

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวระหว่างการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHANGES IN PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF RICE DURING STORAGE UNDER
ACCELERATED CONDITION

Mr. Nonthacha Thanathornvarakul



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Food Technology

Department of Food Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวระหว่าง การเก็บภายใต้ภาวะเร่ง
โดย	นายนทชา ธนธรรวาทกุล
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิษฐา ธนานุวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.จิรรัตน์ อนันตกุล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา เลหาสงคราม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิษฐา ธนานุวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรรัตน์ อนันตกุล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.วรรณดา ตูลยชัย)

นนทชา ธนธรรวรากุล : การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวระหว่างการเก็บ
 ภายใต้อุณหภูมิสูง (CHANGES IN PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF RICE DURING
 STORAGE UNDER ACCELERATED CONDITION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.
 ชนิษฐา ธนานุวงศ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร.จิรรัตน์ อนันตกุล, 93 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวใน
 ระหว่างการเก็บที่อุณหภูมิสูง ตัวอย่างข้าวที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ข้าวแอมิโลสต่ำพันธุ์ขาวดอกมะลิ
 105 (KDML105) ปทุมธานี 1 (PTT1) กข 45 (RD45) และข้าวแอมิโลสสูงพันธุ์กข 47 (RD47) ชัยนาท
 1 (CNT1) พิษณุโลก 2 (PSL2) บรรจุตัวอย่างข้าวเปลือกในกระสอบพลาสติก เก็บที่ 39.2 °C ความชื้น
 สัมพัทธ์ 43.1% เป็นเวลาไม่เกิน 31 สัปดาห์ พบว่า ความชื้นของข้าวเปลือกลดลงมากในช่วง 4
 สัปดาห์แรก จากนั้นจึงมีค่าคงที่อยู่ในช่วง 8 – 10% ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพการหุงต้ม
 และสมบัติของเพสต์ขณะร้อนและเย็นโดยส่วนใหญ่มีการเปลี่ยนแปลงมากในช่วงแรกของการเก็บ
 รักษา (ไม่เกิน 8 สัปดาห์แรก) จากนั้นจึงค่อนข้างคงที่ ส่วนค่า adhesiveness ของข้าวสุกมีแนวโน้ม
 ลดลงตลอดการเก็บรักษา สามารถใช้ fraction conversion model ทำนายการเปลี่ยนแปลงค่า
 adhesiveness และ pasting temperature ตามเวลาการเก็บได้ ($R^2 \geq 0.67$) และพบความแตกต่าง
 ของค่าคงที่อัตรา (k) ของชุดข้อมูลจากข้าวแอมิโลสต่ำและสูง นอกจากนี้ยังพบว่าเอนทาลปีของการ
 เกิดเจลลาตินในเซชันและสัดส่วนของโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (> 225 kDa) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม
 เวลาการเก็บ แต่ไม่พบแนวโน้มที่ชัดเจนของการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการหลอมผลึกสาร
 เชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันตามเวลา นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวแอมิโลสต่ำมีค่า adhesiveness,
 peak viscosity และ breakdown สูงกว่า แต่มีเปอร์เซ็นต์ข้าวตันและ pasting temperature ต่ำ
 กว่าข้าวแอมิโลสสูง สามารถใช้ข้อมูลด้านคุณภาพการหุงต้ม ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก และการ
 เปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็นในการจัดแยกกลุ่มของข้าวตามปริมาณแอมิโลส
 และเวลาการเก็บรักษาตามหลักการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal component analysis)
 ได้ และสามารถใช้เทคนิค NIR spectroscopy ในการทำนายค่าระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการหุง
 ต้ม ค่า adhesiveness pasting temperature peak viscosity และ breakdown ของข้าวพันธุ์
 ต่างๆ ได้ โดยได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง NIR absorption spectrum (4000 – 10000
 cm^{-1}) และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มี $R^2 \geq 0.81$ root mean square error of calibration ≤ 1.50
 และ root mean square error of prediction ≤ 1.38

ภาควิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2557	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5572006523 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEYWORDS: RICE / STORAGE / ELEVATED TEMPERATURE / PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES / NIR SPECTROSCOPY

NONTHACHA THANATHORNVARAKUL: CHANGES IN PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF RICE DURING STORAGE UNDER ACCELERATED CONDITION. ADVISOR: ASSOC. PROF. KANITHA TANANUWONG, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. JIRARAT ANUNTAGOOL, Ph.D., 93 pp.

Objective of this research was to study the changes in physicochemical properties of rice during elevated temperature storage. The investigated paddy rice cultivars included low amylose rice cv. Khao Dawk Mali 105 (KDML105), Pathum Thani 1 (PTT1), and RD45 and high amylose rice, named RD47, Chai Nat 1 (CNT1), and Phitsanulok 2 (PSL2). Paddy were packed in plastic sack and stored at 39.2 °C and 43.1% relative humidity up to 31 weeks. The results showed that in the first 4 weeks of storage, moisture content of paddy decreased sharply and maintain at 8 – 10% afterwards. Most of the parameters related to cooking qualities and pasting properties had dramatic changes in the first period of storage (within the first 8 weeks), and became relatively stable afterwards. The adhesiveness of cooked rice gradually decreased during storage. Change of adhesiveness and pasting temperature during storage could be predicted by fraction conversion model ($R^2 \geq 0.67$) and there were the difference among the rate constant (k) values of the data from low and high amylose rice. Enthalpy of gelatinization and the proportion of high molecular weight proteins (>225 kDa) tended to increase over time. However, enthalpy of amylose-lipid complex melting fluctuated during storage. Moreover, it was found that low amylose rice had higher adhesiveness, peak viscosity and breakdown, but had lower head rice yield and pasting temperature than those of high amylose rice. According to principal component analysis, cooking qualities, textural parameters of cooked rice, and pasting properties were successfully used to classify the rice according to amylose content and storage time. NIR spectroscopic technique was used to predict minimum cooking time, adhesiveness, pasting temperature, peak viscosity, and breakdown of the rice samples. The developed models reflecting the relationship between NIR absorption spectrum (4000 – 10000 cm^{-1}) and each of the parameters had $R^2 \geq 0.81$, root mean square error of calibration ≤ 1.50 , and root mean square error of prediction ≤ 1.38 .

Department: Food Technology

Field of Study: Food Technology

Academic Year: 2014

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์โดยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิษฐา ธนานุวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.จิรารัตน์ อนันตกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาสละเวลาเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนความเอาใจใส่และให้ความช่วยเหลือ รวมทั้งตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องเพื่อให้วิทยานิพนธ์สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา เลาสงคราม ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ธนจันท์ มหาวนิช และ ศาสตราจารย์ ดร.วรรณดา ตูลยธัญ ที่ร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งชี้แนะแนวทางการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนการวิจัย ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนอุดหนุนการวิจัยเกษตรภายใต้โครงการ การสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงข้าวใหม่เป็นข้าวเก่า รหัสโครงการ 2555NRCT716 จากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ขอขอบพระคุณสหกรณ์การเกษตรประจันตคาม ปราจีนบุรี ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี และศูนย์วิจัยข้าวราชบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้าวเปลือกที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านโรงงานต้นแบบแปรรูปอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่สำหรับเก็บตัวอย่าง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในระดับปริญญาโท และพี่ๆ ในระดับปริญญาเอก ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาที่ดำเนินงานวิจัย และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่าน ที่คอยอำนวยความสะดวก ให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณแม่ และครอบครัว ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	2
2.1 ข้าว.....	2
2.2 คุณภาพข้าว.....	3
2.3 การสีข้าว.....	5
2.3.1 ขั้นตอนการสีข้าว.....	6
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพการสี.....	8
2.4 การใช้ประโยชน์จากข้าว.....	8
2.5 การเปลี่ยนแปลงของข้าวในระหว่างการเก็บ.....	10
2.6 เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared spectroscopy, NIR).....	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	16
3.1 วัตถุประสงค์.....	16
3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	16
3.2.1 การเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือก.....	16
3.2.2 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวเปลือก ข้าวสาร และแป้งข้าวของข้าวใหม่.....	17

3.2.3 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวเปลือก ข้าวสาร และแป้งข้าวของข้าว ที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง	21
3.2.4 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพข้าว ระหว่างการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง	21
3.2.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบ (factor analysis) ของค่าคุณภาพการหุงต้ม ค่าที่ เกี่ยวข้องกับลักษณะเนื้อสัมผัส และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อน และเย็น.....	22
3.2.6 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าคุณภาพการหุงต้ม ค่าที่ เกี่ยวข้องกับลักษณะเนื้อสัมผัส และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อน และเย็นจาก NIR spectrum	22
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	23
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวใหม่	23
4.2 คุณภาพการสี.....	24
4.3 คุณภาพการหุงต้ม	26
4.4 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก.....	31
4.5 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็น	36
4.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพข้าวตามเวลาการ เก็บรักษา.....	40
4.7 สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลลาติโนเซชันและสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน.....	41
4.8 รูปแบบน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในแป้งข้าว	46
4.9 การจัดกลุ่มตัวอย่างข้าวจากค่าคุณภาพการหุงต้ม ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก และการ เปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็น	51
4.10 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพข้าวระหว่างการ เก็บด้วยเทคนิค NIR.....	53

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	57
รายการอ้างอิง	59
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์คุณภาพการสี (มกษ. 4004-2555)	68
ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์สมบัติทางเคมี	69
ภาคผนวก ค วิธีวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ	81
ภาคผนวก ง ข้อมูลผลการทดลองเพิ่มเติม	89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	93



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	ลักษณะเด่นของข้าวบางพันธุ์ 3
ตารางที่ 4.1	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวใหม่แต่ละพันธุ์ 23
ตารางที่ 4.2	ค่า Pearson correlation (r) ของคุณภาพการหุงต้มของกลุ่มข้าวแอมิโลสต่ำที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง 30
ตารางที่ 4.3	ค่า Pearson correlation (r) ของคุณภาพการหุงต้มของกลุ่มข้าวแอมิโลสสูงที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง 31
ตารางที่ 4.4	ค่า Pearson correlation (r) ของค่าพารามิเตอร์จากเครื่อง Rapid Visco-Analyzer ของแป้งข้าวแอมิโลสต่ำและสูงที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง 39
ตารางที่ 4.5	ค่า Pearson correlation (r) ของค่า adhesiveness ของข้าวสุกกับค่าพารามิเตอร์จากเครื่อง Rapid Visco-Analyzer ของแป้งข้าวแอมิโลสต่ำและสูงที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง 39
ตารางที่ 4.6	ค่าพารามิเตอร์ (A_0 , A_∞ , และ k) และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของการใช้ fractional conversion model ในการทำนายค่า adhesiveness ของข้าวพันธุ์ต่างๆ ตามเวลาการเก็บรักษา 40
ตารางที่ 4.7	ค่าพารามิเตอร์ (A_0 , A_∞ , และ k) และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของการใช้ fractional conversion model ในการทำนายค่า pasting temperature ของข้าวพันธุ์ต่างๆ ตามเวลาการเก็บรักษา 41
ตารางที่ 4.8	Enthalpy of amylose-lipid complexes (ΔH_{al}) ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง 46
ตารางที่ 4.9	ค่า Factor loading จาก 2 องค์ประกอบแรกที่แยกสกัดได้จากค่าคุณภาพการหุงต้ม ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็น 52

ตารางที่ 4.10	ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และช่วงข้อมูลของค่าทางคุณภาพการหุงต้ม เนื้อสัมผัสและสมบัติของเพสต์ขนมร้อนและเย็นของตัวอย่างข้าว 132 ตัวอย่าง.....	54
ตารางที่ 4.11	ค่าพารามิเตอร์สำหรับการปรับแต่งสเปกตรัม NIR สำหรับแต่ละค่าที่ตรวจวัด ด้วยวิธี Savitzky Golay Derivatives	55
ตารางที่ 4.12	ค่าทางสถิติของสมการทำนายที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Partial least squares regression เพื่อทำนายค่าทางคุณภาพการหุงต้ม เนื้อสัมผัสและสมบัติของเพสต์ขนมร้อนและเย็นของตัวอย่างข้าว 132 ตัวอย่าง	55
ตารางที่ ข.1	ส่วนประกอบ SDS-urea solution และ sample buffer	77
ตารางที่ ข.2	ส่วนประกอบของ separating gel และ stacking gel	78
ตารางที่ ข.3	ส่วนประกอบของ electrode running gel buffer	78
ตารางที่ ข.4	ส่วนประกอบของ staining solution และ destaining solution	79
ตารางที่ ค.1	ขั้นตอนการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขนมร้อนและเย็น.....	86

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	ลักษณะของข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว และข้าวหัก..... 4
รูปที่ 2.2	ขั้นตอนการสีข้าว 5
รูปที่ 2.3	เครื่องกะเทาะเปลือกแบบลูกกลิ้งยาง..... 6
รูปที่ 2.4	หลักการขัดขาวข้าวกล้อง..... 7
รูปที่ 2.5	เครื่องคัดขนาดข้าว 7
รูปที่ 2.6	ผลิตภัณฑ์จากข้าว..... 9
รูปที่ 2.7	กลไกการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในข้าวในระหว่างการเก็บ 11
รูปที่ 3.1	ตัวอย่างถุงพลาสติกสำหรับบรรจุตัวอย่างข้าวเปลือก..... 17
รูปที่ 3.2	สถานที่เก็บตัวอย่างและอุปกรณ์ให้ความร้อนสำหรับควบคุมอุณหภูมิ 17
รูปที่ 3.3	ชุดอุปกรณ์ทดสอบคุณภาพการขัดสี..... 19
รูปที่ 4.1	ความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง 25
รูปที่ 4.2	ปริมาณข้าวตันระหว่างการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง..... 25
รูปที่ 4.3	ระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการหุงต้มของข้าวที่เก็บภายใต้ภาวะเร่ง..... 27
รูปที่ 4.4	ปริมาณน้ำที่ดูดซับขณะหุงต้มของข้าวที่เก็บภายใต้ภาวะเร่ง..... 27
รูปที่ 4.5	ปริมาณของแข็งที่สูญเสียขณะหุงต้มของข้าวที่เก็บภายใต้ภาวะเร่ง 28
รูปที่ 4.6	การขยายปริมาตรของข้าวสุกของข้าวที่เก็บภายใต้ภาวะเร่ง 28
รูปที่ 4.7	อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของข้าวสุกของข้าวที่เก็บภายใต้ภาวะเร่ง 29
รูปที่ 4.8	การยืดตัวของเมล็ดข้าวสุกของข้าวที่เก็บภายใต้ภาวะเร่ง..... 29
รูปที่ 4.9	ค่า hardness ของข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง..... 32
รูปที่ 4.10	ค่า cohesiveness ของข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง 33
รูปที่ 4.11	ค่า adhesiveness ของข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง 33

รูปที่ 4.12	ค่า springiness ของข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง.....	34
รูปที่ 4.13	ค่า gumminess ของข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง.....	34
รูปที่ 4.14	ค่า chewiness ของข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง.....	35
รูปที่ 4.15	ค่า resilience ของข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง.....	35
รูปที่ 4.16	ค่า pasting temperature ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง.....	37
รูปที่ 4.17	ค่า peak viscosity ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง.....	37
รูปที่ 4.18	ค่า breakdown ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง.....	38
รูปที่ 4.19	ค่า setback ของตัวอย่างแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง.....	38
รูปที่ 4.20	Onset gelatinization temperature (T_o) ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง.....	42
รูปที่ 4.21	Peak gelatinization temperature (T_p) ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง.....	42
รูปที่ 4.22	Conclusion gelatinization temperature (T_c) ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง.....	43
รูปที่ 4.23	Gelatinization temperature range ($T_c - T_o$) ของการเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง.....	43
รูปที่ 4.24	Enthalpy of gelatinization (ΔH_g) ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง.....	45
รูปที่ 4.25	รูปแบบน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในข้าวทั้ง 6 พันธุ์.....	47
รูปที่ 4.26	สัดส่วนปริมาณโปรตีนในข้าวใหม่ (จำแนกตามช่วงของน้ำหนักโมเลกุล).....	48
รูปที่ 4.27	สัดส่วนโดยปริมาณของโปรตีนที่จำแนกตามช่วงของน้ำหนักโมเลกุลของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง.....	49
รูปที่ 4.28	การวิเคราะห์องค์ประกอบจากข้อมูลคุณภาพการหุงต้ม ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็นของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง.....	53

รูปที่ 4.29	ค่าเปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายได้จากสมการที่สร้างขึ้นของกลุ่มตัวอย่าง validation	56
รูปที่ ข.1	ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม GeneTools	80
รูปที่ ค.1	กราฟที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส	85
รูปที่ ค.2	ค่าต่างๆ ที่ได้จากการวัดเนื้อสัมผัสแบบ texture profile analysis.....	85
รูปที่ ค.3	ตัวอย่าง thermogram และค่าที่ได้จากเครื่อง differential scanning calorimeter	88
รูปที่ ง.1	ปริมาณน้ำที่ถูกขับออกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง.....	89
รูปที่ ง.2	ลักษณะตัวอย่างข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่งนาน 2 12 และ 31 สัปดาห์	89
รูปที่ ง.3	ค่า adhesiveness ของข้าวสุกที่เตรียมจากข้าวสายพันธุ์ต่างๆ ที่เก็บเป็นเวลาต่างกัน จุดต่างๆ แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เส้นโค้งแสดงค่าที่ทำนายได้จาก fractional conversion model.....	90
รูปที่ ง.4	ค่า pasting temperature ของข้าวสุกที่เตรียมจากข้าวสายพันธุ์ต่างๆ ที่เก็บเป็นเวลากัน จุดต่างๆ แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เส้นโค้งแสดงค่าที่ทำนายได้จาก fractional conversion model.....	91
รูปที่ ง.5	ตัวอย่าง thermogram ของข้าวแอมิโลสต่ำที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่งนาน 6 สัปดาห์	92
รูปที่ ง.6	ตัวอย่าง thermogram ของข้าวแอมิโลสสูงที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่งนาน 6 สัปดาห์	92

บทที่ 1

บทนำ

ข้าวจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย ในปี พ.ศ. 2556 มีผลผลิตมากกว่า 37.8 ล้านตัน ข้าวเปลือก (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558a, 2558b) พันธุ์ข้าวที่ปลูกในประเทศไทยมีหลายสายพันธุ์ โดยแต่ละสายพันธุ์จะมีความเหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศและวัตถุประสงค์ในการใช้งานที่ต่างกันไป เช่น ข้าวหอมของไทยที่เป็นที่นิยมของตลาดโลก ได้แก่พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ กข 15 ซึ่งเป็นข้าวแอมิโลสต่ำ นิยมบริโภคในรูปของข้าวหุงสุกที่ให้เนื้อสัมผัสที่นุ่มและค่อนข้างเหนียว (กรมวิชาการเกษตร, 2547) แต่สำหรับผลิตภัณฑ์เส้นและแผ่นจะนิยมผลิตจากแป้งข้าวแอมิโลสสูง เช่นพันธุ์ชัยนาท 1 (งามชื่น คงเสรี, 2551) ข้าวเปลือกภายหลังจากการเก็บเกี่ยวมักจะถูกจัดเก็บในไซโลหรืออาคารที่มีอากาศถ่ายเท ในระหว่างการเก็บรักษาข้าวเปลือกจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในเมล็ดข้าว ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของข้าวและแป้งข้าวในด้านต่างๆ เช่น ลักษณะปรากฏ คุณภาพการหุงต้ม การเปลี่ยนแปลงข้างต้นอาจเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรต (โดยเฉพาะสตาร์ช) โปรตีน ไขมัน และอาจเกี่ยวข้องกับการทำงานของเอนไซม์หรือไม่ก็ได้เช่น เกิดพันธะไดซัลไฟด์ในโมเลกุลออริซานิน (oryzenin) เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้น้ำหนักโมเลกุลของออริซานินมีค่าเพิ่มขึ้น (Chrastil, 1990) เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันอิสระ (Moritaka และ Yasumatsu, 1972) ภาวะการเก็บข้าว ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลา และปริมาณความชื้นของข้าวจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวและแป้งข้าว (Zhou และคณะ, 2002) จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของข้าวในระหว่างการเก็บรักษาเพียงไม่กี่พันธุ์ และสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวเฉพาะพันธุ์ข้าวที่ศึกษา จึงอาจไม่สามารถประยุกต์ใช้ข้อมูลจากข้าวพันธุ์เดียวเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงของข้าวพันธุ์อื่นได้อย่างครอบคลุม ประกอบกับยังมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเก็บข้าวในภาวะเร่งอยู่น้อย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวในระหว่างการเก็บที่อุณหภูมิสูง โดยเลือกศึกษาข้าวกลุ่มแอมิโลสต่ำและสูงกลุ่มละ 3 พันธุ์ หาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของข้าวในด้านต่างๆ และระยะเวลาการเก็บ รวมถึงการประยุกต์ใช้เทคนิค NIR spectroscopy ในการทำนายสมบัติด้านต่างๆ ของข้าว ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้อาจประยุกต์ใช้ในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ได้ข้าวหรือผลิตภัณฑ์จากข้าวที่มีลักษณะตามที่ต้องการได้

บทที่ 2 วารสารปริทัศน์

2.1 ข้าว

ข้าวเป็นพืชในวงศ์หญ้า (Gramineae) ซึ่งมีความหลากหลายถึง 23 ชนิด แต่เป็นข้าวปลูกเพียง 2 ชนิดคือ ข้าวเอเชีย (*Oryza sativa* L.) และข้าวแอฟริกา (*Oryza glaberrima* Steud.) โดยที่ข้าวเอเชียนั้นจะมีการปลูกมากกว่าข้าวแอฟริกา และสามารถแบ่งข้าวเอเชียออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่คือ ข้าวอินดิกา ข้าวจาปอนิกา และข้าวจาวานิกา ข้าวในกลุ่มแรกจะพบในประเทศเขตร้อนได้แก่ ไทย ฟิลิปปินส์ กัมพูชา ลาว เวียดนาม พม่า ศรีลังกา อินเดีย บังคลาเทศ และอินโดนีเซีย กลุ่มที่สองพบปลูกมากในประเทศญี่ปุ่นและเกาหลี ส่วนกลุ่มสุดท้ายพบปลูกในอินโดนีเซียบางพื้นที่ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550) ในประเทศไทยมีการปลูกข้าวกระจายอยู่ทุกภาคของประเทศ ในปีการผลิต 2556/2557 มีผลผลิตทั้งประเทศรวม 20.46 ล้านตันข้าวสาร (กรมการข้าว, 2558) ผลผลิตข้าวนาปีทั้งประเทศในปี 2556 ในรูปของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 15% มีค่า 27.09 ล้านตัน จำแนกเป็นข้าวเจ้า 19.90 ล้านตัน และข้าวเหนียว 7.19 ล้านตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558a)

ในการจำแนกประเภทของข้าว อาจพิจารณาตามลักษณะของข้าว เช่น รูปร่างของเมล็ด สภาพพื้นที่เพาะปลูก สภาพของแสงแดดในขณะที่ยาวเจริญเติบโต และลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก ซึ่งขึ้นกับปริมาณแอมิโลสในข้าว (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550) หรือแบ่งประเภทของข้าวตามปริมาณแอมิโลสโดยตรง ได้แก่

ข้าวเหนียว (glutinous rice หรือ waxy rice) จะมีแอมิโลสอยู่เพียงเล็กน้อย เมล็ดข้าวสารมีสีขาวขุ่น เมื่อหุงสุกจะมีลักษณะใสและนุ่ม ตัวอย่างข้าวเหนียว เช่น ข้าวพันธุ์ข 10 ข้าวพันธุ์สันป่าตอง เป็นต้น (ธัญญารัตน์ เตชทรัพย์อมร, 2549)

ข้าวเจ้า (nonglutinous rice) เมล็ดข้าวสารมีความใส แต่เมื่อหุงสุกจะมีสีขาวขุ่นและแข็ง ร่วนกว่าข้าวเหนียว โดยสามารถแบ่งข้าวเจ้าออกเป็นสี่กลุ่มตามปริมาณของแอมิโลสคือ ต่ำมาก (2-9%) ต่ำ (9-20%) ปานกลาง (20-25%) และสูง (มากกว่า 25%) ซึ่งปริมาณแอมิโลสที่แตกต่างกันจะส่งผลถึงลักษณะของข้าวสุก เช่น ข้าวที่แอมิโลสสูงจะดูดน้ำในระหว่างการหุงต้มและมีปริมาตรขยายมากกว่าข้าวแอมิโลสต่ำ แต่จะมีลักษณะร่วนและแข็งกว่า (งามชื่น คงเสรี, 2551) ตัวอย่างข้าวและลักษณะเด่นของข้าวเจ้าบางพันธุ์แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะเด่นของข้าวบางพันธุ์

ข้าวพันธุ์	ชนิดข้าว	ลักษณะเฉพาะ	ปริมาณแอมิโลส (%)
ขาวดอกมะลิ 105 (Khao Dawk Mali 105, KDML 105)	ข้าวเจ้าไวต่อ ช่วงแสง	เมล็ดข้าวเรียวยาว ใส แกร่ง คุณภาพการหุงต้มดี ข้าวสุก นุ่มมีกลิ่นหอม	12-17
ปทุมธานี 1 (Pathum Thani 1, PTT1)	ข้าวเจ้าไมไวต่อ ช่วงแสง	ข้าวสุกนุ่มเหนียว มีกลิ่นหอม ลักษณะคล้ายพันธุ์ขาวดอก มะลิ 105	15-19
กข 45 (RD 45)	ข้าวเจ้าน้ำลึก ไว ต่อช่วงแสง	เมล็ดข้าวขาวใส ท้องไข่น้อย	16.35
กข 47 (RD 47)	ข้าวเจ้าไมไวต่อ ช่วงแสง	เมล็ดข้าวสารขาวนวลไม่ เลื่อมมัน เมล็ดยาวเรียวยาว ท้อง ไข่น้อย	26.81
ชัยนาท 1 (Chai Nat 1, CNT 1)	ข้าวเจ้าไมไวต่อ ช่วงแสง	ท้องไข่น้อย ข้าวสุกร่วนและ แข็ง	26.27
พิษณุโลก 2 (Phitsanulok 2, PSL 2)	ข้าวเจ้าไมไวต่อ ช่วงแสง	ท้องไข่น้อย ข้าวสุกร่วนและ แข็ง	28.6

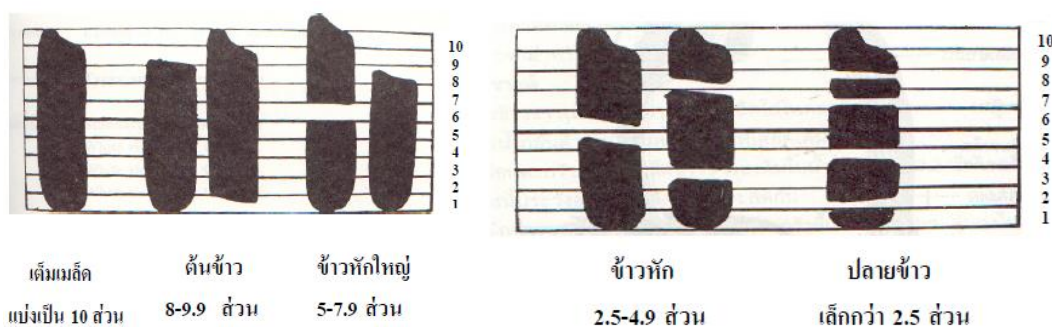
ที่มา: สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว (2556)

2.2 คุณภาพข้าว (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)

คุณภาพข้าวถูกกำหนดขึ้นเพื่อเป็นเกณฑ์หรือมาตรฐานสำหรับการซื้อขายและมีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค โดยพิจารณาจากคุณภาพการสีข้าวเปลือกเป็นข้าวสาร สมบัติทางกายภาพและเคมีของเมล็ดข้าว คุณภาพในการหุงต้มและการรับประทาน ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.2.1 คุณภาพการสี โดยทั่วไปจะพิจารณาประสิทธิภาพการสีจากเกณฑ์ต่อไปนี้

-ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและปริมาณต้นข้าว เมื่อให้ข้าวเต็มเมล็ดมีความยาวทั้งหมด 10 ส่วน ถ้าตัวอย่างมีความยาวอยู่ในช่วง 8 ส่วนขึ้นไปจะถือว่าเป็นต้นข้าว ตัวอย่างข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว และข้าวหักแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะของข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว และข้าวหัก

ที่มา: ดัดแปลงจากกรมวิชาการเกษตร (2547)

-ระดับการขัดสี สามารถแบ่งออกเป็น 4 ระดับ แต่ละระดับจะแตกต่างกันที่ปริมาณรำที่ขัดออกจากข้าวกล้องคือ สีตีพิเศษ สีตี สีตีปานกลาง และสีธรรมดา ซึ่งระดับสีตีพิเศษจะหมายถึงการขัดสีที่สามารถขัดรำออกทั้งหมด นอกจากนี้ยังอาจรายงานเป็นร้อยละของรำที่ขัดออก

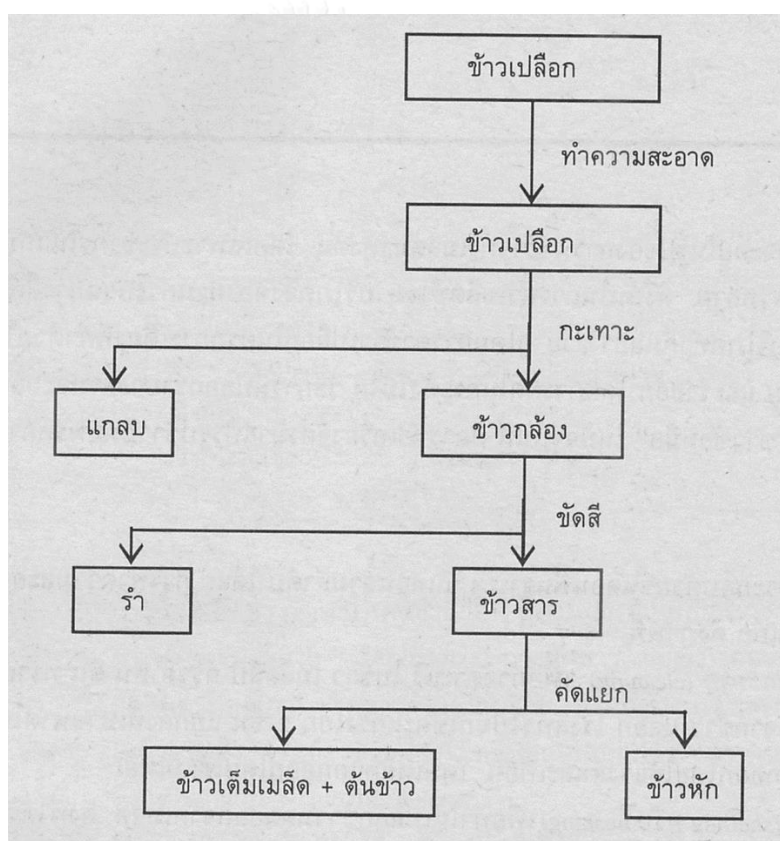
2.2.2 คุณภาพเมล็ดข้าวทางกายภาพ กำหนดจากลักษณะของเมล็ดข้าวสารโดยพิจารณาจากการมองเห็น สัมผัส การวัดขนาด และการชั่งน้ำหนัก ได้แก่ น้ำหนักเมล็ด สีข้าวเปลือก สีข้าวกล้อง ขนาดและรูปร่างเมล็ด ข้าวท้องไข ความถี่ของเมล็ด ความขาวของข้าวสาร และความใสของเมล็ด

2.2.3 คุณภาพเมล็ดข้าวทางเคมี เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวซึ่งได้แก่ คาร์โบไฮเดรต (สตาร์ช) โปรตีน ไขมัน และน้ำ องค์ประกอบเหล่านี้มีผลต่อคุณภาพด้านอื่นๆ ของทั้งข้าวเปลือก ข้าวกล้องและข้าวสาร เช่น สัดส่วนของแอมิโลสต่อแอมิโลเพกทินในสตาร์ช จะมีผลต่อลักษณะในการหุงต้ม ความชื้นในข้าวจะส่งผลต่อคุณภาพการสีของข้าวเปลือก โดยข้าวเปลือกที่มีความชื้นที่เหมาะสมที่ 14% จะทำให้มีคุณภาพการขัดสีดี ได้ข้าวเต็มเมล็ดในสัดส่วนที่สูง

2.2.4 คุณภาพการหุงต้ม ได้แก่ การยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก การขยายปริมาตรของข้าวสุก การอุ้มน้ำของข้าวสุก ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุก ซึ่งจะมีผลต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของข้าวสุก

