ผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันและการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากข้าวและถั่วเหลืองโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

Effect of Storage Conditions on Retrogradation, Physical and Chemical Properties Changing of Extruded Rice and Soy Snack

นิพัฒน์ ลิ้มสงวน*, วราภรณ์ ประเสริฐ, จุฬาลักษณ์ จารุนุช,
พิสุทธิ์ บุตรสุวรรณ และพิศมัย ศรีชาเยช
ฝ่ายกระบวนการผลิตและแปรรูป สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900
Nipat Limsangouan*, Waraporn Prasert, Chulaluck Charunuch,
Pisut Butsuwan and Phisamai Srichayet
Department of Food Processing and Preservation, Institute of Food Research and Product Development,
Kasetsart University, Bangkhen Campus, Ladyao, Chatuchak, Bangkok 10900

บทคัดย่อ

ศึกษาผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันและสมบัติทางกายภาพ (สีและลักษณะเนื้อสัมผัส) และเคมี (ปริมาณแอมิโลส แอมิโลเพคติน และแป้งรีซิสแตนท์) ที่เปลี่ยนแปลงไปในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากข้าวและถั่วเหลือง โดยเริ่มต้นศึกษาผลของสภาวะการเก็บ 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ (-18, 4, 28 และ 50 °C) และระยะเวลาในการเก็บรักษา (0-6 เดือน) พบว่าสภาวะการเก็บที่อุณหภูมิสูง (28 และ 50 °C) ส่งผลให้โมเลกุลของแป้งในผลิตภัณฑ์เกิดรีโทรเกรเดชันได้เร็วกว่าการเก็บที่อุณหภูมิต่ำ และระยะเวลานานขึ้นส่งผลให้ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเอนโดเทอมรีโทรเกรเดชันมีแนวโน้มสูงขึ้นและยังพบการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและลิปิดด้วย และเมื่อศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าปัจจัยหลัก คือ ระยะเวลาในการเก็บรักษาและอิทธิพลร่วมระหว่างระยะเวลาและอุณหภูมิ ($p < 0.05$) ในขณะที่อุณหภูมิในการเก็บรักษาส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในบางสมบัติ โดยระยะเวลามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี L* และ b* ค่าความกรอบ ปริมาณแอมิโลส และแอมิโลเพคติน และปริมาณแป้งรีซิสแตนท์มากกว่าอุณหภูมิ ส่วนค่าสี a* และค่าความแข็งกระด้างขึ้นอยู่กับอุณหภูมิมากกว่าระยะเวลา ทั้งนี้อุณหภูมิในการเก็บไม่มีผลต่อค่าความกรอบและปริมาณแป้งรีซิสแตนท์

***ผู้รับผิดชอบบทความ :** ifrnpl@ku.ac.th

คำสำคัญ : สภาวะการเก็บรักษา; การเกิดรีโทรเกรเดชัน; สมบัติทางกายภาพและเคมี; สมบัติเชิงสุขภาพ; ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

Abstract

The aim of this research was to evaluate the effect of storage conditions on retrogradation reaction and physical (color and texture profile) and chemical (amylose, amylopectin and resistant starch content) changing of extruded rice and soy snack. At first, the effect of storage conditions (temperature: -18, 4, 28 and 50 °C and time: 0-6 months) on retrogradation was determined. The result shown that, the higher storage temperature (28 and 50 °C) resulted in faster retrogradation than lower storage temperature. Longer storage time showed the tended to higher retrogradation temperature and amylase-lipid complex could be found. Then, the effect of storage conditions on physical and chemical properties was examined. The result found that, the main factor effected to quality and property of extruded snack was time and interaction of time and temperature ($p < 0.05$), while the temperature was affected for some properties. The change of L*, b* value, crispness, amylose/amylopectin and resistant starch content was storage time. The storage temperature gave a strong significant effect on a* value and hardness, but no effect on crispness and resistant starch content.

Keywords: storage conditions; retrogradation; physical and chemical properties; functional property; extruded snack

1. บทนำ

ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวในประเทศไทยมีการพัฒนารูปแบบและรสชาติใหม่ ๆ ออกสู่ตลาดอยู่ตลอดเวลา เพื่อขยายฐานการตลาดให้กว้างขวางขึ้น เนื่องจากสภาพการแข่งขันที่ค่อนข้างรุนแรงในปัจจุบัน ซึ่งนับว่าเป็นข้อดีที่ทำให้สินค้ามีความหลากหลาย เพื่อเสนอเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภค โดยส่วนใหญ่ขนมขบเคี้ยวที่ปรากฏตามท้องตลาดจะเป็นผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ได้เป็นผลิตภัณฑ์ขนมอบกรอบหรือขนมขึ้นรูป (extruded snack) เช่น ผลิตภัณฑ์ยี่ห้อปาปริก้า คอนเน่ โปเต้ สแนคแจ็ค คอร์นพัฟ ทวิสตี้ ฯลฯ แต่ในการผลิตและการจัดเก็บก่อนจำหน่ายยังคงพบปัญหาเกี่ยวกับการลดลงของคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะด้านเนื้อสัมผัส ซึ่งเป็นดัชนีที่สำคัญสำหรับการบ่งชี้ถึงคุณภาพของขนมขบเคี้ยว ซึ่งปัญหาดังกล่าวข้างต้นสันนิษฐานได้ว่าน่าจะมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของผลิตภัณฑ์นั่นเอง

ปัจจุบันการเกิดรีโทรเกรเดชันได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันมีบทบาทสำคัญในการเกิดความเก่า (staling) ของขนมปัง ข้าวสุก และอาหารที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเป็นปรากฏการณ์ที่ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิ ซึ่งนำไปสู่การเกิดผลึก (crystallization) บางส่วนในองค์ประกอบของสตาร์ช [1] การเกิดรีโทรเกรเดชันมีผลต่อคุณภาพ การยอมรับและอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ส่วน

