-1479.
- Frei, M., Siddhuraju, P., & Becker, K. (2003). Studies on the in vitro starch digestibility and the glycemic index of six different indigenous rice cultivars from the Philippines. *Food Chemistry*, 83, 395-402.
- Friedman, H. H., Whitney, J. E. & Szczesniak, A.S. 1963. The Texturometer-a new instrument for objective texture measurement. *Journal of Food Science*, 28, 390-396.
- Goni, I., Garcia-Alonso, A., Saura-Calixto, F., (1997). A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutrition Research*, 17, 427-437.
- Gujral, H. S., & Kumar, V. (2003). Effect of accelerated aging on the physicochemical and textural properties of brown and milled rice. *Journal of Food Engineering*, 59, 117-121.
- Han, S. H., Lee, S. W., & Chul, R. (2008). Effects of cooking methods on starch hydrolysis kinetics and digestion-resistant fractions of rice and soybean. *European Food Research and Technology*, 227, 1315-1321.
- Hu, P., Zhao, H., Duan, Z., Linlin, Z., & Wu, D. (2004). Starch digestibility and the estimated glycemic score of different types of rice differing in amylose contents. *Journal of Cereal Science*, 40, 231-237.
- Jaisut, D., Prachayawarakorn, S., Varayanond, W., Tungtrakul, P., & Saponronnarit, S. (2008). Effects of drying temperature and tempering time on starch digestibility of brown fragrant rice. *Journal of Food Engineering*, 86, 251-258.
- Kennedy, G., Burlingame, B & Nguyen, N. (2002). Nutrient impact assessment of rice in major rice-consuming countries. *FAO International Rice Commission Newsletter*. pp.33-41. Rome: n.p. [Online]. Available from: <http://www.fao.org/DOCREP/005/Y6159T/y6159t04.htm>. [Cited 12 July 2011].

- Lamberts, L., Bie, E.D., Vandeputte, G.E., Veraverbeke, W.S., Derycke, V., & Delcour, J.A. (2007). Effect of milling on colour and nutritional properties of rice. *Food Chemistry*, 100, 1496-1503.
- Mohapatra, D., & Bal, S. (2006). Cooking quality and instrumental textural attributes of cooked rice for different milling fractions. *Journal of Food Engineering*, 73, 253-259.
- Mohapatra, D., & Bal, S. (2007). Effect of degree of milling on specific energy consumption, optical measurements and cooking quality of rice. *Journal of Food Engineering*, 80, 119-125.
- Orthoefer, F. T. (2005). *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*. 6th ed. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.
- Panlasigui, L. N., Thompson, L. U., & Juliano, B. O. (1991). Rice varieties with similar amylose content differ in starch digestibility and glycemic response in humans. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 54, 871-877.
- Park, J. K., Kim, S. S., & Kim, O. K. (2001). Effect of milling ratio on sensory properties of cooked rice and on physicochemical properties of milled and cooked rice. *Cereal Chemistry*, 78, 151-156.
- Roy, P., Ijiri, T., Okadome, H., Nei, D., Orikasa, T., Nakamura, N., & Shiina, T. (2008). Effect of processing conditions on overall energy consumption and quality of rice (*Oryza sativa* L.). *Food Engineering*, 89, 343-348.
- Saleh, M. I., & Meullenet, J-F. (2007). Effect of moisture content at harvest and degree of milling (based on surface lipid content) on the texture properties of cooked long-grain rice. *Cereal Chemistry*, 84, 119-124.
- Sasaki, T., Kohyama, K., Suzuki, Y., Okamoto, K., Noel, T. R., & Ring, S. G. (2009). Physicochemical characteristics of waxy rice starch influencing the in vitro digestibility of a starch gel. *Food Chemistry*, 116, 137-142.
- Sompong, R., Siebenhandl-Ehn, S., Linsberger-Martin, G., & Berghofer, E. (2011). Physicochemical and antioxidant properties of red and black rice varieties from Thailand, china and sri-lanka. *Food Chemistry*, 124, 132-140.
- Sotelo, A., Sousa, V., Montalvo, I., Hernandez, M., & Hernandez-Aragon, L. (1990). Chemical composition of different fractions of 12 mexican varieties of rice obtained during milling. *Cereal Chemistry*, 67, 209-212.

- Tran, T.U., Suzuki, K., Okadome, H., Homma, S., & Ohtsubo, K. (2004). Analysis of the tastes of brown rice and milled rice with different milling yields using a taste sensing system. *Food Chemistry*, 88, 557-566.
- Vandeputte, G.E., & Delcour, J.A. (2004). From sucrose to starch granule to starch physical behaviour: a focus on rice starch. *Carbohydrate Polymer*, 58, 245-266.
- Walter, M., Picolli da Silva, L., & Denardin, C. C. (2005). Rice and resistant starch: different content depending on chosen methodology. *Journal of Food Composition and Analysis*, 18, 279-285.
- Zaidul, I. S. M., Norulaini, N. A. N., Omar, A. K. M., Yamauchi, H., & Noda, T. (2007). RVA analysis of mixtures of wheat flour and potato, sweet potato, yam, and cassava starches. *Carbohydrate polymers*, 69, 784-791.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดลงขององค์ประกอบทางเคมี