2.3 การสีข้าว (งามชื่น คงเสรี, 2551)

ก่อนการนำข้าวไปใช้ประโยชน์ทั้งในรูปแบบของการนำข้าวทั้งเมล็ดมาหุงต้มเพื่อบริโภคหรือผลิตเป็นแป้งข้าว ข้าวเปลือกจะต้องผ่านกระบวนการสีข้าวก่อน โดยขั้นตอนการสีข้าวจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอนตามลำดับได้แก่ การทำความสะอาด การกะเทาะ การขัดขาวและการคัดแยก ดังรูปที่ 2.2



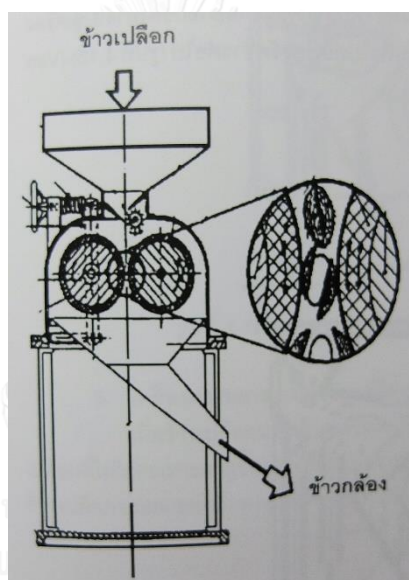
รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการสีข้าว

ที่มา: งามชื่น คงเสรี (2551)

2.3.1 ขั้นตอนการสีข้าว

2.3.1.1 การทำความสะอาด (cleaning) โดยทั่วไปมักใช้ตะแกรงโยก 2 ชั้น เพื่อแยกกรวด หิน ทราย เมล็ดวัชพืช ฟางข้าว โดยสิ่งที่เบา มีขนาดใหญ่ เช่น ฟางข้าว กิ่งไม้ ใบไม้ หรือวัสดุขนาดเล็ก เช่น กรวด ทราย จะถูกแยกออกจากข้าวเปลือกด้วยแรงสั่นสะเทือน

2.3.1.2 การกะเทาะ (shelling หรือ husking) ทำเพื่อให้เปลือกข้าวหลุดออกจากเมล็ด ระบบกะเทาะอาจเป็นระบบลูกยาง (rubber rolls) (รูปที่ 2.3) หรือระบบโม้หินแนวนอน (under run disc huller) แกลบและข้าวกล้องจะถูกแยกออกโดยใช้ลมดูด ข้าวกล้องจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องขัดขาวต่อไปสำหรับผลิตข้าวขาว

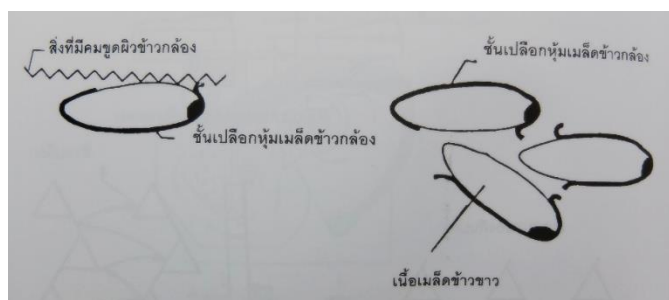


รูปที่ 2.3 เครื่องกะเทาะเปลือกแบบลูกกลิ้งยาง

ที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2550)

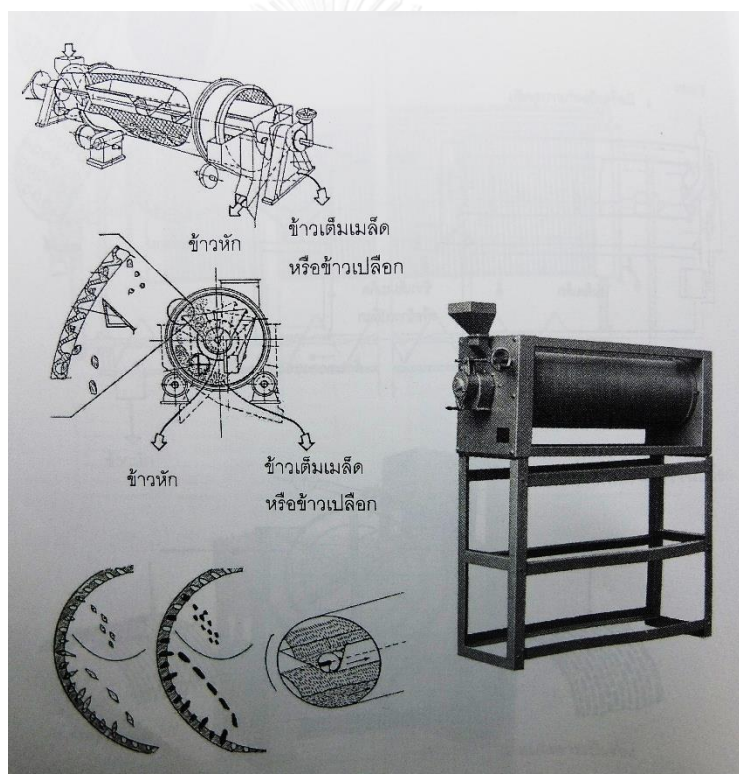
2.3.1.3 การขัดขาว (whitening) การขัดข้าวกล้องเป็นข้าวขาวมี 2 แบบ คือ แบบขัดผิวข้าวกล้องด้วยหินขัด (abrasive) และแบบขัดผิวข้าวกล้องด้วยการเสียดสีกันเอง (friction) (รูปที่ 2.4) รำที่ถูกขัดออกจะแยกออกโดยใช้ลมเป่า และข้าวขาวที่ได้จะมีทั้งข้าวเต็มเมล็ดและข้าวหักขนาดต่างๆปนกัน

2.3.1.4 การคัดแยก (grading หรือ separation) ข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าวและข้าวหัก จะถูกแยกออกจากกันโดยตะแกรงโยกและตะแกรงหลุมทรงกระบอก ตัวอย่างของเครื่องคัดขนาดข้าวแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 หลักการขัดขาวข้าวกล้อง

ที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2550)



รูปที่ 2.5 เครื่องคัดขนาดข้าว

ที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2550)

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพการสี

2.3.2.1 พันธุ์ข้าว เช่นพันธุ์ที่มีขนาดเมล็ดยาวมาก มีท้องไข่มาก จะให้ปริมาณต้นข้าวต่ำ

2.3.2.2 ระยะเวลาและการเก็บเกี่ยว ระยะเวลาที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยวคือ 28-30 วัน หลังจากข้าวออกดอก และข้าวมีความชื้นอยู่ในช่วง 20-26%

2.3.2.3 ความชื้นข้าวเปลือก ค่าความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการนำไปขัดสีเพื่อให้ได้ปริมาณต้นข้าวมากคือ 12-14% นอกจากนี้วิธีการลดความชื้นอาจส่งผลต่อคุณภาพการสีได้ด้วย การลดความชื้นอาจแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆ คือ รูปแบบธรรมชาติ ได้แก่การตากข้าวในลาน และรูปแบบที่ใช้เครื่องจักร เช่น เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบกระบะ เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า เครื่องลดความชื้นแบบฟลูอิดไธซ์เบด และ เครื่องลดความชื้นแบบสเปาเต็ดเบด (พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557) อัตราการลดความชื้นที่รวดเร็วจะทำให้เมล็ดข้าวร้าว ซึ่งอาจพบได้ในการอบแห้งด้วยเครื่องลดความชื้นแบบฟลูอิดไธซ์เบด มีผลทำให้คุณภาพการสีลดลง

2.3.2.4 การเก็บรักษา เช่น อาจเกิดการเสื่อมเสียของข้าวได้เนื่องจากการทำลายของแมลงหรือศัตรูในโรงเก็บ แมลงจะกัดกินเมล็ดข้าวทำให้คุณภาพการสีลดลง และสิ่งขับถ่ายของแมลงยังทำให้เกิดกลิ่นเหม็นอีกด้วย

2.4 การใช้ประโยชน์จากข้าว

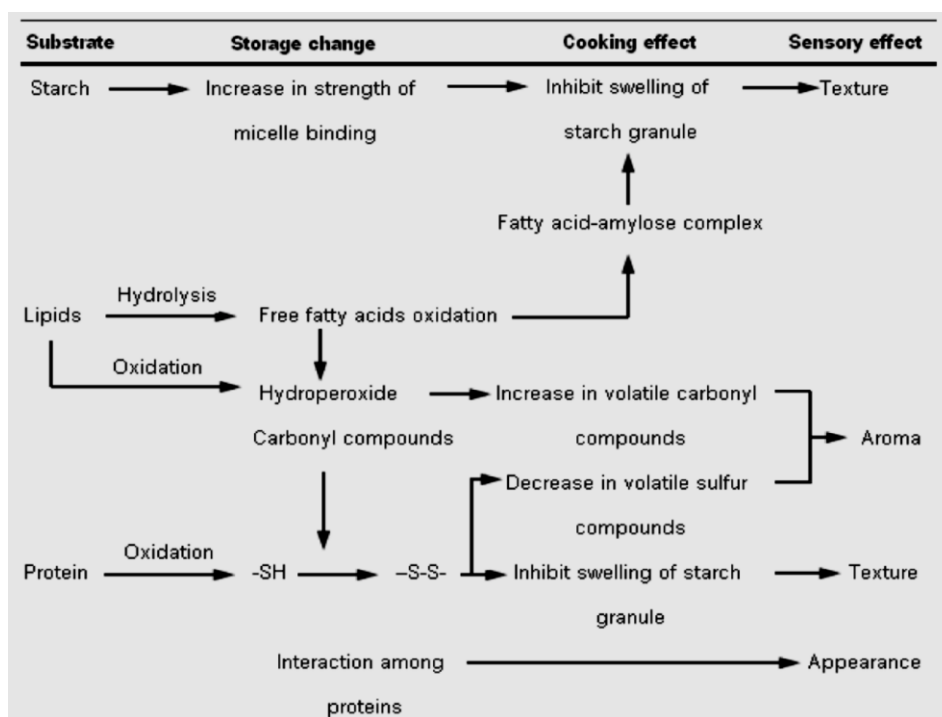
จากการแปรรูปข้าวเปลือกเป็นข้าวกล้องและข้าวสาร จะทำให้เกิดผลพลอยได้คือ ข้าวหัก รำ และแกลบ ผลิตภัณฑ์ที่ต่อเนื่องจากกระบวนการแปรรูปนี้สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่คือ กลุ่มผลิตภัณฑ์แปรรูปจากเมล็ดข้าว กลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารหมักดองจากข้าว และกลุ่มผลิตภัณฑ์แปรรูปจากผลพลอยได้ของข้าว (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550) ผลิตภัณฑ์และผลพลอยได้จากข้าวแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อพิจารณาการใช้ประโยชน์ข้าวจากปริมาณแอมิโลส รวมถึงความใหม่และเก่าของข้าวพบว่า ข้าวที่มีแอมิโลสต่ำและ/หรือข้าวใหม่นิยมนำไปบริโภคเป็นข้าวหุงสุกมากกว่า เนื่องจากให้เนื้อสัมผัสที่นุ่มและเหนียวกว่าข้าวที่มีแอมิโลสสูง และ/หรือข้าวเก่า ซึ่งผู้บริโภคในประเทศไทยมักชอบข้าวหุงสุกที่เหนียวนุ่มมากกว่าข้าวที่แข็งและร่วน (Katekhong และ Charoenrein, 2014) แต่สำหรับผลิตภัณฑ์เส้นและแผ่น นิยมใช้ข้าวที่มีแอมิโลสไม่ต่ำกว่า 27% เป็นวัตถุดิบ และควรเป็นข้าวเก่าที่มีอายุการเก็บอย่างน้อย 3 – 4 เดือน (งามชื่น คงเสรี, 2551)

2.5 การเปลี่ยนแปลงของข้าวในระหว่างการเก็บ

การเปลี่ยนแปลงของข้าวจะเกิดขึ้นตลอดเวลาตั้งแต่การเก็บเกี่ยวจนถึงการนำไปบริโภค โดยเรียกรวมกระบวนการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในข้าวว่ากระบวนการ aging ซึ่งได้มีผู้เสนอกลไกการเปลี่ยนแปลงจากข้าวใหม่เป็นข้าวเก่าว่าเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรต (โดยเฉพาะสตาร์ช) โปรตีน ไขมัน และอาจเกี่ยวข้องกับการทำงานของเอนไซม์หรือไม่ก็ได้เช่น เกิดพันธะไดซัลไฟด์ในโมเลกุลออริซานิน (oryzenin) เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้น้ำหนักโมเลกุลของออริซานินมีค่าเพิ่มขึ้น (Chrastil, 1990) เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันอิสระ (Moritaka และ Yasumatsu, 1972) การเปลี่ยนแปลงข้างต้นอาจขัดขวางการพองตัวของเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้อย่างจำกัด มีผลทำให้แป้งเกิดเจลลาคีโนเซชันได้ยากขึ้น (Tananuwong และ Malila, 2011a) และเกิดการรั่วซึมของแอมิโลสออกจากเม็ดแป้งน้อยลงด้วย (Zhou และคณะ, 2003) การเปลี่ยนแปลงของข้าวในระหว่างการเก็บส่งผลให้คุณภาพการหุงต้มและคุณภาพการบริโภคของข้าวเปลี่ยนแปลงไปด้วย เช่น ใช้น้ำปริมาณมากขึ้นและเวลานานขึ้นในการหุงต้ม ข้าวสุกมีปริมาณเพิ่มขึ้น มีความแข็งมากขึ้น และเกาะติดกันน้อยลง (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550) นอกจากนี้ปฏิกิริยาเมลลาร์ดที่เกิดขึ้นระหว่างเก็บรักษาเป็นผลให้เมล็ดข้าวมีสีคล้ำลงเมื่อเก็บเป็นเวลานานขึ้น กลไกการเปลี่ยนแปลงในระหว่าง aging และผลของการเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 2.7 ระดับการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับอุณหภูมิ เวลา และความชื้น โดยการเปลี่ยนแปลงของข้าวจะเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อเก็บที่อุณหภูมิสูง (Ramesh และคณะ, 2000)

มีงานวิจัยที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพข้าวเปลือก ข้าวกล้องและข้าวสารที่เก็บภายใต้ภาวะเร่ง Saponronnarit และคณะ (2008) ศึกษาการเร่งความเก่าของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเก็บข้าวในที่อับอากาศ อบแห้งข้าวเปลือกความชื้น 28.2% และ 33% ที่อุณหภูมิ 130 และ 150 °C ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที จนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้น 22-23% นำข้าวเปลือกไปเก็บในที่อับอากาศ 30-120 นาที แล้วเป่าด้วยลมความเร็วลม 0.15 เมตร/วินาที จนกระทั่งความชื้นเหลือ 16% เปรียบเทียบกับการเก็บข้าวเปลือกที่อุณหภูมิห้องในถุงพลาสติกปิดสนิทระยะเวลา 6 เดือน พบว่า ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกก่อนการอบแห้งที่มากกว่า อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงกว่าและระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศที่นานขึ้นจะทำให้ค่าความขาวลดลงมากกว่า แต่มีปริมาณข้าวตันเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศ ทำให้ปริมาณน้ำที่ดูดซับขณะหุงต้มและการขยายปริมาตรของข้าวสุกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณของแข็งที่สูญเสียขณะหุงต้มมีแนวโน้มลดลง ซึ่งข้าวที่ผ่านการเร่งอายุโดยอบแห้งข้าวเปลือกความชื้น 33% ที่อุณหภูมิ 150 °C และเก็บในที่อับอากาศนาน 120 นาที จะมี

ปริมาณน้ำที่ดูดซับขณะหุงต้ม การขยายปริมาตรของข้าวสุก และปริมาณของแข็งที่สูญเสียขณะหุงต้ม ใกล้เคียงกับข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิห้องนาน 6 เดือน



รูปที่ 2.7 กลไกการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในข้าวในระหว่างการเก็บ

ที่มา: Tananuwong และ Malila (2011a)

Jaisut และคณะ (2009) ได้ศึกษาการเร่งความแก่ของข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้การอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบดร่วมกับการเก็บข้าวในที่อับอากาศ อบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 130 และ 150 °C ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที และเก็บข้าวที่อบแห้งแล้วในที่อับอากาศเป็นเวลา 30-120 นาที หลังจากนั้นเป่าด้วยลมจนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือ 16% (ใช้เวลาประมาณ 30-40 นาที) เปรียบเทียบกับการเก็บข้าวกล้องในถุงปิดสนิทที่อุณหภูมิห้องนาน 7 เดือน การอบแห้งมีผลทำให้ได้ข้าวกล้องหอมมะลิที่มีลักษณะการหุงต้มคล้ายกับการเก็บข้าวนาน 7 เดือน โดยปริมาณน้ำที่ดูดซับขณะหุงต้ม การขยายปริมาตรของข้าวสุกมีค่าเพิ่มขึ้น และปริมาณของแข็งที่สูญเสียขณะหุงต้มมีค่าลดลง แต่การยืดตัวของเมล็ดข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการอบแห้งเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย การเปลี่ยนแปลงจะเกิดมากขึ้นในข้าวที่อบแห้งที่อุณหภูมิสูง และเก็บในที่อับอากาศนาน ความแข็งของ

ข้าวกล้องหุงสุกที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 150 °C และเก็บที่อับอากาศนาน 120 นาที ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิห้องนาน 4-7 เดือน

Pisithkul และคณะ (2010) ได้ศึกษาการเร่งความเก่าของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 โดยการให้ความร้อนแก่ข้าวสารที่บรรจุในภาชนะปิดสนิทที่อุณหภูมิ 100-120 °C นาน 15-120 นาที ด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (autoclave) และแปรปริมาณความชื้นเริ่มต้นของข้าวสาร 2 ระดับ (13.4 และ 16.6%) เมื่อเปรียบเทียบกับ การปล่อยให้ข้าวเก่าตามธรรมชาติพบว่า ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกที่ผ่านการเร่งความเก่าจะเปลี่ยนไปเหมือนกับข้าวเก่าตามธรรมชาติคือ มีลักษณะแข็งขึ้น เหนียวติดกันน้อยลง ปริมาณของแข็งที่สูญเสียขณะหุงต้มลดลง การยึดตัวของเมล็ดข้าวสุกมีค่ามากขึ้น และเมล็ดมีสีเหลืองมากขึ้น โดยที่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า ระยะเวลา นานกว่า และความชื้นเริ่มต้นสูงกว่า จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่างๆ ในข้าวในระดับที่มากกว่าด้วย

Likitwattanasade และ Hongsprabhas (2010) ศึกษาผลของการเร่งความเก่าข้าวเปลือก โดยเก็บข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 60 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 70% เป็นระยะเวลา 5 วัน เปรียบเทียบกับข้าวใหม่ในข้าวไทย 3 พันธุ์ได้แก่ สันป่าตอง 1 ปทุมธานี 1 และเหลืองประทิว 123 พบว่าตัวอย่างข้าวทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านการเร่งความเก่า เมื่อนำไปสกัดแยกโปรตีนด้วยต่าง ตัวอย่างข้าวที่ผ่านการเร่งความเก่ามีปริมาณโปรตีนคงเหลือในแป้งมากกว่าในตัวอย่างข้าวใหม่ ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ เมื่อแยกสกัดโปรตีนในข้าวตามความสามารถในการละลาย และนำไปวิเคราะห์รูปแบบน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนด้วยวิธีการแยกด้วยกระแสไฟฟ้าบนเจลพอลิอะคริลาไมด์ที่มี sodium dodecyl sulfate เป็นส่วนประกอบ พบว่ารูปแบบน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในกลุ่มกลูเตลินจากข้าวทั้ง 3 พันธุ์มีน้ำหนักโมเลกุลที่ใกล้เคียงกัน แต่แตกต่างกันที่ความเข้มของแถบโปรตีนทั้งในข้าวใหม่และข้าวที่ผ่านการเร่ง และเมื่อเติม β -mercaptoethanol (β -ME) รูปแบบของแถบโปรตีนเปลี่ยนไป โดยที่โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดใหญ่มีปริมาณลดลง เนื่องจาก β -ME ทำลายพันธะไดซัลไฟด์ แต่ไม่มีความแตกต่างระหว่างข้าวใหม่และข้าวที่ผ่านการเร่ง

กิตติศักดิ์ วสันตวิงศ์ และคณะ (2555) ศึกษาผลของการเร่งให้ข้าวเก่าด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นระยะเวลา 5 7 และ 14 วัน โดยใช้ตัวอย่างข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ความชื้นเริ่มต้นไม่เกิน 14% พบว่าอุณหภูมิโดยเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งอยู่ที่ประมาณ 40 °C และเมื่อพิจารณาคุณภาพข้าวสารที่สำคัญ ได้แก่ ความขาวของข้าวสาร ค่าสี (L a b) และสมบัติด้านความหนืด พบว่าค่าความขาวของข้าวสารและค่าสีของข้าวใหม่และข้าวที่ผ่านการเร่งความเก่าไม่มีความแตกต่างกัน ($P \geq 0.05$) แต่พบการเปลี่ยนแปลงของสมบัติด้านความหนืด กล่าวคือ ค่า peak viscosity และ breakdown มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่า final viscosity และ setback มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการเร่งความเก่าเป็นเวลานานขึ้น

Park และคณะ (2012) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีกายภาพของข้าวจาปอนิก้า โดยเก็บข้าวสารที่อุณหภูมิ 4 20 30 และ 40 °C เป็นเวลา 4 เดือน จากผลการทดลองพบว่า การเก็บข้าวที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้ข้าวสีเปลี่ยนแปลงไป โดยมีค่า yellowness ที่วัดด้วยเครื่อง color-difference meter เพิ่มขึ้นจาก 10.5 เป็น 14.52 หลังจากเก็บไว้ 1 เดือนที่อุณหภูมิ 40 °C แต่ค่าความขาวซึ่งวัดด้วยเครื่อง whiteness meter ลดลงเป็น 36.5 หลังเก็บไว้ 1 เดือน ต่ำกว่าค่าความขาวที่ยอมรับได้ (≥ 38) เมื่อพิจารณาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่วัดด้วยเครื่อง Texture analyzer พบว่าข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1 เดือนมีค่า hardness และ cohesiveness เพิ่มขึ้น แต่ค่า adhesiveness ลดลง โดยข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิ 40 °C 1 เดือนมีลักษณะเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 °C 4 เดือน เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็นด้วยเครื่อง Rapid Visco-Analyzer (RVA) พบว่าค่า breakdown ลดลงแต่ setback มากขึ้นเมื่อข้าวเก็บไว้นานขึ้น จากการประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสของข้าวสุกในระบบ 9-point hedonic scale พบว่า ข้าวที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิสูง (30 และ 40 °C) ได้รับความนุ่มลดลงหลังเก็บไว้ 1 เดือน และมีคะแนนทุกด้านต่ำกว่า 5 หลังเก็บข้าวที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา 3 เดือน

Parnsakhorn และ Langkapin (2013) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านต่างๆ ของข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยเก็บข้าวที่อุณหภูมิ 4 และ 37 °C เป็นเวลา 8 เดือน พบว่าข้าวกล้องที่เก็บที่อุณหภูมิตั้ง 2 ระดับมีค่าสี b มากขึ้นตลอดการเก็บรักษา โดยค่าสี b ของข้าวกล้องที่เก็บที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 1 เดือน แตกต่างจากตัวอย่างข้าวที่ไม่ผ่านการเก็บอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) แต่ในตัวอย่างข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 °C ค่าดังกล่าวจะเริ่มมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากค่าสีของข้าวใหม่ภายหลังจากเก็บไว้นาน 6 เดือน ปริมาณน้ำที่ดูดซับขณะหุงต้มและค่าความแข็งของข้าวสุกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา โดยพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าทั้งสองข้างต้นในตัวอย่างข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 1 เดือน กับตัวอย่างข้าวที่ไม่ผ่านการเก็บ แต่ไม่พบความแตกต่างของทั้งสองค่าข้างต้นในตัวอย่างข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 °C ตลอดระยะเวลา 8 เดือน นอกจากนี้ยังพบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันอิสระในตัวอย่างข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิตั้ง 2 ระดับ แต่การเก็บที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นมากกว่าระหว่างการเก็บรักษา

2.6 เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared spectroscopy, NIR)

เทคนิค NIR เป็นวิธีการตรวจสอบวิธีหนึ่งที่ไม่ทำลายตัวอย่าง สามารถได้ข้อมูลรวดเร็วและแม่นยำ (ณัฐกานต์ นวเศรษฐวิสูตร, 2547) โดยศึกษาในช่วงความยาวคลื่น 800 – 2500 นาโนเมตร

ในประเทศไทยมีการนำเทคนิคนี้มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ความชื้น เส้นใย น้ำมัน กรดไขมันอิสระ ในวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมมันสำปะหลัง อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ อุตสาหกรรมแป้ง นมและผลิตภัณฑ์นม น้ำมันพืช (กรมวิชาการเกษตร, 2547) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NIR แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

2.6.1 ขั้นตอนการสร้างสมการ (calibration equation) สามารถแบ่งได้ 2 วิธีหลักคือ wavelength selected method เป็นวิธีที่ต้องเลือกข้อมูลที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่งๆ ที่สัมพันธ์กับค่าที่ต้องการวิเคราะห์ และวิธี full spectrum method ซึ่งจะเลือกใช้ข้อมูลจากช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมมาสร้างสมการ โดยใช้วิธีการทางสถิติเพื่อลดจำนวนตัวแปรอิสระและสร้างตัวแปรกลุ่มใหม่ขึ้นมา เช่น ใช้วิธี Partial least square regression (PLSR) ในขั้นตอนการลดจำนวนตัวแปรอิสระด้วยการแบ่งกลุ่มตัวแปรอิสระเดิมที่มีความสัมพันธ์กัน รวมทั้งนำข้อมูลของตัวแปรตามเข้ามารวมในการสร้างตัวแปรใหม่ที่เรียกว่าแฟกเตอร์ โดยที่ค่าสเปกตรัมทุกความยาวคลื่นมีค่าน้ำหนักที่แตกต่างกันขึ้นกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ สมการ PLSR สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.1 (ศิริพร ริพล, 2551)

$$Y = b_0 + b_1F_1 + b_2F_2 + \dots + b_nF_n \dots \dots \dots 2.1$$

เมื่อ F_1, F_2, \dots, F_n = ค่าตัวแปรใหม่ที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูล Y ที่ตำแหน่ง n ตัวแปร

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่วงน้ำหนักที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูล Y ที่ตำแหน่ง n ตัวแปร

2.6.2 ขั้นตอนการทดสอบสมการ (validation test) เมื่อได้สมการทำนายค่าแล้ว ต้องมีการทดสอบประสิทธิภาพของสมการก่อนนำไปใช้จริง ซึ่งมี 2 วิธีคือ full cross validation ซึ่งใช้ตัวอย่างกลุ่มเดียวกับตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเพื่อทดสอบสมการที่สร้างขึ้น และวิธี prediction testing ซึ่งจะใช้ตัวอย่างชุดใหม่ที่ผ่านขั้นตอนการเตรียม และได้รับสิ่งทดลอง (treatment) เหมือนกับตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการ ถ้าผลการทำนายค่าที่ได้ใกล้เคียงกับผลอ้างอิง และให้ค่าทางสถิติที่ดี แสดงว่าสมการทำนายค่าเหล่านั้นที่สร้างขึ้นยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้ทำนายค่าต่อไปได้อย่างถูกต้อง (ศิริพร ริพล, 2551)

มีการนำเทคนิค NIR มาใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับข้าว เช่น ญัฐกานต์ นวเศรษฐวิสูตร (2547) ใช้เทคนิค NIR เพื่อทำนายปริมาณแอมิโลสเทียบกับปริมาณสตาร์ช ปริมาณสตาร์ช ปริมาณโปรตีน และปริมาณความชื้นของข้าว โดยศึกษาในตัวอย่างข้าวสารไทย 6 พันธุ์ได้แก่ พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

ปทุมธานี 1 กข 23 สุพรรณบุรี 1 สุพรรณบุรี 60 และ สุพรรณบุรี 90 จำนวนทั้งสิ้น 146 หน่วย ตัวอย่าง วัดการสะท้อนกลับของคลื่นในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร พบว่าการสร้างสมการด้วยวิธี PLSR ให้สมการที่ใช้ในการทำนายค่าคุณภาพดังกล่าวได้แม่นยำกว่าวิธีทางสถิติ simple linear regression (SLR) และ multiple linear regression (MLR) ได้สมการสำหรับการทำนายปริมาณแอมิโลส (เปรียบเทียบกับปริมาณสตาร์ช) ปริมาณสตาร์ช ปริมาณโปรตีน และปริมาณความชื้นของข้าวด้วยวิธี PLSR ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) เท่ากับ 0.989, 0.954, 0.896 และ 0.741 ตามลำดับและมีค่า standard error of prediction (SEP) เท่ากับ 1.221%, 0.619%, 0.138% และ 0.252% ตามลำดับ

ศิราพร ริพล (2551) ได้ศึกษาการใช้เทคนิค NIR เพื่อทำนายปริมาณแอมิโลส โปรตีน ไขมัน โดยรวม และความชื้นของข้าว 5 พันธุ์ได้แก่ พันธุ์ชัยนาท 1 ปทุมธานี 1 หอมสุพรรณบุรี กข 15 และ ขาวดอกมะลิ 105 โดยวัดการสะท้อนกลับของคลื่นในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร สร้างสมการถดถอยเชิงเส้นด้วยเทคนิค PLSR พบว่าสมการที่สร้างขึ้นสามารถใช้ทำนายปริมาณแอมิโลส โปรตีน ไขมันโดยรวม และความชื้น โดยมีค่า R เท่ากับ 0.97, 0.95, 0.95 และ 0.93 ตามลำดับ ค่า standard error of calibration (SEC) เท่ากับ 1.57%, 0.15%, 0.13% และ 0.16% ตามลำดับ ค่า SEP เท่ากับ 1.81%, 0.19%, 0.14% และ 0.16% ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้และค่าที่ได้จากสมการ (bias) เท่ากับ 0.09%, 0.04%, 0.02% และ 0.02% ตามลำดับ และทดสอบสมการที่สร้างขึ้นด้วยข้าวจากแหล่งอื่นเพื่อทำนายค่าปริมาณแอมิโลส ไขมัน และความชื้นของตัวอย่างข้าวในกลุ่มนี้ พบว่าให้ค่า R เท่ากับ 0.96, -0.27 และ 0.56 ตามลำดับ ค่า SEP เท่ากับ 2.07%, 0.23% และ 0.56% ตามลำดับ และค่า bias เท่ากับ -1.17%, -0.59% และ -0.24 % ตามลำดับ

นอกจากการใช้เทคนิค NIR เพื่อทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในข้าว Siriphollakul และคณะ (2015) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็นด้วยเครื่อง RVA ของแป้งข้าว และวัดการสะท้อนกลับของคลื่นจากตัวอย่างข้าวเปลือก ในช่วงความยาวคลื่น 1400 – 2400 นาโนเมตร และสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นด้วยเทคนิค PLSR ระหว่างค่า parameter ที่วัดได้จากเครื่อง RVA (setback, peak viscosity, breakdown, และ consistency) กับ NIR spectrum พบว่าสมการที่สร้างได้สามารถใช้ทำนายค่าดังกล่าวได้ดี ให้ค่า R อยู่ในช่วง 0.81 – 0.96 เมื่อตรวจสอบสมการที่สร้างขึ้นด้วยตัวอย่างกลุ่ม validation พบว่าค่าที่ทำนายได้จากสมการไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับค่าจริง ($P < 0.05$)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุประสงค์

-ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (KDML105) และ กข 45 (RD45) ซึ่จากสหกรณ์การเกษตรประจันตคาม

-ข้าวเปลือกพันธุ์ปทุมธานี 1 (PTT1) กข 47 (RD47) และพิษณุโลก 2 (PSL2) ซึ่จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี

-ข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท 1 (CNT1) ซึ่จากศูนย์วิจัยข้าวราชบุรี

ตัวอย่างข้าวที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นข้าวที่เพาะปลูกในฤดูกาลเพาะปลูกนาปี พ.ศ. 2555 และได้รับตัวอย่างมาดำเนินงานวิจัยในเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2556