ใหญ่เมื่อเกิดรีโทรเกรเดชันทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์และการยอมรับของผู้บริโภคลดต่ำลง เช่น ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพ (staling) ในผลิตภัณฑ์ขนมอบ ผลิตภัณฑ์สูญเสียความสามารถในการอุ้มน้ำ [2] ทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบเปลี่ยนแปลง เช่น ซุปกระป๋อง และทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความขุ่น อย่างไรก็ตาม การเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นสิ่งที่ต้องการให้เกิดขึ้นในบางผลิตภัณฑ์ เพื่อช่วยปรับปรุงโครงสร้าง สมบัติทางกายภาพ และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ เช่น ในผลิตภัณฑ์อาหารเช้าจากธัญชาติ การเกิดรีโทรเกรเดชันช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งและมีความเหนียวลดลง ในกระบวนการผลิตชิ้นมันฝรั่งสุกแห้ง ใช้วิธีคืนรูป-เยือกแข็ง (freeze-thaw) เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดรีโทรเกรเดชัน ซึ่งช่วยลดปริมาณสตาร์ชที่ละลายน้ำได้ และยังช่วยเพิ่มความแข็งให้แก่ผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวญี่ปุ่น “Harusame” และเส้นก๋วยเตี๋ยวของจีน ใช้วิธีคืนรูป-เยือกแข็ง เพื่อลดความเหนียวของผลิตภัณฑ์ ทำให้เนื้อสัมผัสเป็นไปตามความต้องการของผู้บริโภค การเกิดรีโทรเกรเดชันมีประโยชน์ทางโภชนศาสตร์ เนื่องจากทำให้เกิดสตาร์ชที่ทนต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ (resistant starch) ซึ่งมีประโยชน์ต่อร่างกาย เพราะสตาร์ชดังกล่าวไม่ถูกดูดซึมในลำไส้ แต่สามารถถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ที่อยู่ในลำไส้ใหญ่ เกิดเป็นกรดไขมันสายสั้น ๆ ซึ่งจะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค [3]

มีการพัฒนาวิธีที่ใช้ศึกษาการเกิดเรโทรเกรเดชัน ด้วยกันหลายวิธี หลักการของวิธีการของวิธีเหล่านี้คือ ในระหว่างการเก็บรักษา สมบัติทางกายภาพและเคมีของแบบจำลองเจลสตาร์ช หรือผลิตภัณฑ์ที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เนื่องมาจากองค์ประกอบภายในของเจลสตาร์ช หรือผลิตภัณฑ์ที่มีสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงสามารถตรวจและติดตามการเกิดรีโทรเกรเดชันได้จากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพเหล่านี้ [4] ด้วยเหตุนี้ เพื่อให้ทราบองค์ความรู้ในการนำมาประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวเมื่อผ่านสภาวะในการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน ด้วยระยะเวลาที่ต่างกัน จะมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของผลิตภัณฑ์อย่างไร และส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ เคมี และเชิงสุขภาพของผลิตภัณฑ์ได้อย่างไรบ้าง คณะนักวิจัยคาดว่าผลสรุปดังกล่าวจะมีประโยชน์เป็นอย่างยิ่งต่อการเรียนรู้ และส่งเสริมภาคอุตสาหกรรมต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีวิจัย

2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

ข้าวกล้อง (brown rice) แป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน (de-fatted soy flour) แป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม (full fat soy flour) น้ำตาลทราย (sugar) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) วิตามินรวม (mixed vitamin) amylose/amylopectin และ resistant starch assay kit (Megazyme, Ireland)

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

นำข้าวกล้องมาบดให้ละเอียดด้วย Fitz mill (Comminutor serial # 1871, USA) และ Pin mill (Alpine Augsbug, Germany) เก็บใส่ถุงพลาสติกก่อนนำมาผสมกับส่วนผสมอื่น ๆ ตามอัตราส่วนที่กำหนด (ข้าวกล้องบด 70 % แป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน 17.5 % แป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม 6 % น้ำตาลทราย 5 % วิตามินรวม 1 % และแคลเซียมคาร์บอเนต 0.5 %)

2.3 กระบวนการเอกซ์ทรูชัน

นำวัตถุดิบที่ผสมเสร็จเรียบร้อยแล้วเป็นเนื้อเดียวกัน ป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์ชนิดสกรูคู่ที่หมุนตามกัน (Twin Screw Extruder: Hermann Berstoff Laboratory Co-rotating Twin Screw Extruder รุ่น ZE 25x33D, Germany) ซึ่งประกอบ

ด้วยบาเรล 7 หัว ความยาวของบาเรลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 870 : 25 ผนังบาเรลให้ความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าซึ่งควบคุมได้ ในผนังบาเรลบางส่วนเป็นแจ็กเก็ต 2 ชั้น ที่มีท่อน้ำสำหรับปั๊มน้ำเย็นเข้าไปหมุนเวียนด้วยอัตราการไหลที่ควบคุมได้ เพื่อป้องกันความร้อนที่สูงเกินไป ส่วนท้ายสุดของบาเรลประกอบด้วยหน้าแปลน ซึ่งมีลักษณะเป็นรูกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 มม. ส่วนผสมวัตถุดิบถูกป้อนเข้าสู่เครื่องด้วยถังป้อนที่มีสกรูคู่อยู่ที่ก้นถังทำหน้าที่ป้อนวัตถุดิบแบบปริมาตร ซึ่งในสภาวะการผลิตของการทดลองนี้จะปรับอัตราการป้อนให้คงที่ และปรับปริมาณน้ำเข้าไปผสมกับวัตถุดิบ อยู่ที่ 30-40 % stoke รวมถึงปรับความเร็วรอบของสกรู (screw speed) ที่ 350 รอบต่อนาที โดยจัดอุณหภูมิที่บาเรลให้คงที่ จัดอุณหภูมิแต่ละบาเรลดังนี้ H2: 35 ℃; H3: 55 ℃; H4: 125 ℃; H5: 140 ℃; H6: 160 ℃; H7: 130 ℃; Die: 120 ℃ หลังจากผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เก็บตัวอย่างเอกซ์ทรูเดตที่ได้ในซองอะลูมินั่ม เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เคมี และปริมาณแป้งรีซิสแตนท์ต่อไป

2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เคมี และเชิงสุขภาพ

2.4.1 ความชื้น (moisture)

ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 2 g ใส่ใน moisture can ที่ทราบน้ำหนักคงที่แล้ว นำไปเข้า oven ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง นำออกมาใส่ใน desiccator 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก นำค่าที่ได้ไปคำนวณหา % moisture

2.4.2 อัตราการพองตัว (expansion ratio)

นำเวอร์เนียมาวัดขนาดของตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน นำค่าที่วัดได้หารด้วยขนาดของหน้าแปลน จะได้ค่า expansion ratio

อัตราการพองตัว = ขนาดของตัวอย่าง ÷ ขนาดของหน้าแปลน

2.4.3 ความหนาแน่นรวม (bulk density)

ใส่ตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการเอ็กซ์-ทรูชันลงในกระบอกตวง 100 ml จนถึงระดับ ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างเทียบกับปริมาตรของกระบอกตวง จะได้ค่า bulk density

ความหนาแน่นรวม = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในภาชนะ ÷ ปริมาตรของภาชนะที่บรรจุ

2.4.4 การวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชัน

ชั่งน้ำหนัก pan ชั่งน้ำหนักตัวอย่างและน้ำหนักน้ำตามที่คำนวณได้ใส่ลงใน pan ใช้เข็มเขี่ยให้ตัวอย่างเข้ากันกับน้ำ ปิดฝา pan แล้ว pack pan ให้แน่นสนิท แล้วนำไปวัดค่าค่าการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนโดยใช้เครื่อง DSC (Differential Scanning Calorimeter) โดยวิเคราะห์ค่า on set, peak , end set และ ΔH ด้วย software “Pyris 1 DSC” ที่อุณหภูมิ 30-140 ℃

2.4.5 สี (color)

นำตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการเอ็กซ์-ทรูชันและผ่านการบดด้วยเครื่องบด บรรจุใส่ในถุงพลาสติกใส และวัดสีโดยใช้เครื่องวัดสี (Spectraflash 600 plus; Data color International, USA) บันทึกค่าสี L*, a* และ b* ในระบบ CIE Lab โดยค่า L* คือค่าความสว่าง (0 = สีดำ, 100 = สีขาว) ค่า a* คือค่าสีแดง-เขียว (+ = สีแดง, - = สีเขียว) และค่า b* คือค่าสีเหลือง-น้ำเงิน (+ = สีเหลือง, - = สีน้ำเงิน)

2.4.6 การวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (texture profile)

วิเคราะห์ค่าความกรอบและความแข็งโดยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, TA.XT plus) หัววัดที่ใช้คือหัวใบมีดตัด (HDP/BS; Blade set with knife) ค่าความกรอบแปลผลจากจำนวนพีคที่เกิดขึ้นระหว่างการวัด ส่วนค่าความแข็ง คือ แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการวัดเนื้อสัมผัส

2.4.7 ปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพคติน (amylose and amylopectin content)

วิเคราะห์ตามวิธีที่ปรากฏในคู่มือ Amylose/Amylopectin Assay Kit (Megazyme, Ireland)

2.4.8 การวิเคราะห์ปริมาณแป้งรีซิสแตนท์ (resistant starch)

วิเคราะห์ตามวิธีที่ปรากฏในคู่มือ Resistant Starch Assay Kit (Megazyme, Ireland)

2.6 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ factorial design ศึกษาอิทธิพลของสภาวะการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบใน 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ (4 ระดับ ได้แก่ -18, 4, 28 และ 50 องศาเซลเซียส) และระยะเวลา (ศึกษาเป็นเวลา 6 เดือน) โดยวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS® version 12 (SPSS Thailand Co., Ltd.)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

การทดลองผลิตขนมขบเคี้ยวเพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาอิทธิพลของสภาวะการเก็บรักษาต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันและสมบัติทางกายภาพ เคมี และเชิงสุขภาพ ตัวอย่างที่ได้มี % ความชื้นเริ่มต้น 5.72±0.02 อัตราการพองตัว 2.06±0.08 และความหนาแน่นรวม 9.99±0.19 ก./100 มล.

3.1 อิทธิพลของสภาวะการเก็บรักษาต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน

เมื่อตรวจสอบผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวซึ่งเก็บที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ด้วยเครื่อง DSC พบเอนโดเทอมการดูดกลืนพลังงานเพื่อสลายโครงสร้างผลึก 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ การเกิดการเกิดรีโทรเกรเดชันในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 50-70 ℃ (1st peak) และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน (amylose-lipid complex) ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 110-120 ℃ (2nd peak) แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งช่วงอุณหภูมิที่พบเอนโดเทอมการดูดกลืนพลังงานทั้ง 2 ช่วงอุณหภูมินี้สอดคล้องกับ Eliasson และ Gudmundsson [5] ซึ่งกล่าวว่าผลึกแอมิโลเพคตินรีโทรเกรด จะสลายตัวที่อุณหภูมิ 45-60 ℃ และจะสลายตัวได้ทั้งหมดที่อุณหภูมิประมาณ 80 ℃ ในขณะที่การสลายโครงสร้างผลึกแอมิโลเพคตินรีโทรเกรดของสตาร์ชมันฝรั่งจะเกิดที่อุณหภูมิ 40-70 ℃ [6] ในขณะที่เอนโดเทอมการดูดกลืนพลังงานเมื่อตรวจสอบด้วยเครื่อง DSC ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 106-120 ℃ แสดงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Biliaderis และคณะ [7] พบว่าสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและลิปิดชนิดที่ 2 จะแสดงเอนโดเทอมที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 ℃ ในขณะที่ Ong และ Blanshard [8] พบว่าการเกิดเจลาทิไนซ์ได้อย่างสมบูรณ์จะส่งผลต่อระดับการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและลิปิด

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทั้งอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาส่งผลให้มีการเกิดกระบวนการรีโทรเกรเดชันและการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ผลิตโดยกระบวน-การเอกซ์ทรูชัน โดยผลิตภัณฑ์ที่เก็บนาน 1 เดือน ที่อุณหภูมิห้อง (28 ℃) และ 50 ℃ นั้นเริ่มพบการเกิดเรโทรเกรเดชันได้ในบางตัวอย่างที่ทดสอบ ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่เก็บนาน 1 เดือน ที่อุณหภูมิ -18 ℃ และ 4 ℃ ไม่พบการเกิดการเกิดเรโทรเกรเดชันเลยในทุกตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีกว่าการเก็บผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่อเก็บผลิตภัณฑ์นานตั้งแต่ 2 เดือนขึ้นไป ในทุกช่วงอุณหภูมิที่ใช้เก็บผลิตภัณฑ์พบการเกิดเรโทรเกรเด-