ก.1 การคำนวณปริมาณโปรตีน

คำนวณ % ของโปรตีนที่ระดับการสี 1.75% โดยเปรียบเทียบกับระดับการสี 0%
 ที่ระดับการสี 0% มีปริมาณโปรตีน 8.87% คิดเป็น 100%
 ที่ระดับการสี 1.75% มีปริมาณโปรตีน 8.49% คิดเป็น 95.72%
 นั่นคือที่ระดับการสี 1.75% มีปริมาณโปรตีนลดลง $100\% - 95.72\% = 4.28\%$
 เมื่อเปรียบเทียบกับที่ระดับการสี 0%

ก.2 การคำนวณปริมาณไขมัน

คำนวณ % ของไขมันที่ระดับการสี 1.75% โดยเปรียบเทียบกับระดับการสี 0%
 ที่ระดับการสี 0% มีปริมาณไขมัน 2.92% คิดเป็น 100%
 ที่ระดับการสี 1.75% มีปริมาณไขมัน 2.21% คิดเป็น 75.68%
 นั่นคือที่ระดับการสี 1.75% มีปริมาณไขมันลดลง $100\% - 75.68\% = 24.32\%$
 เมื่อเปรียบเทียบกับที่ระดับการสี 0%

ก.3 การคำนวณปริมาณเส้นใย

คำนวณ % ของเส้นใยที่ระดับการสี 1.75% โดยเปรียบเทียบกับระดับการสี 0%
 ที่ระดับการสี 0% มีปริมาณเส้นใย 1.12% คิดเป็น 100%
 ที่ระดับการสี 1.75% มีปริมาณเส้นใย 0.99% คิดเป็น 88.39%
 นั่นคือที่ระดับการสี 1.75% มีปริมาณเส้นใยลดลง $100\% - 88.39\% = 11.61\%$
 เมื่อเปรียบเทียบกับที่ระดับการสี 0%

ก.4 การคำนวณปริมาณเถ้า

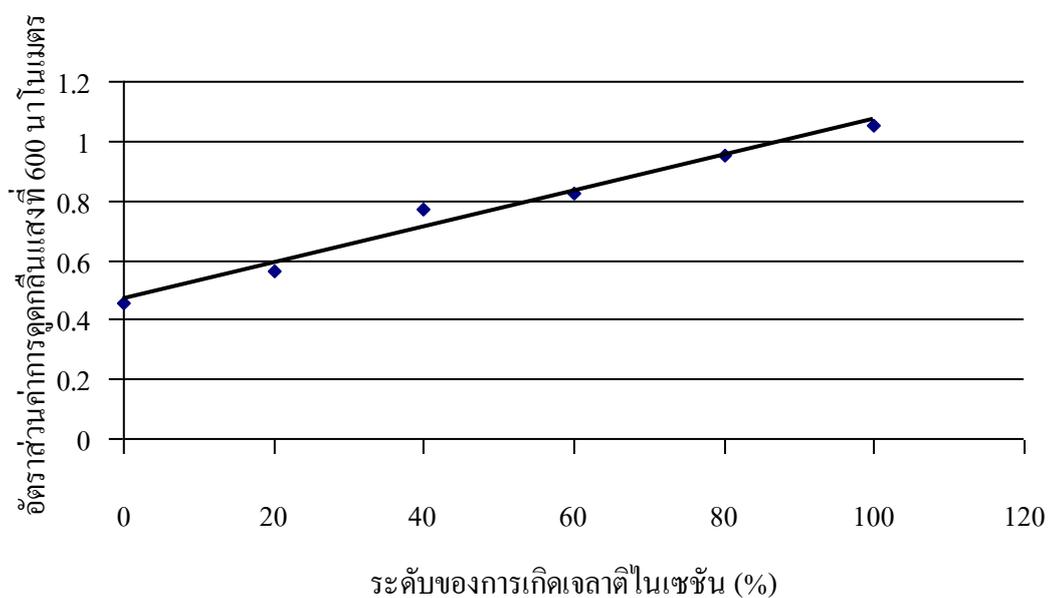
คำนวณ % ของเถ้าที่ระดับการสี 1.75% โดยเปรียบเทียบกับระดับการสี 0%
 ที่ระดับการสี 0% มีปริมาณเถ้า 1.42% คิดเป็น 100%
 ที่ระดับการสี 1.75% มีปริมาณเถ้า 1.16% คิดเป็น 81.69%
 นั่นคือที่ระดับการสี 1.75% มีปริมาณเถ้าลดลง $100\% - 81.69\% = 18.31\%$
 เมื่อเปรียบเทียบกับที่ระดับการสี 0%

ภาคผนวก ข

กราฟมาตรฐานของระดับของการเกิดเจลลาติโนเซชันข้าวขาวดอกมะลิ 105

ตาราง ข.1 การประเมินระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชันด้วยวิธี Differential alkaline solubility ในการสร้างกราฟมาตรฐาน