3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือก

ทำความสะอาดข้าวเปลือกแต่ละพันธุ์โดยร่อนข้าวเปลือกผ่านเครื่องทำความสะอาดข้าวเปลือก (บริษัท นาทวี เทคโนโลยี จำกัด, รุ่น TV 03, ฉะเชิงเทรา) เพื่อคัดเอาสิ่งปนเปื้อน เช่น ฟาง หญ้า เศษหิน ดินออกไป แบ่งบรรจุข้าวเปลือกที่ผ่านการทำความสะอาดใส่ถุงพลาสติกสาน (รูปที่ 3.1) ถูกละ 1.5 กิโลกรัม และมัดปากถุงด้วยเชือกฟาง เก็บข้าวเปลือกภายใต้ภาวะเร่งในห้องปิดและใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบอินฟราเรด (ห้างหุ้นส่วนจำกัด สวนหลวง เอ็นจิเนียริง, กรุงเทพมหานคร) (รูปที่ 3.2) เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในห้องให้มีค่า 39.2 ± 0.9 °C ความชื้นสัมพัทธ์มีค่า 43.1 ± 2.8 % ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องด้วยเครื่อง temperature and humidity datalogger (Shenzhen Everbest Machinery Industry Co., Ltd, DT-172/172TK, China)



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างถุงพลาสติกสำหรับบรรจุตัวอย่างข้าวเปลือก



รูปที่ 3.2 สถานที่เก็บตัวอย่างและอุปกรณ์ให้ความร้อนสำหรับควบคุมอุณหภูมิ

3.2.2 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวเปลือก ข้าวสาร และแป้งข้าวของข้าวใหม่

สุ่มตัวอย่างข้าวแต่ละพันธุ์ที่ได้จากข้อ 3.2.1. มาวิเคราะห์สมบัติของข้าวเปลือก ข้าวสาร และแป้งข้าวดังนี้ (ทดลอง 2 ซ้ำ โดยตัวอย่างข้าว 1 กระสอบ คือ 1 ซ้ำของการทดลอง)

3.2.2.1 การวิเคราะห์สมบัติของข้าวเปลือก

- วัดความชื้นของข้าวเปลือกด้วยเครื่อง grain moisture meter (G-WON Hitech CO., LTD, GMK-303, Seoul, Korea) วัดค่า 3 ซ้ำ ต่อ 1 ซ้ำของการทดลอง
- วิเคราะห์คุณภาพการสีตามวิธีใน มกษ. 4004-2555 (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2555) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก) โดยใช้เครื่องมือสำหรับการทดสอบการสี (อุสินทวี ลพบุรี ประเทศไทย) ซึ่งประกอบด้วย เครื่องกะเทาะเปลือกแบบ 3 ลูกกลิ้ง เครื่องขัดขาวเมล็ดข้าวสาร และ เครื่องคัดข้าวสาร (รูปที่ 3.3) ขั้นตอนการสีข้าวมัดนี้ นำข้าวเปลือกมาผ่านเครื่องกะเทาะเปลือก 2 รอบ โดยปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.1 – 0.2 มิลลิเมตร จากนั้นนำข้าวกลิ้งที่ได้ไปขัดขาวด้วยเครื่องขัดขาวเป็นระยะเวลา 20 วินาที คัดแยกข้าวหักออกจากข้าวสารที่ขัดขาวแล้วด้วยเครื่องคัดข้าวสาร วัดค่า 4 ซ้ำ ต่อ 1 ซ้ำของการทดลอง จากนั้นจึงนำตัวอย่างข้าวสารไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ที่ระบุในข้อ 3.2.2.2

3.2.2.2 การวิเคราะห์สมบัติของข้าวสาร

- วิเคราะห์คุณภาพการหุงต้มของข้าวสารตามวิธีของ Singh และคณะ (2005) ประกอบด้วย ระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการหุงต้ม (minimum cooking time) หมายถึงระยะเวลาหุงต้มที่ให้เมล็ดข้าวสุกที่ไม่มีส่วนขาวตรงกลางเมล็ดเมื่อกดข้าวด้วยกระจก และ นำเวลาที่ได้ไปใช้ในการหาค่าต่อไปนี้ ปริมาณน้ำที่ดูดซับขณะหุงต้ม (water uptake) หมายถึงสัดส่วนโดยน้ำหนักของข้าวที่เพิ่มขึ้นระหว่างทำให้สุกเนื่องจากการดูดน้ำ ปริมาณของแข็งที่สูญเสียขณะหุงต้ม (solid loss) หมายถึงสัดส่วนของแข็งในส่วนที่เหลือจากการหุงต้ม รายงานในรูปร้อยละของของแข็งต่อน้ำหนักข้าวสาร การขยายปริมาตรของข้าวสุก (volume expansion) หมายถึง สัดส่วนโดยปริมาตรของข้าวสุกต่อปริมาตรข้าวสาร อัตราส่วนระหว่างความยาวกับความกว้างของข้าวสุก (length breadth ratio) และการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก (elongation ratio) หมายถึง อัตราส่วนความยาวของข้าวสุกต่อความยาวของข้าวสาร (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.1) วัดค่า 4 ซ้ำ ต่อ 1 ซ้ำของการทดลอง
- วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (texture analyzer) (Texture Technologies Corp, TA-XT plus, UK) ดัดแปลงจากวิธีของ Park และคณะ (2001) ใช้วิธีการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ texture profile analysis (TPA) โดยใช้หัววัดแบบ P/100 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.2) 1 ซ้ำของการทดลอง เตรียมตัวอย่างข้าวสุก

2 ครั้ง แต่แต่ละครั้งของการเตรียมตัวอย่างข้าวสุก วัดค่า 15 ซ้ำ รวมวัดค่าซ้ำทั้งสิ้น 30 ซ้ำ ต่อ 1 ซ้ำของการทดลอง



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์ทดสอบคุณภาพการขัดสี

- วัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (FT-NIR Antaris II, Thermo Scientific, USA) ในช่วงเลขคลื่น $4000 - 10000 \text{ cm}^{-1}$ (ความยาวคลื่น $1000 - 2500 \text{ nm}$) ที่ความละเอียด (resolution) 8 cm^{-1} จำนวนครั้งของการสแกนคือ 32 ครั้งต่อสเปกตรัม บันทึกค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยจากการสแกนทั้ง 32 ครั้ง ที่อุณหภูมิ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ในแต่ละซ้ำของการทดลอง สุ่มข้าวสารมา 10 ชุด ชุดละ 25 กรัมสำหรับการวัดค่านี้

3.2.2.3 การวิเคราะห์สมบัติของแป้งข้าวสาร

เตรียมตัวอย่างแป้งข้าวโดยบดตัวอย่างข้าวสารด้วยเครื่อง waring blender (Waring Commercial, 8010BU, USA) โดยใช้ความเร็วสูงในการบดตัวอย่างและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh จากนั้นจึงนำตัวอย่างแป้งที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ดังนี้

- วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ ใย และคาร์โบไฮเดรต ตามวิธีมาตรฐาน (AOAC, 2005) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข. 1 – ข.6) ทั้งนี้ได้ส่งตัวอย่างวิเคราะห์ปริมาณไขมันและเส้นใยหยาบที่สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว) วัดค่า 3 ซ้ำ ต่อ 1 ซ้ำของการทดลอง
- วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสด้วยวิธี amperometric titration โดยดัดแปลงจากวิธีของ Takeda และ Hizkuri (1987) และ Gibson และคณะ (1997) ส่งตัวอย่างวิเคราะห์ที่หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลังและแป้ง สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร วัดค่า 3 ซ้ำ ต่อ 1 ซ้ำของการทดลอง
- วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็นด้วยเครื่อง RVA (Newport Scientific Instrument & Engineer, RVA-4, Australia) ตามวิธีของ AACC (2000) หมายเลข 61-02.01 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.3) วัดค่า 2 ซ้ำ ต่อ 1 ซ้ำของการทดลอง
- วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลาคีโนเซชันและที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสารเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (Perkin-Elmer Co, Diamond, Norwalk, USA) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.4) วัดค่า 1 ซ้ำ ต่อ 1 ซ้ำของการทดลอง
- ศึกษาารูปแบบของโปรตีนสกัดจากข้าวโดยการแยกด้วยกระแสไฟฟ้าบนเจลพอลิอะคริลาไมด์ที่มี sodium dodecyl sulfate เป็นส่วนประกอบ (sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE) ศึกษาแบบ 1 มิติ โดยดัดแปลงจากวิธีของ Laemmli (1970) และ Iida และคณะ (1993) โดยใช้เครื่อง OmniPAGE electrophoresis (Clever Scientific Ltd, CVS10DSYS, UK) และ power supply (Major Science, MS300V, USA) ทดลองที่ 300 V และ 20 มิลลิแอมแปร์ต่อ 1 เจล โดยใช้เจล SDS-PAGE ที่มีความเข้มข้นของ separating gel และ stacking gel 10% และ 4% ตามลำดับ และใช้ Perfect Protein™ markers, 10-225 kDa (Navogen®, Merck Millipore, USA) เป็นโปรตีนมาตรฐานประมวลผลข้อมูลจากแถบโปรตีนที่แยกได้โดยใช้เครื่อง Gel documentation (Syngene, InGeniusL, UK) บันทึกภาพด้วยโปรแกรม GeneSnap และวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของแต่ละ

แถบโปรตีนด้วยโปรแกรม GeneTools (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.7) วัดค่า 2 ซ้ำ ต่อ 1 ซ้ำของการทดลอง

3.2.3 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวเปลือก ข้าวสาร และแป้งข้าวของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง

สุ่มตัวอย่างข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่งในช่วงเดือนมีนาคม – ตุลาคม พ.ศ. 2555 ที่ระยะเวลา 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 22, 26 และ 31 สัปดาห์ ครั้งละ 2 ถัง โดย 1 ถัง คือ 1 ซ้ำของการทดลอง และวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของข้าวเปลือก ข้าวสาร และแป้งข้าว ตามที่ระบุในข้อ 3.2.2.1 - 3.2.2.3 ยกเว้นการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีที่จะวิเคราะห์เฉพาะในตัวอย่างข้าวใหม่เท่านั้น การวัดสีข้าวเปลือกที่ผ่านการเก็บกระทำเช่นเดียวกับตัวอย่างข้าวใหม่ และวัดความชื้นของแป้งข้าวด้วยเครื่อง moisture analyzer (Mettler Toledo, HB43-S, Switzerland)

หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ตรวจวัดได้ระหว่างการเก็บรักษาด้วยวิธี Pearson correlation analysis ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (SPSS 22, IBM Corporation, USA)

3.2.4 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพข้าวระหว่างการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง

ทำนายความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ตรวจวัดได้ในข้อ 3.2.2 และ 3.2.3 กับระยะเวลาการเก็บรักษาโดยใช้ fractional conversion model (สมการที่ 3.1) (Tiwari และคณะ, 2009)

$$A_t = A_\infty + (A_0 - A_\infty) \times e^{-kt} \dots\dots\dots 3.1$$

โดยที่ A_t หมายถึงค่าที่ตรวจวัดที่ระยะเวลาการเก็บต่างๆ

A_0 หมายถึงค่าที่ตรวจวัดของข้าวใหม่

A_∞ หมายถึงค่าที่ตรวจวัดที่ระยะเวลาการเก็บที่ยาวนาน ($t \rightarrow \infty$)

k หมายถึงค่าคงที่อัตราของการเปลี่ยนแปลงค่าที่ตรวจวัด

t หมายถึงระยะเวลาการเก็บรักษาข้าว

3.2.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบ (factor analysis) ของค่าคุณภาพการหุงต้ม ค่าที่เกี่ยวข้องกับลักษณะเนื้อสัมผัส และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็น

นำข้อมูลค่าคุณภาพการหุงต้ม ค่าที่เกี่ยวข้องกับลักษณะเนื้อสัมผัสและการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็นมาจัดกลุ่มตัวแปรด้วยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal component analysis, PCA) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (SPSS 22, IBM Corporation, USA) เพื่อรวมตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันไว้ในกลุ่มของตัวแปรองค์ประกอบหลัก (PC) เดียวกัน จากนั้นจึงจำแนกกลุ่มตัวอย่างด้วยหลักการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวและระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวภายใต้ภาวะเร่ง

3.2.6 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าคุณภาพการหุงต้ม ค่าที่เกี่ยวข้องกับลักษณะเนื้อสัมผัส และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็นจาก NIR spectrum

คัดเลือกค่าที่ตรวจวัดจากค่าคุณภาพการหุงต้ม ค่าที่เกี่ยวข้องกับลักษณะเนื้อสัมผัส และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็น ซึ่งให้ค่าน้ำหนักองค์ประกอบ (factor loading) ที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากการวิเคราะห์ในข้อ 3.2.5 สำหรับนำไปใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพด้านต่างๆ ของข้าว และรูปแบบการดูดกลืนแสงจาก NIR spectrum ด้วยวิธี PLSR โดยใช้โปรแกรม The Unscrambler® X (The Unscrambler® X 10.3, CAMO Software, USA) โดยแบ่งกลุ่มข้อมูลตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่ม calibration และ validation ด้วยอัตราส่วน 3:1 และปรับแต่งข้อมูล NIR spectrum ของข้าวด้วยวิธี Savitzky Golay Derivative

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวใหม่

องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวสารใหม่ทั้ง 6 พันธุ์แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วย ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใยหยาบและคาร์โบไฮเดรต ปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ที่กล่าวไปข้างต้นในข้าวทุกพันธุ์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยองค์ประกอบที่มีมากที่สุดในการแบ่งข้าวซึ่งมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 86 โดยน้ำหนักแห้งคือคาร์โบไฮเดรต แต่ในแป้งข้าวแต่ละชนิดจะมีปริมาณแอมิโลสที่แตกต่างกัน ดังในตารางที่ 4.1 โดยที่ข้าวพันธุ์ KDML105, PTT1 และ RD45 จะมีปริมาณแอมิโลสอยู่ในช่วง 9-12% ในขณะที่ข้าวพันธุ์ RD47, CNT1 และ PSL2 มีปริมาณแอมิโลสมากกว่า 20% ในการทดลองนี้จึงจัดข้าว 3 สายพันธุ์แรกอยู่ในกลุ่มข้าวแอมิโลสต่ำ และข้าวอีก 3 สายพันธุ์อยู่ในกลุ่มข้าวแอมิโลสสูงตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวใหม่แต่ละพันธุ์

พันธุ์ข้าว	KDML105	PTT1	RD45	RD47	CNT1	PSL2
ความชื้น*	10.61 ± 0.93	11.19 ± 0.42	11.75 ± 0.06	11.73 ± 0.35	10.75 ± 0.04	11.17 ± 0.23
โปรตีน**	7.62 ± 0.20	7.40 ± 0.11	8.39 ± 0.10	9.24 ± 0.01	10.9 ± 0.33	8.08 ± 0.12
ไขมัน**	1.35 ± 0.94	2.10 ± 1.14	1.44 ± 0.62	1.72 ± 0.50	0.74 ± 0.02	1.09 ± 0.25
เถ้า**	0.39 ± 0.04	0.40 ± 0.04	0.44 ± 0.04	0.55 ± 0.18	0.87 ± 0.03	0.92 ± 0.04
เส้นใยหยาบ**	1.07 ± 0.03	0.96 ± 0.03	0.91 ± 0.01	0.88 ± 0.03	0.97 ± 0.03	0.84 ± 0.01
คาร์โบไฮเดรต**	89.58 ± 1.07	89.15 ± 1.02	88.84 ± 0.74	87.62 ± 0.64	86.53 ± 0.35	89.09 ± 0.35
แอมิโลส**	10.01 ± 0.59	9.32 ± 0.35	11.15 ± 0.12	24.27 ± 0.28	22.79 ± 0.47	24.83 ± 0.37

ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ

* รายงานค่าร้อยละฐานเปียก

** รายงานค่าร้อยละฐานแห้ง

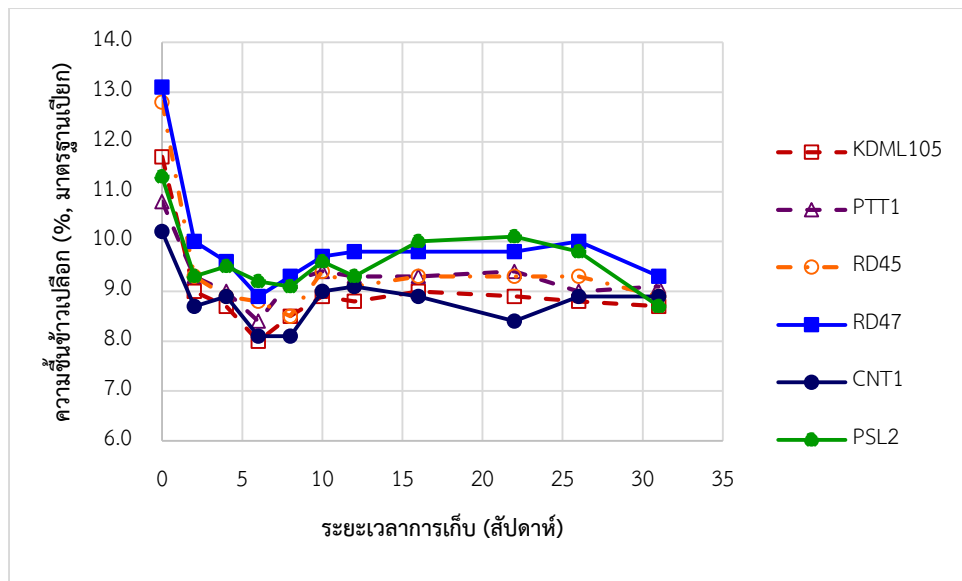
4.2 คุณภาพการสี

ความชื้นของข้าวเปลือกในระหว่างการเก็บภายใต้ภาวะเร่งแสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกทุกพันธุ์ต่ำกว่า 13% ค่าความชื้นลดลงอย่างมากในช่วง 2 สัปดาห์แรกของการเก็บรักษา และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหลังจากนั้น โดยความชื้นจะอยู่ในช่วง 8 - 10% สำหรับระดับการขัดสีซึ่งพิจารณาจากปริมาณรำที่ถูกขัดออกมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บ ยกเว้นพันธุ์ KDML105 ซึ่งปริมาณรำที่ถูกขัดออกมีปริมาณลดลงมากในช่วง 4 สัปดาห์แรกของการเก็บรักษา (ภาคผนวก ง รูปที่ ง.1) เมื่อพิจารณาปริมาณข้าวตัน (รูปที่ 4.2) พบว่าค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้นมากในช่วง 4 สัปดาห์แรกของการเก็บ จากนั้นจึงค่อนข้างคงที่ ซึ่งจะพบแนวโน้มดังกล่าวได้ชัดเจนในตัวอย่างข้าวกลุ่มเอมิโลสสูง เมื่อพิจารณาคุณภาพการสีของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง โดยอ้างอิงจากมาตรฐานสินค้าเกษตรเรื่อง ข้าว (มกษ. 4004-2555) (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2555) ซึ่งกำหนดว่า ข้าวเปลือกที่มีคุณภาพการสีในระดับดี ต้องได้ข้าวเต็มเมล็ดและข้าวตันไม่ต่ำกว่า 34% พบว่า ภายหลังจากการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง 4 สัปดาห์ ข้าวทุกสายพันธุ์ ยกเว้น PTT1 และ RD45 มีคุณภาพการสีในระดับดี

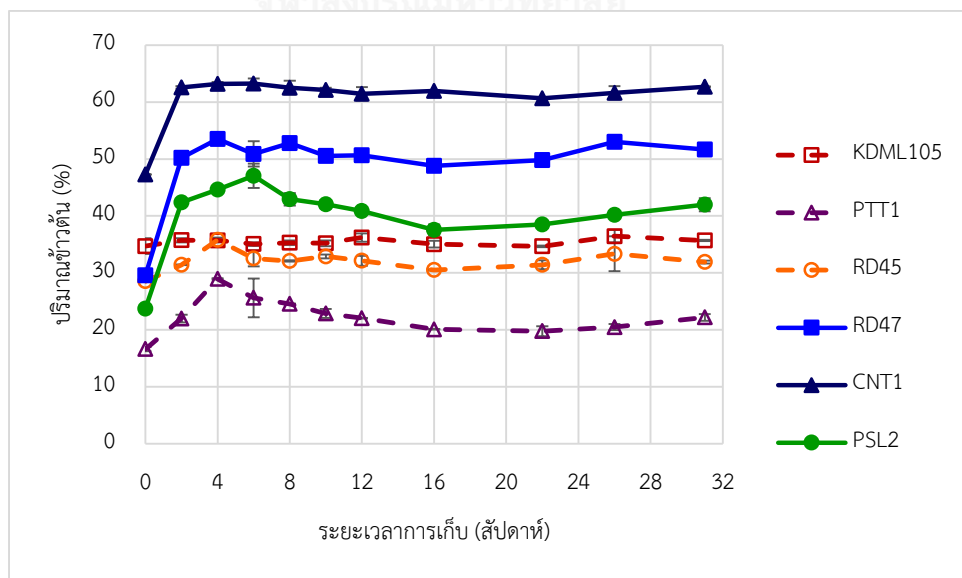
Kongkiattikajorn และ Phochanachai (2000) ศึกษาผลของอุณหภูมิการเก็บรักษาข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพ โดยเก็บข้าวสารในถุงพลาสติก polypropylene เป็นระยะเวลา 7 เดือน ที่อุณหภูมิ 25 และ 37 °C พบว่าปริมาณข้าวตันของข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิ 37 °C จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามเวลาการเก็บรักษา และมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการเก็บที่อุณหภูมิ 25 °C ที่เวลาการเก็บรักษาเท่ากัน การเปลี่ยนแปลงปริมาณข้าวตันระหว่างการเก็บอาจเกี่ยวกับการจัดเรียงตัวใหม่ของเม็ดสตาร์ชในเมล็ดข้าวสาร การที่เม็ดสตาร์ชมาจัดเรียงตัวกันดีขึ้นจึงทนต่อการขัดสีมากขึ้น (Juliano, 1985; Soponronnarit และคณะ, 2008) Villareal และคณะ (1976) รายงานว่า hardness index ของเมล็ดข้าวสารมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บข้าวไว้นาน 6 เดือน ทั้งข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิ 2 และ 29 °C โดยที่ข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิสูงกว่าจะมีค่าดังกล่าวสูงกว่า และค่า hardness index ของเมล็ดข้าวสารที่สูงขึ้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณข้าวตันที่เพิ่มขึ้นด้วย

นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของข้าวเปลือกและปริมาณข้าวตัน กล่าวคือ ในช่วง 2 สัปดาห์แรกของการเก็บข้าวภายใต้ภาวะเร่งซึ่งเป็นช่วงที่ความชื้นในข้าวเปลือกมีการเปลี่ยนแปลงมาก ปริมาณข้าวตันก็มีการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน โดยเฉพาะในข้าวกลุ่มเอมิโลสสูง แต่หลังจากนั้นเมื่อความชื้นของข้าวเปลือกมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจึงทำให้ได้ปริมาณข้าวตันที่ค่อนข้างคงที่ เนื่องจากความแกร่งของเมล็ดข้าวจะขึ้นกับความชื้นในข้าว สุวรรณษา ทองหยู และ ถวัลย์ศักดิ์ เผ่าสังข์ (2557) ศึกษาผลของปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกต่อความแกร่งของเมล็ดข้าวสาร โดยศึกษาที่ความชื้น 4 ระดับ (11% 14% 17% และ 20% มาตรฐานเปียก) ในข้าวไทย 4

พันธุ์ (พิษณุโลก 2 กข 31 กข 47 และ แจ็กเชย) พบว่าปริมาณความชื้นมีผลต่อความแกร่งของเมล็ดข้าว ความชื้นที่ต่ำลงมีผลให้เมล็ดข้าวมีความแกร่งมากขึ้น มีผลทำให้ได้ปริมาณข้าวตันเพิ่มมากขึ้น ข้าวหักน้อยลง ที่ระดับความชื้น 11% ให้ปริมาณข้าวตันสูงสุดในข้าวทุกพันธุ์ และเมื่อเปรียบเทียบตามกลุ่มแอมิโลสพบว่าปริมาณข้าวตันของกลุ่มข้าวแอมิโลสสูงจะมีปริมาณมากกว่ากลุ่มข้าวแอมิโลสต่ำตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา



รูปที่ 4.1 ความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ

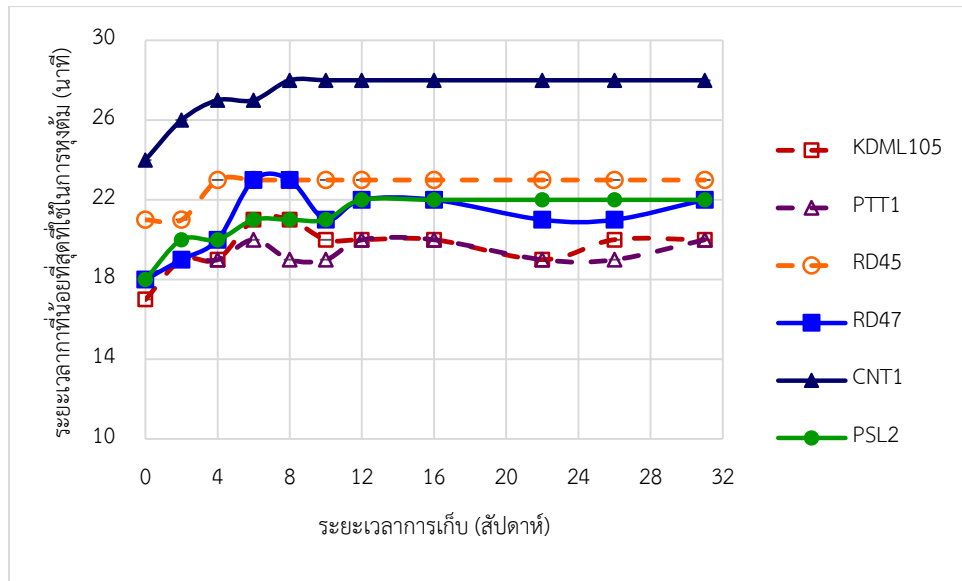


รูปที่ 4.2 ปริมาณข้าวตันระหว่างการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ

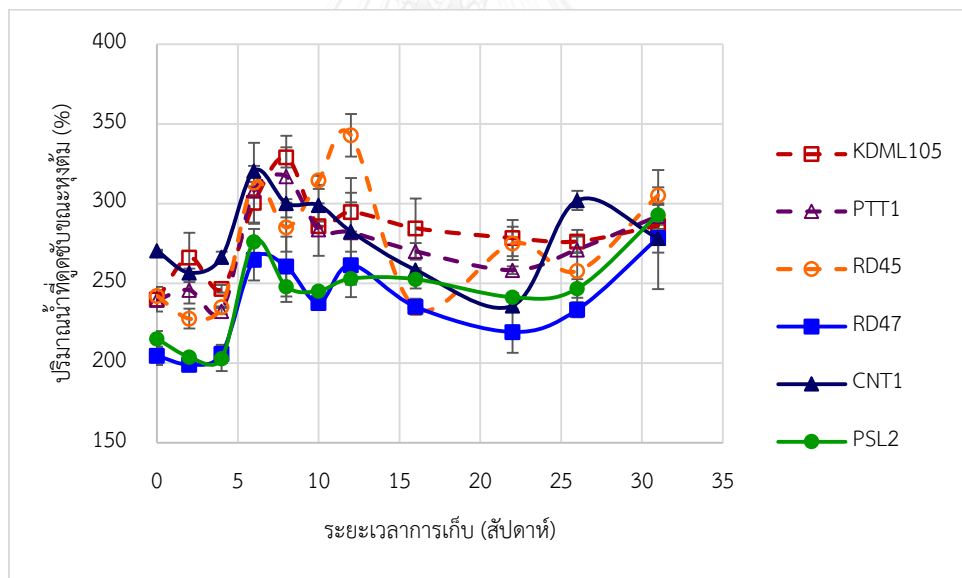
4.3 คุณภาพการหุงต้ม

ค่าที่บ่งถึงคุณภาพการหุงต้มของข้าวประกอบด้วยระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการหุงต้ม ปริมาณน้ำที่ดูดซับขณะหุงต้ม ปริมาณของแข็งที่สูญเสียขณะหุงต้ม การขยายปริมาตรของข้าวสุก และอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของข้าวสุก แสดงในรูปที่ 4.3 – 4.7 พบว่าระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการหุงต้ม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 8 สัปดาห์แรกของการเก็บจากนั้นจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่ไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณน้ำที่ดูดซับขณะหุงต้มอย่างชัดเจนระหว่างการเก็บรักษา ค่าปริมาณของแข็งที่สูญเสียขณะหุงต้ม การขยายปริมาตรของข้าวสุก และอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของข้าวสุกของข้าวทุกพันธุ์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในช่วง 6 สัปดาห์แรกของการเก็บ จากนั้นจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ ส่วนการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุกค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามเวลาการเก็บ นอกจากนี้ยังพบว่าระยะที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการหุงต้มและการขยายปริมาตรของข้าวสุกของข้าวกลุ่มแอมิโลสสูง จะมีค่าสูงกว่าในกลุ่มข้าวแอมิโลสต่ำ อาจเนื่องจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสมากกว่า สตาร์ชจะเกิดเจลลิตินในเซชันได้ยากกว่า ทำให้ใช้เวลาหุงต้มนานกว่า และสามารถดูดซับน้ำเข้าไปมากกว่า ทำให้เมล็ดข้าวเกิดการขยายตัวมากขึ้นตามไปด้วย (Zhou และคณะ, 2007) รูปที่ 4.8 แสดงค่าการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุกพบว่า การเก็บข้าวที่นานขึ้นมีผลทำให้ข้าวสุกมีค่าดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น การที่เมล็ดข้าวมีการขยายตัวมากขึ้นอาจเป็นผลเนื่องจากความสามารถในการดูดซับน้ำที่เพิ่มขึ้นของเมล็ดข้าวระหว่างการให้ความร้อน (Sodhi และคณะ, 2003)

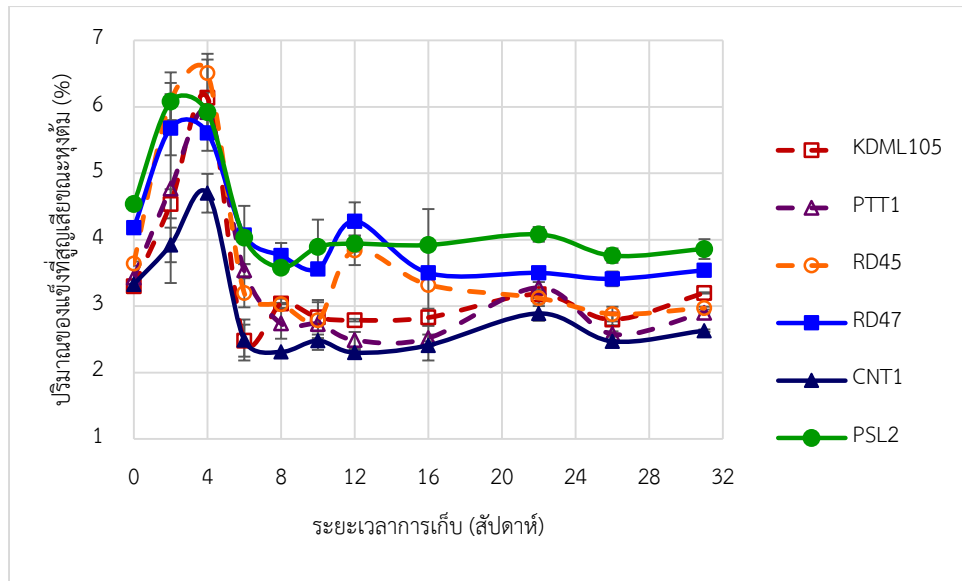
เมื่อเปรียบเทียบลักษณะปรากฏและลักษณะทางเนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่ได้จากข้าวกลุ่มแอมิโลสต่ำและสูง พบว่าข้าวแอมิโลสต่ำเกาะติดกันเป็นกลุ่มมากกว่า แต่ข้าวแอมิโลสสูงมีลักษณะเป็นเมล็ดร่วน แยกออกจากกันได้ง่าย เมื่อทดสอบด้วยกระจกสไลด์เพื่อพิจารณาความสุกของข้าว ซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งในการหาระยะเวลาการหุงต้มที่น้อยที่สุด พบว่าข้าวแอมิโลสต่ำใช้แรงในการกดน้อยกว่า และให้เนื้อเมล็ดข้าวที่มีความชุ่มน้อยกว่า แต่มีความเหนียวติดกระจกสไลด์มากกว่าข้าวแอมิโลสสูง หุงสุก เมื่อระยะเวลาการเก็บเพิ่มขึ้น ข้าวแอมิโลสสูงหุงสุกมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน กล่าวคือ ต้องออกแรงกดเมล็ดข้าวมากขึ้น และมีความเหนียวติดกระจกสไลด์น้อยลง แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวที่ชัดเจนในข้าวแอมิโลสต่ำหุงสุกที่ผ่านการเก็บรักษา (ภาคผนวก ง รูปที่ ง.2)