ตารางที่ 1 การเกิดรีโทรเกรเดชันในขนมขบเคี้ยว เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ กัน

อุณหภูมิ	ระยะเวลา (เดือน)	1st Peak (retrogradation)				2nd Peak (Amylose-lipid complex)			
		On set (℃)	Peak (℃)	End set (℃)	ΔH (J/g)	On set (℃)	Peak (℃)	End set (℃)	ΔH (J/g)
ตัวอย่างควบคุม (0 เดือน)		72.33±0.78	75.23±0.62	83.81±0.10	0.39±0.01	ND*	ND	ND	ND
-18 ℃	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2	52.31±0.00	55.06±0.00	63.50±0.00	0.32±0.00	ND	ND	ND	ND
	4	55.35±0.00	61.24±1.56	68.29±4.76	0.55±0.11	ND	ND	ND	ND
	6	70.03±0.64	73.23±0.40	81.47±1.03	0.36±0.00	116.26±2.68	117.68±1.95	120.98±0.68	0.35±0.18
4 ℃	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2	-	53.91±0.00	69.42±0.00	0.40±0.00	ND	ND	ND	ND
	4	59.77±1.36	64.62±2.51	76.89±0.34	0.64±0.07	ND	ND	ND	ND
	6	70.89±3.46	73.99±3.56	83.16±3.20	0.42±0.09	108.80±2.24	111.39±4.16	116.24±6.81	0.25±0.01
28 ℃	1	67.43±0.00	71.12±0.00	76.68±0.00	0.27±0.00	ND	ND	ND	ND
	2	48.87±0.00	56.19±2.98	68.26±0.69	0.35±0.05	98.26±0.00	110.13±0.00	113.11±0.00	0.20±0.00
	4	58.52±0.00	62.72±0.00	80.87±0.00	0.71±0.00	110.05±2.04	114.96±3.91	122.86±0.11	0.22±0.05
	6	57.39±0.00	61.35±0.00	68.25±0.00	0.20±0.00	ND	ND	ND	ND
50 ℃	1	65.38±0.00	70.77±0.00	76.85±0.00	0.54±0.00	ND	ND	ND	ND
	2	46.93±0.00	53.91±0.00	67.45±0.00	0.40±0.00	105.55±0.00	112.65±0.00	116.07±0.00	2.39±0.00
	4	61.36±0.52	66.57±0.24	69.55±2.96	0.56±0.00	109.76±2.50	115.86±1.65	124.08±2.39	0.75±0.25
	6	69.27±5.90	72.00±6.89	78.47±9.87	0.29±0.23	ND	ND	ND	ND

*ND = not detected

ชันและเวลาในการเก็บที่นานขึ้นยังส่งผลให้มีแนวโน้มการพบเอนโดเทอมของการเกิดเรโทรเกรเด-ชันในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม ปัจจัยหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อการเกิดรีโทรเกรด คือ โครงสร้างของแอมิโลสและแอมิโลเพคติน การที่แอมิโลเพคตินมีสายสั้น จะยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชัน เช่น การศึกษาของ Lii และคณะ [9] พบว่าเมื่อเก็บรักษาสตาร์ชข้าวในระยะเวลาสั้น โมเลกุลแอมิโลเพคตินสายสั้นจะชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชัน แต่เมื่อระยะเวลาในการเก็บยาวนานขึ้น โมเลกุลแอมิโลแพคตินสายสั้นจะสามารถจับกับโมเลกุลสายยาว (co-crystallize) ทำให้การเกิดรีโทรเกรเดชันเกิดได้มากขึ้น เนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่มีแรงเฉือนที่รุนแรง ใช้อุณหภูมิสูงและมีความดันเกิดขึ้นในระบบ ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลสายสั้น ๆ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างในการทดลองนี้เกิดการรีโทรเกรดไม่สูงมากนัก

ด้วยวัตถุดิบที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ผลิตโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีหลากหลายและมีส่วน ประกอบของไขมัน และเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการสุก จึงทำให้มีโอกาสเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลสและไขมันได้ ดังนั้นจึงพบเอนโดเทอมการดูดกลืนพลังงานแสดงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวเกิดขึ้น จากการทดลองพบว่าการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลสและไขมันจะพบได้ใน

ตัวอย่างที่เก็บนาน 6 เดือน เมื่อเก็บที่อุณหภูมิต่ำ (-18 และ 4 ℃) แต่เมื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (28 และ 50 ℃) สามารถพบการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลสและไขมันได้เมื่อเก็บผลิตภัณฑ์นาน 2 และ 4 เดือน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเก็บที่อุณหภูมิต่ำ เป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Tg) จึงส่งผลให้โมเลกุลไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ อันเป็นการยับยั้งการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลสและไขมัน แต่จะพบการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและลิปิดมากขึ้นเมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 50 ℃ นอกจากนี้ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและไขมันยังช่วยกระตุ้นการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วย [10]

3.2 อิทธิพลของสภาวะการเก็บรักษาต่อสีของผลิตภัณฑ์

สีของผลิตภัณฑ์มีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค การเปลี่ยนแปลงของสีในตัวผลิตภัณฑ์สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากสภาวะการเก็บรักษา [11] จากการศึกษาผลของสภาวะการเก็บรักษา (อุณหภูมิและระยะเวลา) ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสี (ระบบ CIE Lab) L*, a* and b* ในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ทดสอบ ได้ผลดังนี้