ระดับของการเกิด เจลลิตีในเซชัน (%)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตร		อัตราส่วนของค่า การดูดกลืนแสง
	0.2M KOH	0.5M KOH	
0	0.193	0.425	0.454
20	0.262	0.466	0.562
40	0.353	0.459	0.769
60	0.419	0.507	0.826
80	0.513	0.538	0.954
100	0.550	0.522	1.054



ภาพประกอบ ข.1 กราฟมาตรฐานระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชันของข้าวขาวดอกมะลิ 105
 $y = 0.006x + 0.4675, R^2 = 0.9816$

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ก.1 การวิเคราะห์ความชื้น (AOAC. 2000)

อบถ้วยใส่ตัวอย่าง (Moisture can) พร้อมฝา ในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ นานประมาณ 15 นาที ทำให้เย็นใน โถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักพร้อมฝา โดยเครื่องชั่งละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ชั่งตัวอย่างประมาณ 3–5 กรัม ใส่ลงในถ้วยใส่ตัวอย่าง บันทึกรับน้ำหนัก นำไปอบในตู้อบลมร้อน $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ ประมาณ 2-3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นใน โถดูดความชื้น ประมาณ 30 นาที แล้วชั่งน้ำหนัก

ก.2 การวิเคราะห์โปรตีนด้วยวิธีเจลดาล์ (AOAC. 2000)

ใส่วัสดุควบคุมการเคี้ยว 2–3 ชิ้น ในหลอดเจลดาล์ (Kjeldahl flask) และเติมโพแทสเซียมซัลเฟต 3 กรัม แล้วชั่งตัวอย่างข้าวที่บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 70 mesh ให้ทราบน้ำหนักแน่นอน (200 – 300 มิลลิกรัม) ใส่ในหลอดเจลดาล์ เติมสารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 6 มิลลิลิตร ลงในหลอด เขย่าเบาๆ เพื่อผสมให้เข้ากัน จากนั้นติดตั้งหลอดเจลดาล์ลงในช่องของเครื่องย่อยโปรตีน ซึ่งมีเตาไฟฟ้าและฝาครอบหลอดดูดแก๊สพิษ เปิดน้ำเพื่อดูดแก๊สพิษ เปิดฝาครอบแล้วเติมคอปเปอร์ซัลเฟตลงไป 0.13 กรัม ปิดฝาครอบให้สนิท ตั้งหน้าปิดควบคุมความร้อนหมายเลข 3 (อุณหภูมิ 120°C) เป็นเวลา 30 นาที ปรับหน้าปิดควบคุมความร้อนไปที่หมายเลข 7-8 (อุณหภูมิ 370°C) แล้วทำการย่อยต่ออีก 45–60 นาที จนได้สารละลายใส แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น นำหลอดเจลดาล์ที่ย่อยแล้ว ใส่ในช่องสำหรับกลั่นของเครื่องกลั่นอัตโนมัติ กดปุ่ม H_2O ให้น้ำไหลลงผสมกับสารที่ถูกย่อยในปริมาณ 3 เท่าของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ย่อย กดปุ่มสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 35% (w/v) ให้น้ำไหลลงผสมกับสารในหลอดเจลดาล์ในปริมาณต่าง 5 เท่าของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ย่อย กดปุ่มควบคุมเวลาในตำแหน่งที่ 4 นาน 3 นาที ตวงสารละลายบอริกอิ่มตัว ประมาณ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมอินดิเคเตอร์ผสมลงไป 2- 4 หยด นำไปวางที่ตำแหน่งรับสิ่งที่กลั่นได้ เมื่อเครื่องพร้อมทำงานจะมีไฟเขียวสว่างที่ตำแหน่ง ready กดปุ่ม start distillation เมื่อเครื่องกลั่นเสร็จจะมีไฟแดงที่ตำแหน่ง aspirating สว่าง เครื่องดูดของเหลวที่ นำขวดรูปชมพู่ที่บรรจุสิ่งที่กลั่นได้ไปไตเตรทกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ จนถึงจุดสมบรูณ์แล้วบันทึกผล

ก.3 การวิเคราะห์ไขมันด้วยวิธีช็อกซ์เลท (AOAC. 2000)

บดข้าวและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 70 mesh ซึ่งตัวอย่างประมาณ 3 กรัม วางบน กระจายกรองและห่อลงใส่ใน extraction thimble และทำการสวม adapter นำเข้าเครื่องวิเคราะห์ ไขมัน ซึ่ง ปีกเกอร์ประจำเครื่องให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนละเอียดถึงหน่วยมิลลิกรัม แล้วใส่ตัวทำละลายคือ ปิโตรเลียมอีเทอร์ลงในบีกเกอร์ 70 มิลลิลิตร ใส่ thimble บรรจุตัวอย่างลงใน หลอดช็อกซ์เลท ปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านเครื่องสกัดให้เหมาะสม กลั่นระบบ reflux ด้วยระบบ steam bath เป็นเวลา 30 นาที และหลังจากนั้นทำการระเหยตัวทำละลายเป็นเวลา 30 นาที โดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนัก ที่แน่นอนละเอียดถึงหน่วยมิลลิกรัม

ก.4 การวิเคราะห์เส้นใย (AOAC. 2000)

