ผลของสายพันธุ์กล้วย แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและจากกล้วยทั้งผล โปรตีน และเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ต่อคุณภาพและค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้า

นาฏยา อริยสุขโฆษิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

ผลของสายพันธุ์กล้วย แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและจากกล้วยทั้งผล โปรตีน และเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ต่อคุณภาพและค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้า

นาฏยา อริยสุขโฆษิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
2565
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

EFFECT OF BANANA CULTIVARS, GREEN BANANA FLOUR AND WHOLE GREEN BANANA FLOUR, PROTEIN AND TRANSGLUTAMINASE ON THE QUALITY AND GLYCEMIC INDEX OF PASTA

NARTTAYA ARIYASUKKOSIT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE MASTER DEGREE OF SCIENCE
IN FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE
BURAPHA UNIVERSITY
2022

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของ นาฏยา อริยสุขโฆษิต ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

.....
(อาจารย์ ดร.อโนชา สุขสมบูรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร.อาภัสรา แสงนาค)

..... กรรมการ
(ดร.อโนชา สุขสมบูรณ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สามารถ สายอุต)

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. อุษาวดี ตันติวรานุรักษ์)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.นุจรี ไชยมงคล)
วันที่ 7 เดือน กันยายน พ.ศ. 2565

BUU iThesis 61910136 thesis / recv: 03072565 19:36:42 / seq: 70
913343329

61910136: สาขาวิชา: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร; วท.ม. (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร)
คำสำคัญ: พาสต้า / แป้งกล้วยดิบ / ดัชนีไกลซีมิก

นาฏยา อริยสุขโฆษิต : ผลของสายพันธุ์กล้วย แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและจากกล้วยทั้งผล โปรตีน และเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ต่อคุณภาพและค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้า. (EFFECT OF BANANA CULTIVARS, GREEN BANANA FLOUR AND WHOLE GREEN BANANA FLOUR, PROTEIN AND TRANSGLUTAMINASE ON THE QUALITY AND GLYCEMIC INDEX OF PASTA) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: อโนชา สุขสมบูรณ์ ปี พ.ศ. 2565.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม โปรตีน และเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ต่อคุณภาพและค่าดัชนีไกลซีมิก (GI) ของพาสต้า จากผลการทดลอง พบว่า แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม มีผลต่อค่าสี ความหนืดของน้ำแป้ง ค่าดัชนีการละลายน้ำและดัชนีการดูดซับน้ำของแป้งกล้วยดิบ แป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล มีค่า GI ต่ำที่สุด ($p<0.05$) เท่ากับ 40.46 และเมื่อนำแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มาเตรียมเป็นเส้นพาสต้า พบว่า พาสต้าจากแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มี cooking time ที่แตกต่างกัน (12.30-14.00 นาที) แต่มี cooking loss และ cooking yield แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$) เช่นเดียวกับค่า GI โดยมีค่าอยู่ที่ 83.81-85.53 และเมื่อทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่า พาสต้าที่ทำจากแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มีคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส และรสชาติ แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$) โดยพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม (HPP) และพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NPP) ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดไม่แตกต่างกัน ($p\geq0.05$) เท่ากับ 6.10 และ 6.13 คะแนน ตามลำดับ จึงพิจารณาเลือก NPP เนื่องจากหาง่าย และราคาถูก ไปทดลองต่อไป ผลของชนิดโปรตีน ได้แก่ ไข่ขาวผง (E) เวย์โปรตีน (W) และโปรตีนถั่วเหลือง (S) และปริมาณของโปรตีน ได้แก่ 4.35, 8.70 และ 13.05% ของแป้งกล้วยดิบ มีผลต่อค่า G' และ G" ของโด สมบัติด้านการต้มหุง และเนื้อสัมผัสของพาสต้า จากผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค พบโปรตีนจับตัวกันเป็นก้อนและแยกจากสตาร์ช และพบว่าพาสต้าที่ผสม S ทุกปริมาณ มีค่า GI ต่ำที่สุดและแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ (69.69-70.05) ($p\geq0.05$) โดย พบว่า พาสต้าที่ผสม S 8.70% ของแป้งกล้วยดิบ มี cooking loss น้อยที่สุด และมีค่า hardness สูงที่สุด จึงคัดเลือกไปทดลองในขั้นตอนต่อไป จากผลการศึกษาปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (TG) ได้แก่ 0, 2.18, 4.35 และ 6.52% ของแป้งกล้วยดิบ ที่มีต่อสมบัติของพาสต้า พบว่า การเพิ่มปริมาณ TG ทำให้ค่า G' และ G" เพิ่มขึ้น และพบการเชื่อมข้ามของโปรตีนจากการวิเคราะห์ด้วย SDS-PAGE การเติม TG 4.35 และ 6.52% ของแป้งกล้วยดิบ ทำให้พาสต้ามีค่า cooking yield และ ค่า hardness ต่ำลง อย่างไรก็ตาม พาสต้าที่ผสม TG ทุกปริมาณ มีโครงสร้างทางจุลภาค ค่า GI (65.05-68.98) รวมทั้งคะแนนความชอบจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$) ทั้งนี้จึงคัดเลือกพาสต้าที่ผสม TG 2.18% ของแป้งกล้วยดิบ ไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบกับพาสต้าแป้งสาลีทางการค้า (Semolina pasta, SP) เนื่องจากมีค่า hardness และได้รับคะแนนความชอบทางด้านเนื้อสัมผัสสูงสุด จากผลการทดลอง พบว่า พาสต้าที่ผสม TG 2.18% ของแป้งกล้วยดิบ มีความชื้น ไขมัน เส้นใย เถ้า และคาร์โบไฮเดรต สูงกว่า SP แต่มีปริมาณโปรตีนน้อยกว่า โดยพาสต้าที่ผสม TG 2.18% ของแป้งกล้วยดิบ มีโปรตีน 7.65% และ SP มีโปรตีน 12.56%