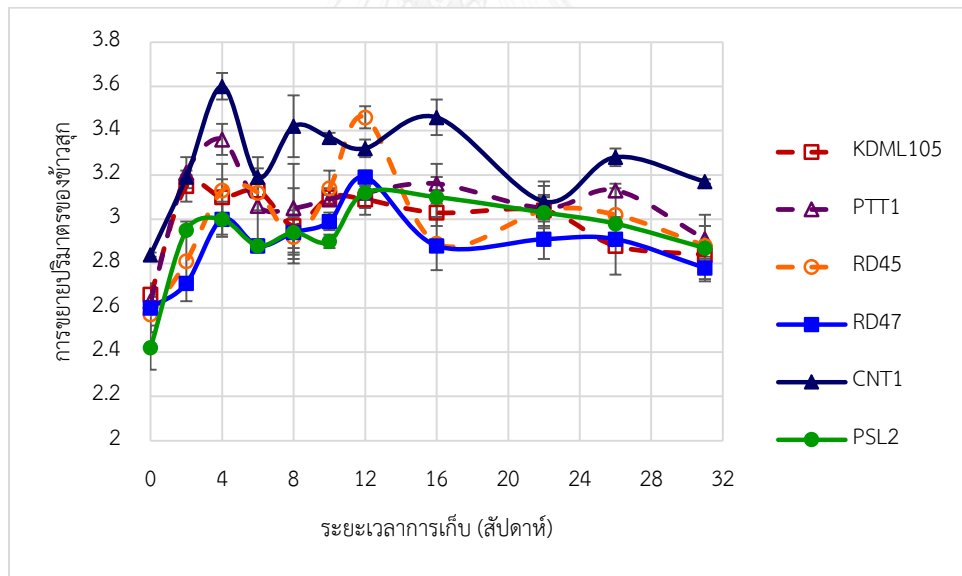
รูปที่ 4.3 ระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการหุงต้มของข้าวที่เก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



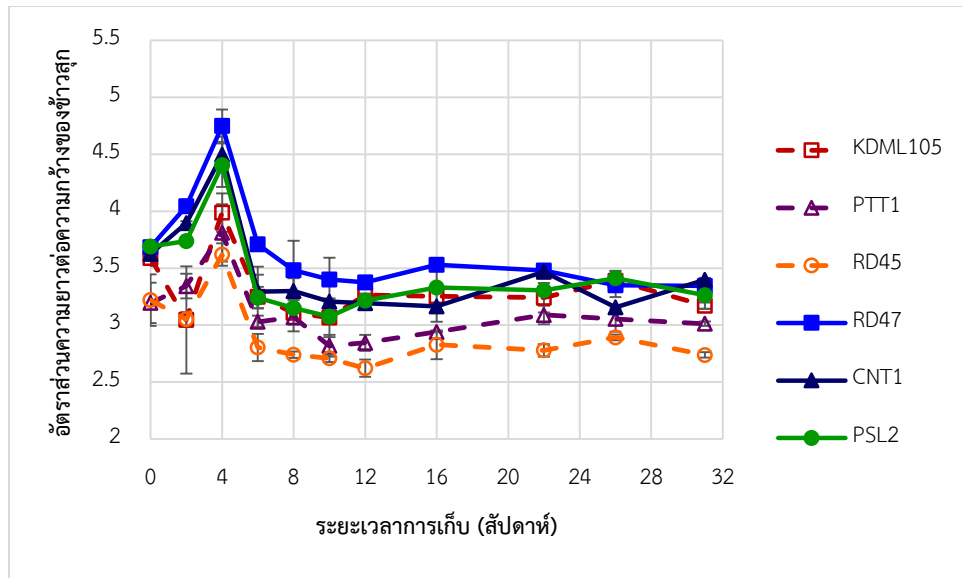
รูปที่ 4.4 ปริมาณน้ำที่ดูดซับขณะหุงต้มของข้าวที่เก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



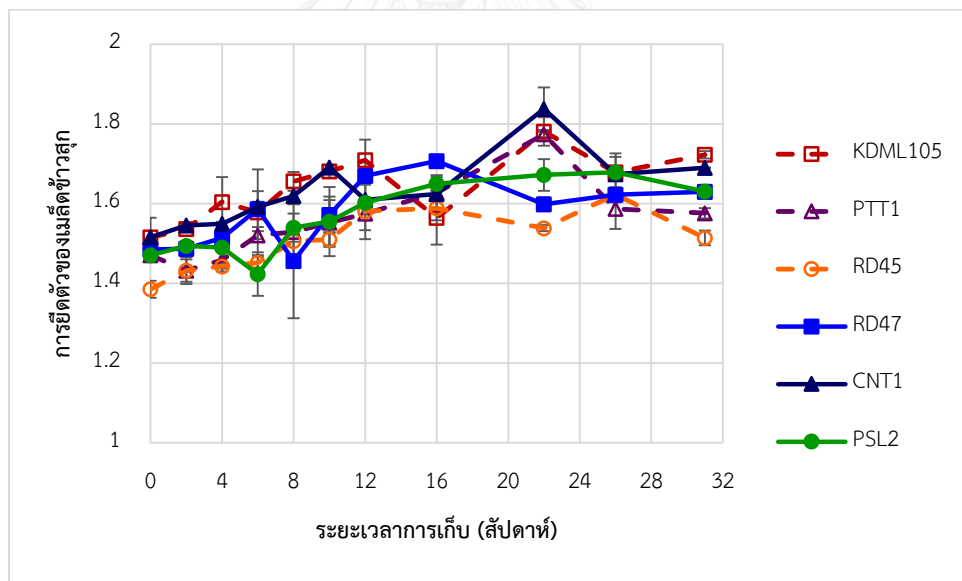
รูปที่ 4.5 ปริมาณของแข็งที่สูญเสียขณะหุงต้มของข้าวที่เก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



รูปที่ 4.6 การขยายปริมาตรของข้าวสุกของข้าวที่เก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



รูปที่ 4.7 อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของข้าวสุกของข้าวที่เก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



รูปที่ 4.8 การยึดตัวของเมล็ดข้าวสุกของข้าวที่เก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ระบุคุณภาพการหุงต้มของกลุ่มข้าวแอมิโลสต่ำ และกลุ่มข้าวแอมิโลสสูง พบค่า Pearson correlation (r) ที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) ระหว่างคู่ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าข้าวที่ใช้ระยะเวลาการหุงต้มนาน ปริมาณน้ำที่ดูดซับขณะหุงต้ม การขยายปริมาตรของข้าวสุก และการขยายตัวของเมล็ดข้าวจะมีค่ามากขึ้นด้วย ในขณะที่ปริมาณของแข็งที่สูญเสียขณะหุงต้มจะมีปริมาณลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่มีรายงานว่าเมื่อข้าวใหม่เปลี่ยนเป็นข้าวเก่า การหุงต้มจะต้องให้ระยะเวลานานขึ้น ปริมาณน้ำที่ดูดซับและการขยายปริมาตรของข้าวสุกจะเพิ่มขึ้นแต่ปริมาณของแข็งที่สูญเสียขณะหุงต้มจะลดลง (Bhattacharya, 2011; Sodhi และคณะ, 2003; Zhou และคณะ, 2002) ทั้งนี้แนวโน้มดังกล่าวจะเห็นได้อย่างชัดเจนกว่าในชุดข้อมูลจากข้าวกลุ่มแอมิโลสสูง เนื่องจากมีค่า r ที่สูงกว่า

ตารางที่ 4.2 ค่า Pearson correlation (r) ของคุณภาพการหุงต้มของกลุ่มข้าวแอมิโลสต่ำที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง

	MCT	WU	SL	VE	LB	E
MCT	1.000	0.290	-0.030	0.145	-0.543*	-0.191
WU		1.000	-0.554*	0.346	-0.530*	0.264
SL			1.000	0.147	0.583*	-0.422
VE				1.000	-0.063	0.124
LB					1.000	-0.019
E						1.000

* มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

MCT หมายถึง minimum cooking time, WU หมายถึง water uptake, SL หมายถึง solid loss, VE หมายถึง volume expansion, LB หมายถึง length breadth ratio, E หมายถึง elongation ratio

ตารางที่ 4.3 ค่า Pearson correlation (r) ของคุณภาพการหุงต้มของกลุ่มข้าวแอมิโลสสูงที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง

	MCT	WU	SL	VE	LB	E
MCT	1.000	0.729*	-0.734*	0.818*	-0.264	0.537*
WU		1.000	-0.737*	0.542*	-0.527*	0.334
SL			1.000	-0.434	0.712*	-0.560*
VE				1.000	-0.081	0.404
LB					1.000	-0.402
E						1.000

* มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

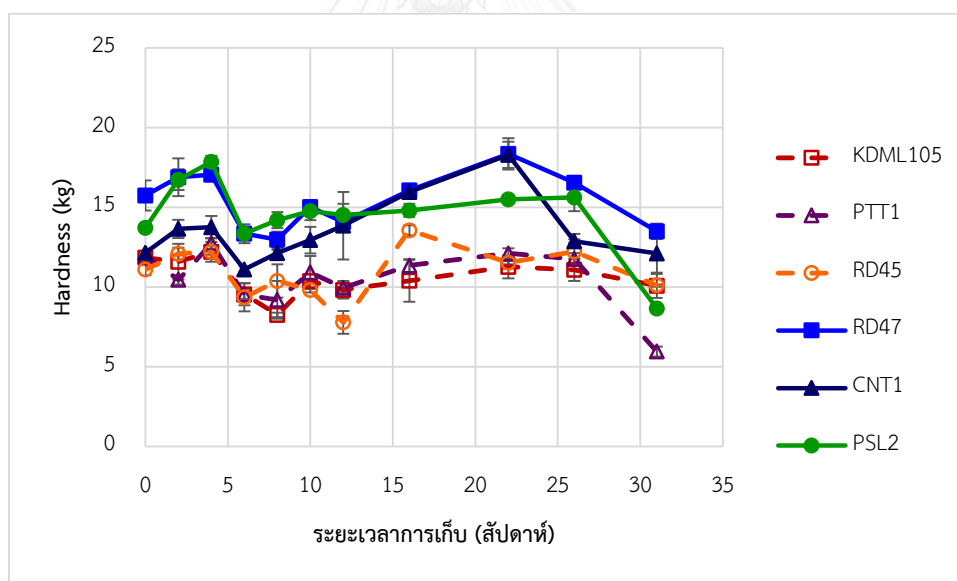
MCT หมายถึง minimum cooking time, WU หมายถึง water uptake, SL หมายถึง solid loss, VE หมายถึง volume expansion, LB หมายถึง length breadth ratio, E หมายถึง elongation ratio

4.4 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก

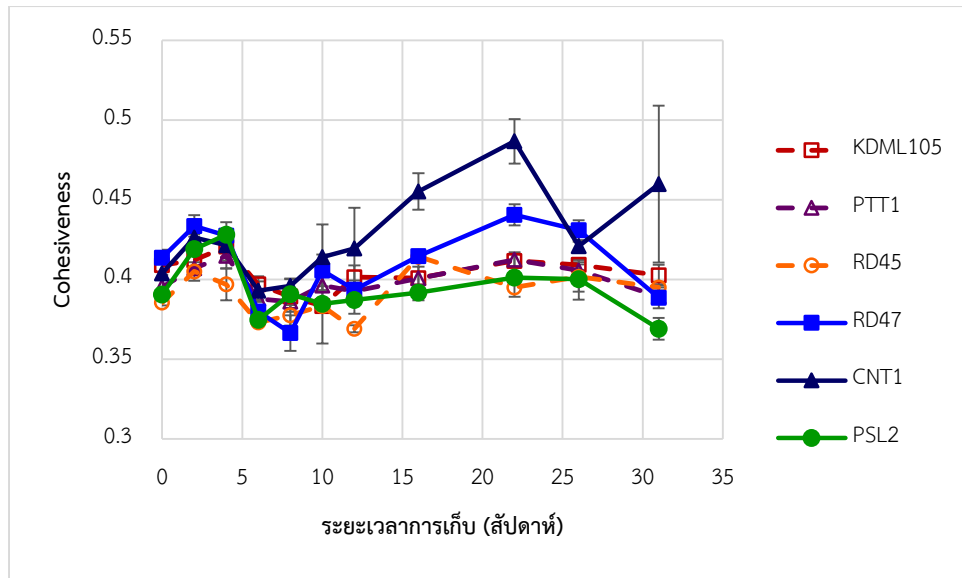
ค่าลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่วิเคราะห์ด้วยวิธี texture profile analysis แสดงในรูปแบบที่ 4.9 – 4.15 ค่า hardness, cohesiveness, gumminess, chewiness และ resilience มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจนระหว่างการเก็บในข้าวทุกพันธุ์ แต่ค่า adhesiveness ของข้าวทุกพันธุ์จะมีแนวโน้มลดลงระหว่างการเก็บ ส่วนค่า springiness ของข้าวแอมิโลสสูงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นภายหลังจากเก็บข้าวนาน 6 สัปดาห์ แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนของค่าดังกล่าวในข้าวแอมิโลสต่ำ การที่ค่า hardness ของข้าวสุกในงานวิจัยนี้มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจนซึ่งแตกต่างกับในงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่รายงานว่าในระหว่างการเก็บรักษาข้าว ค่า hardness มีค่าเพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บ (Pisithkul และคณะ, 2010; Tulyathan และ Leeharatanaluk, 2007) อาจเป็นผลเนื่องมาจากวิธีการเตรียมตัวอย่างข้าวสุกที่แตกต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างข้าวสุกเพื่อวัดลักษณะเนื้อสัมผัสโดยใช้ระยะเวลาการให้ความร้อนและปริมาณข้าวต่อน้ำจากข้อมูลระยะเวลาการหุงต้มที่เหมาะสมและปริมาณน้ำที่ดูดซับขณะหุงต้มที่เวลาการเก็บรักษาต่างๆ ตามลำดับ (รูปที่ 4.3 และ 4.4) แต่ในงานวิจัยอื่นๆ จะนิยมใช้อัตราส่วนของข้าวต่อน้ำ และระยะเวลาการให้ความร้อนที่คงที่

ตลอดการทดลอง (ไม่ขึ้นกับเวลาการเก็บรักษาข้าว) ในขณะที่แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า adhesiveness สอดคล้องกับงานวิจัยของ Park และคณะ (2012) และ Tulyathan และ Leeharatanaluk (2007) ซึ่งการลดลงของ adhesiveness ในข้าวเก่าอาจเกิดจากความสามารถในการจับกันของโปรตีน (oryzenin) และ starch ที่ลดลง มีผลทำให้ข้าวเหนียวติดกันน้อยลง (Chrastil, 1990; Ramesh และคณะ, 2000; Tulyathan และ Leeharatanaluk, 2007)

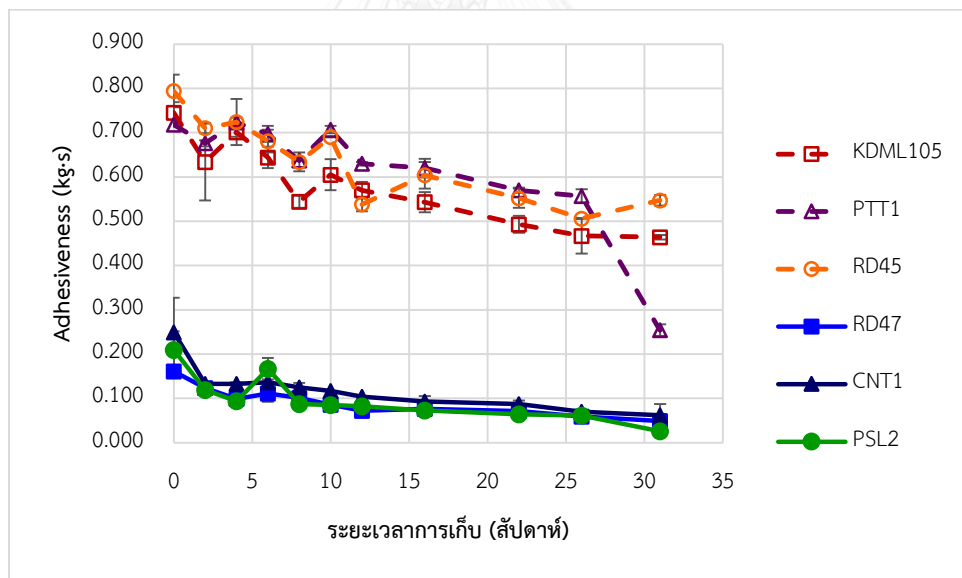
เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวแอมิโลสต่ำและแอมิโลสสูง พบว่า ข้าวแอมิโลสสูงจะมีค่า hardness ของข้าวสุกสูงกว่าข้าวแอมิโลสต่ำ แต่จะมีค่า adhesiveness ต่ำกว่า ซึ่งลักษณะเนื้อสัมผัสดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับปริมาณแอมิโลส กล่าวคือค่า hardness และปริมาณแอมิโลสจะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวก แต่ค่า adhesiveness จะมีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับปริมาณแอมิโลส (Ramesh และคณะ, 2000; Zhou และคณะ, 2002) ทั้งนี้ค่า hardness ของข้าวสุกอาจเกี่ยวข้องกับการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชในเมล็ดข้าว กล่าวคือสตาร์ชที่มีแอมิโลสสูงกว่า จะเกิดรีโทรเกรเดชันได้เร็วกว่าและดีกว่าสตาร์ชที่มีแอมิโลสต่ำ (Ma และ Sun, 2009)



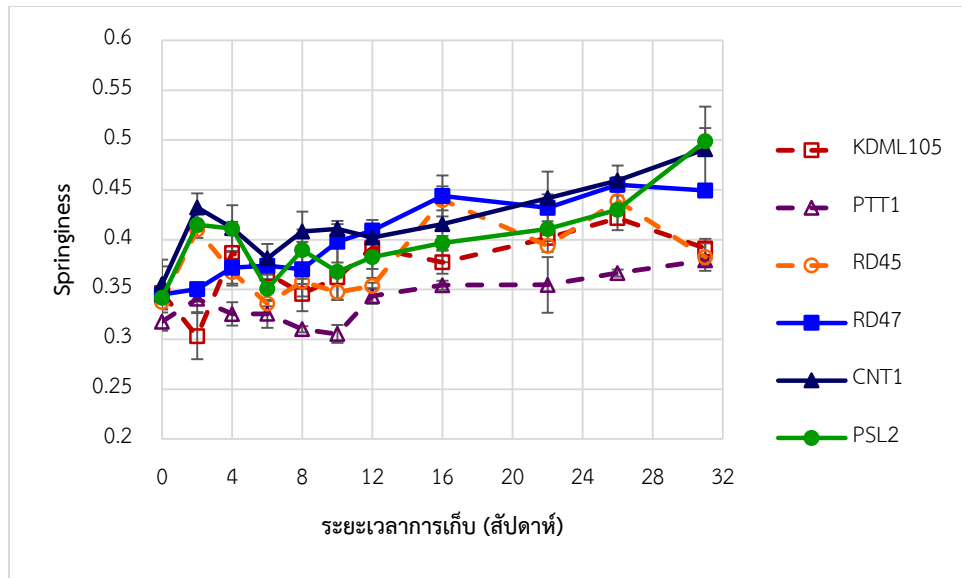
รูปที่ 4.9 ค่า hardness ของข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



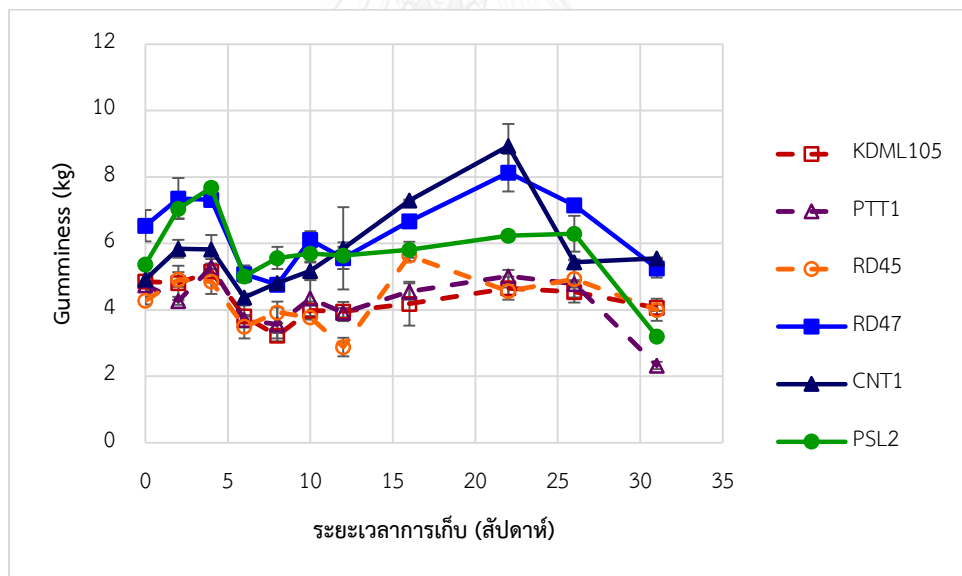
รูปที่ 4.10 ค่า cohesiveness ของข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



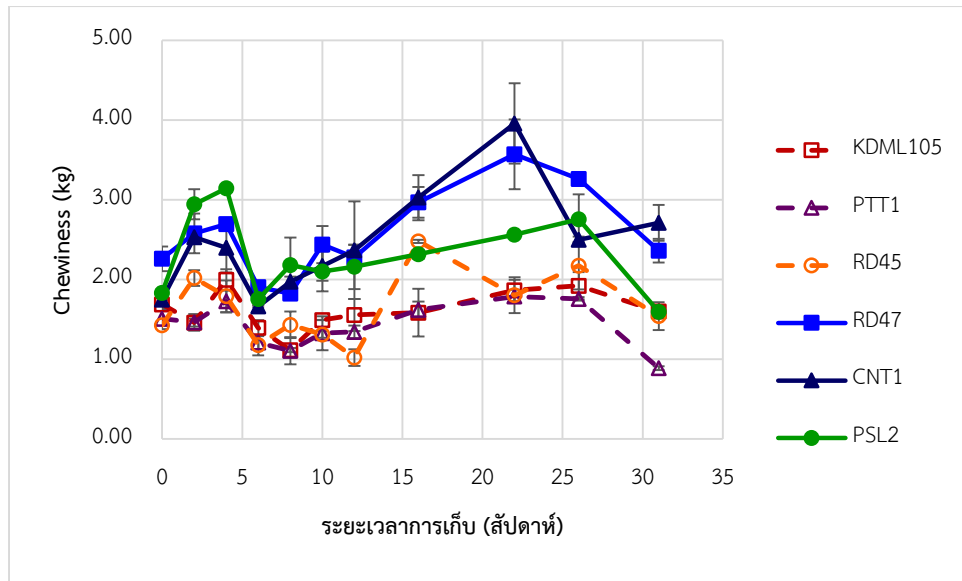
รูปที่ 4.11 ค่า adhesiveness ของข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



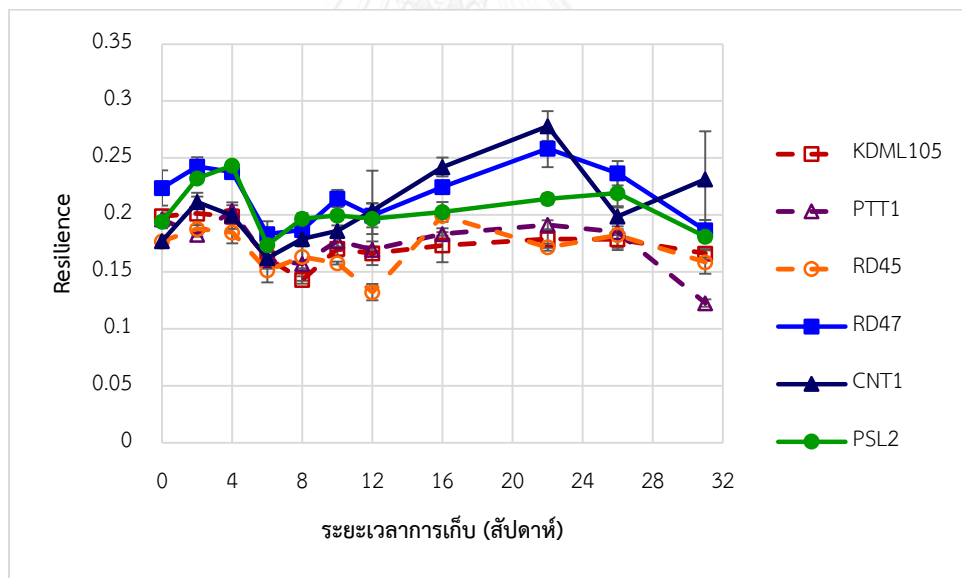
รูปที่ 4.12 ค่า springiness ของข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



รูปที่ 4.13 ค่า gumminess ของข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



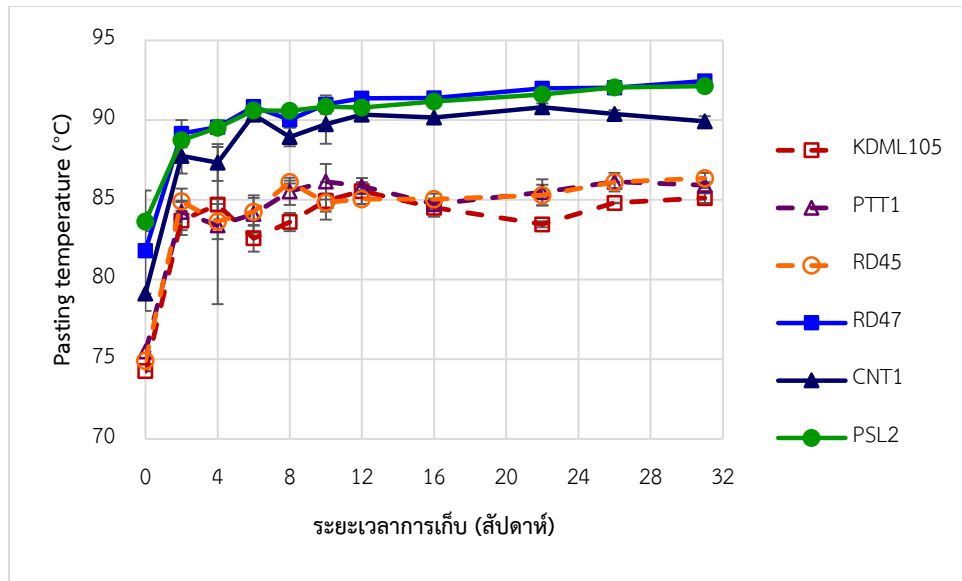
รูปที่ 4.14 ค่า chewiness ของข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



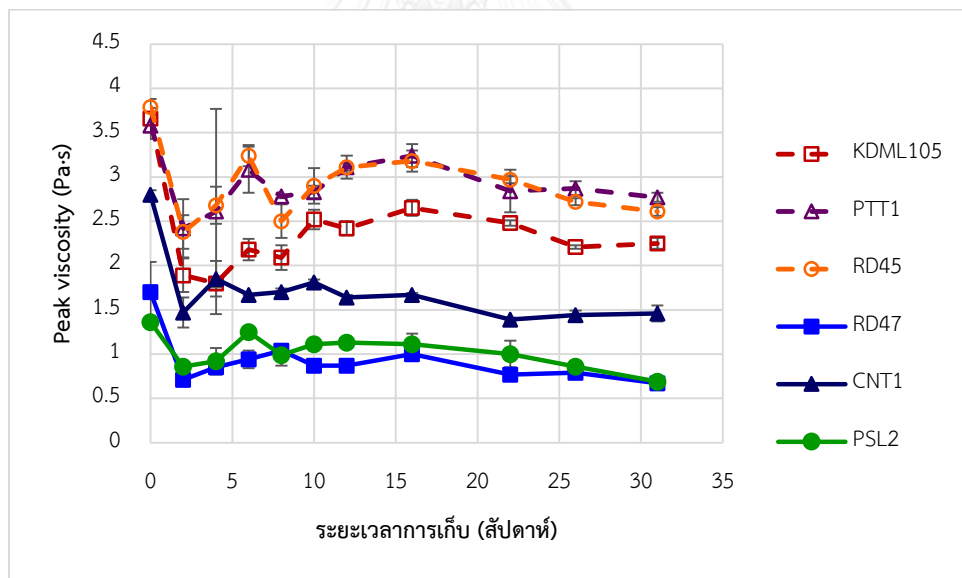
รูปที่ 4.15 ค่า resilience ของข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ

4.5 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็น

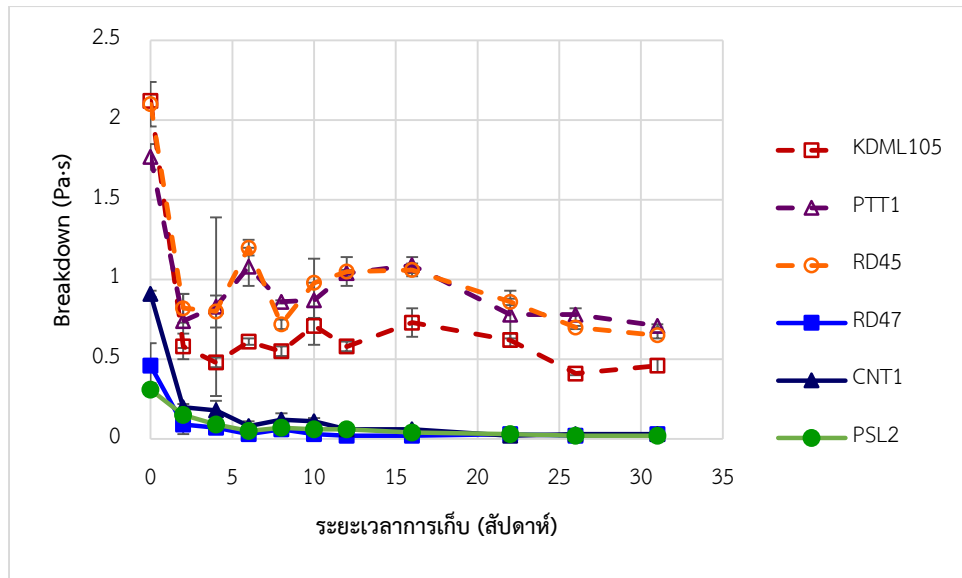
การเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็นของแป้งข้าวแสดงในรูปที่ 4.16 – 4.19 พบว่า ภายใน 2 สัปดาห์แรกของการเก็บข้าว ตัวอย่างแป้งข้าวมีค่า pasting temperature เพิ่มขึ้น แต่มีค่า peak viscosity และ breakdown (ผลต่างของค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด) ลดลง จากนั้นค่าเหล่านี้จึงค่อนข้างคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhou และคณะ (2003) ซึ่งศึกษาการเก็บข้าวสาร 3 พันธุ์ที่อุณหภูมิ 4 และ 37 °C เป็นระยะเวลา 16 เดือน การเปลี่ยนแปลงของค่าทั้ง 3 ดังกล่าวนั้น อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างโปรตีน กล่าวคือออโรซิโนเกิดการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ (Chrastil, 1990; Hamaker และ Griffin, 1993; Tananuwong และ Malila, 2011a) การเปลี่ยนแปลงของโปรตีนอาจขัดขวางการพองตัวของเม็ดแป้ง จึงทำให้ค่า pasting temperature เพิ่มขึ้นแต่ค่า peak viscosity และ breakdown มีค่าลดลงระหว่างการเก็บ ส่วนค่า setback (ผลต่างของค่าความหนืดสุดท้ายและความหนืดต่ำสุด) ของตัวอย่างข้าวแอมิโลสต่ำ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 12 สัปดาห์แรกของการเก็บรักษา จากนั้นจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่ในตัวอย่างข้าวแอมิโลสสูงจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ setback ที่ไม่ชัดเจนในช่วง 10 สัปดาห์แรกของการเก็บแต่ค่าดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงหลังจากนั้น ค่า setback ที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บนานขึ้นอาจเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโปรตีน กล่าวคือความหนืดของแป้งเปียกจะขึ้นอยู่กับ protein-rich domains และ starch-rich domains ในส่วนแรกเมื่อโปรตีนมีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น และในส่วนที่สองเมื่อโปรตีนและแป้งเกิดอันตรกิริยากันน้อยลง แอมิโลสและแอมิโลเพกทินจึงมีโอกาที่จะมาจัดเรียงตัวกันเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบได้มากขึ้น (Tananuwong และ Malila, 2011a) เมื่อเปรียบเทียบค่า pasting temperature, peak viscosity และ breakdown ของข้าวทั้ง 2 กลุ่ม จะพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่ pasting temperature ตัวอย่างข้าวแอมิโลสสูงจะมีค่าสูงกว่าในข้าวกลุ่มแอมิโลสต่ำ แต่ค่า peak viscosity และ breakdown จะต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับ Park และคณะ (2007) ที่รายงานว่าค่า pasting temperature และ peak viscosity มีความสัมพันธ์กับปริมาณแอมิโลส โดย pasting temperature และปริมาณแอมิโลสมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผันตรง แต่ peak viscosity จะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับปริมาณแอมิโลส



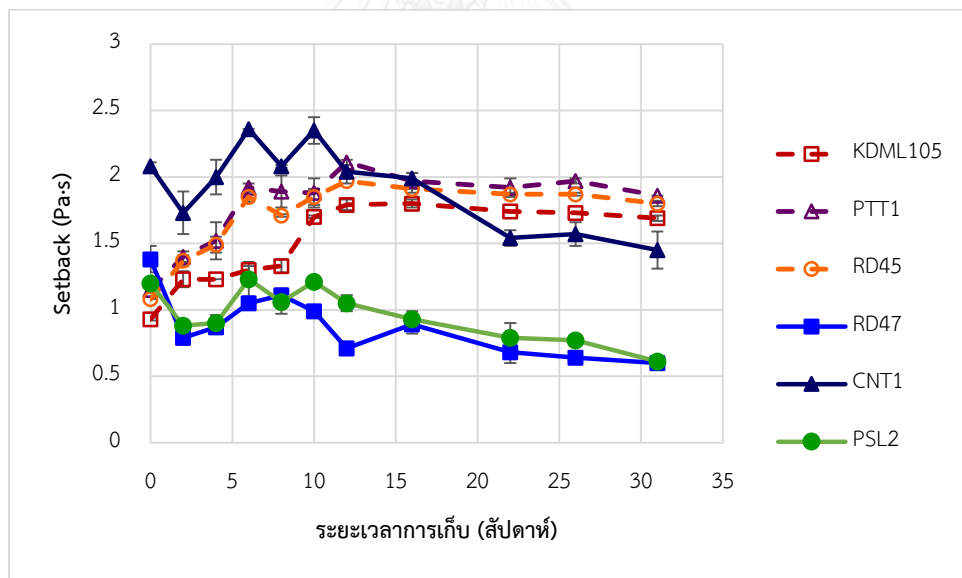
รูปที่ 4.16 ค่า pasting temperature ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



รูปที่ 4.17 ค่า peak viscosity ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



รูปที่ 4.18 ค่า breakdown (ค่าผลต่างของค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด) ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



รูปที่ 4.19 ค่า setback (ค่าผลต่างของค่าความหนืดสุดท้ายและความหนืดต่ำสุด) ของตัวอย่างแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า r ของค่าที่ตรวจวัดจากเครื่อง RVA ประกอบด้วยค่า pasting temperature, peak viscosity, และ breakdown พบว่าค่าที่ตรวจวัดได้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.01$) ทั้งในกลุ่มข้าวแอมิโลสต่ำและสูง โดยค่า pasting temperature แปรผกผันกับค่า peak viscosity และ breakdown ในขณะที่ค่า peak viscosity และ breakdown จะแปรผันตรงตามกัน

ตารางที่ 4.4 ค่า Pearson correlation (r) ของค่าพารามิเตอร์จากเครื่อง Rapid Visco-Analyzer ของแป้งข้าวแอมิโลสต่ำและสูงที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง

	ข้าวแอมิโลสต่ำ			ข้าวแอมิโลสสูง		
	PT	PV	BD	PT	PV	BD
PT	1	-0.525*	-0.823*	1	-0.704*	-0.941*
PV		1	0.882*		1	0.715*
BD			1			1

* มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

PT หมายถึง pasting temperature, PV หมายถึง peak viscosity, BD หมายถึง breakdown

ตารางที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ตรวจวัดได้จากเครื่องวัดเนื้อสัมผัสและ RVA สำหรับข้าวแอมิโลสสูง พบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่า adhesiveness กับค่า pasting temperature peak viscosity และ breakdown ($P < 0.01$) แต่สำหรับข้าวแอมิโลสต่ำ พบว่าค่า adhesiveness มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่า pasting temperature และ breakdown เท่านั้น ($P < 0.01$)

ตารางที่ 4.5 ค่า Pearson correlation (r) ของค่า adhesiveness ของข้าวสุกกับค่าพารามิเตอร์จากเครื่อง Rapid Visco-Analyzer ของแป้งข้าวแอมิโลสต่ำและสูงที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง

	PT	PV	BD
Adhesiveness			
ข้าวแอมิโลสต่ำ	-0.491*	0.296	0.536*
ข้าวแอมิโลสสูง	-0.865*	0.686*	0.812*

* มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

PT หมายถึง pasting temperature, PV หมายถึง peak viscosity, BD หมายถึง breakdown

4.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพข้าวตามเวลาการเก็บรักษา

เมื่อพิจารณาข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ ตามเวลาการเก็บรักษา (หัวข้อ 4.3 – 4.5) พบว่ามีบางค่าที่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนตามเวลา และมีรูปแบบเฉพาะตัว คือมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในช่วงแรกของการเก็บรักษา จากนั้นจึงเปลี่ยนแปลงช้าลงจนเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งเวลาการเก็บยาวนาน ($t \rightarrow \infty$) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการทำนายการเปลี่ยนแปลงค่าตามแนวโน้มดังกล่าวคือ fractional conversion model (สมการที่ 3.1) (Tiwari และคณะ, 2009) และพบว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงค่า adhesiveness และ pasting temperature ตามเวลาการเก็บได้ดี ค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองดังกล่าวแสดงในภาคผนวก ง รูปที่ ง.3 – ง.4 ค่าพารามิเตอร์ (A_0 , A_∞ , และ k) และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.6 - 4.7 ซึ่งพบว่าค่า k และ A_∞ ของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในข้าวกลุ่มแอมิโลสต่ำและสูงมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน จากค่า k ที่ได้นี้อาจสรุปได้ว่าปริมาณแอมิโลสมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงค่า adhesiveness และ pasting temperature และค่า A_∞ ที่แตกต่างกันในข้าวแอมิโลสต่ำและแอมิโลสสูง แสดงถึงผลของปริมาณแอมิโลสต่อสมบัติด้านต่างๆ ของข้าว เช่น ข้าวแอมิโลสสูงที่เก็บเป็นเวลานานที่ภาวะเร่งนี้ จะมีค่า adhesiveness น้อยกว่าแต่มีค่า pasting temperature สูงกว่าข้าวแอมิโลสต่ำที่เก็บเป็นเวลานาน

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ (A_0 , A_∞ , และ k) และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของการใช้ fractional conversion model ในการทำนายค่า adhesiveness ของข้าวพันธุ์ต่างๆ ตามเวลาการเก็บรักษา

	พันธุ์ข้าว	A_0 (kg*s)	A_∞ (kg*s)	k (สัปดาห์ ⁻¹)	R^2
Adhesiveness (kg*s)	KDML105	0.723	0.413	0.0607	0.8541
	PTT1	0.759	~0*	0.0177	0.6010
	RD45	0.784	0.504	0.0824	0.8153
	RD47	0.152	0.056	0.1191	0.9033
	CNT1	0.224	0.082	0.2033	0.8009
	PSL2	0.182	0.045	0.1157	0.6652

* A_∞ มีค่าน้อยมาก

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ (A_0 , A_∞ , และ k) และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของการใช้ fractional conversion model ในการทำนายค่า pasting temperature ของข้าวพันธุ์ต่างๆ ตามเวลาการเก็บรักษา

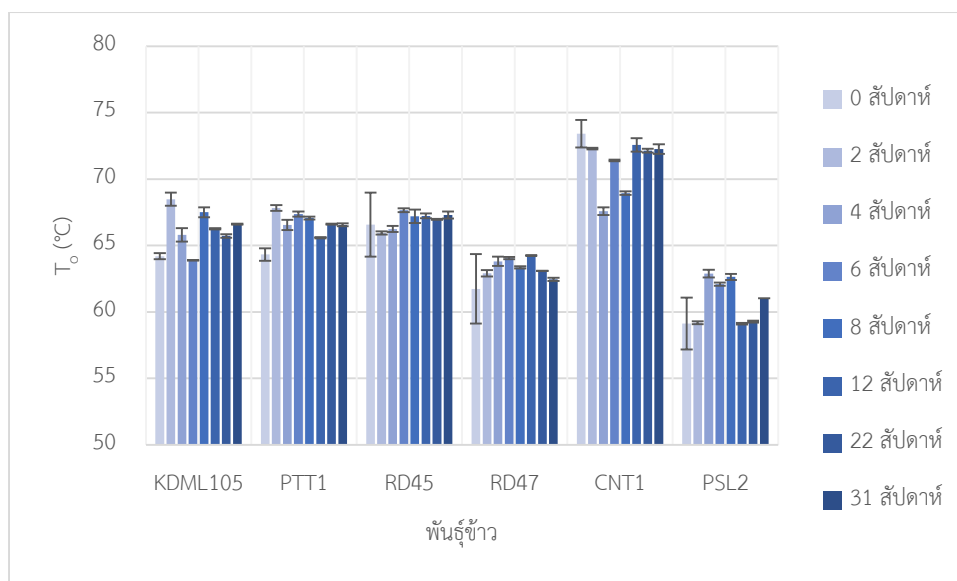
	พันธุ์ข้าว	A_0 (°C)	A_∞ (°C)	k (สัปดาห์ ⁻¹)	R^2
Pasting temperature (°C)	KDML105	74.26	84.40	1.3798	0.9096
	PTT1	75.55	85.40	0.8318	0.9094
	RD45	74.91	85.20	1.5777	0.9208
	RD47	81.97	91.43	0.5541	0.9276
	CNT1	79.27	90.02	0.5999	0.9308
	PSL2	83.83	91.39	0.4049	0.9449

ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพข้าวส่วนใหญ่เกิดขึ้นมากในช่วง 2 – 4 สัปดาห์แรกของการเก็บรักษา ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นของข้าวระหว่างการเก็บ (รูปที่ 4.1) จากงานวิจัยที่มีผู้ศึกษามาก่อนหน้านี้พบว่าความชื้นเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของข้าวในระหว่างการเก็บ โดยความชื้นที่สูงกว่ามีผลทำให้ข้าวเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพมากกว่า (Pearce และคณะ, 2001) เมื่อความชื้นภายในข้าวลดลงเหลือประมาณ 9% และมีค่าค่อนข้างคงที่ ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 6 ของการเก็บรักษาข้าว ค่าที่ตรวจวัดข้างต้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยด้วย

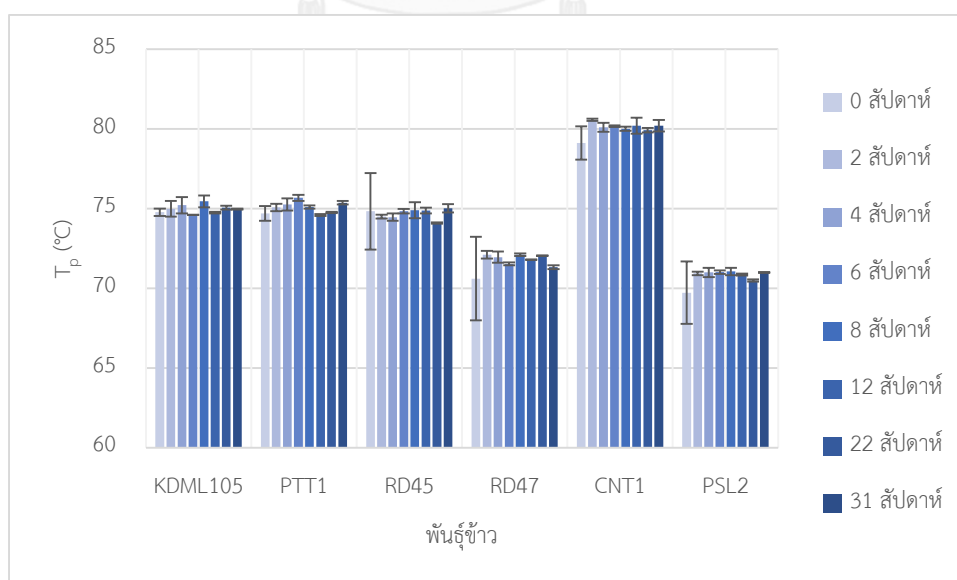
4.7 สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลลาติไนเซชันและสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน

ค่าอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้งข้าวแสดงในรูปที่ 4.20 – 4.23 ตัวอย่าง DSC thermogram ของตัวอย่างข้าวแต่ละสายพันธุ์ แสดงดังภาคผนวก ง รูปที่ ง.5 – ง.6 ระหว่างการเก็บรักษาข้าวภายใต้ภาวะเร่งพบว่า onset temperature (T_o), peak temperature (T_p), และ conclusion temperature (T_c) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาในข้าวทุกพันธุ์ เมื่อพิจารณาตามพันธุ์ของข้าวพบว่า T_o ของแป้งข้าวทั้ง 6 พันธุ์มีเพียงข้าว

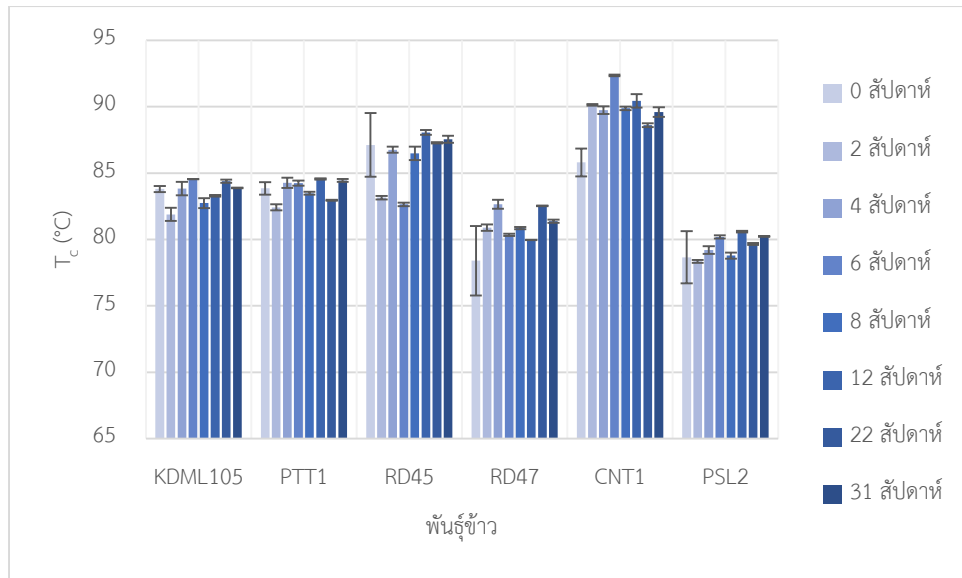
แอมิโลสสูงพันธุ์ CNT1 เท่านั้นที่มีค่าดังกล่าวสูงกว่า 70 °C และมีค่าสูงกว่าทุกพันธุ์ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ในขณะที่ข้าวพันธุ์ RD47 และ PSL2 ซึ่งเป็นข้าวกลุ่มแอมิโลสสูงเช่นกัน กลับมีค่านี้นี้ต่ำกว่าในข้าวกลุ่มแอมิโลสต่ำอีก 3 พันธุ์ และมีลักษณะเช่นเดียวกันสำหรับค่า T_p และ T_c สำหรับค่า gelatinization temperature range ($T_c - T_o$) มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจนโดยมีค่าอยู่ในช่วง 15 - 20 °C



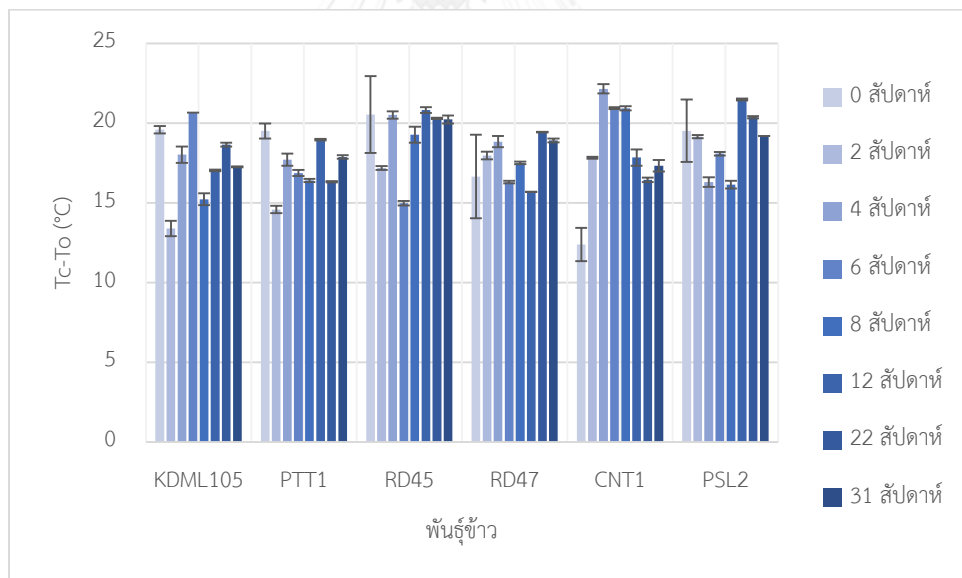
รูปที่ 4.20 Onset gelatinization temperature (T_o) ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



รูปที่ 4.21 Peak gelatinization temperature (T_p) ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



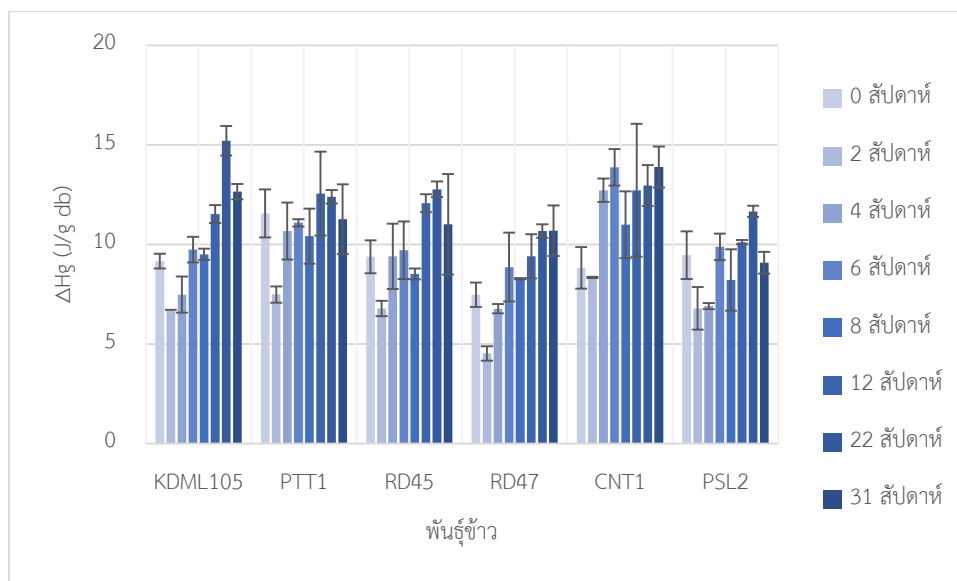
รูปที่ 4.22 Conclusion gelatinization temperature (T_c) ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ครั้ง



รูปที่ 4.23 Gelatinization temperature range ($T_c - T_o$) ของการเกิดเจลาคตินในเซชันของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ครั้ง

เมื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งข้าวจากเครื่อง RVA (ค่า pasting temperature) และเครื่อง DSC พบว่าค่าที่ได้จากทั้ง 2 เครื่องมือให้แนวโน้มแตกต่างกันระหว่างข้าวทั้ง 2 กลุ่ม กล่าวคือ กลุ่มข้าวแอมิโลสต่ำจะมีค่า pasting temperature ต่ำกว่ากลุ่มข้าวแอมิโลสสูง ในขณะที่ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC กลับมีเพียงพันธุ์ CNT1 เท่านั้นที่มีค่าสูงกว่าดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ความแตกต่างของอุณหภูมิที่วัดได้จากเครื่องมือทั้ง 2 อาจมาจากหลักการวิเคราะห์ที่ต่างกันคือ ข้อมูล pasting temperature จากเครื่อง RVA เป็นค่าอุณหภูมิที่ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเป็น 2 Rapid Visco Unit (RVU) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการดูดน้ำและพองตัวของเม็ดสตาร์ชเป็นหลัก แต่ค่าจากเครื่อง DSC เป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการดูดความร้อนเพื่อทำลายโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช และอาจเกี่ยวข้องกับการปรากฏการณ์อื่นๆ ด้วย เช่น การเสียดสีของโปรตีนในข้าว

รูปที่ 4.24 แสดงค่าเอนทาลปีที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔH_g) ซึ่งมีค่าลดลงภายใน 2 สัปดาห์แรกจากนั้นจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในข้าวทุกพันธุ์ Patindol และคณะ (2005) และ Zhou และคณะ (2010) รายงานว่า ΔH_g มีค่าเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาข้าว นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Patindol และคณะ (2005) ซึ่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงของข้าวเปลือก 2 พันธุ์ (Cypress และ Bengal) โดยเก็บข้าวเปลือกความชื้นประมาณร้อยละ 12.5 ที่อุณหภูมิ 4 21 และ 38 °C พบการเปลี่ยนแปลงของ ΔH_g เฉพาะในฟลาวัวร์ข้าว แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงในสตาร์ชข้าว และการเก็บข้าวที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่า การเพิ่มขึ้นของ ΔH_g อาจเป็นผลเนื่องจากการจัดเรียงตัวของสายพอลิเมอร์บริเวณกิ่งของแอมิโลเพคตินที่มากเกิดเป็นสายเกลียวคู่ทำให้เม็ดแป้งมีความเป็นผลึกมากขึ้น (Patindol และคณะ, 2005) และการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนในข้าวที่มีพันธะไดซัลไฟด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเพปไทด์เพิ่มขึ้นซึ่งขัดขวางการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้ง (Chrastil, 1990; Chrastil และ Zarins, 1992; Katekhong และ Charoenrein, 2014) และต้องใช้พลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นในการเกิดเจลลิตีในเซชัน



รูปที่ 4.24 Enthalpy of gelatinization (ΔH_g) ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ

เอนทาลปีที่ใช้ในการหลอมผลึกสารเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน (ΔH_{gl}) ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่งแสดงในตารางที่ 4.8 ค่าดังกล่าวคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของพีคการดูดความร้อนเพื่อหลอมผลึกสารเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน ซึ่งพบได้ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 90 – 120 °C จากผลการทดลองไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวที่ชัดเจนตลอดระยะเวลาการเก็บในข้าวทุกพันธุ์ ปัจจัยที่ส่งเสริมการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันคือความชื้นและอุณหภูมิ (Le Bail และคณะ, 1999; Tananuwong และ Malila, 2011b) แต่ในการทดลองนี้ ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกในระหว่างการเก็บลดน้อยลงภายหลังจากเก็บข้าวนาน 2 สัปดาห์ ความชื้นของข้าวเปลือกที่มีค่าต่ำ (น้อยกว่า 10%, รูปที่ 4.1) อาจไม่เอื้อต่อการเกิดสารเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน ค่า ΔH_{gl} จึงไม่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนระหว่างการเก็บ

ตารางที่ 4.8 Enthalpy of amylose-lipid complexes (ΔH_{al}) ของแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง

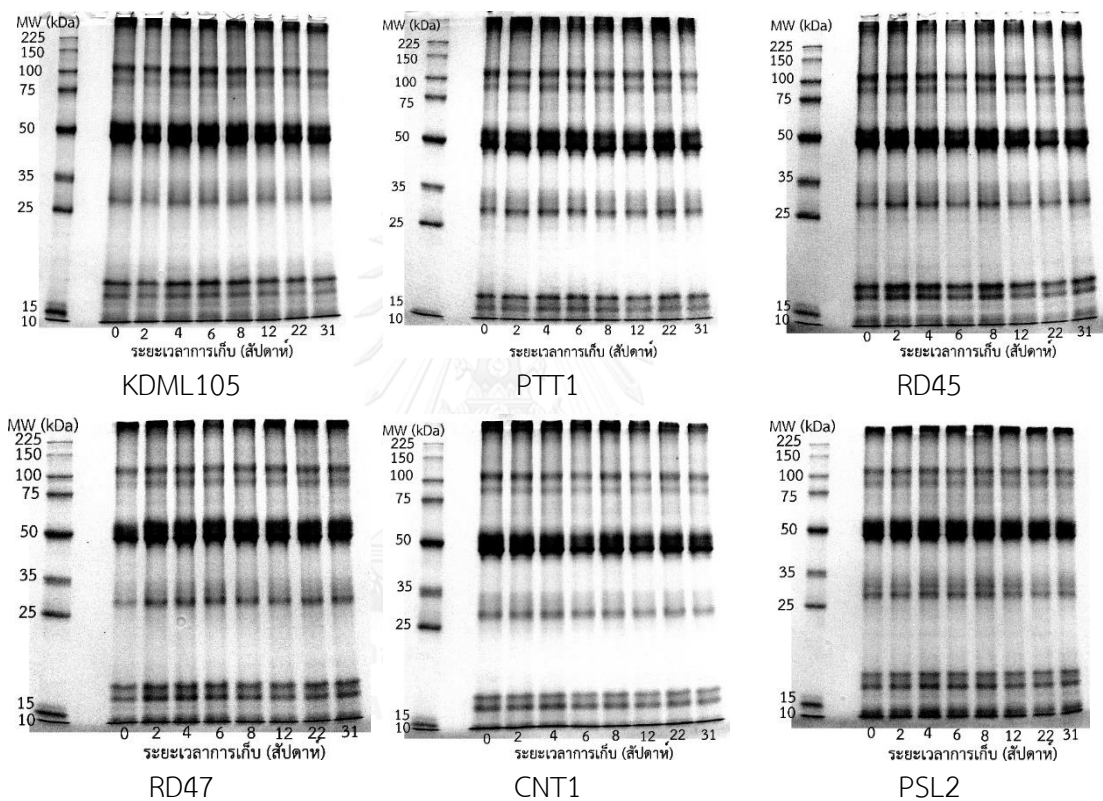
ระยะเวลา การเก็บ (สัปดาห์)	ΔH_{al} (J/g db)					
	KDML105	PTT1	RD45	RD47	CNT1	PSL2
0	0.550 ± 0.160	1.380 ± 0.330	2.450 ± 1.700	2.720 ± 0.813	2.520 ± 0.740	3.235 ± 1.385
2	1.720 ± 0.347	0.921 ± 0.16	0.535 ± 0.088	1.709 ± 0.170	0.703 ± 0.045	0.687 ± 0.075
4	1.950 ± 0.364	1.228 ± 0.272	0.900 ± 0.161	3.040 ± 0.245	1.059 ± 0.204	1.515 ± 0.207
6	0.670 ± 0.006	1.187 ± 0.138	0.713 ± 0.102	0.607 ± 0.062	0.493 ± 0.041	1.036 ± 0.084
8	1.236 ± 0.264	0.734 ± 0.076	1.454 ± 0.355	0.380 ± 0.059	0.606 ± 0.092	1.395 ± 0.165
12	0.146 ± 0.038	2.167 ± 0.039	0.414 ± 0.126	0.622 ± 0.008	1.712 ± 0.360	0.909 ± 0.042
22	0.541 ± 0.086	0.558 ± 0.029	0.632 ± 0.028	1.218 ± 0.012	0.626 ± 0.100	1.070 ± 0.051
31	0.666 ± 0.022	1.071 ± 0.079	1.043 ± 0.183	1.220 ± 0.084	0.703 ± 0.255	0.959 ± 0.002

ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ

4.8 รูปแบบน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในแป้งข้าว

รูปแบบน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในแป้งข้าวต่างพันธุ์ที่ผ่านการเก็บเป็นเวลาที่ต่างๆ กัน แสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่าข้าวทั้ง 6 พันธุ์มีรูปแบบน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนที่คล้ายคลึงกัน และยังพบแถบโปรตีนที่ตำแหน่งเดียวกันทั้งในข้าวใหม่และข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่งอีกด้วย โปรตีนในแป้งข้าวทุกตัวอย่างประกอบด้วยกลุ่มของโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วงดังต่อไปนี้ ขนาดเล็กกว่า 20, 25 - 30, 45 - 55, 80 - 90, 100 - 110 kDa และโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 225 kDa จากงานวิจัยก่อนหน้านี้มีผู้รายงานน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในข้าวโดยแยกตามการละลายของโปรตีน ดังนี้ โปรตีนที่ละลายได้ในน้ำ (albumin) มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 15 - 25 kDa โปรตีนที่ละลายได้ในสารละลายเกลือเจือจาง (globulin) มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 15 25 50 และ 160 - 200 kDa โปรตีนที่ละลายได้ในแอลกอฮอล์ (prolamin) มีน้ำหนักโมเลกุล 10 - 16 kDa และโปรตีนที่ละลายได้ในสารละลายต่าง (glutelin) หรือ oryzenin ซึ่งพบมากที่สุดใข้าว ประกอบด้วย 2 หน่วยย่อยคือ α (acidic) และ β (basic) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 28 - 39 และ 19 -25 kDa ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีรายงานถึง polypeptide precursor ของ glutelin ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 51 - 58 kDa โดยโปรตีนชนิดนี้จะถูกไฮโดรไลส์ได้เป็น α -subunit และ β -subunit ของ glutelin ในขั้นตอน post-translational modification อย่างไรก็ตาม อาจตรวจพบโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (> 225 kDa) จากโปรตีนแต่ละส่วนที่แยกได้ตามความสามารถในการละลายนี้ด้วย (Cao และคณะ, 2009; Likitwattanasade และ Hongsprabhas, 2010; Van Der Borght และคณะ,

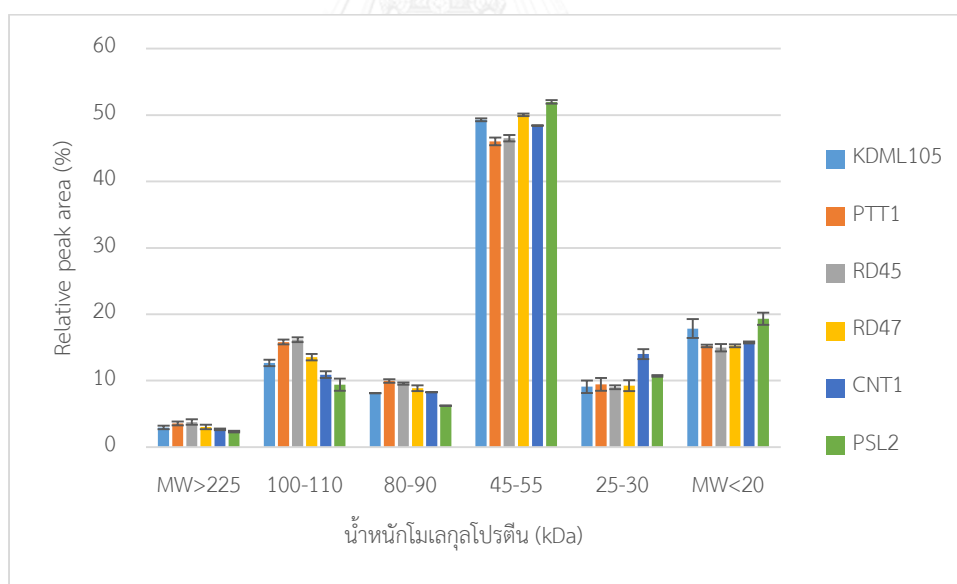
2006) ทั้งนี้ น้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในกลุ่มต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิค SDS-PAGE ขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น พันธุ์ข้าว รวมถึงวิธีการสกัดและเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของโปรตีน (Likitwattanasade และ Hongsprabhas, 2010) จากข้อมูลข้างต้นอาจใช้ระบุกลุ่มของโปรตีนหลักที่พบในแต่ละแถบได้ดังนี้ แถบโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 30 kDa ประกอบด้วยหน่วยย่อยของโปรตีนในกลุ่ม albumin globulin prolamin และ glutelin และแถบโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 45 – 55 คือโปรตีนในกลุ่ม globulin และ glutelin