อบถ้วยกรอง (Crucible) ในตู้อบอุณหภูมิ 105°C จนได้น้ำหนักคงที่ แล้วปล่อยให้เย็น ในโถดูดความชื้น บดตัวอย่างที่ได้ให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 70 mesh ซึ่งตัวอย่าง ประมาณ 1 กรัม ใส่ลงใน crucible ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้ว หลังจากนั้นให้ติดตั้งถ้วยกรอง ใส่ในแท่นของชุดหาปริมาณเส้นใยอาหารดิบ เติมสารละลาย H_2SO_4 เข้มข้น 1.25% ที่ผ่าน การให้ความร้อนก่อนบนแผ่นให้ความร้อน (Hot plate) แล้วเติมในช่องย่อยจนถึงระดับ 150 มิลลิลิตร หยดสารป้องกันการเกิดฟอง (N-octanol) ประมาณ 3 หยด หลังจากเดือดแล้ว ต้มต่อไปอีก 30 นาที เปิดลิ้นไปที่ vacuum เพื่อระบายกรด H_2SO_4 ออก แล้วล้าง crucible ด้วยน้ำกลั่นร้อน 30 มิลลิลิตร ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง เติมสารละลาย KOH เข้มข้น 1.25% ที่ร้อนจำนวน 150 มิลลิลิตร พร้อมกับ หยดสารป้องกันการเกิดฟองประมาณ 3 หยด ต้มให้เดือดประมาณ 30 นาที ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4-5 ล้างถ้วยกรองด้วยน้ำกลั่นเย็นอีกครั้ง และอีก 3 ครั้งด้วยอะซิโตนจำนวน 25 มิลลิลิตร อบตัวอย่าง ในถ้วยกรองที่อุณหภูมิ 103°C นาน 1 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะได้น้ำหนักคงที่ จะได้น้ำหนักของ เส้นใยดิบ (Crude fiber) ที่รวมกับน้ำหนักของเถ้าเผาตัวอย่างในถ้วยกรองที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นลงใน แล้วชั่งน้ำหนัก ตัวอย่างที่ได้เป็นน้ำหนักถ้วยกรองที่ตัวอย่าง ซึ่งเป็นเถ้า

ค.5 การวิเคราะห์เถ้า (AOAC. 2000)

เผาถ้วยกรองเปล่าในเตาเผา (Muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 15 นาที ทำให้เย็นลงในโถดูดความชื้น ประมาณ 1 ชั่วโมง ซึ่งถ้วยกรองให้ละเอียดถึงหน่วยมิลลิกรัม ซึ่งตัวอย่างอาหารประมาณ 5 กรัม ลงในถ้วยกรอง วางถ้วยกรองบนเตาไฟฟ้าในตู้ควัน เพิ่มอุณหภูมิที่ละน้อยจนควันหมดไปและตัวอย่างเปลี่ยนเป็นถ่านสีดำ ย้ายถ้วยกรองใส่ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550°C นาน 16 ชั่วโมง นำเอาถ้วยกรองออกจากเตาเผาไปทำให้เย็นในโถดูดความชื้น ถ้าเถ้ายังมีส่วนสีดำปนอยู่ ให้เติมน้ำกลั่น 1-2 มิลลิกรัม ใช้แท่งแก้วคนให้เถ้ากระจายตัวออก ล้างเถ้าจากแท่งแก้วให้หมด แล้วนำถ้วยกรอง ไปอบไอน้ำจนแห้ง นำถ้วยกรองไปเข้าเตาเผาอีก 24 ชั่วโมง จนได้เถ้าสีขาวทั้งหมด ทำให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักละเอียดถึงหน่วยมิลลิกรัม

ค.6 การหาปริมาณคาร์โบไฮเดรตรวมโดยวิธีผลต่าง (difference method)

$$\text{ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (\%)} = 100 - (\% \text{ความชื้น} + \% \text{โปรตีน} + \% \text{ไขมัน} + \% \text{เส้นใย} + \% \text{เถ้า})$$

ภาคผนวก ง
การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตาราง ง.1 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	P
1. ปริมาณความชื้น					
ระดับการสี	.008	5	.002	.872	.528
ความคลาดเคลื่อน	.022	12	.002		
2. ปริมาณโปรตีน					
ระดับการสี	8.736	5	1.747	287.993	.000*
ความคลาดเคลื่อน	.073	12	.006		
3. ปริมาณไขมัน					
ระดับการสี	10.965	5	2.193	2322.025	.000*
ความคลาดเคลื่อน	.011	12	.001		
4. ปริมาณเส้นใย					
ระดับการสี	1.273	5	.255	385.123	.000*
ความคลาดเคลื่อน	.008	12	.001		
5. ปริมาณเถ้า					
ระดับการสี	2.215	5	.443	280.738	.000*
ความคลาดเคลื่อน	.019	12	.002		
6. ปริมาณคาร์โบไฮเดรต					
ระดับการสี	77.506	5	15.501	1002.234	.000*
ความคลาดเคลื่อน	.186	12	.015		

*มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง.2 การเปรียบเทียบเบี่ยงทั้งหมด เบี่ยงที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ และเบี่ยงที่ย่อยได้ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	P
1. เบี่ยงทั้งหมด					
ระดับการสี	3.734	5	.747	6.686	.003*
ความคลาดเคลื่อน	1.340	12	.112		
2. เบี่ยงที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์					
ระดับการสี	.056	5	.011	101.120	.000*
ความคลาดเคลื่อน	.001	12	.000		
3. เบี่ยงที่ย่อยได้					
ระดับการสี	4.689	5	.938	8.596	.001*
ความคลาดเคลื่อน	1.309	12	.109		

*มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง.3 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวขาวคอกมะติ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	P
1. ปริมาณไขมัน					
ระดับการสี	8.583	4	2.146	17.783	.000*
ความคลาดเคลื่อน	1.207	10	.121		
2. ปริมาณโปรตีน					
ระดับการสี	8.524	4	2.131	61.729	.000*
ความคลาดเคลื่อน	.345	10	.035		
3. ปริมาณเส้นใย					
ระดับการสี	17.119	4	4.280	76.506	.000*
ความคลาดเคลื่อน	.559	10	.056		
4. ปริมาณเถ้า					
ระดับการสี	6.999	4	1.750	30.988	.000*
ความคลาดเคลื่อน	.565	10	.056		
5. ปริมาณความชื้น					
ระดับการสี	17.242	5	3.448	17.780	.000*
ความคลาดเคลื่อน	2.327	12	.194		
6. ปริมาณคาร์โบไฮเดรต					
ระดับการสี	152.792	4	38.198	102.34	.000*
ความคลาดเคลื่อน	3.732	10	.373		

*มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง.4 การเปรียบเทียบคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	P
1. ความแข็ง					
ระดับการสี	104.567	5	20.913	43.083	.000*
ความคลาดเคลื่อน	5.825	12	.485		
2. ความเกาะติดกัน					
ระดับการสี	.012	5	.002	32.062	.000*
ความคลาดเคลื่อน	.001	12	.000		
3. ความเหนียวติดกัน					
ระดับการสี	6.489	5	1.298	103.361	.000*
ความคลาดเคลื่อน	.151	12	.013		
4. ความยืดหยุ่น					
ระดับการสี	.107	5	.021	1.390	.295
ความคลาดเคลื่อน	.184	12	.015		
5. ความเหนียวติดยึด					
ระดับการสี	3.570	5	.714	16.066	.000*
ความคลาดเคลื่อน	.533	12	.044		
6. การเคี้ยว					
ระดับการสี	2.332	5	.466	3.818	.027*
ความคลาดเคลื่อน	1.466	12	.122		

*มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	P
1. ความหนืดสูงสุด					
ระดับการสี	64815.362	5	12963.072	694.153	.000*
ความคาดเคลื่อน	224.096	12	18.675		
2. ความหนืดต่ำสุด					
ระดับการสี	21511.537	5	4302.307	46.271	.000*
ความคาดเคลื่อน	1115.776	12	92.981		
3. ผลต่างของ ความหนืดสูงสุด กับความหนืดต่ำสุด					
ระดับการสี	13105.803	5	2621.161	24.585	.000*
ความคาดเคลื่อน	1279.391	12	106.616		
4. ความหนืดสุดท้าย					
ระดับการสี	24014.678	5	4802.936	36.596	.000*
ความคาดเคลื่อน	1574.907	12	131.242		
5. ผลต่างของ ความหนืดสุดท้ายกับ ความหนืดต่ำสุด					
ระดับการสี	924.171	5	184.834	16.745	.000*
ความคาดเคลื่อน	132.456	12	11.038		
6. เวลาในการให้ค่า ความหนืดสูงสุด					
ระดับการสี	.040	5	.008	.910	.506
ความคาดเคลื่อน	.106	12	.009		
7. อุณหภูมิแป้งเปียก					
ระดับการสี	25.841	5	5.168	1.790	.189
ความคาดเคลื่อน	34.640	12	2.887		

*มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง.6 การเปรียบเทียบระดับของการเกิดเงาติโนเซชันของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	P
1. ระดับการเกิดเงาติโนเซชัน					
ระดับการสี	2576.368	5	515.274	456.311	.000*
ความคลาดเคลื่อน	13.551	12	1.129		

*มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง.7 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินดัชนีไกลซีมิกของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการสีต่างกัน

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	P
1. C_{∞}					
ระดับการสี	366.134	5	73.227	814.788	.000*
ความคลาดเคลื่อน	1.078	12	.090		
2. k					
ระดับการสี	.000	5	.000	11.078	.000*
ความคลาดเคลื่อน	.000	12	.000		
3. HI					
ระดับการสี	736.970	5	147.394	1705.730	.000*
ความคลาดเคลื่อน	1.037	12	.086		
4. GI					
ระดับการสี	222.099	5	44.420	1710.278	.000*
ความคลาดเคลื่อน	.312	12	.026		

*มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ภาคผนวก จ

การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่

ตาราง จ.1 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการใส่ต่อปริมาณโปรตีนของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		10.90	8.50	6.50	4.50	1.75	0
การใส่ (%)	ค่าเฉลี่ย	6.87	7.19	7.63	7.94	8.49	8.87
10.90	6.87	-	.010*	.000*	.000*	.000*	.000*
8.50	7.19		-	.001*	.000*	.000*	.000*
6.50	7.63			-	.012*	.000*	.000*
4.50	7.94				-	.000*	.000*
1.75	8.49					-	.003*
0	8.87						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.2 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการใส่ต่อปริมาณไขมันของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		10.90	8.50	6.50	4.50	1.75	0
การใส่ (%)	ค่าเฉลี่ย	0.63	0.91	1.27	1.71	2.21	2.92
10.90	0.63	-	.000*	.000*	.000*	.000*	.000*
8.50	0.91		-	.000*	.000*	.000*	.000*
6.50	1.27			-	.000*	.000*	.000*
4.50	1.71				-	.000*	.000*
1.75	2.21					-	.000*
0	2.92						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.3 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อปริมาณเส้นใยของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		10.90	8.50	6.50	4.50	1.75	0
การใส่ (%)	ค่าเฉลี่ย	0.35	0.50	0.66	0.75	0.99	1.12
10.90	0.35	-	.000*	.000*	.000*	.000*	.000*
8.50	0.50		-	.000*	.000*	.000*	.000*
6.50	0.66			-	0.24	.000*	.000*
4.50	0.75				-	.000*	.000*
1.75	0.99					-	.001*
0	1.12						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.4 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อปริมาณเถ้าของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		10.90	8.50	6.50	4.50	1.75	0
การใส่ (%)	ค่าเฉลี่ย	0.36	0.60	0.97	1.04	1.16	1.42
10.90	0.36	-	.000*	.000*	.000*	.000*	.000*
8.50	0.60		-	.000*	.000*	.000*	.000*
6.50	0.97			-	.594	.004*	.000*
4.50	1.04				-	.061	.000*
1.75	1.16					-	.000*
0	1.42						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.5 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อปริมาณคาร์โบไฮเดรตของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	1.75	4.50	6.50	8.50	10.90
การใส่ (%)	ค่าเฉลี่ย	74.23	75.69	77.08	78.04	79.31	80.36
0	74.23	-	.000*	.000*	.000*	.000*	.000*
1.75	75.69		-	.000*	.000*	.000*	.000*
4.50	77.08			-	.000*	.000*	.000*
6.50	78.04				-	.000*	.000*
8.50	79.31					-	.000*
10.90	80.36						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.6 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อปริมาณแป้งทั้งหมดของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	1.75	4.50	6.50	8.50	10.90
การใส่ (%)	ค่าเฉลี่ย	83.96	84.01	84.37	84.61	85.06	85.11
0	83.96	-	1.000	.804	.389	.044*	.033*
1.75	84.01		-	.874	.470	.057	.044*
4.50	84.37			-	.973	.335	.270
6.50	84.61				-	.746	.659
8.50	85.06					-	1.000
10.90	85.11						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.7 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อปริมาณแป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		10.90	8.50	6.50	4.50	1.75	0
การใส่ (%)	ค่าเฉลี่ย	2.51	2.55	2.58	2.61	2.65	2.67
10.90	2.51	-	.018*	.000*	.000*	.000*	.000*
8.50	2.55		-	.096	.001*	.000*	.000*
6.50	2.58			-	.096	.000*	.000*
4.50	2.61				-	.010*	.001*
1.75	2.65					-	.602
0	2.67						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.8 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อปริมาณแป้งที่ย่อยได้ของข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	1.75	4.50	6.50	8.50	10.90
การใส่ (%)	ค่าเฉลี่ย	81.29	81.36	81.76	82.03	82.51	82.60
0	81.29	-	1.000	.696	.255	.021*	.013*
1.75	81.36		-	.807	.342	.030*	.019*
4.50	81.76			-	.954	.248	.161
6.50	82.03				-	.684	.521
8.50	82.51					-	1.000
10.90	82.60						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.9 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการใส่ต่อปริมาณความชื้นของ
รำข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	1.75	4.50	6.50	8.50	10.90
การใส่ (%)	ค่าเฉลี่ย	9.79	12.43	12.43	12.41	12.40	12.40
0	9.79	-	.000*	.000*	.000*	.000*	.000*
1.75	12.43		-	1.000	1.000	1.000	1.000
4.50	12.43			-	1.000	1.000	1.000
6.50	12.41				-	1.000	1.000
8.50	12.40					-	1.000
10.90	12.40						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.10 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการใส่ต่อปริมาณโปรตีนของ
รำข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	10.90	8.50	6.50	4.50	1.75
การใส่ (%)	ค่าเฉลี่ย	5.05	12.79	13.60	13.86	14.69	14.85
0	5.05	-	.000*	.000*	.000*	.000*	.000*
10.90	12.79		-	.004*	.000*	.000*	.000*
8.50	13.60			-	.639	.000*	.000*
6.50	13.86				-	.003*	.001*
4.50	14.69					-	.927
1.75	14.85						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.11 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อปริมาณไขมันของ
รำข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	10.90	8.50	6.50	4.50	1.75