61910136: MAJOR: FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY; M.Sc. (FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY)

KEYWORDS: Pasta / Green banana flour / Glycemic index

NARTTAYA ARIYASUKKOSIT : EFFECT OF BANANA CULTIVARS, GREEN BANANA FLOUR AND WHOLE GREEN BANANA FLOUR, PROTEIN AND TRANSGLUTAMINASE ON THE QUALITY AND GLYCEMIC INDEX OF PASTA . ADVISORY COMMITTEE: ANOCHA SUKSOMBOON, 2022.

The aim of this research was to study the effect of pulp green banana flour and whole green banana flour from Kluai Namwa and Kluai Hom, protein and transglutaminase on the quality and glycemic index (GI) of pasta. The results showed that pulp green banana flour and whole green banana flour from Kluai Namwa and Kluai Hom affected the color, pasting properties, water solubility index and water absorption index of green banana flour. Green banana flour from the whole of Kluai Namwa had the lowest GI ($p< 0.05$) of 40.46. Pasta was prepared from 4 types of green banana flour. It was found that the pasta from all 4 types of green banana flour had different cooking times (12.30-14.00 min). However, the cooking loss and cooking yield was not significantly different ($p\geq0.05$) as well as the GI value of 83.81-85.53. The result from sensory evaluation showed that the pasta made from all 4 types of green banana flour had no statistically significant difference in a liking score on appearance, color, odor, texture and taste ($p\geq0.05$). Pasta prepared from pulp of green Kluai Hom flour (HPP) and pulp of green Kluai Namwa flour (NPP) received the non-difference highest overall acceptability score ($p\geq0.05$) of 6.10 and 6.13 points, respectively. Therefore, NPP was selected for further experimentation due to its availability and lower cost. Protein types included egg white powder (E), whey protein concentrate (W), and soy protein isolate (S) and amount of protein included 4.35, 8.70 and 13.05% of green banana flour affected the G' and G" values of the dough, cooking properties and texture of pasta. From the microstructure study, it was found that proteins clumped together and separated from starch matrix. The pasta with all levels of soy protein isolate gave the non-significant difference lowest GI value (69.69-70.05) ($p\geq0.05$). The pasta with 8.70 % (green banana flour basis) of soy protein isolate have the least cooking loss and the highest hardness, so it was selected for further experiment. The results from the study of the amount of transglutaminase (TG) included 0, 2.18, 4.35 and 6.52% of green banana flour on the properties of pasta showed that the increasing the TG content increased the G' and G” values. The protein crosslinked was found from SDS-PAGE analysis. The pasta with the addition of 4.35 and 6.52% (green banana flour basis) of TG have lower cooking yield and hardness values. The addition all levels of TG did not affect the microstructure, GI (65.05-68.98), and sensory score of appearance, color, odor, taste, and overall acceptability of pasta ($p\geq0.05$). However, the pasta with 2.18% (green banana flour basis) of TG was selected for chemical composition analysis compared with commercial semolina pasta (SP), due to its higher of hardness value and highest texture liking score. The results showed that 2.18% (green banana flour basis) of TG pasta had moisture, fat, fiber, ash and carbohydrates more than SP but had less protein. The 2.18% (green banana flour basis) of TG pasta contented 7.65% protein, while SP had 12.56% protein.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของ ดร.อโนชา สุขสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่ช่วยกรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเป็นรูปเล่มที่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังดูแลเอาใจใส่และให้กำลังใจเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งใจเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบปากเปล่าวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.อาภัสรา แสงนาค และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สามารถ สายอุต ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.สมชาติ แม่นปืน และ ดร.นิสานารถ กระแสชล สำหรับความกรุณาในการให้ความรู้ และข้อมูลในการวิเคราะห์รูปแบบของโปรตีนด้วยวิธี Sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาทุกท่าน ตลอดจนคณะกรรมการผู้สอบเค้าโครงวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำและให้ข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์กับงานวิจัยให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาทุกท่าน ที่คอยให้คำแนะนำและให้การช่วยเหลืออย่างดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อรัตนะ คุณแม่นุชรี ว่าที่ ร.ต.ฤทธิชัย อริยสุขโฆษิต และนายณัฐภัค อิ่มเอิบ ตลอดจนเพื่อน ๆ ที่คอยให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมา จนสามารถทำสิ่งต่าง ๆ ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่บุพการีบูรพาจารย์

และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบันที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

นาฏยา อริยสุขโฆษิต

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญภาพ ..... ฏ
บทที่ 1 บทนำ 1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย 4
สมมติฐานของการวิจัย 4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
ขอบเขตของการวิจัย 5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6
ดัชนีไกลซีมิก 6
ข้อดีของการคำนึงถึงค่า GI ในการบริโภคอาหาร 6
การลดค่าดัชนีไกลซีมิกในอาหาร 7
การย่อยสตาร์ชในอาหาร 9
สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยของเอนไซม์ 10
พาสต้า 11
ชนิดของพาสต้า 11
กระบวนการผลิตพาสต้า 12

ลักษณะคุณภาพของพาสต้า....12
กล้วย....13
สายพันธุ์กล้วย....13
กล้วยน้ำว้า....16
กล้วยหอม....17
ระดับความแก่ของกล้วย....19
แป้งและสตาร์ชกล้วย....20
การใช้แป้งกล้วยเพื่อลด GI ในอาหาร....27
ผลของชนิดโปรตีนและเอนไซม์ที่มีต่อการลดอัตราการย่อยของสตาร์ช....28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย....40
วัตถุดิบและสารเคมี....40
อุปกรณ์ และเครื่องมือ....42
วิธีดำเนินการวิจัย....44
ตอนที่ 1 ศึกษาผลของแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม ต่อสมบัติทางกายภาพ และค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้ง คุณลักษณะของพาสต้า และค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ....44
ตอนที่ 2 ศึกษาชนิดและปริมาณของโปรตีน ต่อลักษณะทางกระแสวิทยาของโด คุณลักษณะของพาสต้า โครงสร้างทางจุลภาค และค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ....50
ตอนที่ 3 ศึกษาผลของปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ต่อลักษณะทางกระแสวิทยาของโด รูปแบบของโปรตีน ปริมาณหมู่อะมิโนอิสระ คุณลักษณะของพาสต้า โครงสร้างทางจุลภาค ค่าดัชนีไกลซีมิก องค์ประกอบทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ....52
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล....55

4.1 ผลของแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม ต่อสมบัติทางกายภาพ และค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้ง คุณลักษณะของพาสต้า และค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ 55

4.2 ผลการศึกษาชนิดและปริมาณของโปรตีน ต่อลักษณะทางกระแสวิทยาของโด คุณลักษณะของพาสต้า โครงสร้างทางจุลภาค และค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ 69

4.3 ผลของปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ต่อลักษณะทางกระแสวิทยาของโด รูปแบบของโปรตีน ปริมาณหมู่อะมิโนอิสระ คุณลักษณะของพาสต้า โครงสร้างทางจุลภาค ค่าดัชนีไกลซีมิก องค์ประกอบทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ 84