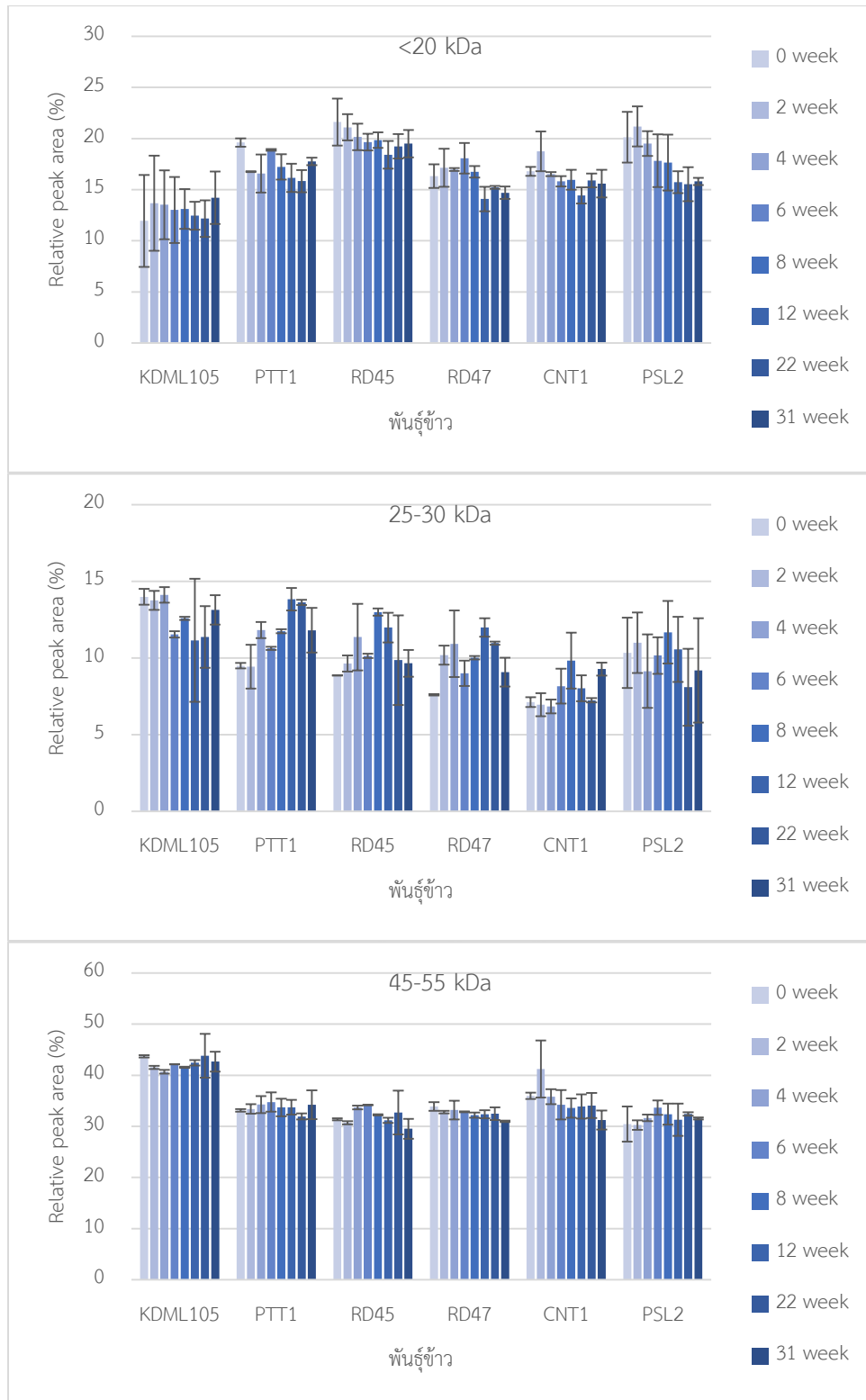
รูปที่ 4.25 รูปแบบน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในข้าวทั้ง 6 พันธุ์ แถวของโปรตีนจากซ้ายไปขวาคือ Perfect Protein Markers (10–225 kDa) โปรตีนจากตัวอย่างข้าวใหม่และตัวอย่างข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่งที่เวลาต่างๆ กัน

ข้อมูลในเชิงปริมาณของโปรตีนข้าวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ กัน แสดงดังรูปที่ 4.26 – 4.27 ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวคำนวณได้จาก peak area ของความเข้มแต่ละแถบโปรตีนภายใน lane เดียวกัน โดยนำค่า peak area ของแต่ละแถบโปรตีนมาคำนวณเป็น relative peak area (%) โดยเทียบจากปริมาณ peak area รวมภายใน lane เดียวกัน (ภาคผนวก ข.7) จากรูปที่ 4.26 พบว่าข้าวใหม่ทั้ง 6 พันธุ์มีส่วนของปริมาณโปรตีน (จำแนกตามช่วงของน้ำหนักโมเลกุล) ที่ใกล้เคียงกัน โดยที่พบ

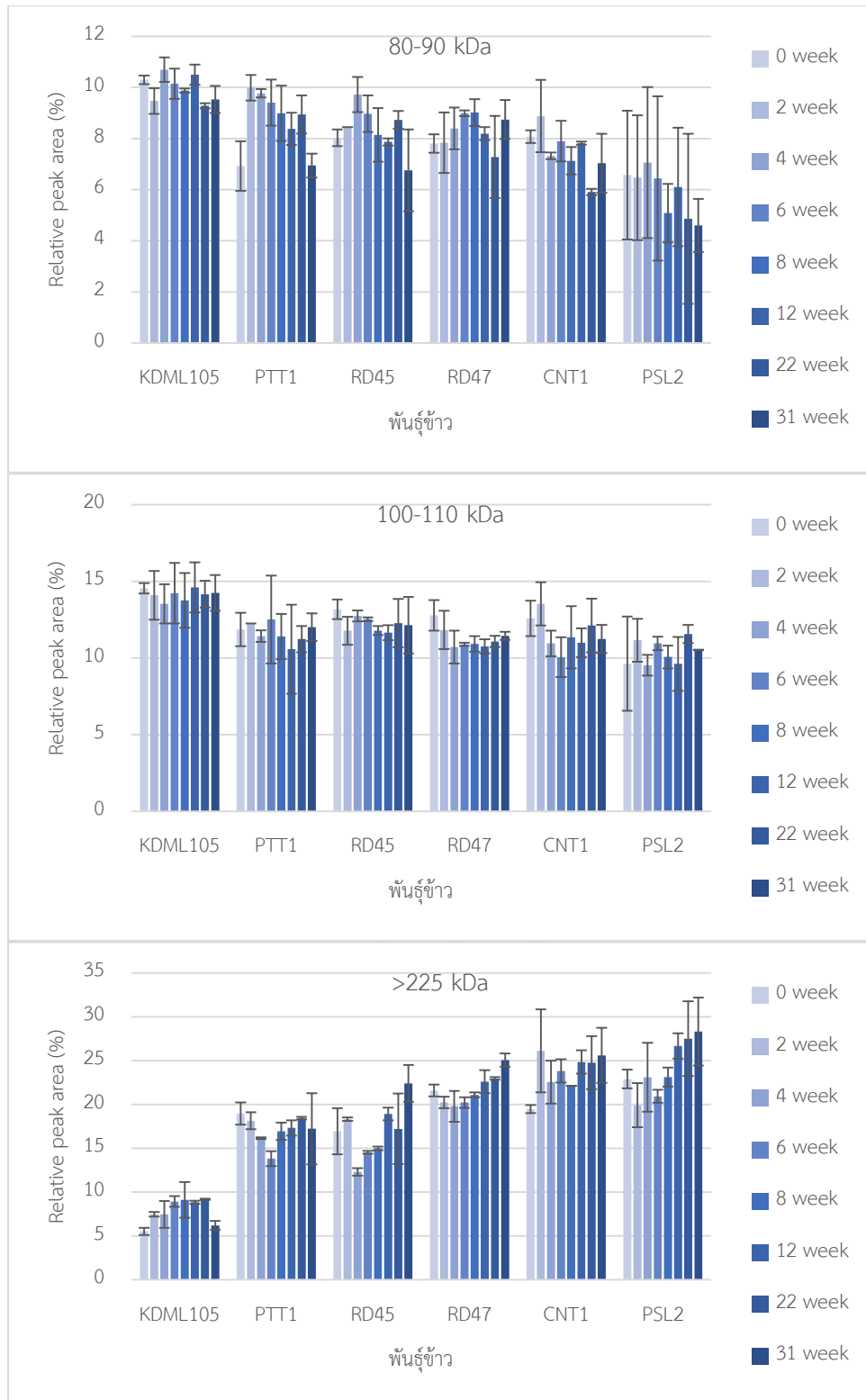
โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 45-55 kDa ในสัดส่วนสูงที่สุด และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของโปรตีนแต่ละกลุ่มระหว่างการเก็บรักษาข้าวพบว่า โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 20 kDa มีแนวโน้มลดลงตามเวลาการเก็บรักษาข้าวทุกพันธุ์ ส่วนโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุล 45 – 55 kDa ของข้าวพันธุ์ RD47 และ CNT1 มีปริมาณลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บนานขึ้น และปริมาณโปรตีนในช่วงน้ำหนักโมเลกุล 80 – 90 kDa มีแนวโน้มลดลงในข้าวทุกพันธุ์ภายหลังการเก็บข้าวนาน 6 สัปดาห์ แต่สำหรับโปรตีนช่วงน้ำหนักโมเลกุล 25 – 30 และ 100 – 110 kDa มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่า โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 225 kDa มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาข้าว โดยเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนหลังจากเก็บข้าวภายใต้ภาวะเร่งนาน 6 สัปดาห์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tulyathan และ Leeharatanaluk (2007) ที่ศึกษา รูปแบบน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในข้าวใหม่พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เปรียบเทียบกับข้าวที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิห้อง นาน 5 และ 8 เดือน พบว่าข้าวที่ผ่านการเก็บนาน 5 และ 8 เดือนจะมีแถบโปรตีนในส่วน stacking gel เข้มกว่าในตัวอย่างข้าวใหม่ แสดงว่า มวลโมเลกุลของโปรตีนมีค่าเพิ่มขึ้นในตัวอย่างข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา



รูปที่ 4.26 สัดส่วนปริมาณโปรตีนในข้าวใหม่ (จำแนกตามช่วงของน้ำหนักโมเลกุล) error bar แสดงค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



รูปที่ 4.27 สัดส่วนโดยปริมาณของโปรตีนที่จำแนกตามช่วงของน้ำหนักโมเลกุลของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



รูปที่ 4.27 (ต่อ) สัดส่วนโดยปริมาณของโปรตีนที่จำแนกตามช่วงของน้ำหนักโมเลกุลของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ครั้ง

จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบน้ำหนักรโม่เลกุลโปรตีนในข้าวข้างต้นอาจสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนน่าจะเป็นกลไกหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของข้าวระหว่างเก็บรักษา (หัวข้อ 4.2 – 4.5) กล่าวคือ การเก็บข้าวภายใต้ภาวะเร่งนี้มีผลทำให้โปรตีนเกิดอันตรกิริยากันมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากพันธะไดซัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้น (Chrastil, 1990; Chrastil และ Zarins, 1992; Moritaka และ Yasumatsu, 1972; Tananuwong และ Malila, 2011b; Zhou และคณะ, 2003) ทำให้มีโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีจำนวนมากขึ้น และ โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ ลดลง ซึ่งส่งผลต่อการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ช และเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับของอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชและโปรตีน (starch-protein interactions) ดังที่ได้อภิปรายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้

4.9 การจัดกลุ่มตัวอย่างข้าวจากค่าคุณภาพการหุงต้ม ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็น

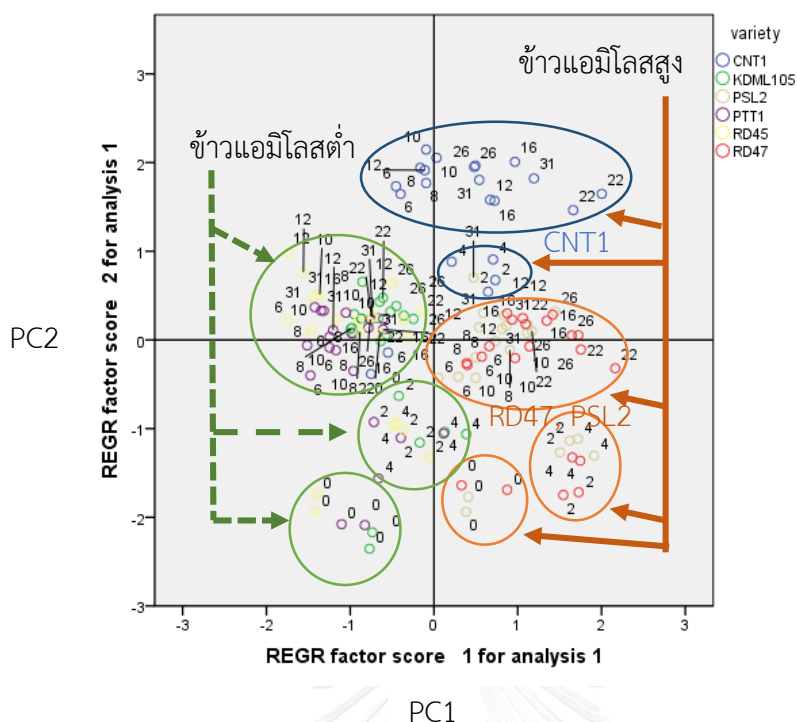
เมื่อนำข้อมูลคุณภาพการหุงต้ม ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็นโดยใช้หลักการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) พบว่าสามารถอธิบายความแปรปรวนรวมได้ 66.26% เมื่อพิจารณาน้ำหนักของค่าสหสัมพันธ์ (factor loading) (ตารางที่ 4.9) ในแต่ละคุณลักษณะพบว่าปริมาณน้ำที่ดูดซับขณะหุงต้ม (WU) อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของข้าวสุก (LB) ลักษณะเนื้อสัมผัส และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็น แสดงในกลุ่มของ PC1 ซึ่งสามารถอธิบายความแปรปรวนได้สูงที่สุด (48.13%) และกลุ่ม PC2 ได้แก่ค่าระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการหุงต้ม (MCT) ปริมาณของแข็งที่สูญเสียขณะหุงต้ม (SL) การขยายปริมาตรของข้าวสุก (VE) และอัตราส่วนความยาวข้าวสุกต่อความยาวของเมล็ดข้าวสาร (E) สามารถอธิบายความแปรปรวนได้ 18.14% ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่งแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่าสามารถแบ่งกลุ่มข้าวได้ตามแนวแกน PC1 ได้แก่กลุ่มข้าวแอมิโลสต่ำ (KDML105, PTT1, และ RD45) และกลุ่มข้าวแอมิโลสสูง (RD47, CNT1, และ PSL2) นอกจากนี้ในกลุ่มข้าวแอมิโลสสูงยังสามารถแบ่งข้าวพันธุ์ CNT1 ออกจากข้าวอีก 2 พันธุ์ได้ด้วย และเมื่อพิจารณาตามแนวแกน PC2 พบว่าสามารถแยกข้าวออกได้เป็นสามกลุ่มตามระยะเวลาการเก็บคือกลุ่มข้าวใหม่ กลุ่มข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง 2 และ 4 สัปดาห์ และกลุ่มสุดท้ายคือข้าวที่เก็บภายใต้ภาวะเร่งตั้งแต่ 6 สัปดาห์ขึ้นไป ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้นที่พบการเปลี่ยนแปลงในด้านต่างๆ ของข้าวที่เก็บภายใต้ภาวะเร่งในช่วงแรกของการเก็บเท่านั้น จากนั้นค่าต่างๆ จึงค่อนข้างคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง

ตารางที่ 4.9 ค่า Factor loading จาก 2 องค์ประกอบแรกที่แยกสกัดได้จากค่าคุณภาพการหุงต้ม ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็น

ค่าที่ตรวจวัด	Factor loading		
	Principle component 1	Principle component 2	
คุณภาพการหุงต้ม	MCT	0.196	0.793*
	WU	-0.658*	0.597*
	SL	0.369	-0.636*
	VE	-0.086	0.646*
	LB	0.604	-0.330
	E	0.204	0.609*
ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก	Hardness	0.891*	-0.130
	Cohesiveness	0.546*	.0144
	Adhesiveness	-0.809*	-0.340
	Springiness	0.588*	0.495
	Gumminess	0.881*	-0.068
	Chewiness	0.900*	0.138
	Resilience	0.859*	-0.113
การเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ ขณะร้อนและเย็น	PT	0.682*	0.506*
	PV	-0.886*	-0.131
	TV	-0.857*	0.193
	BD	-0.770*	-0.419
	FV	-0.794*	0.301
	SB	-0.706*	0.385

* ค่า Factor loading ที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05

MCT หมายถึง minimum cooking time, WU หมายถึง water uptake, SL หมายถึง solid loss, VE หมายถึง volume expansion, LB หมายถึง length breadth ratio, E หมายถึง elongation ratio, PT หมายถึง pasting temperature, PV หมายถึง peak viscosity, TV หมายถึง trough viscosity, BD หมายถึง breakdown, FV หมายถึง final viscosity, SB หมายถึง setback



รูปที่ 4.28 การวิเคราะห์องค์ประกอบจากข้อมูลคุณภาพการหุงต้ม ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็นของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง

4.10 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพข้าวระหว่างการเก็บด้วยเทคนิค NIR

จากข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบค่าคุณภาพการหุงต้ม ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็น ค่าที่วัดได้ส่วนใหญ่ให้ค่า factor loading ที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตารางที่ 4.9) จึงคัดเลือกมาเพียงเฉพาะค่าที่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนตามเวลาการเก็บรักษา ประกอบด้วยค่าระยะเวลาการหุงต้มที่เหมาะสม (MCT) adhesiveness (TeA) pasting temperature (PT) peak viscosity (PV) และ breakdown (BD) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละค่าที่เลือกได้ (dependent variable) กับรูปแบบการดูดกลืนแสงจาก NIR spectrum (independent variable) ข้อมูล NIR spectrum จากตัวอย่างข้าว 132 ตัวอย่างถูกนำมาแบ่งเป็นกลุ่ม calibration และ validation ในอัตราส่วน 3:1 ค่าสถิติเบื้องต้นของค่า MCT, TeA, PT, PV, และ BD แสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และช่วงข้อมูลของค่าทางคุณภาพการหุงต้ม เนื้อสัมผัสและสมบัติของเพสต์ขณะร้อนและเย็นของตัวอย่างข้าว 132 ตัวอย่าง

ค่าที่ตรวจวัด	กลุ่ม calibration (100 ตัวอย่าง)			กลุ่ม validation (32 ตัวอย่าง)		
	ค่าเฉลี่ย	SD	ช่วงข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	SD	ช่วงข้อมูล
MCT (นาที)	22	3	17-28	22	3	18-28
TeA (kg·s)	0.3589	0.2706	0.0240-0.8200	0.3503	0.2656	0.0440-0.7310
PT (°C)	86.78	4.26	74.24-92.65	86.88	3.91	75.10-92.20
PV (Pa·s)	1.986	0.911	0.654-3.857	1.965	0.878	0.695-3.572
BD (Pa·s)	0.507	0.519	0.015-2.194	0.471	0.455	0.018-1.827

MCT หมายถึง minimum cooking time, TeA หมายถึง adhesiveness, PT หมายถึง pasting temperature, PV หมายถึง peak viscosity, BD หมายถึง breakdown

เมื่อนำค่า MCT, TeA, PT, PV, BD จากตัวอย่างกลุ่ม calibration มาหาความสัมพันธ์กับข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งตามวิธีในตารางที่ 4.11 ด้วยวิธีการทางสถิติ Partial least squares regression จะได้สมการสำหรับทำนายค่าแต่ละค่าที่ตรวจวัด ค่าทางสถิติของสมการทำนายที่สร้างได้แสดงในตารางที่ 4.12 พบว่าสมการที่ได้ให้ค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.81 – 0.90 และเมื่อนำสมการที่ได้ไปตรวจสอบความถูกต้องด้วยกลุ่มข้อมูล validation ค่าที่ทำนายได้จากสมการที่สร้างขึ้นไม่มีความแตกต่างจากค่าจริงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากข้อมูลดังกล่าวทำให้สรุปได้ว่าสามารถใช้เทคนิค NIR spectroscopy ทำนายค่า MCT, TeA, PT, PV, BD ได้

ตารางที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการปรับแต่งสเปกตรัม NIR สำหรับแต่ละค่าที่ตรวจวัด ด้วยวิธี Savitzky Golay Derivatives

ค่าที่ตรวจวัด	Number of smoothing point	Number of left side point	Number of right side point
MCT	11	5	5
TeA	17	8	8
PT	13	6	6
PV	17	8	8
BD	17	8	8

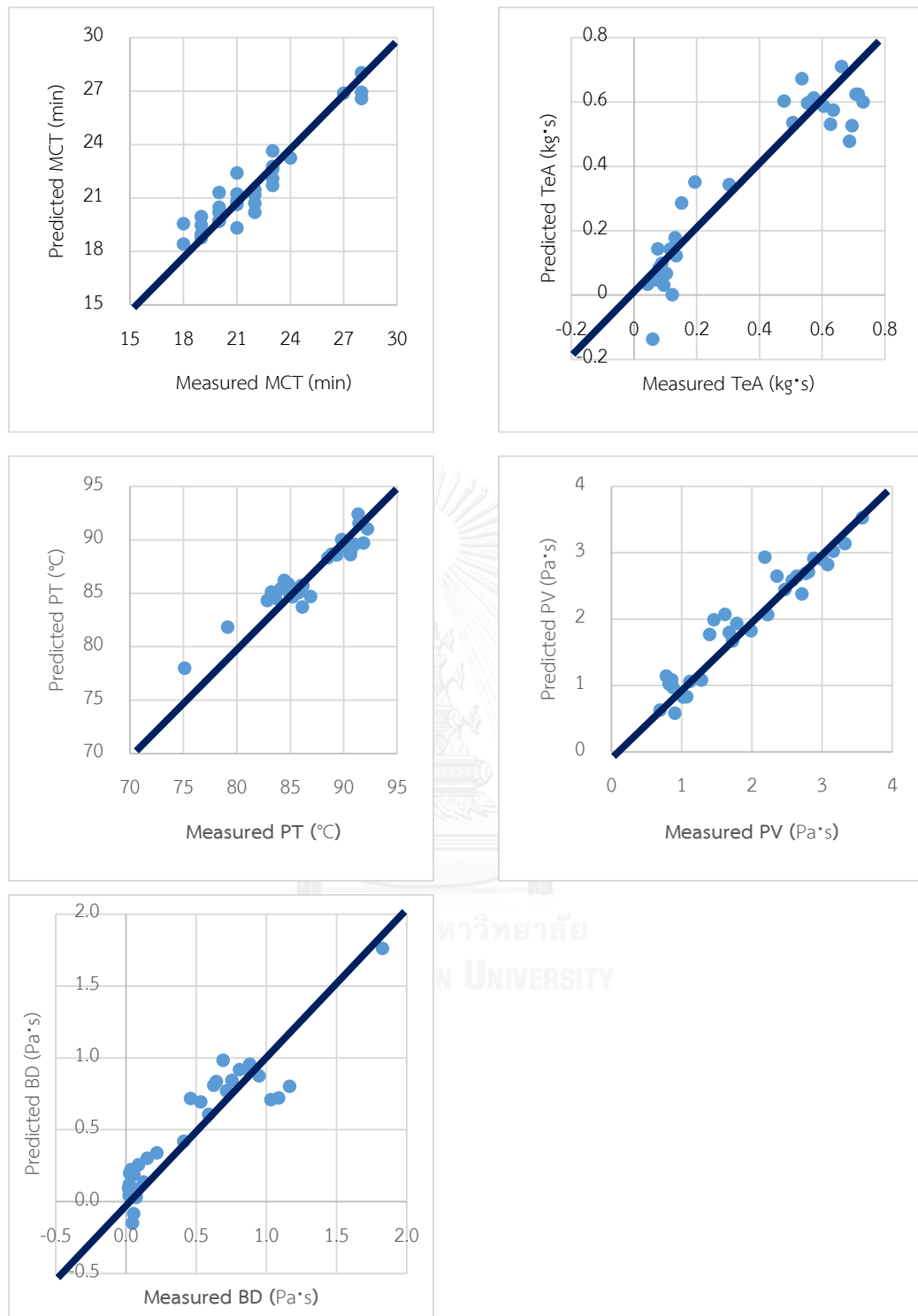
derivative order = 2nd derivative, polynomial order = 2

MCT หมายถึง minimum cooking time, TeA หมายถึง adhesiveness, PT หมายถึง pasting temperature, PV หมายถึง peak viscosity, BD หมายถึง breakdown

ตารางที่ 4.12 ค่าทางสถิติของสมการทำนายที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Partial least squares regression เพื่อทำนายค่าทางคุณภาพการหุงต้ม เนื้อสัมผัสและสมบัติของเพสต์ขณะร้อนและเย็นของตัวอย่าง ข้าว 132 ตัวอย่าง

ค่าที่ตรวจวัด	Factor	Calibration		Validation				t-test
		R ²	RMSEC	R	RMSEP	SEP	Bias	
MCT	6	0.8656	1.0742	0.9542	0.8623	0.8527	-0.1980	-1.314
TeA	8	0.9035	0.0845	0.9382	0.0922	0.0928	-0.0128	-0.780
PT	7	0.8742	1.5032	0.9501	1.3577	1.3788	-0.0428	-0.176
PV	8	0.8821	0.3127	0.9556	0.2564	0.2590	0.0270	0.589
BD	8	0.8135	0.2234	0.9306	0.1688	0.1667	0.0398	1.351

MCT หมายถึง minimum cooking time, TeA หมายถึง adhesiveness, PT หมายถึง pasting temperature, PV หมายถึง peak viscosity, BD หมายถึง breakdown, RMSEC หมายถึง root mean square error of calibration, RMSEP หมายถึง root mean square error of prediction, SEP หมายถึง standard error of prediction



รูปที่ 4.29 ค่าเปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายได้จากสมการที่สร้างขึ้นของกลุ่มตัวอย่าง validation MCT หมายถึง minimum cooking time, TeA หมายถึง adhesiveness, PT หมายถึง pasting temperature, PV หมายถึง peak viscosity, BD หมายถึง breakdown

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การเก็บข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 40 °C มีผลทำให้สมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวพันธุ์ต่างๆ เปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ ปริมาณความชื้นในข้าวเปลือกลดลงมากในช่วง 4 สัปดาห์แรกของการเก็บรักษา และมีค่าคงที่อยู่ในช่วง 8 – 10 % หลังจากนั้น ส่วนปริมาณข้าวตันเพิ่มขึ้นมากในช่วงแรกของการเก็บ จากนั้นจึงค่อนข้างคงที่ ในด้านคุณภาพการหุงต้มพบว่าระยะเวลาการหุงต้มที่เหมาะสม ปริมาณของแข็งที่สูญเสียขณะหุงต้ม การขยายปริมาตรของข้าวสุก และอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของข้าวสุกของข้าวทุกพันธุ์มีการเปลี่ยนแปลงมากภายใน 6-8 สัปดาห์แรก จากนั้นจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ค่าการยึดตัวของเมล็ดข้าวสุกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บ เมื่อพิจารณาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกพบว่า ค่า adhesiveness มีแนวโน้มลดลงตลอดการเก็บรักษา ในข้าวทุกพันธุ์ ส่วนค่า springiness ของข้าวแอมิโลสสูงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นภายหลังจากเก็บข้าวนาน 6 สัปดาห์ แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนของค่าดังกล่าวในข้าวแอมิโลสต่ำ และไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนของค่า hardness cohesiveness gumminess chewiness และ resilience สำหรับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืดของแป้งข้าวพบว่า ภายใน 2 สัปดาห์แรกของการเก็บข้าว ตัวอย่างแป้งข้าวมีค่า pasting temperature เพิ่มขึ้น แต่มีค่า peak viscosity และ breakdown ลดลง จากนั้นค่าเหล่านี้จึงค่อนข้างคงที่ ส่วนค่า setback ของตัวอย่างข้าวแอมิโลสต่ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 12 สัปดาห์แรกของการเก็บรักษา แต่ไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ในข้าวแอมิโลสสูง ทั้งนี้สามารถใช้ fraction conversion model ทำนายการเปลี่ยนแปลงค่า adhesiveness และ pasting temperature ตามเวลาการเก็บได้ ($R^2 \geq 0.67$) และพบว่าค่าคงที่อัตรา (k) ของชุดข้อมูลจากข้าวแอมิโลสต่ำและข้าวแอมิโลสสูงมีความแตกต่างกันด้วย

ในด้านสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลลาติไนเซชันพบว่า T_o , T_p และ T_c เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ส่วนค่า ΔH_g มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นภายหลังจากเก็บข้าวภายใต้ภาวะเร่งนาน 2 สัปดาห์ แต่ไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนของ ΔH_a ระหว่างการเก็บข้าว นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อรูปแบบโปรตีน โดยสัดส่วนเชิงปริมาณของโปรตีนที่มีขนาดใหญ่ (> 225 kDa) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาการเก็บข้าว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปแบบน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนนี้น่าจะเป็นกลไกหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของข้าวระหว่างเก็บ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างสมบัติของข้าวแอมิโลสต่ำและข้าวแอมิโลสสูงที่เวลาการเก็บรักษาเท่ากัน พบว่าข้าวแอมิโลสสูงให้ปริมาณข้าวต้นสูงกว่าข้าวแอมิโลสต่ำ ข้าวแอมิโลสต่ำมีค่า adhesiveness ของข้าวสุก ค่า peak viscosity และ breakdown สูงกว่าข้าวแอมิโลสสูงตลอดระยะเวลาการเก็บข้าว แต่มีค่า hardness ของข้าวสุก pasting temperature ต่ำกว่าข้าวแอมิโลสสูง

จากการจัดกลุ่มตัวอย่างข้าวโดยวิเคราะห์ข้อมูลด้านคุณภาพการหุงต้ม ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขณะร้อนและเย็นโดยใช้หลักการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) พบว่าพารามิเตอร์ดังกล่าวใช้ในการจัดแยกกลุ่มข้าวแอมิโลสต่ำ และกลุ่มข้าวแอมิโลสสูง ออกจากกันได้ รวมถึงการจัดแยกกลุ่มของข้าวตามระยะเวลาการเก็บรักษาได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มข้าวใหม่ กลุ่มข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง 2 และ 4 สัปดาห์ และกลุ่มข้าวที่เก็บภายใต้ภาวะเร่งตั้งแต่ 6 สัปดาห์ขึ้นไป

เมื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาการหุงต้มที่เหมาะสม ค่า adhesiveness pasting temperature peak viscosity และ breakdown (dependent variable) กับรูปแบบการดูดกลืนแสงจาก NIR spectrum ในช่วงเลขคลื่น 4000 – 10000 cm^{-1} (independent variable) พบว่าสมการที่ได้ให้ค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.81 – 0.90 ตรวจสอบความถูกต้องด้วยกลุ่มข้อมูล validation ค่าที่ทำนายได้จากสมการที่สร้างขึ้นไม่มีความแตกต่างจากค่าจริงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิค NIR spectroscopy ในการทำนายค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ได้

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากปริมาณความชื้นในข้าวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของข้าวระหว่างการเก็บ ดังนั้นควรมีการศึกษาผลของการเก็บข้าวภายใต้ภาวะเร่งโดยควบคุมความชื้นของตัวอย่างให้คงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บ
2. อาจศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมในตัวอย่างข้าวกล้อง ข้าวขาว และแป้งข้าว เพื่อให้ได้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของข้าวและแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่งที่ครอบคลุม สำหรับใช้ในการจัดการเพื่อให้ได้ข้าวและผลิตภัณฑ์จากข้าวที่มีลักษณะตามที่ต้องการ

รายการอ้างอิง

- AACC. (2000). Method 61-02.01. Determination of the pasting properties of rice with the Rapid Visco Analyzer *AACC International Approved Methods of Analysis*. AACC International: Saint Paul, MN, US.
- AOAC. (2005). *Official Methods of Analysis*. 18th ed Washington D.C.: The Association of the Official Analytical Chemists.
- Bhattacharya, K. R. (2011). 5 - Ageing of rice. In K. R. Bhattacharya (Ed.), *Rice Quality* (pp. 116-163): Woodhead Publishing
- Cao, X., Wen, H., Li, C., & Gu, Z. (2009). Differences in functional properties and biochemical characteristics of congenetic rice proteins. *Journal of Cereal Science*, 50(2), 184-189.
- Chrastil, J. (1990). Protein-starch interactions in rice grains. Influence of storage on oryzenin and starch. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 38, 1804-1809.
- Chrastil, J., & Zarins, Z. M. (1992). Influence of storage on peptide subunit composition of rice oryzenin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40(6), 925-928.
- Gibson, T. S., Solah, V. A., & McCleary, B. V. (1997). A procedure to measure amylose in cereal starches and flours with concanavalin a. *Journal of Cereal Science*, 25, 111-119.
- Hamaker, B. R., & Griffin, V. K. (1993). Effect of disulfide bond-containing protein on rice starch gelatinization and pasting. *Cereal Chemistry*, 70, 377-380.