การใส่ (%)	ค่าเฉลี่ย	0.97	15.48	16.60	16.60	17.21	17.74
0	0.97	-	.000*	.000*	.000*	.000*	.000*
10.9	15.48		-	.029*	.029*	.001*	.000*
8.5	16.60			-	1.000	.414	.026*
6.5	16.60				-	.419	.027*
4.5	17.21					-	.550
1.75	17.74						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.12 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อปริมาณเส้นใยของ
รำข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		10.90	8.50	6.50	4.50	1.75	0
การใส่ (%)	ค่าเฉลี่ย	8.67	8.69	9.80	10.86	11.25	41.78
10.90	8.67	-	1.000	.639	.080	.031*	.000*
8.50	8.69		-	.652	.083	.032*	.000*
6.50	9.80			-	.690	.383	.000*
4.50	10.86				-	.993	.000*
1.75	11.25					-	.000*
0	41.78						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.13 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อปริมาณเถ้าของ
รำข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		10.90	8.50	6.50	4.50	1.75	0
การสี (%)	ค่าเฉลี่ย	7.64	8.61	8.63	9.25	9.66	23.25
10.90	7.64	-	.074	.068	.002*	.000*	.000*
8.50	8.61		-	1.000	.387	.048*	.000*
6.50	8.63			-	.408	.052	.000*
4.50	9.25				-	.777	.000*
1.75	9.66					-	.000*
0	23.25						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.14 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อปริมาณคาร์โบไฮเดรตของ
รำข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	1.75	4.50	6.50	8.50	10.90
การสี (%)	ค่าเฉลี่ย	19.17	34.06	35.57	38.52	40.10	43.01
0	19.17	-	.000*	.000*	.000*	.000*	.000*
1.75	34.06		-	.859	.043*	.005*	.000*
4.50	35.57			-	.282	.040*	.001*
6.50	38.52				-	.836	.042*
8.50	40.10					-	.295
10.90	43.01						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.15 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อความแข็งของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		10.90	8.50	6.50	4.50	1.75	0
การสี (%)	ค่าเฉลี่ย	4.99	6.19	6.81	8.34	9.67	12.27
10.90	4.99	-	.517	.142	.003*	.000*	.000*
8.50	6.19		-	.937	.063	.002*	.000*
6.50	6.82			-	.279	.010*	.000*
4.50	8.34				-	.000*	.000*
1.75	9.67					-	.020*
0	12.27						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.16 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อความเกาะติดกันของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	1.75	4.50	6.50	8.50	10.90
การสี (%)	ค่าเฉลี่ย	0.24	0.24	0.28	0.29	0.30	0.30
0	0.24	-	1.000	.003*	.001*	.000*	.000*
1.75	0.24		-	.003*	.001*	.000*	.000*
4.50	0.28			-	.963	.218	.218
6.50	0.29				-	.609	.609
8.50	0.30					-	1.000
10.90	0.30						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.17 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อความเหนียวติดกันของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		10.90	8.50	6.50	4.50	1.75	0
การสี (%)	ค่าเฉลี่ย	-2.24	-1.70	-1.23	-1.02	-0.72	-0.44
10.9	-2.24	-	.003*	.000*	.000*	.000*	.000*
8.50	-1.70		-	.009*	.000*	.000*	.000*
6.50	-1.23			-	.448	.005*	.000*
4.50	-1.02				-	.129	.001*
1.75	-0.72					-	.157
0	-0.44						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.18 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อความเหนียวติดซี่คของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		10.90	8.50	6.50	4.50	1.75	0
การสี (%)	ค่าเฉลี่ย	1.51	1.82	1.93	2.30	2.34	2.91
10.90	1.51	-	.668	.378	.019*	.014*	.000*
8.50	1.82		-	.995	.246	.192	.002*
6.50	1.93			-	.489	.402	.004*
4.50	2.30				-	1.000	.094
1.75	2.34					-	.123
0	2.91						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.19 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อการเจริญของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		10.90	8.50	6.50	4.50	1.75	0
การใส่ (%)	ค่าเฉลี่ย	0.42	0.68	0.74	0.97	1.07	1.57
10.90	0.42	-	.970	.931	.612	.440	.045*
8.50	0.68		-	1.000	.956	.857	.165
6.50	0.74			-	.984	.922	.217
4.50	0.97				-	1.000	.527
1.75	1.07					-	.703
0	1.57						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.20 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการใส่ปุ๋ยต่อความหนืดสูงสุดของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	1.75	4.50	6.50	8.50	10.90
การใส่ (%)	ค่าเฉลี่ย	244.22	303.89	315.42	364.97	385.64	428.42
0	244.22	-	.000*	.000*	.000*	.000*	.000*
1.75	303.89		-	.131	.000*	.000*	.000*
4.50	315.42			-	.000*	.000*	.000*
6.50	364.97				-	.003*	.000*
8.50	385.64					-	.000*
10.90	428.42						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.21 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อความหนืดต่ำสุดของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	4.50	1.75	6.50	8.50	10.90
การสี (%)	ค่าเฉลี่ย	133.72	158.78	159.28	184.31	210.03	236.83
0	133.72	-	.147	.135	.001*	.000*	.000*
4.50	158.78		-	1.000	.135	.001*	.000*
1.75	159.28			-	.148	.001*	.000*
6.50	184.31				-	.131	.001*
8.50	210.03					-	.108