ค่า L* ซึ่งบ่งบอกถึงความสว่างของผลิตภัณฑ์หากมีค่าต่ำกว่าแสดงถึงการที่ผลิตภัณฑ์มีสีคล้ำขึ้นซึ่งจากการทดลองสามารถแสดงผลดังตารางที่ 2 ที่สภาวะการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน พบว่าปัจจัยที่ศึกษาทั้ง 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิในการเก็บ และระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลต่อการเปลี่ยน แปลงความสว่างของผลิตภัณฑ์ โดยระยะเวลามีผลมากกว่าอุณหภูมิในการเก็บ (พิจารณาจาก F-value) ซึ่งระยะการเก็บที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสว่างลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เช่นเดียวกับอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาก็ส่งผลต่อค่าความสว่างเช่นกัน ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับ Sowbhagya และคณะ [12] ที่ศึกษาความคงตัวของสีในผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูชันระหว่างการเก็บ พบว่าระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสว่างลดลงถึง 30 % ในระยะเวลา 10 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิปกติ ในขณะที่อุณหภูมิในการเก็บที่เพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้ความสว่างลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะเร่งปฏิกิริยาการเกิดสารสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์มากขึ้น กอปรกับระยะเวลาที่มากขึ้นจึงส่งเสริมให้เกิดการคล้ำของสีมากขึ้น [11] จึงทำให้ค่า L* ลดลง ซึ่งให้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน

ค่า a* บ่งชี้ถึงระดับความเป็นสีแดง-เขียวของผลิตภัณฑ์หากมีค่าต่ำแสดงถึงการที่ผลิตภัณฑ์มีสีแดงมากขึ้น ซึ่งจากการทดลองได้ผลดังตารางที่ 2 พบว่าปัจจัยที่ศึกษาส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่านี้ของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยอุณหภูมิในการเก็บมีผลมากกว่าระยะเวลาที่ใช้ศึกษา (พิจารณาจาก F-value) ที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่า a* สูงขึ้น จาก

การเกิดสารสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ ในขณะที่ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นก็เป็นการส่งเสริมให้ค่า a* เพิ่มสูงขึ้นด้วย เช่นเดียวกับอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาก็ส่งผลต่อค่า a* เช่นกัน ($p<0.05$)

ค่า b* บ่งชี้ถึงระดับความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน จากการวิเคราะห์ค่าสี ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2 พบว่าสภาวะในการเก็บรักษามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวนี้อย่างมีนัยสำคัญ โดยระยะเวลามีผลมากกว่าอุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษา (พิจารณาจาก F-value) ที่ระยะเวลานานขึ้นทำให้ค่า b* สูงขึ้น เหตุผลเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของค่า a* และที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าดังกล่าวนี้เพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาก็ส่งผลต่อค่า b* เช่นกัน ($p < 0.05$)

ตารางที่ 2 ค่า L*, a* และ b* ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่อุณหภูมิและระยะการเก็บรักษาต่าง ๆ

เดือน	L*-value				a*-value				b*-value			
	-18 ℃	4 ℃	28 ℃	50 ℃	-18 ℃	4 ℃	28 ℃	50 ℃	-18 ℃	4 ℃	28 ℃	50 ℃
0	82.03±0.18	82.03±0.18	82.03±0.18	82.03±0.18	2.44±0.13	2.44±0.13	2.44±0.13	2.44±0.13	23.76±0.28	23.76±0.28	23.76±0.28	23.76±0.28
1	83.98±0.44	84.13±0.62	83.57±0.30	84.47±0.33	1.85±0.17	1.84±0.15	1.94±0.17	1.90±0.16	21.25±0.42	21.17±0.30	21.63±0.49	21.47±0.19
2	84.78±0.64	83.43±0.48	84.67±0.05	84.10±0.34	1.53±0.20	2.06±0.18	1.60±0.07	2.28±0.18	20.21±0.37	22.19±0.38	20.81±0.34	21.56±0.45
3	84.13±0.38	83.95±0.16	83.28±0.40	83.48±0.37	1.69±0.16	1.68±0.19	2.17±0.04	2.43±0.16	20.90±0.39	21.20±0.10	22.00±0.75	22.20±0.48
4	82.63±0.36	82.32±0.62	83.00±0.36	82.93±0.98	2.22±0.19	2.25±0.17	2.03±0.06	2.62±0.17	22.30±0.13	22.67±0.20	22.24±0.26	22.78±0.54
5	82.22±0.16	81.97±0.36	82.14±0.32	81.95±0.43	2.22±0.10	2.03±0.12	2.25±0.13	2.79±0.30	22.57±0.04	22.65±0.53	23.08±0.18	23.16±0.45
6	85.99±0.14	80.26±0.29	82.73±0.17	80.35±0.13	1.24±0.10	2.57±0.03	1.98±0.14	3.60±0.09	19.66±0.28	24.89±0.05	22.41±0.84	25.78±0.39

ตารางที่ 3 ค่า hardness, crispness และปริมาณแป้งรีซิสแตนท์ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่อุณหภูมิและระยะการเก็บรักษาต่าง ๆ

เดือน	Hardness (g)				Crispness				Resistant starch content (g/100 g sample)			
	-18 ℃	4 ℃	28 ℃	50 ℃	-18 ℃	4 ℃	28 ℃	50 ℃	-18 ℃	4 ℃	28 ℃	50 ℃
0	2621.75±246.17	2621.75±246.17	2621.75±246.17	2621.75±246.17	8.60±3.24	8.60±3.24	8.60±3.24	8.60±3.24	0.26±0.02	0.26±0.02	0.26±0.02	0.26±0.02
1	3509.95±186.32	2864.40±120.20	2564.67±135.73	2730.06±136.74	12.70±5.74	9.40±3.06	9.70±2.71	9.20±2.10	0.20±0.01	0.21±0.03	0.22±0.01	0.20±0.01
2	3304.26±270.60	2611.62±207.61	3046.44±198.09	2921.04±195.87	11.60±2.68	7.50±1.51	10.60±4.27	9.60±4.53	0.20±0.02	0.19±0.02	0.17±0.04	0.18±0.02
3	3177.65±230.35	3016.75±176.10	2723.68±112.17	3220.81±161.27	11.80±4.83	11.80±4.57	11.50±2.59	10.80±3.65	0.22±0.01	0.23±0.01	0.20±0.02	0.21±0.01
4	2987.24±110.67	3023.21±259.60	2855.87±288.19	3281.23±333.54	8.70±3.23	10.70±3.62	11.50±2.07	14.60±6.13	0.25±0.01	0.25±0.01	0.22±0.01	0.25±0.01
5	3134.46±197.49	2798.56±222.10	2528.14±165.45	2992.28±287.92	13.20±3.99	13.20±4.59	9.20±4.57	9.50±2.22	0.29±0.03	0.28±0.01	0.29±0.02	0.28±0.01
6	2672.90±375.80	2684.12±326.69	2297.81±193.39	3202.42±184.75	8.40±1.84	8.90±3.11	8.40±1.65	12.90±5.93	0.28±0.01	0.26±0.01	0.27±0.01	0.27±0.01