- Iida, S., Amano, E., & Nishio, T. (1993). A rice (*Oryza sativa* L.) mutant having a low content of glutelin and a high content of prolamine. *Theoretical and Applied Genetics*, 87, 374-378.
- Jaisut, D., Prachayawarakorn, S., Varayanond, W., Tungtrakul, P., & Soponronnarit, S. (2009). Accelerated aging of jasmine brown rice by high-temperature fluidization technique. *Food Research International*, 42(5-6), 674-681.
- Juliano, B. O. (1985). Criteria and tests for rice grain qualities. In B. O. Juliano (Ed.), *Rice: Chemistry and technology* (2nd ed., pp. 443-524). St. Paul, MN, USA: American association of cereal chemists
- Katekhong, W., & Charoenrein, S. (2014). Effect of rice ageing and freeze-thaw cycle on textural properties of cooked rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105. *International Journal of Food Science & Technology*, 49(10), 2283-2289.
- Kongkiattikajorn, J., & Phochanachai, S. (2000). *Effect of temperature on physicochemical properties of milled rice cv. Khaw dawk mali 105 during storage*. Paper presented at the The 38th Kasetsart University Annual Conference, Kasetsart University, Bangkok, Thailand.
- Laemmli, U. K. (1970). Cleavage of Structural Proteins during the Assembly of the Head of Bacteriophage T4. *Nature*, 227, 680-685.
- Le Bail, P., Bizot, H., Ollivon, M., Keller, G., Bourgaux, C., & Buléon, A. (1999). Monitoring the crystallization of amylose-lipid complexes during maize starch melting by synchrotron x-ray diffraction. *Biopolymers*, 50(1), 99-110.

- Likitwattanasade, T., & Hongsprabhas, P. (2010). Effect of storage proteins on pasting properties and microstructure of Thai rice. *Food Research International*, 43(5), 1402-1409.
- Ma, Y., & Sun, D.-W. (2009). Hardness of cooked rice as affected by varieties, cooling methods and chill storage. *Journal of Food Process Engineering*, 32(2), 161-176.
- Moritaka, S., & Yasumatsu, K. (1972). Studied on cereals. X. The effect of sulhydrul groups on storage deterioration of milled rice. *Eiyo To Shokutyo*, 25, 59-62.
- Park, C. E., Kim, Y. S., Park, K. J., & Kim, B. K. (2012). Changes in physicochemical characteristics of rice during storage at different temperatures. *Journal of Stored Products Research*, 48, 25-29.
- Park, I.-M., Ibáñez, A. M., Zhong, F., & Shoemaker, C. F. (2007). Gelatinization and pasting properties of waxy and non-waxy rice starches. *Starch - Stärke*, 59(8), 388-396.
- Park, J. K., Kim, S. S., & Kim, K. O. (2001). Effect of milling ratio on sensory properties of cooked rice and on physicochemical properties of milled and cooked rice. *Cereal Chemistry*, 78(2), 151-156.
- Parnsakhorn, S., & Langkapin, J. (2013). Changes in physicochemical characteristics of germinated brown rice and brown rice during storage at various temperatures. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(2), 293-303.
- Patindol, J., Wang, Y.-J., & Jane, J.-l. (2005). Structure-functionality changes in starch following rough rice storage. *Starch - Stärke*, 57(5), 197-207.

- Pearce, M. D., Marks, B. P., & Meullenet, J. F. (2001). Effects of postharvest parameters on functional changes during rough rice storage. *Cereal Chemistry*, 78(3), 354-357.
- Pisithkul, K., Jongkaewwattana, S., Wongpornchi, S., Tulyathan, V., & Meechoui, S. (2010). Partial characterization of rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105 as affected by accelerated-aging factors. *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*, 9(2), 305-317.
- Ramesh, M., Bhattacharya, K. R., & Mitchell, J. R. (2000). Developments in understanding the basis of cooked-rice texture. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 40(6), 449-460.
- Singh, N., Kaur, L., Singh Sodhi, N., & Singh Sekhon, K. (2005). Physicochemical, cooking and textural properties of milled rice from different Indian rice cultivars. *Food Chemistry*, 89(2), 253-259.
- Siriphollakul, P., Kanlayanarat, S., Rittiron, R., Wanitchang, J., Suwonsichon, T., Boonyaritthongchai, P., & Nakano, K. (2015). Pasting properties by near-infrared reflectance analysis of whole grain paddy rice samples. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 8, 1550035.
- Sodhi, N. S., Singh, N., Arora, M., & Singh, J. (2003). Changes in physico-chemical, thermal, cooking and textural properties of rice during aging. *Journal of Food Processing and Preservation*, 27(5), 387-400.

- Soponronnarit, S., Chiawwet, M., Prachayawarakorn, S., Tungtrakul, P., & Taechapiroj, C. (2008). Comparative study of physicochemical properties of accelerated and naturally aged rice. *Journal of Food Engineering*, 85(2), 268-276.
- Takeda, Y., & Hizkuri, S. (1987). Structures of rice amylopectins with low and high affinities for iodine. *Carbohydrate research*, 168, 79-88.
- Tananuwong, K., & Malila, Y. (2011a). Changes in physicochemical properties of organic hulled rice during storage under different conditions. *Food Chemistry*, 125(1), 179-185.
- Tananuwong, K., & Malila, Y. (2011b). Quality of rice as affected by paddy drying and kernel storage. In Y. Liu & L. Froyen (Eds.), *Rice: Production, Consumption and Health Benefits*: Nova Science Publishers, Inc.
- Tiwari, B. K., O'Donnell, C. P., Patras, A., Brunton, N., & Cullen, P. J. (2009). Effect of ozone processing on anthocyanins and ascorbic acid degradation of strawberry juice. *Food Chemistry*, 113(4), 1119-1126.
- Tulyathan, V., & Leeharatanaluk, B. (2007). Changes in quality of rice (*Oryza sativa* L.) cv. KHAO DAWK MALI 105 during storage. *Journal of Food Biochemistry*, 31(3), 415-425.
- Van Der Borght, A., Vandeputte, G. E., Derycke, V., Brijs, K., Daenen, G., & Delcour, J. A. (2006). Extractability and chromatographic separation of rice endosperm proteins. *Journal of Cereal Science*, 44(1), 68-74.

Villareal, R. M., Resurreccion, A. P., Suzuki, L. B., & Juliano, B. O. (1976). Changes in physicochemical properties of rice during storage. *Starch - Stärke*, 28(3), 88-94.

Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., & Blanchard, C. (2002). Ageing of stored rice: Changes in chemical and physical attributes. *Journal of Cereal Science*, 35(1), 65-78.

Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., & Blanchard, C. (2003). Effect of rice storage on pasting properties of rice flour. *Food Research International*, 36(6), 625-634.

Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., & Blanchard, C. (2007). Effect of storage temperature on cooking behaviour of rice. *Food Chemistry*, 105(2), 491-497.

Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., & Blanchard, C. (2010). Effect of storage temperature on rice thermal properties. *Food Research International*, 43(3), 709-715.

Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., Blanchard, C., & Baxter, G. (2003). Rice ageing. I. Effect of changes in protein on starch behaviour. *Starch - Stärke*, 55(3-4), 162-169.

กรมวิชาการเกษตร. (2547). คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.brrd.in.th/library/document/E-book/brrd4706001.pdf> [8 พฤษภาคม 2556].

กิตติศักดิ์ วสันตวิวงศ์, ผดุงศักดิ์ วานิชชัง, พิทักษ์ จันทร์เจริญ, อาริรัตน์ อิมศิลป์, ใจทิพย์ วานิชชัง, & ศรีสกุล แก้วกระจ่าง (2555). การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่อบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์. วารสารวิจัย มสด สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 5(2), 27-36.

- งามชื่น คงเสรี. (2551). ผลิตภัณฑ์ข้าว ผลิตภัณฑ์อาหาร *Food Products* (พิมพ์ครั้งที่ 5). นนทบุรี: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
- จิรารัตน์ ทัดติยกุล. (2554). วิทยากระแสนของอาหาร (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐกานต์ นวเศรษฐวิสูตร. (2547). การทำนายคุณภาพข้าวเจ้าของไทยด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธัญญารัตน์ เตชทรัพย์อมร. (2549). ผลของการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน และอุณหภูมิในการเก็บต่อปริมาณสารหอม 2-อะเซทิล-1-ฟีโรลีน และคุณภาพการสีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 *Oryza sativa* L. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิรสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูโซนาค, มุस्ताฟา ยะกา, & ประชา บุญยวานิชกุล. (2557). การทบทวนพัฒนาการของการลดความชื้นข้าวเปลือกในทางอุตสาหกรรม. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 9(1), 68-74.
- ศิริพร ริพล. (2551). การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวโดยเนียร์อินฟราเรดรีเฟลกแทนซ์สเปกโตรสโกปี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2558a). ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร ข้าวนาปรัง. ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.oae.go.th/download/prcai/DryCrop/secondrice56/3.pdf> [25 พฤษภาคม 2558].

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2558b). ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร ข้าวนาปี. [ออนไลน์]
แหล่งที่มา : <http://www.oae.go.th/download/prcai/DryCrop/majorrice2556-57/3.pdf> [25 พฤษภาคม 2558].

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. (2555). มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ.4004-2555 ข้าว. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.acfs.go.th/standard/download/RICE-1.pdf> [23 เมษายน 2556].

สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว. (2556). พันธุ์ข้าว. [ออนไลน์] แหล่งที่มา:
<http://www.brrd.in.th/rkb/varieties/index.php.htm> [18 มีนาคม 2556].

สุวรรณษา ทองหุ่ย, & ถวัลย์ศักดิ์ เผ่าสังข์. (2557). ความแกร่งที่เหมาะสมกับคุณภาพการสีข้าวไทย.
วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, 45(2 (พิเศษ)), 629-632.

อรอนงค์ นัยวิกุล. (2550). ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร:
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์คุณภาพการสี (มกษ. 4004-2555)

วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องกะเทาะเปลือกแบบ 3 ลูกกลิ้ง (อุสินทวี ลพบุรี ประเทศไทย)
2. เครื่องขัดขาวข้าว (อุสินทวี ลพบุรี ประเทศไทย)
3. เครื่องคัดแยกข้าวหัก (อุสินทวี ลพบุรี ประเทศไทย)
4. เครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่ง (Mettler Toledo, MS1602S, Switzerland)

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งข้าวเปลือก 125 กรัม และนำกะเทาะข้าวเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะ
2. นำข้าวกล้องที่ได้ไปขัดขาวด้วยเครื่องขัดขาวข้าว นาน 20 วินาที
3. คัดแยกข้าวหักและข้าวตันออกจากกันด้วยเครื่องคัดแยกข้าวหัก และตรวจสอบซ้ำอีกครั้ง ภายหลังจากตัวอย่างผ่านเครื่องคัดแยกข้าวหักแล้ว บันทึกน้ำหนักข้าวตันที่ได้ โดยข้าวตันคือ เมล็ดข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 8 ใน 10 ส่วนของเมล็ดขึ้นไป
4. คำนวณปริมาณร้อยละของข้าวตันตามสมการที่ ก.1

$$\text{ร้อยละของข้าวตัน} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวตัน}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \dots \text{ก.1}$$

ภาคผนวก ข
วิธีวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

ข.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นด้วยวิธีการใช้ตู้อบลมร้อน (ดัดแปลงจากวิธีของ AOAC (2005))

วัสดุอุปกรณ์

1. ถ้วยอะลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น
2. Desiccator
3. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven, WTB Binder รุ่น E53, Germany)
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Mettler Toledo, AB204, Switzerland)

วิธีวิเคราะห์

1. นำถ้วยอะลูมิเนียมสำหรับหาความชื้นไปอบที่อุณหภูมิ 105 ± 3 °C นาน 1 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่ แล้วทิ้งให้เย็นใน desiccator จากนั้นชั่งน้ำหนักถ้วยอะลูมิเนียม
2. ชั่งตัวอย่างให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอนด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่งประมาณ 3 กรัม ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน (จากข้อ 1)
3. อบตัวอย่างในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 ± 3 °C นาน 8 ชั่วโมง
4. นำตัวอย่างออกจากตู้อบ แล้วใส่ใน desiccator ทิ้งไว้ให้เย็น
5. ชั่งน้ำหนักภาชนะอะลูมิเนียมพร้อมตัวอย่าง
6. นำไปอบต่อจนน้ำหนักคงที่ (± 0.0005)
7. คำนวณปริมาณความชื้นตามสมการ ข.1

$$\text{ปริมาณความชื้น (\% wet basis)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)}} \times 100 \dots \text{ข.1}$$

ข.2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี Kjeldahl method (AOAC, 2005)

วัสดุอุปกรณ์

1. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 41
2. หลอด Kjeldahl สำหรับใส่ตัวอย่าง (Buchi, Switzerland)
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Mettler Toledo, AB204, Switzerland)
4. เครื่องย่อยโปรตีน (Buchi, K-424, Switzerland)
5. เครื่องดักไอกรด (Buchi, B-414, Switzerland)
6. เครื่องกลั่นไนโตรเจน (Buchi, B-324, Switzerland)

สารเคมี

1. Selenium mixture (Merck, Germany)
2. Sulphuric acid 98% (QRëC®, New Zealand)
3. Sodium hydroxide (QRëC®, New Zealand)
4. Boric acid (Univar, Ajax Finechem, Australia)
5. Hydrochloric acid 37% (QRëC®, New Zealand)
6. สารละลายอินดิเคเตอร์ methyl red-methylene blue

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 1 กรัม ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 41 และใส่ลงในหลอดย่อยตัวอย่าง และทำ blank โดยใช้ น้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร แทนตัวอย่าง
2. เติม selenium mixture 5 กรัม และ sulphuric acid 20 มิลลิลิตร ลงในหลอดย่อยตัวอย่าง ที่มีตัวอย่างอยู่
3. นำไปย่อยจนตัวอย่างในหลอดถูกย่อยหมดหรือจนได้สารละลายสีน้ำตาลแดง (ประมาณ 1 ชั่วโมง)

4. ปลอ่ยให้ตัวอย่างที่ย่อยเสร็จแล้วเย็น และต่อเข้ากับเครื่องกลั่นไนโตรเจน รองรับสารที่กลั่นด้วยสารละลาย boric acid เข้มข้น 4% (w/v) ปริมาตร 50 มิลลิลิตรที่เติมสารละลายอินดิเคเตอร์ 2 หยด กำหนดภาวะการกลั่น ดังนี้

- น้ำกลั่น: 50 มิลลิลิตร
- 50% NaOH: 60 มิลลิลิตร
- เวลาในการกลั่น: 5 นาที
- ไอน้ำ: 100%

5. นำสารละลายในขวดรองรับมาไตเตรทด้วย 0.1 N HCl จนกระทั่งถึงจุดยุติได้สารละลายสีม่วงแดง นำปริมาตรสารละลาย HCl ที่ใช้ในการไตเตรทไปคำนวณปริมาณไนโตรเจนดังแสดงในสมการ ข. 2 และนำไปคำนวณปริมาณโปรตีน ดังแสดงในสมการ ข.3

$$\text{ปริมาณไนโตรเจน (\% wet basis)} = \frac{(V-B) \times N \times 1.4}{W} \dots\dots\dots \text{ข.2}$$

โดย V คือ ปริมาตรของสารละลาย HCl ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่างเป็นมิลลิลิตร

B คือ ปริมาตรของสารละลาย HCl ที่ใช้ในการไตเตรท blank เป็นมิลลิลิตร

N คือ ความเข้มข้นที่แน่นอนของของสารละลาย HCl เป็นนอร์มอล

W คือ น้ำหนักตัวอย่างเป็นกรัม

$$\text{ปริมาณโปรตีน (\% wet basis)} = \text{ปริมาณไนโตรเจน (\%)} \times 5.95 \dots\dots\dots \text{ข.3}$$

โดย 5.95 คือ แฟกเตอร์การคูณเป็นร้อยละของโปรตีนข้าว

ข.3 การวิเคราะห์ปริมาณไขมันตัดแปลงจากวิธีของ AOAC (2005)

วัสดุอุปกรณ์

1. Extraction thimbles
2. Desiccator
3. กระดาษกรอง (Whatman No.1)

4. Soxhlet
5. Rotary evaporator
6. ตู้อบลมร้อน

สารเคมี

Petroleum ether (QRëC®, New Zealand)

วิธีวิเคราะห์

1. นำขวดกันแบนไปอบที่อุณหภูมิ 105 ± 3 °C นาน 1 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่ แล้วทิ้งให้เย็นใน desiccator จากนั้นชั่งน้ำหนักขวดกันแบน
2. ชั่งตัวอย่างที่อบไล่ความชื้นแล้วให้มีน้ำหนักแน่นอน 5 กรัมแล้วห่อด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 ใส่ใน thimble แล้วใส่ลงในชุดสกัดไขมัน เติม petroleum ether 250 มิลลิลิตรลงใน Soxhlet apparatus
3. สกัดไขมันเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
4. นำขวดกันแบนออกจาก Soxhlet apparatus ระเหย petroleum ether ในขวดกันแบนออกด้วยเครื่อง rotary evaporator
5. นำขวดกันแบนที่มีน้ำมันไปอบที่ 105 ± 3 °C นาน 1 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่
6. ทิ้งให้เย็นใน desiccator
7. ชั่งน้ำหนักขวดกันแบนที่มีน้ำมันอยู่ แล้วคำนวณหาปริมาณไขมันดังแสดงในสมการ ข.4

$$\text{ปริมาณไขมัน (\% dry basis)} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำมันที่สกัดได้}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}} \times 100 \dots\dots\dots\text{ข.4}$$

ข.4 การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยหยาบ (AOAC, 2005)

วัสดุอุปกรณ์

1. Büchner funnel
2. Crucible
3. Desiccator
4. ตู้อบลมร้อน
5. เตาเผา
6. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
7. กระดาษกรอง (Whatman No. 1 และ 42)

สารเคมี

1. Sulphuric acid 98%
2. Sodium hydroxide
3. 95% Ethanol

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างแบ่งข้าวที่ผ่านการสกัดไขมันแล้ว 3 กรัม (W1) ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลาย sulphuric acid ความเข้มข้น 1.25% ปริมาตร 200 มิลลิลิตร และนำไปต้มให้เดือดนาน 30 นาที รักษาปริมาตรสารละลายให้คงที่โดยการเติมน้ำร้อนลงไปเพิ่ม
3. กรองสารในข้อ 2 โดยใช้ Büchner funnel และกระดาษกรอง Whatman No. 1 และล้างกากที่กรองได้ด้วยน้ำร้อนจนกระทั่งแน่ใจว่าไม่มีกรดเหลืออยู่ในกาก
4. เทกากที่ได้กลับลงไปบีกเกอร์เติม และเติมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 1.25% ปริมาตร 200 มิลลิลิตรนำไปต้มให้เดือดนาน 30 นาที รักษาปริมาตรสารละลายให้คงที่โดยการเติมน้ำร้อนลงไปเพิ่ม

5. กรองสารในข้อ 4 โดยใช้ Büchner funnel และกระดาษกรอง Whatman No. 42 ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน และล้างกากที่กรองได้ด้วยน้ำร้อนจนกระทั่งแน่ใจว่าไม่มีด่างเหลืออยู่ในกาก
6. ล้างกากที่เหลืออยู่ด้วย Ethanol 95 % ครั้งละ 25 มิลลิลิตร 2 ครั้ง
7. นำกระดาษกรองที่มีกากติดอยู่ใส่ลงใน crucible ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน (ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนจนกระทั่งได้น้ำหนักที่คงที่) (W₂)
8. นำ crucible ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 °C จนกระทั่งเถ้าที่ได้เป็นสีขาว นำออกมาทิ้งให้เย็นใน desiccator และชั่งน้ำหนัก (W₃)
9. คำนวณปริมาณเถ้าดังแสดงในสมการ ข.5

$$\text{ปริมาณเส้นใยหยาบ (\% dry basis)} = \frac{W_2 - W_3}{W_1} \times 100 \dots \text{ข.5}$$

ข.5 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (AOAC, 2005)

วัสดุอุปกรณ์

1. Crucible
2. Desiccator
3. Hot plate
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Mettler Toledo, AB204, Switzerland)
5. เตาเผา (Fisher Scientific, Isotemp, USA)

วิธีวิเคราะห์

1. นำ crucible ไปเผาที่อุณหภูมิ 550°C จนน้ำหนักคงที่ ทิ้งให้เย็นใน Desiccator แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่าง 3 กรัมใส่ใน crucible
3. นำตัวอย่างไปเผาด้วย hot plate ในตู้ควันจนหมดควันแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550°C จนน้ำหนักคงที่ได้เถ้าสีขาว

4. นำตัวอย่างออกมาทิ้งให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก
5. คำนวณปริมาณเถ้าตามสมการที่ ข.6

$$\text{ปริมาณเถ้า (\% wet basis)} = \frac{\text{น้ำหนักเถ้า}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}} \times 100 \dots\dots\dots\text{ข.6}$$

ข.6 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต

วิธีการคำนวณ

คำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยคำนวณตามสมการที่ ข.7

$$\text{ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (\%db)} = 100 - \% (\text{โปรตีน} + \text{ไขมัน} + \text{ใยอาหารหยาบ} + \text{เถ้า}) \dots\dots\text{ข.7}$$

ข.7 การศึกษารูปแบบของโปรตีนสกัดจากข้าวโดยวิธีการแยกด้วยกระแสไฟฟ้าบนเจล พอลิอะคริลาไมด์ที่มี sodium dodecyl sulfate เป็นส่วนประกอบ (sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE) แบบ 1 มิติ ตัดแปลงจากวิธีของ Laemmli (1970) และ lida และคณะ (1993)

วัสดุอุปกรณ์

1. อุปกรณ์ OmniPAGE Electrophoresis (Cleaver Scientific Ltd, CVS10DSYS, UK)
2. Power supply (Major Science, MS300V, USA)
3. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Eppendorf, MiniSpin plus, Germany)
4. Gel documentation (Syngene, InGeniusL, UK)

สารเคมี

1. Perfect Protein™ Markers, 10-225 kDa (Navogen®, Merck Millipore, USA)
2. Acrylamide (Fluka, Sigma-Aldrich Co. LLC., Switzerland)
3. N,N'-Methylenebisacrylamide (Fluka, Sigma-Aldrich Co. LLC., Switzerland)
4. Tris (Hydroxylmethyl) aminomethane (Tris-base) (CARLO ERBA Reagents, France)
5. Sodium dodecyl sulfate (SDS) (APS, Ajax Finechem, Australia)
6. Ammonium persulfate (APS) (OmniPur®, Merck Millipore, USA)

7. N,N,N',N'-Tetramethyl ethylenediamine (TEMED) (OmniPur®, Merck Millipore, USA)
8. Hydrochloric acid 37% (QRëC®, New Zealand)
9. Urea (Unilab, Ajax Finechem, Australia)
10. Glycerol (Univar, Ajax Finechem, Australia)
11. Glycine (Research Organics, USA)
12. Glacial Acetic acid (QRëC®, New Zealand)
13. 95% Ethanol
14. 1-Butanol (AnalR®, VWR International Ltd., UK)
15. Coomassie brilliant blue R-250 (Imperial Chemical Industries PLC, Merck Millipore, Germany)
16. Bromophenol Blue sodium salt (OmniPur®, Merck Millipore, USA)

วิธีการวิเคราะห์

- ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง
 1. เตรียม SDS-urea solution และ sample buffer โดยผสมสารตามตารางที่ ข. และปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ด้วย 50 mM Tris-base, pH 6.8
 2. ชั่งน้ำหนักแป้ง 40 มิลลิกรัม ใส่ลงในหลอด eppendorf ขนาด 1.5 มิลลิลิตร และเติม SDS-urea solution 700 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันโดย vortex นาน 1 นาที และทิ้งไว้ข้ามคืนที่อุณหภูมิห้อง เพื่อละลายโปรตีนในตัวอย่าง
 3. ปั่นเหวี่ยงตัวอย่างที่ 7000 x g นาน 5 นาที
 4. ปิเปตส่วนน้ำใส 200 ไมโครลิตรผสมกับ sample buffer 200 ไมโครลิตรที่อยู่ใน eppendorf หลอดใหม่ และผสมให้เข้ากันด้วย vortex

ตารางที่ ข.1 ส่วนประกอบ SDS-urea solution และ sample buffer

ส่วนประกอบ	SDS-urea solution	Sample buffer
	(8 m Urea, 4% SDS, 20% Glycerol and 50 mm Tris-base, pH 6.8)	(8 m Urea, 4% SDS, 20% Glycerol and 50 mm Tris-base, pH 6.8)
Urea	48.05 กรัม	48.05 กรัม
SDS	4.00 กรัม	4.00 กรัม
Glycerol	20.00 กรัม	20.00 กรัม
1% Bromophenol blue	-	2.00 มิลลิลิตร
ปริมาตรสุดท้าย	100 มิลลิลิตร	100 มิลลิลิตร

— ขั้นตอนการเตรียมเจล

1. ประกอบชุดเครื่องมือสำหรับเตรียมเจลเข้าด้วยกัน
2. เตรียมสารละลาย separating gel (แสดงในตารางที่ ข.2) โดยผสมทุกอย่างเข้าด้วยกัน ยกเว้น APS และ TEMED ที่จะเติมก่อนขึ้นรูปเจล
3. เติม APS และ TEMED และผสมให้เข้ากันโดยที่คนเบาๆ และปิเปตลงไประหว่างกระจกทั้ง 2 แผ่น (เจล 1 แผ่นใช้สารละลาย 5.6 มิลลิลิตร) และปิดทับผิวหน้าด้วย 1-butanol ปล่อยให้เจลเกิดพอลิเมอร์เซชันนาน 40 นาที
4. เท 1-butanol ออก และล้างผิวหน้าของเจลด้วยน้ำกลั่น
5. เตรียมสารละลาย stacking gel (ดังแสดงในตารางที่ ข.2) โดยผสมทุกอย่างเข้าด้วยกัน ยกเว้น APS และ TEMED ที่จะเติมก่อนขึ้นรูปเจล
6. เติม APS และ TEMED และผสมให้เข้ากันโดยที่คนเบาๆ และปิเปตลงไประหว่างกระจกทั้ง 2 แผ่น (เจล 1 แผ่นใช้สารละลาย 1 มิลลิลิตร) ประกอบส่วน comb และปล่อยให้เจลเกิดพอลิเมอร์เซชันอีกนาน 2 ชั่วโมง 20 นาที
7. เมื่อครบเวลาถอดฐานของชุดเครื่องมือออกและนำไปใส่ลงใน tank และเติม electrode running gel buffer gel (แสดงในตารางที่ ข.3) ให้ท่วมด้านล่างและด้านบนของ gel

ตารางที่ ข.2 ส่วนประกอบของ separating gel และ stacking gel

ส่วนประกอบ	Separating gel	Stacking gel
น้ำกลั่น	8.02 มิลลิลิตร	6.1 มิลลิลิตร
1.5 M Tris-base pH 8.8	5.00 มิลลิลิตร	-
0.5 m Tris-base pH 6.8	-	2.50 มิลลิลิตร
10% SDS	200 ไมโครลิตร	100 ไมโครลิตร
Acrylamide solution (30% T, 2.67% C)	6.67 มิลลิลิตร	1.33 มิลลิลิตร
10% APS	100 ไมโครลิตร	50 ไมโครลิตร
TEMED	10 ไมโครลิตร	5 ไมโครลิตร
ปริมาตรรวม	20 มิลลิลิตร	10 มิลลิลิตร

%T หมายถึง total solids content, %C หมายถึง cross-linker acrylamide monomer

ตารางที่ ข.3 ส่วนประกอบของ electrode running gel buffer

ส่วนประกอบ	ปริมาณ
น้ำกลั่น	1 ลิตร
Tris-base	3.02 กรัม
SDS	1.00 กรัม
Glycine	14.40 กรัม

- ขั้นตอนการแยกด้วยกระแสไฟฟ้า
- 1. ฉีด protein marker 5 ไมโครลิตร ลงใน well แรกของแผ่นเจล และฉีดสารละลายโปรตีนตัวอย่าง 5 ไมโครลิตร ลงใน well อื่นๆ
- 2. เริ่มแยกด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้ความต่างศักย์ 300 V และกระแสไฟฟ้า 20 mA/เจล 1 แผ่น
- 3. หยุดการแยกเมื่อสีของ bromophenol blue เคลื่อนที่ลงมาเกือบสุดแผ่นเจล
- 4. แกะแผ่นเจลออกจากกระดาษ ล้างด้วยน้ำกลั่นและนำไปย้อมสีเจล

- ขั้นตอนการย้อมสีเจล
 1. ย้อมสีเจลด้วย staining solution (แสดงในตารางที่ ข.4) นาน 1 ชั่วโมง
 2. เท staining solution ออก และล้างเจลด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง
 3. ล้างสีย้อมออกด้วย destaining solution (แสดงในตารางที่ ข.4) นานครึ่งชั่วโมง และเปลี่ยน destaining solution อีก 1 ครั้ง
 4. เท destaining solution ออก และล้างเจลด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง
 5. แخذเจลในน้ำกลั่นข้ามคืนก่อนนำไปบันทึกภาพเจลและคำนวณน้ำหนักโมเลกุลโปรตีนด้วย gel documentation systems (Syngene, InGeniusL, UK)

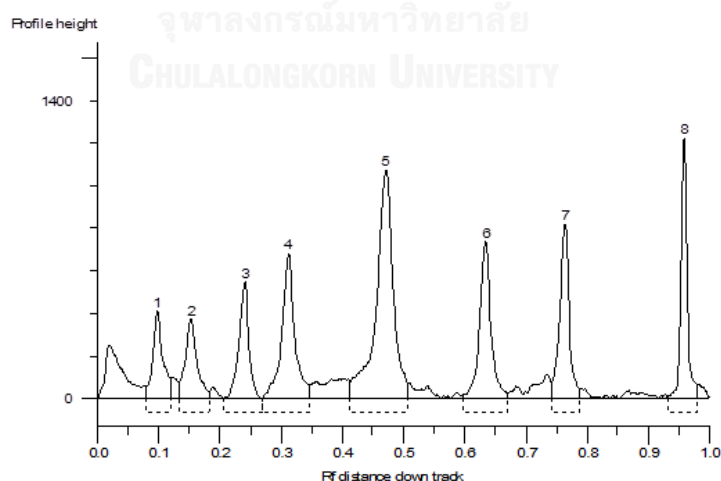
ตารางที่ ข.4 ส่วนประกอบของ staining solution และ destaining solution

ส่วนประกอบ	Staining solution	Destaining solution
น้ำกลั่น	400 มิลลิลิตร	650 มิลลิลิตร
Coomassie Brilliant Blue R-250	1.0 กรัม	-
95% Ethanol	500 มิลลิลิตร	250 มิลลิลิตร
Glacial acetic acid	100 มิลลิลิตร	100 มิลลิลิตร
ปริมาตรรวม	1000 มิลลิลิตร	1000 มิลลิลิตร

- ขั้นตอนการบันทึกภาพเจลและคำนวณน้ำหนักโมเลกุลโปรตีน
 1. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่อง gel documentation systems และเปิดโปรแกรม GeneSnap
 2. นำแผ่นเจลที่ผ่านการย้อมสีเจลแล้ววางบนแผ่น conversion screen (เปลี่ยนแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นแสงขาว) ที่วางอยู่บนแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต
 3. กดปุ่ม automatic exposure
 4. ปรับแต่งความชัดของรูปภาพเพิ่มเติมและบันทึกรูปภาพ

5. วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลโปรตีนโดยใช้โปรแกรม GeneTools
6. เปิดภาพเจลที่ต้องการวิเคราะห์ เลือกชนิดของการวิเคราะห์เป็นแบบ “gel” และกำหนดทิศทางของการแยกด้วยกระแสไฟฟ้า
7. ระบุคอลัมน์ที่เป็น protein marker เลือกแถบที่เป็นแถบของโปรตีนทั้งหมด กด Assign from standard โปรแกรมจะจับคู่แถบ protein marker และน้ำหนักโมเลกุลพร้อมกับแสดง calibration curve
8. เลือกคอลัมน์ที่เป็นโปรตีนตัวอย่างที่ต้องการทราบน้ำหนักโมเลกุล และเลือกแถบโปรตีนที่ปรากฏอยู่ทั้งหมดเพื่อคำนวณน้ำหนักโมเลกุล
9. บันทึกผลโดยส่งออกข้อมูลไปยังโปรแกรม Microsoft Word ข้อมูลที่ได้ของแถบโปรตีนแต่ละแถบประกอบด้วยน้ำหนักโมเลกุล ความสูงของ peak และพื้นที่ภายใต้ peak (รูปที่ ข.1) ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของแถบโปรตีนแต่ละแถบ
10. นำข้อมูลพื้นที่ภายใต้ peak ภายใน lane เดียวกันมาคำนวณสัดส่วนของโปรตีนในแต่ละแถบของตัวอย่างนั้นๆ ตามสมการที่ ข.8

$$\text{Relative peak area (\%)} = \frac{\text{peak area ของแถบโปรตีน}}{\text{peak area รวมภายใน lane}} \times 100 \dots \text{ข.8}$$