10.90	236.83						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.22 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อผลต่างของความหนืดสูงสุด
กับความหนืดต่ำสุดของข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	1.75	4.50	6.50	8.50	10.90
การสี (%)	ค่าเฉลี่ย	110.50	144.55	156.64	175.61	180.67	191.58
0	110.50	-	.043*	.005*	.000*	.000*	.000*
1.75	144.55		-	.832	.073	.030*	.005*
4.50	156.64			-	.452	.227	.037*
6.50	175.61				-	.995	.622
8.50	180.67					-	.882
10.90	191.58						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.23 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อความหนืดสุดท้ายของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	1.75	4.50	6.50	8.50	10.90
การสี (%)	ค่าเฉลี่ย	207.03	240.86	248.53	272.56	303.00	312.89
0	207.03	-	.080	.024*	.001*	.000*	.000*
1.75	240.86		-	.981	.111	.001*	.000*
4.50	248.53			-	.320	.003*	.001*
6.50	272.56				-	.133	.029*
8.50	303.00					-	.945
10.90	312.89						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.24 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อผลต่างของความหนืด
สุดท้ายกับความหนืดต่ำสุดของข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	1.75	4.50	6.50	8.50	10.90
การสี (%)	ค่าเฉลี่ย	73.31	76.06	81.58	88.25	89.75	92.64
0	73.31	-	.954	.175	.005*	.002*	.001*
1.75	76.06		-	.552	.022*	.010*	.002*
4.50	81.58			-	.363	.185	.041*
6.50	88.25				-	.997	.754
8.50	89.75					-	.944
10.90	92.64						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.25 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อระดับของการเกิด
เมล็ดในเซชันของข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	1.75	4.50	6.50	8.50	10.90
การสี (%)	ค่าเฉลี่ย	59.14	68.36	72.86	77.97	85.81	96.23
0	59.14	-	.000*	.000*	.000*	.000*	.000*
1.75	68.36		-	.008*	.000*	.000*	.000*
4.50	72.86			-	.003*	.000*	.000*
6.50	77.97				-	.000*	.000*
8.50	85.81					-	.000*
10.90	96.23						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.26 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อค่า C_{∞} ของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	1.75	4.50	6.50	8.50	10.90
การสี (%)	ค่าเฉลี่ย	52.17	53.22	58.69	60.80	63.05	63.81
0	52.17	-	.031*	.000*	.000*	.000*	.000*
1.75	53.22		-	.000*	.000*	.000*	.000*
4.50	58.69			-	.000*	.000*	.000*
6.50	60.80				-	.000*	.000*
8.50	63.05					-	.160
10.90	63.81						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.27 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อค่า k ของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		4.50	0	1.75	6.50	8.50	10.90
การสี (%)	ค่าเฉลี่ย	.056	.058	.058	.061	.063	.064
4.50	.056	-	.907	.718	.078	.006*	.003*
0	.058		-	.998	.907	.376	.038*
1.75	.058			-	.600	.078	.038*
6.50	.061				-	.718	.483
8.50	.063					-	.998
10.90	.064						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.28 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อค่า HI ของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	1.75	4.50	6.50	8.50	10.90
การสี (%)	ค่าเฉลี่ย	70.02	71.51	78.51	82.07	85.51	86.54
0	70.02	-	.002*	.000*	.000*	.000*	.000*
1.75	71.51		-	.000*	.000*	.000*	.000*
4.50	78.51			-	.000*	.000*	.000*
6.50	82.07				-	.000*	.000*
8.50	85.51					-	.030*
10.90	86.54						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง จ.29 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลของระดับการสีต่อค่า GI ของ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระดับ		0	1.75	4.50	6.50	8.50	10.90
การสี (%)	ค่าเฉลี่ย	78.15	78.97	82.81	84.77	86.65	87.22
0	78.15	-	.002*	.000*	.000*	.000*	.000*
1.75	78.97		-	.000*	.000*	.000*	.000*
4.50	82.81			-	.000*	.000*	.000*
6.50	84.77				-	.000*	.000*
8.50	86.65					-	.029*
10.90	87.22						-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ นามสกุล	นางสาวลลิตา พยัคฆพล
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2530
จังหวัด และประเทศที่เกิด	อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2547	มัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนสระบุรีวิทยาคม ตำบลปากเพรียว อำเภอเมือง จังหวัดสระบุรี
พ.ศ. 2552	ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร และโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
พ.ศ. 2554	ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชาเทคโนโลยี การอาหาร มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำแหน่ง สถานที่ทำงาน	เจ้าหน้าที่สำนักอาหาร สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา 88/24 ถนนติวานนท์ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000
ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้	789/374 ตำบลปากเพรียว อำเภอเมือง จังหวัดสระบุรี 18000
รางวัลเรียนดี ทูนวิจัย หรือทุนการศึกษา	ทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประเภท บัณฑิตศึกษา ประจำปี 2553 และทุนวิจัยงบประมาณรายได้ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปี 2554