3.3 อิทธิพลของสภาวะการเก็บรักษาต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

ความแข็ง (hardness) และความกรอบ (crispness) ถือเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว ซึ่งโดยปกติผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ดีควรมีค่าความแข็งต่ำแต่ค่าความกรอบสูง แต่ลักษณะเนื้อสัมผัสดังกล่าวอาจมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานาน หรือเก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดลองซึ่งศึกษาผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว ได้ผลดังตารางที่ 3 เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ โดยอุณหภูมิมีผลมากกว่าระยะเวลาในการเก็บ (พิจารณาจาก F-value) ในขณะที่ ระยะเวลามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความกรอบของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนอุณหภูมิไม่มีผลต่อค่าความกรอบ ในขณะที่อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาก็ส่งผลต่อค่าความแข็งและความกรอบ ($p < 0.05$) ด้วย

ที่อุณหภูมิสูง (50 ℃) พบว่าทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษามีความแข็งสูงที่สุด เมื่อผ่านระยะเวลา 6 เดือน เนื่องจากความแข็งมีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง มีความชื้นลดลงต่ำสุด จึงมีผลทำให้ความกระด้างของผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้น จากการที่ผลิตภัณฑ์มีความแห้งและสูญเสียความชื้นนั่นเอง ซึ่งให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับ Yu และคณะ [13] ที่พบว่าข้าวสุกจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บนานขึ้น

ระยะเวลาในการเก็บรักษาที่นานขึ้น ส่งผลต่อความกรอบของผลิตภัณฑ์ โดยการเก็บรักษานานขึ้นมีแนวโน้มที่จะทำให้ความกรอบเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งให้ผลการ

ทดลองเช่นเดียวกับ Larsen และคณะ [14] ซึ่งวิเคราะห์ความกรอบที่เพิ่มสูงขึ้นในผลิตภัณฑ์ข้าวโอ๊ตที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะการเก็บที่เพิ่มขึ้น (จาก 3 และ 10 เดือน) และผลการทดลองของ Hirte และคณะ [15] ซึ่งศึกษาความกรอบของผิวขนมปัง พบว่าเมื่อผ่านระยะเวลานานขึ้นความกรอบของผิวขนมปังจะเพิ่มขึ้น จากการที่ความชื้นของผิวขนมปังลดลง ผลิตภัณฑ์มีการสูญเสียความชื้นทำให้ผิวแห้งและกรอบมากขึ้น เช่นเดียวกับความแข็งนั่นเอง

3.4 อิทธิพลของสภาวะการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพคติน

อัตราส่วนของปริมาณแอมิโลสและแอมิโล-เพคติน มีอิทธิพลต่อสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ตัวอย่าง เช่น การทดลองของ Launay และ Lisch [16] ระบุว่าอัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์จะลดลงเมื่อปริมาณแอมิโลสของวัตถุดิบที่ใช้เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณของแอมิโลเพคตินที่สูงขึ้นจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเบา ผิวเนื้อเนียนเรียบ มีความยืดหยุ่นและเป็นเนื้อเดียวที่ดีกว่าการใช้วัตถุดิบที่มีปริมาณแอมิโลสสูง [17] นอกเหนือจากนี้แล้วปริมาณของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินยังมีผลต่อสมบัติการไหลและความข้นหนืด [18] ของแป้งข้าวโพดบดหยาบดัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยเมื่อปริมาณของแอมิโลสเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้แป้งมีความข้นหนืดเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของแอมิ-โลสอุ้มน้ำไว้ภายในโมเลกุล

ผลการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพคตินในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว ดังตารางที่ 4 เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพคติน ในขณะที่อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาก็ส่งผลต่อปริมาณดังกล่าวเช่นกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยระยะเวลามีผลมากกว่าอุณหภูมิในการเก็บ (พิจารณาจาก F-value) ที่ระยะเวลานานขึ้นพบว่าแนวโน้มของปริมาณแอมิโลสจะลดลง เช่นเดียวกับการทดลองของ Kumari และคณะ [19] ที่พบว่าปริมาณแอมิโลสลดลงในอาหารพร้อมรับประทานที่ทำจากธัญพืชเมื่อผ่านระยะการเก็บ 6 เดือน

ตารางที่ 4 ปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพคตินของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่อุณหภูมิและระยะการเก็บรักษาต่าง ๆ

เดือน	Amylose % (w/w total starch)*				Amylopectin % (w/w total starch)*			
	-18 ℃	4 ℃	28 ℃	50 ℃	-18 ℃	4 ℃	28 ℃	50 ℃
0	8.15±1.36	8.15±1.36	8.15±1.36	8.15±1.36	91.85±1.36	91.85±1.36	91.85±1.36	91.85±1.36
1	8.16±0.77	8.74±0.26	10.14±1.49	8.90±0.28	91.84±0.77	91.26±0.26	89.86±1.49	91.10±0.28
2	8.63±0.84	8.81±0.34	8.94±0.35	8.36±0.89	91.37±0.84	91.19±0.34	91.06±0.35	91.64±0.89
3	7.45±0.85	8.77±0.51	9.51±0.51	9.57±0.47	92.55±0.85	91.23±0.51	90.49±0.51	90.43±0.47
4	9.92±0.52	9.67±0.72	9.57±0.23	10.00±0.23	90.08±0.52	90.33±0.72	90.43±0.23	90.00±0.23
5	7.90±0.68	8.41±0.59	8.22±0.44	8.16±1.36	92.10±0.68	91.59±0.59	91.78±0.44	91.84±1.36
6	7.44±0.31	7.46±0.54	7.48±0.60	7.23±1.24	92.56±0.31	92.54±0.54	92.52±0.60	92.77±1.24