รูปที่ ข.1 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม GeneTools

ภาคผนวก ค
วิธีวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

ค.1 การวิเคราะห์คุณภาพการหุงต้ม ตัดแปลงจากวิธีของ Singh และคณะ (2005)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Mettler Toledo, AB204, Switzerland)
2. ถ้วยอลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น
3. Desiccator
4. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven, WTB Binder, E53, Germany)
5. Absolute digimatic caliper (Mitutoyo, model CD-6" CSX, Japan)
6. กระจกสไลด์

วิธีการวิเคราะห์

- ระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการหุงต้ม (minimum cooking time)
 1. ชั่งน้ำหนักข้าวต้น 1 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลองที่มีน้ำกลั่นอยู่ 10 มิลลิลิตร
 2. นำตัวอย่างไปให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C
 3. สุ่มตัวอย่างข้าวออกมาทุกๆ 1 นาที แล้วกดด้วยกระจกสไลด์ ระยะเวลาที่เหมาะสมในการหุงต้มหมายถึงระยะเวลาหุงต้มที่ให้เมล็ดข้าวสุกที่ไม่มีส่วนขาวขุ่นตรงกลางเมล็ดเมื่อกดข้าวด้วยกระจก
- ปริมาณน้ำที่ดูดซับขณะหุงต้ม (water uptake) และปริมาณของแข็งที่สูญเสียขณะหุงต้ม (solid loss)
 1. ชั่งน้ำหนักข้าวต้น 1 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลองที่มีน้ำกลั่นอยู่ 10 มิลลิลิตร
 2. นำตัวอย่างไปให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C โดยใช้ระยะเวลาการให้ความร้อนเท่ากับระยะเวลาที่เหมาะสมในการหุงต้ม

2.1 ตัวอย่างน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการหุงต้ม

2.2.1 รินน้ำส่วนเกินออกใส่ถ้วยอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้วนำไปอบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 110 ± 3 °C นาน 4 ชั่วโมง

2.2.2 นำตัวอย่างออกจากตู้อบ แล้วใส่ใน desiccator ทิ้งไว้ให้เย็น ชั่งน้ำหนักภาชนะอลูมิเนียมพร้อมตัวอย่าง

2.2.3 คำนวณปริมาณของแข็งที่สูญเสียขณะหุงต้มตามสมการที่ ค.1

$$\text{ปริมาณของแข็งที่สูญเสียขณะหุงต้ม (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของแข็ง}}{\text{น้ำหนักข้าวสาร}} \times 100 \dots\dots \text{ค.1}$$

2.2 ตัวอย่างข้าวสุก

2.2.1 ชั่งน้ำส่วนเกินที่ติดอยู่ที่ผิวข้าวออก และชั่งน้ำหนักข้าวสุก

2.2.2 คำนวณปริมาณน้ำที่ดูดซับขณะหุงต้มตามสมการที่ ค.2

$$\text{ปริมาณน้ำที่ดูดซับขณะหุงต้ม (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวสุก} - \text{น้ำหนักข้าวสาร}}{\text{น้ำหนักข้าวสาร}} \times 100 \dots\dots \text{ค.2}$$

— การขยายปริมาตรของข้าวสุก (volume expansion)

1. ชั่งน้ำหนักข้าวต้น 1 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลองที่มีน้ำกลั่นอยู่ 10 มิลลิลิตร
2. วัดความสูงของข้าวสารในหลอดทดลอง
3. นำตัวอย่างไปให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C โดยใช้ระยะเวลาการให้ความร้อนเท่ากับระยะเวลาที่เหมาะสมในการหุงต้ม
4. วัดความสูงของข้าวสุกในหลอดทดลอง และคำนวณการขยายปริมาตรของข้าวสุกตามสมการที่ ค.3

$$\text{การขยายปริมาตรของข้าวสุก} = \frac{\text{ความสูงของข้าวสุกในหลอดทดลอง}}{\text{ความสูงของข้าวสารในหลอดทดลอง}} \dots\dots \text{ค.3}$$

- อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของข้าวสุก (length breath ratio) และการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก (elongation ratio)
 1. วัดความยาวของเมล็ดข้าวสาร 10 เมล็ด
 2. วัดความยาวและความกว้างของข้าวสุก 10 เมล็ด
 3. คำนวณอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของข้าวสุกและการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุกตามสมการที่ ค.4 และ 4.5 ตามลำดับ

$$\text{อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของข้าวสุก} = \frac{\text{ความยาวเฉลี่ยของข้าวสุก}}{\text{ความกว้างเฉลี่ยของข้าวสุก}} \dots\dots\dots\text{ค.4}$$

$$\text{การยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก} = \frac{\text{ความยาวเฉลี่ยของข้าวสุก}}{\text{ความยาวเฉลี่ยของข้าวสาร}} \dots\dots\dots\text{ค.5}$$

ค.2 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Technologist Corp., TA-XT plus, UK)
2. หัววัด P/100

วิธีการเตรียมตัวอย่างข้าวสุก

1. คำนวณปริมาณน้ำสำหรับใช้หุงข้าวโดยคำนวณจากปริมาณน้ำที่ดูดซับขณะหุงต้ม สำหรับข้าวสาร 20 กรัม
2. เทข้าวและน้ำใส่ถ้วยอะลูมิเนียม และนำไปให้ความร้อนด้วยการนึ่ง
3. นึ่งข้าวเป็นระยะเวลานานเท่ากับระยะเวลาที่เหมาะสมในการหุงต้ม
4. เมื่อครบระยะเวลาการให้ความร้อน นำถ้วยที่มีข้าวสุกอยู่ไปเก็บในกล่องพลาสติก นาน 10 นาที และคลุกข้าวให้เข้ากัน และเก็บไว้ในกล่องอีกนาน 20 นาที
5. แบ่งข้าวเพื่อนำไปวิเคราะห์เนื้อสัมผัสครั้งละ 1 กรัม

วิธีการวิเคราะห์

1. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส และเข้าโปรแกรม Exponent ก่อนการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสทุกครั้ง calibrate force โดยใช้ลูกตุ้มหนัก 1 กิโลกรัม และ calibrate height ที่ 30 มิลลิเมตร ประกอบหัววัดเข้ากับเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส
2. วิเคราะห์เนื้อสัมผัสโดยใช้ texture profile analysis (TPA) ตั้งค่าการวิเคราะห์ดังนี้

Mode: measure force in compression

Test speed: 1.0 mm/sec

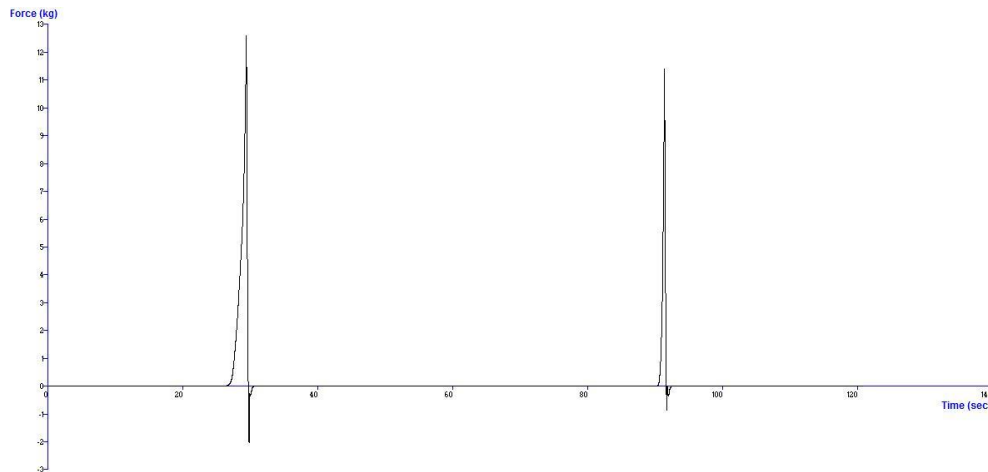
Post test speed: 5.0 mm/sec

Distance: 29.5 mm

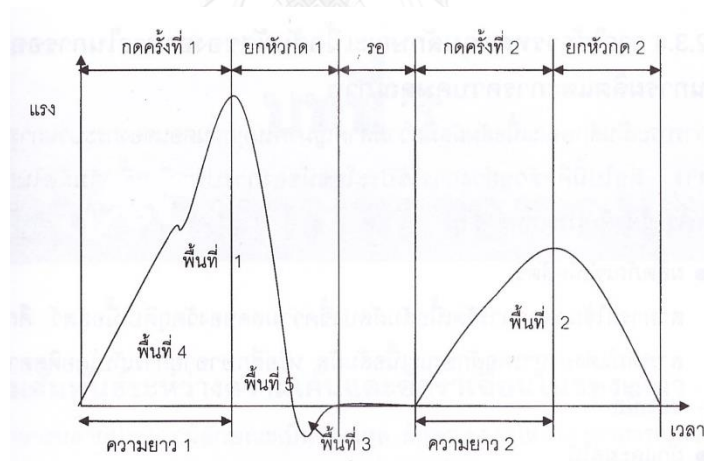
Holding time between cycle: 3 sec

3. เรียงตัวอย่างข้าวสุก 1 กรัม เป็นชั้นเดียวบนแท่นวางตัวอย่าง
4. เริ่มการวิเคราะห์ค่าทางเนื้อสัมผัส (ตัวอย่างกราฟที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสดังแสดงในรูปที่ ค.1) บันทึกค่า Hardness, Cohesiveness, Adhesiveness, Springiness, Gumminess, Chewiness และ Resilience ดังนี้
 - Hardness คือค่าแรงสูงสุดที่ได้จากการกดตัวอย่างครั้งแรก
 - Cohesiveness คืออัตราส่วนพื้นที่ที่ได้จากการกดครั้งที่ 2 ต่อพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการกดครั้งแรก (พื้นที่ 2/พื้นที่ 1 รูปที่ ค.2)
 - Adhesiveness คืองานที่ใช้ในการถอนหัววัดออกจากตัวอย่างของการกดครั้งแรก (พื้นที่ 3 รูปที่ ค.2)
 - Springiness คือความสูงของตัวอย่างที่คืนกลับมาในช่วงเวลาหลังจากสิ้นสุดการกดครั้งที่ 1 และก่อนการกดครั้งที่ 2 (ความยาว 2/ความยาว 1 รูปที่ ค.2)
 - Gumminess คือ Hardness x Cohesiveness
 - Chewiness คือ Gumminess x Springiness

- Resilience คือความสามารถในการคงรูปร่างและคืนตัวหลังจากได้รับแรงกระทำ (พื้นที่ 5/ พื้นที่ 4 รูปที่ ค.2)



รูปที่ ค.1 กราฟที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส



รูปที่ ค.2 ค่าต่างๆ ที่ได้จากการวัดเนื้อสัมผัสแบบ texture profile analysis

ที่มา ดัดแปลงจากจิรารัตน์ ทัตติยกุล (2554)

ค.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขมะร้อนและเย็น ตามวิธีของ AACC (2000) หมายเลข 61-02.01

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวิเคราะห์ความหนืดของเพสต์ขมะร้อนและเย็น (Newport Scientific Instrument & Engineer, RVA-4, Australia)
2. ถ้วยทรงกระบอกอลูมิเนียมและใบพัด

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างแป้งข้าวให้ได้น้ำหนักแบ่ง 3 กรัม ลงบนกระดาษชั่งสาร และชั่งน้ำกลั่นในถ้วยทรงกระบอกอลูมิเนียมให้ได้ 25 กรัม
2. เมื่อพร้อมวิเคราะห์ เทตัวอย่างแป้งลงน้ำและใช้ใบพัดค่อยๆ ตีหรือกวนผสมตัวอย่าง
3. นำถ้วยทรงกระบอกพร้อมใบพัดใส่เข้ากับเครื่องและเริ่มวิเคราะห์โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ ค.1 โดยโปรแกรมสามารถบันทึกค่าต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้โดยอัตโนมัติ ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature), ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity), ค่าความหนืดที่ลดลง (breakdown; ค่าผลต่างของค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด), ค่าการคืนตัว (setback; ค่าผลต่างค่าความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด) และค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity)

ตารางที่ ค.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสต์ขมะร้อนและเย็น

ขั้นตอน	อุณหภูมิ (°C)	อัตราเร็ว (RPM)	ระยะเวลา (นาที : วินาที)
1	50	-	0 : 00
2	50	960	0 : 00
3	50	160	0 : 00
4	50	160	1 : 00
5	95	160	4 : 42
6	95	160	7 : 12
7	50	160	11 : 00
สิ้นสุดการทดสอบ			13 : 00

ค.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับเจลาตินในเซชันและสารเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน

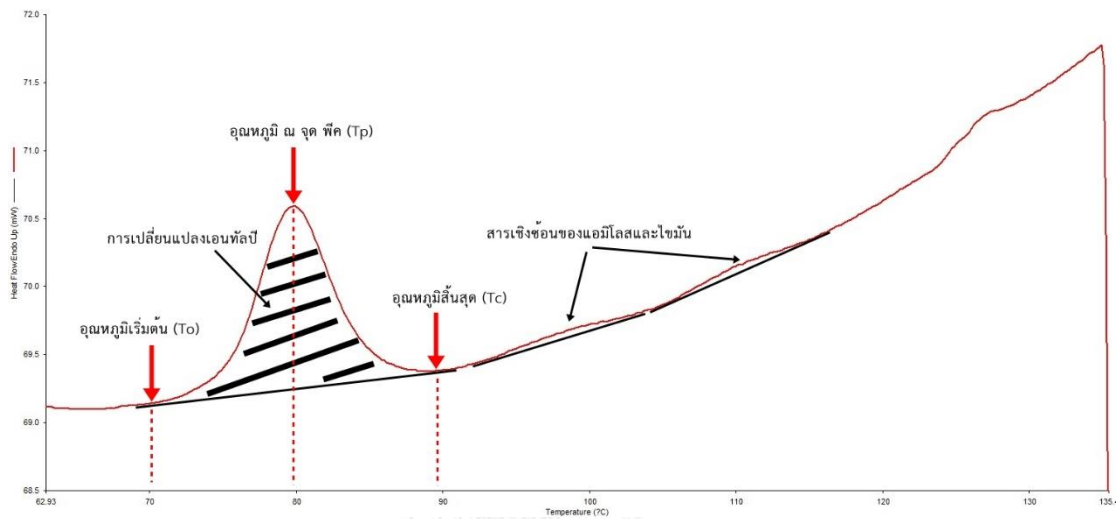
เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) (Perkin-Elmer Co., Diamond, Norwalk, USA) ต่อเข้ากับเครื่อง intracooler unit (Perkin-Elmer, 2P, USA) ใช้แก๊สไนโตรเจน (99.99%) เป็น purge gas ที่อัตราการไหล 20 ml/นาที
2. DSC stainless steel pan และ O-Rings

วิธีการวิเคราะห์

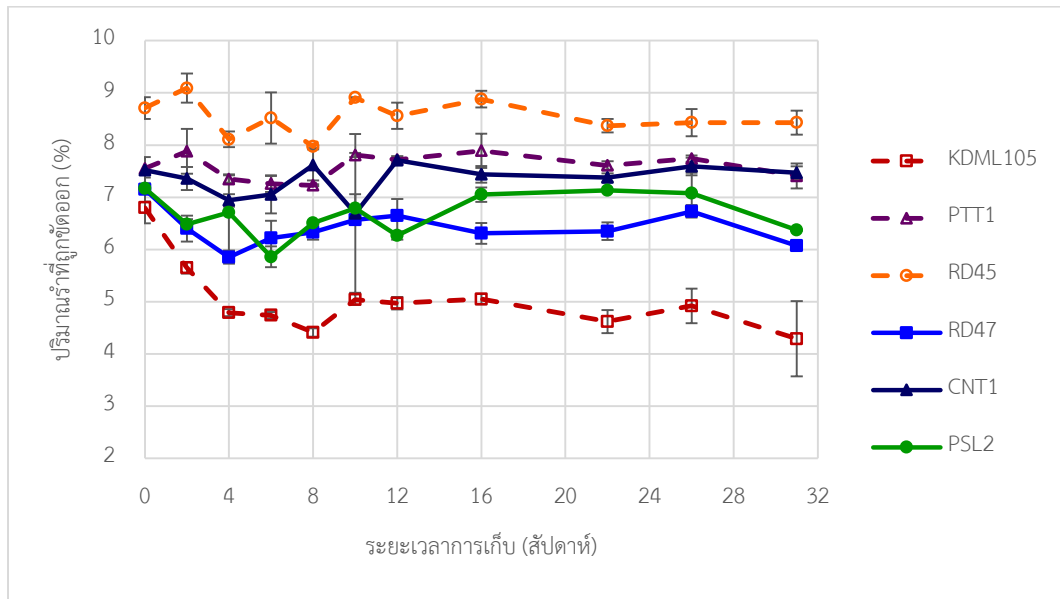
1. ชั่งตัวอย่างแบ่งให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 4 มิลลิกรัม ลงใน stainless steel pan จากนั้นปิดฝา pan น้ำหนัก 12 ไมโครลิตรใส่ลงไปใน pan ดังกล่าว
2. ปิดฝา pan และเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 คืน ก่อนนำมาวิเคราะห์ และใช้ stainless steel pan เปล่าเป็นตัวอ้างอิง และมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้
 - ขั้นตอนที่ 1: คงอุณหภูมิไว้ที่ 30 °C นาน 1 นาที
 - ขั้นตอนที่ 2: ให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 30 °C ถึง 135 °C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/นาที
 - ขั้นตอนที่ 3: คงอุณหภูมิไว้ที่ 135 °C นาน 1 นาที
3. บันทึกค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากเครื่อง DSC ตามตัวอย่าง thermogram ในรูปที่ ค.3 ดังนี้
 - T_0 คืออุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลาตินในเซชันหรืออุณหภูมิเริ่มต้นการหลอมสารเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน พิจารณาจากค่าอุณหภูมิที่ทำให้ heat flow เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น
 - T_p คืออุณหภูมิ ณ จุดพีค (ระบุโดย Pyris™ software version 11)
 - T_c คืออุณหภูมิสิ้นสุดในการเกิดเจลาตินในเซชันหรืออุณหภูมิสิ้นสุดการหลอมสารเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน พิจารณาจากค่าอุณหภูมิที่ทำให้ heat flow มีค่าลดลงจนกลับสู่ base line

- ΔH คือพลังงานที่ใช้ในการเกิดการเกิดเจลลาติไนเซชันหรือพลังงานที่ใช้ในการหลอมสารเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟ โดย Pyris™ software version 11

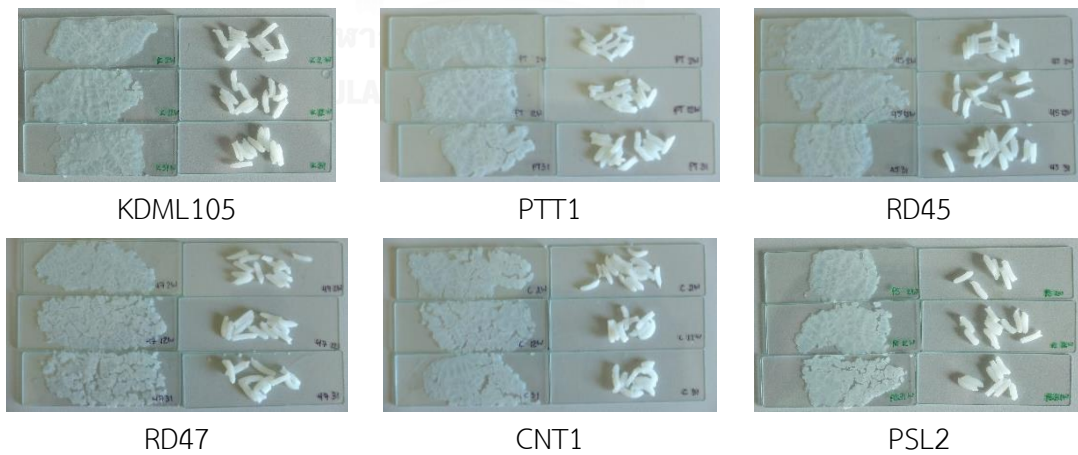


รูปที่ ค.3 ตัวอย่าง thermogram และค่าที่ได้จากเครื่อง differential scanning calorimeter

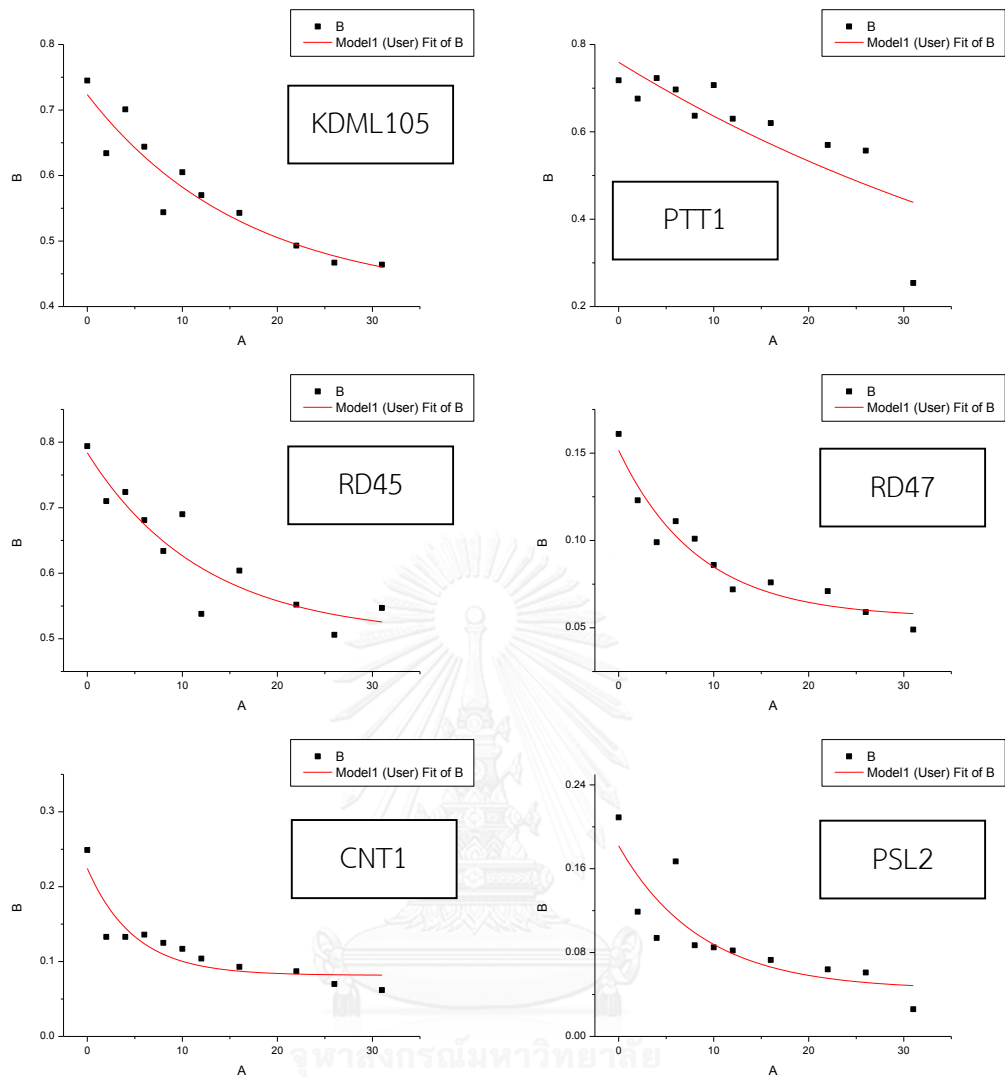
ภาคผนวก ง
ข้อมูลผลการทดลองเพิ่มเติม



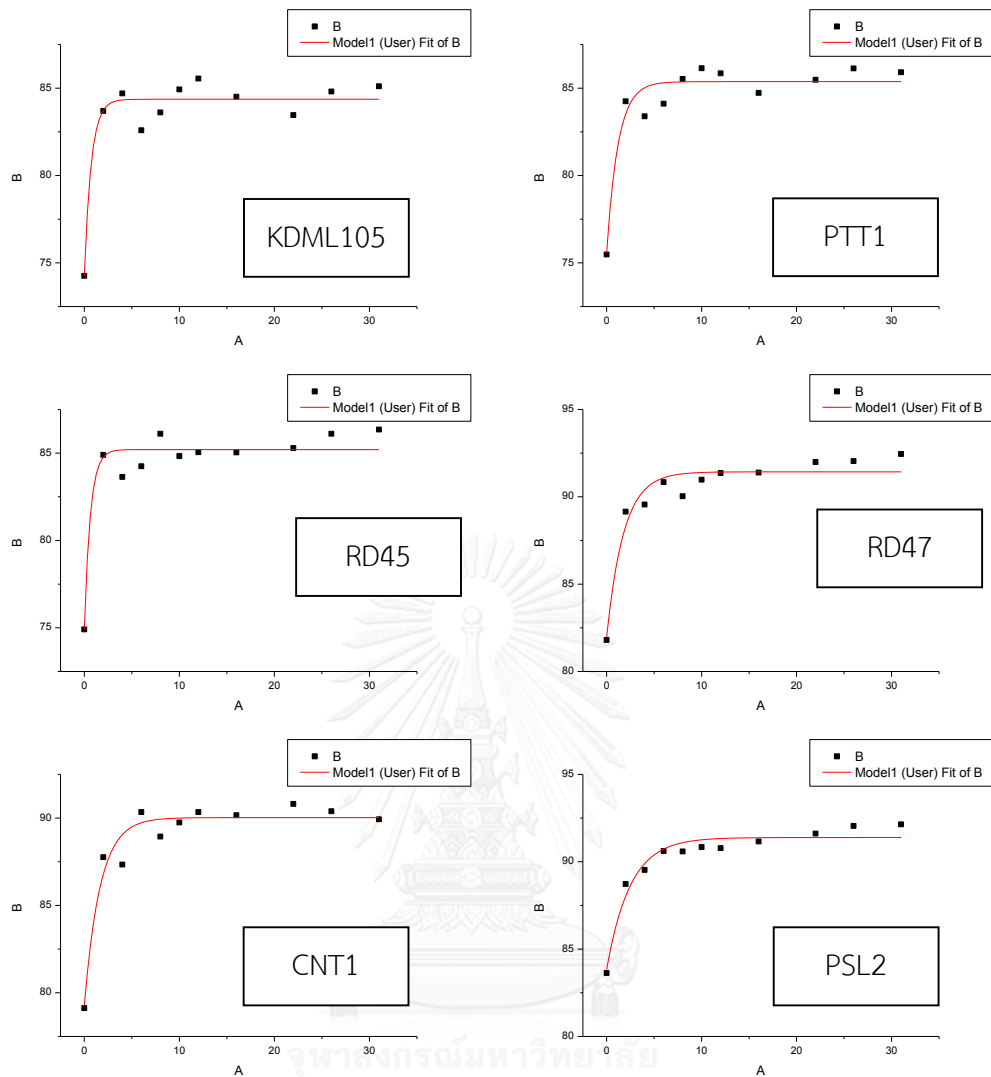
รูปที่ ง.1 ปริมาณรำที่ถูกขัดออกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่ง error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 2 ซ้ำ



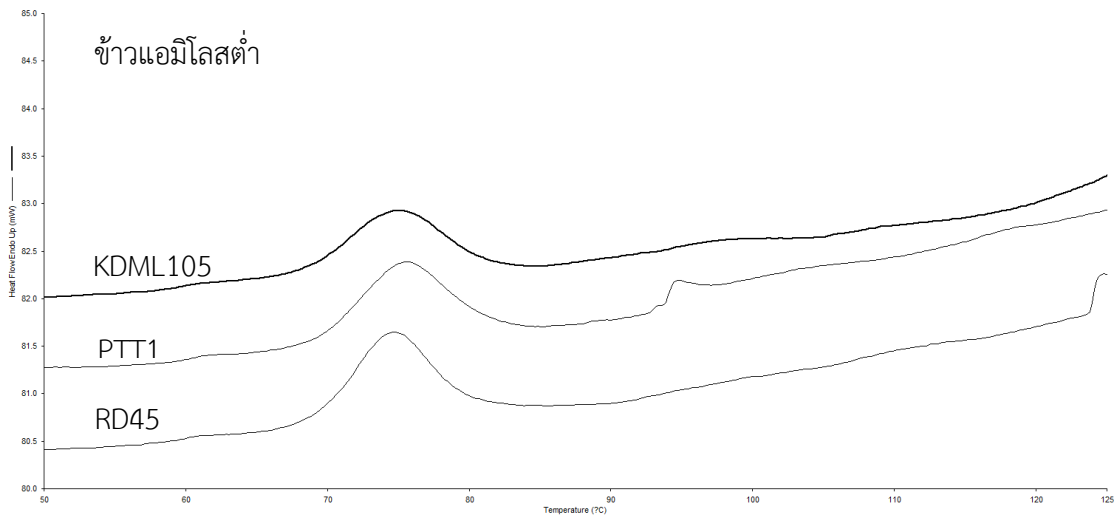
รูปที่ ง.2 ลักษณะตัวอย่างข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่งนาน 2 12 และ 31 สัปดาห์



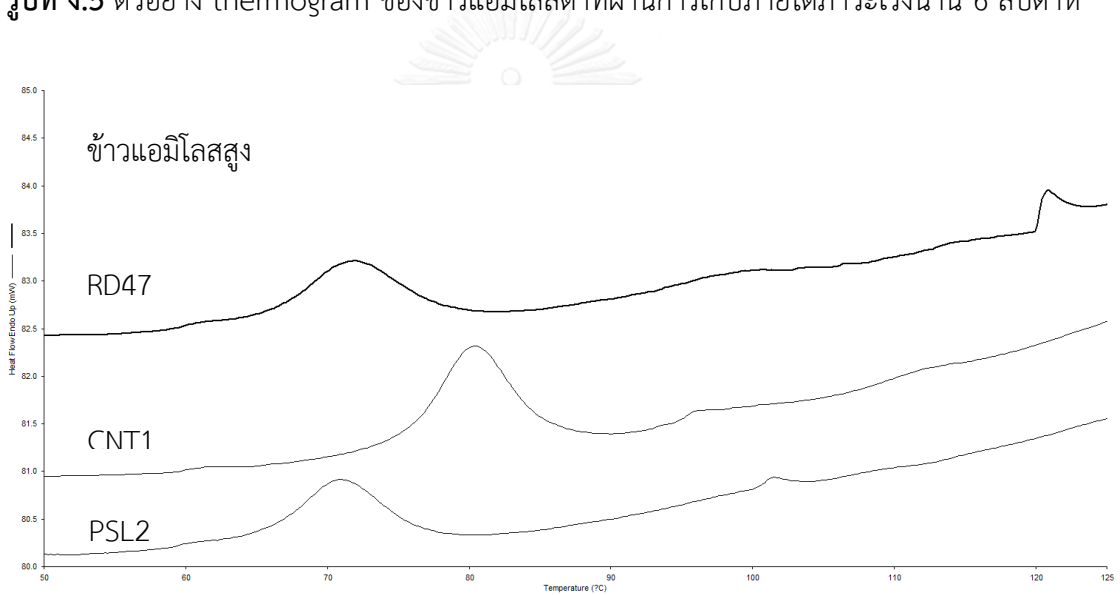
รูปที่ 3.3 ค่า adhesiveness ของข้าวสุกที่เตรียมจากข้าวสายพันธุ์ต่างๆ ที่เก็บเป็นเวลาที่ต่างกัน จุดต่างๆ แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เส้นโค้งแสดงค่าที่ทำนายได้จาก fractional conversion model



รูปที่ ๔.๔ ค่า pasting temperature ของข้าวสุกที่เตรียมจากข้าวสายพันธุ์ต่างๆ ที่เก็บเป็นเวลาต่างกัน จุดต่างๆ แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เส้นโค้งแสดงค่าที่ทำนายได้จาก fractional conversion model



รูปที่ ง.5 ตัวอย่าง thermogram ของข้าวแอมิโลสต่ำที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่งนาน 6 สัปดาห์



รูปที่ ง.6 ตัวอย่าง thermogram ของข้าวแอมิโลสสูงที่ผ่านการเก็บภายใต้ภาวะเร่งนาน 6 สัปดาห์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนทชา ธนธรรวากุล เกิดวันที่ 24 พฤษภาคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง) สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร จากภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553 และศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555

ผลงานที่ตีพิมพ์เผยแพร่

Thanathornvarakul, N., Tananuwong, K., & Anantagool, J. (2014). Changes in physicochemical properties of rice during storage under accelerated condition. Paper presented at the International Conference on Sustainable Global Agriculture and Food Security, The Emerald Hotel, Bangkok, Thailand.