3.5 อิทธิพลของสภาวะการเก็บรักษาต่อปริมาณแป้งรีซิสแตนท์

แป้งรีซิสแตนท์ เป็นแป้งที่ร่างกายมนุษย์ไม่สามารถย่อยได้ในระบบย่อยอาหารแต่จุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ต่อร่างกายสามารถนำแป้งดังกล่าวไปใช้ประโยชน์จึงแสดงให้เห็นว่าแป้งดังกล่าวมีความ

สามารถในการส่งเสริมสุขภาพได้ งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ปริมาณแป้งรีซิสแตนท์ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว โดยใช้ Resistant Starch Assay Kit (Mega-zyme, Ireland) ที่สภาวะการเก็บรักษาต่าง ๆ เพื่อศึกษาถึงอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งดังกล่าว จากการทดลองได้ผลดังตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าปัจจัยที่ศึกษาบางปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งรีซิสแตนท์อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ได้แก่ ระยะเวลาในการเก็บรักษาและอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาก็ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งรีซิสแตนท์ด้วย ส่วนอุณหภูมิในการเก็บรักษาไม่ส่งผลต่อค่าดังกล่าว ซึ่งให้ผลการทดลองที่แตกต่างกับ Mangala และคณะ [20] กล่าวว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งรีซิสแตนท์ในผลิตภัณฑ์อาหาร แต่จากการให้ความร้อนที่สูงกว่า (125 °C) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เกิดการรวมตัวกันของโครงข่ายของโมเลกุลแป้ง

ที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่จะทำให้ปริมาณแป้งรีซิสแตนท์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับ Namratha และคณะ [21] ซึ่งศึกษาปริมาณแป้งรีซิสแตนท์ในผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมรับประทานที่เก็บรักษาไว้นาน 4 เดือน มีปริมาณแป้งรีซิสแตนท์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน และ Kumari และคณะ [19] ก็ศึกษาปริมาณแป้งรีซิสแตนท์ในผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมรับประทานที่ผลิตจากธัญพืชที่เก็บรักษาไว้ 6 เดือน และพบว่ามีการเพิ่มขึ้นของแป้งรีซิสแตนท์ แต่ให้ผลการทดลองที่แตกต่างกับ Niba [22] ซึ่งศึกษาปริมาณแป้งรีซิสแตนท์ในผลิตภัณฑ์เกล็ดขนมปัง โดยพบว่าปริมาณแป้งดังกล่าวเพิ่มขึ้นในช่วง 4 วันแรก และลดลงในวันที่ 7 ทั้ง 3 อุณหภูมิที่ศึกษา (20, 4 และ -18 °C)

3.6 ผลของการเกิดรีโทรเกรเดชันต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว

การทดลองนี้ไม่ได้วิเคราะห์ % การเกิดรีโทรเกรเดชันในผลิตภัณฑ์ในแต่ละสิ่งทดลอง จึงไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว เนื่องจากผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเกิดจากส่วนผสมหลายชนิดจึงทำให้การอ่านและวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ทำได้ยาก แต่สามารถระบุได้ว่าเกิดหรือไม่เกิดปฏิกิริยาดังกล่าว ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาส่งผลให้มีการเกิดกระบวนการรีโทรเกรเดชันและการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เมื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูง แต่ไม่ส่งผลเมื่อเก็บที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อเวลาในการเก็บนานขึ้นจะมีแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรดมากขึ้น ผลการทดลองทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการศึกษาอิทธิพลของสภาวะการเก็บต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว เมื่อเปรียบเทียบกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

3.5.1 การเกิดรีโทรเกรเดชันไม่มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากกลไกการเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลของแป้ง

3.5.2 การเกิดรีโทรเกรเดชันสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ในส่วนของความแข็งกระด้าง กล่าวคือ เมื่อผลิตภัณฑ์เกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความแข็งกระด้างเพิ่มสูงขึ้น จากการทดลองที่ได้ให้ผลเช่น เดียวกับการทดลองของ Kingcam และคณะ [23] ซึ่งศึกษาอิทธิพลของการเกิดรีโทรเกรเดชันต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของแผ่นมันฝรั่งอบแห้ง และการทดลองของ Yu และคณะ [24] ซึ่งทดลองในข้าวสุก

3.5.3 การเกิดรีโทรเกรเดชันสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมิโลสในผลิตภัณฑ์ขนมขบ-

เคี้ยว จากการทดลองนี้ในสิ่งทดลองที่มีการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงจะพบปริมาณแอมิโลสต่ำกว่า (ที่อุณหภูมิสูงและระยะเวลานาน) ซึ่งเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างผลึกนั่นเอง [25]

3.5.4 การเกิดรีโทรเกรเดชันสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งรีซิสแตนท์ กล่าวคือ เมื่อโมเลกุลของแป้งในผลิตภัณฑ์เกิดปฏิกิริยารีโทรเกรเดชัน จะทำให้ปริมาณแป้งรีซิสแตนท์เพิ่มขึ้น ซึ่งการทดลองนี้ให้ผลเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Park และคณะ [26] ซึ่งทดลองในแป้งข้าวโพดที่มีแอมิโลเพคตินสูง

4. สรุป

การศึกษาอิทธิพลของการเกิดรีโทรเกรเดชันต่อสมบัติทางกายภาพ เคมี และเชิงสุขภาพ ในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยเริ่มต้นศึกษาผลของสภาวะการเก็บ ได้แก่ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน พบว่าเมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานาน จะส่งผลให้โมเลกุลของแป้งในผลิตภัณฑ์เกิดรีโทรเกรเดชันมากขึ้น และเมื่อศึกษาผลของสภาวะการเก็บต่อสมบัติทางกายภาพ เคมี และเชิงสุขภาพ พบว่าระยะเวลาในการเก็บส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี L* และ b* ค่าความกรอบ ปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพคติน และปริมาณแป้งรีซิสแตนท์มากกว่าอุณหภูมิในการเก็บ ส่วนค่าสี a* และค่าความแข็งกระด้าง ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเก็บมากกว่าระยะเวลา ทั้งนี้อุณหภูมิในการเก็บไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความกรอบและปริมาณแป้งรีซิสแตนท์ และเมื่อเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดรีโทรเกรเดชันกับสมบัติด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว พบว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัส โดยทำให้มีความแข็งกระด้างเพิ่มขึ้น สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพคติน โดยทำให้ปริมาณแอมิโลสลดลงและสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งรีซิสแตนท์ โดยทำให้ปริมาณของแป้งดังกล่าวเพิ่มขึ้น เป็นต้น ดังนั้นหากต้องการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวให้มีคุณลักษณะหรือคุณภาพที่ต้องการก็จำเป็นต้องคำนึงถึงอิทธิพลของการเกิดรีโทรเกรเดชันเช่นกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการดำเนินโครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร ที่อนุเคราะห์สถานที่ในการปฏิบัติงานพร้อมเครื่องจักร และอุปกรณ์ทั้งหมดในการทดลอง

6. รายการอ้างอิง

[1] Yrjo, R., 1995, Phase Transition in Foods, London Academic Press, London, 380 p.

[2] Gudmundsson, M., 1994, Retrogradation of starch and the role of its components, Thermoclimica Acta 246: 329-341.

[3] Eerlingen, R.C., Crombez, M. and Delcour, J.A., 1993, Enzyme resistance starch: I. Quantitation and qualitative influence of incubation time and temperature of autoclaved starch on resistant starch formation, Cereal Chem. 70: 339-344.

[4] ศันสนีย์ อุดมระติ, 2548, การเกิดเจลาทิเนเซชันและรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าว 4 พันธุ์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 162 น.

[5] Eliasson, A.C. and Gudmundsson, M., 1996,

Starch: Physicochemical and Function Aspects, pp.431-503. In Eliasson, A.C. (Ed.), Carbohydrate in Food. Marcel Dekker, Inc., New York.

[6] Chung, J.H., Jeong, H.Y. and Lim, S.T., 2003, Effect of acid hydrolysis and defatting on crystallinity and pasting properties of freeze-thawed high amylase corn starch, Carbohydr. Polym. 54: 449-455.

[7] Biliaderis, C.G., Tonogai, J.R. Perez, C.M. and Juliano, B.O., 1993, Thermophysical properties of milled rice starch as influenced by variety and parboiling method, Cereal Chem. 70: 512-516.

[8] Ong, M.H. and Blanshard J.M.V., 1995, Texture determinants of cooked, parboiled rice: II. Physicochemical properties and leaching behaviour of rice, J. Cereal Sci. 21: 261-269.

[9] Lii, Y.C., Lai, V.M.F. and Shen, M.C., 2004, Changes in retrogradation properties of rice starch with amylase content and molecular properties, Cereal Chem. 81: 392-398.

[10] Vamndeputte, E,G., Vermeylen, R.V., Geeroms, J. and Delcour, J.A., 2003, Rice starch: III. Structure aspects provide insight in amylopectin retrogradation property and gel texture, J. Cereal Sci. 38: 61-68.

[11] Jeremiah, L.E. and Gibson, L.L., 2001, The influence of storage temperature and storage time on color stability, retail properties and case life of retail ready beef, Food Res. Int. 34: 815-826.

[12] Sowbhagya, H.B., Smitha, S., Sampathu, S.R., Krishnamurthy, N. and Bhattacharya, S., 2005, Stability of water-soluble turmeric colorant in an extruded food product during storage, J. Food Eng. 67: 367-371.

[13] Yu, S., Ma, Y. and Sun, D.W., 2009, Impact of amylase content on starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage, J. Cereal Sci. 50: 139-144.

[14] Larsen, H., Lea, P. and Rodbotten, M., 2005, Sensory changes in extruded oat stored under different packaging, light and temperature conditions, Food Qual. Prefer. 16: 573-584.

[15] Hirte, A., Hamer, R.J., Meinders. And Primo-Martin, C., 2010, Permeability of crust is key to crispness retention, J. Cereal Sci. 52: 129-135.

[16] Launay, B. and Lisch, J.M., 1983, Twin screw extrusion cooking of starched: Behavior of starch pastes, expansion and mechanical properties of extrudates, J. Food Eng. 2: 259-280.

[17] Mercier, C. and Feillet, P., 1975, Modification of carbohydrate components by extrusion-cooking of cereal products, Cereal Chem. 52: 283-297.

[18] Copeland, L., Blazek, J., Salman, H. andTang, M.C., 2009, Form and

functionality of starch, Food Hydrocoll. 23: 1527-1534.

[19] Kumari, M., Urooj, A. and Prasad, N.N., 2007, Effect of storage on resistant starch and amylase content of cereal-pulse based ready-to-eat commercial products, Food Chem. 102: 1425-1430.

[20] Mangala, S.L., Udayasankar, K. and Tharanathan, R.N., 1999, Resistant starch from processed cereals: the influence of amylopectin and non-carbohydrate constituents in its formation, Food Chem. 64: 391-396.

[21] Namratha, J., Asna, U. and Prasad, N.N., 2002, Effect of storage on resistant starch content of processed ready-to-eat foods, Food Chem. 79: 395-400.

[22] Niba, L.L., 2003, Effect of storage period and temperature on resistant starch and β-glucan content in cornbread, Food Chem. 83: 493-498.

[23] Kingcam, R., Devahastin, S. and Chiewchan, N., 2008, Effect of starch retrogradation on texture of potato chips produced by low-pressure superheated steam drying, J. Food Eng. 89: 72-79.

[24] Yu, S., Ma, Y. and Sun, D.W., 2009, Impact of amylase content on starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage, J. Cereal Sci. 50: 139-144.

[25] Iturriaga, L.B., Mishima, B.L. and Añon, M.C., 2010, A study of the retrogradation process in five argentine rice starches, LWT-Food Sci. Technol. 43: 670-674.

[26] Park, E.Y., Baik, B.K. and Lim, S.T., 2009, Influences of temperature-cycled storage on retrogradation and in vitro digestibility of waxy maize starch gel, J. Cereal Sci. 50: 43-48.