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 99

บรรณานุกรม 102

ภาคผนวก 113

ภาคผนวก ก 114

ภาคผนวก ข 129

ภาคผนวก ค 135

ภาคผนวก ง 142

ภาคผนวก จ 145

ภาคผนวก ฉ 159

ประวัติย่อของผู้วิจัย 162

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	การแบ่งกลุ่มของอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตตามค่าดัชนีไกลซีมิก (GI)	6
2-2	ประเภทของสตาร์ชในอาหารเมื่อพิจารณาตามความสามารถในการถูกย่อย	9
2-3	องค์ประกอบทางโภชนาการของกล้วยน้ำว้าดิบและกล้วยน้ำว้าสุก 100 กรัม	17
2-4	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งกล้วยหอม (Musa AAA group) ระดับความแก่ระยะที่ 1	19
2-5	ขนาดของมีดสตาร์ชของกล้วยพันธุ์ต่าง ๆ	21
2-6	องค์ประกอบของแป้งกล้วยหอม (cavendish) ปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือกที่ระดับความแก่ระยะ 2	26
2-7	คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของไข่ขาวผง	29
2-8	องค์ประกอบของ whey protein concentrate (WPC) และ whey protein isolate (WPI)	31
3-1	ส่วนผสมในการเตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผลจากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม	48
3-2	ส่วนผสมในการเตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีส่วนผสมของชนิดโปรตีนและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน	50
3-3	ส่วนผสมในการเตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีส่วนผสมของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในปริมาณแตกต่างกัน	52
4-1	ค่าสี L* a* และ b* ของแป้งกล้วยดิบ	56
4-2	การเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยดิบ	60
4-3	ดัชนีการละลายน้ำและดัชนีการดูดซับน้ำของแป้งกล้วยดิบ	61
4-4	ค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้งกล้วยดิบ	63
4-5	เวลาที่เหมาะสมในการต้มพาสต้าแป้งกล้วยดิบให้สุก (cooking time) ปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loss) และน้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (cooking yield) ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ	65
4-6	ค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ	67
4-7	คะแนนการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ	68

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4-8 เวลาที่เหมาะสมในการต้มพาสต้าแป้งกล้วยดิบให้สุก (cooking time) ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณโปรตีนแตกต่างกัน 75

4-9 ค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน 83

4-10 เวลาที่เหมาะสมในการต้มพาสต้าแป้งกล้วยดิบให้สุก (cooking time) ปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loss) และน้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (cooking yield) ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน 90

4-11 ลักษณะเนื้อสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน 91

4-12 ค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน 94

4-13 คะแนนการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน 96

4-14 องค์ประกอบทางเคมีของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG1 เปรียบเทียบกับพาสต้าแป้งสาลีทางการค้า 98

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	กระบวนการแปรรูปต่าง ๆ ที่ส่งผลต่ออัตราการย่อยสตาร์ช	8
2-2	ลักษณะต้น เครือ และผลของกล้วยน้ำว้า	16
2-3	ลักษณะต้น เครือ และผลของกล้วยหอม	18
2-4	ระดับความแก่ของกล้วยที่ดูจากการผ่าทางขวางของผลกล้วย	19
2-5	ระดับความแก่ 7 ระยะของกล้วย โดยจำแนกจากสีผิวของเปลือกกล้วย	20
2-6	ภาพที่ถูกส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron micrographs) ของกล้วย 3 สายพันธุ์ ที่กำลังขยาย 1,000 และ 2,500 เท่า	22
2-7	ลักษณะของเม็ดแป้งกล้วยสายพันธุ์ Valery ที่ตรวจสอบด้วยกล้อง scanning electron micrographs (SEM)	22
2-8	รูปแบบ unit cell ของผลึกแบบ A และ B	23
2-9	ลักษณะการหักเหรังสี x-ray ของสายพันธุ์แป้งกล้วยในไทย โดยมีโครงสร้างผลึกแบบ B-type	24
2-10	ปฏิกิริยาการย้ายหมู่เอซิลจากกรดอะมิโนกลูตามีนของ TGase	37
2-11	ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างกรดอะมิโนกลูตามีนและเอมีนของไลซีนของ TGase	37
2-12	ปฏิกิริยาแยกหมู่เอมีนของโปรตีนที่มีกรดอะมิโนกลูตามีนของ TGase	38
3-1	ระดับความแก่ระยะที่ 1 ของกล้วยน้ำว้า และกล้วยหอม	44
4-1	แสดงลักษณะและสีของแป้งกล้วยดิบ	55
4-2	การเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยดิบ	58
4-3	อัตราการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลองของแป้งกล้วยดิบชนิดต่าง ๆ	62
4-4	ลักษณะของเส้นพาสต้าแป้งกล้วยดิบ	64
4-5	อัตราการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลองของพาสต้าแป้งกล้วยดิบชนิดต่าง ๆ	66
4-6	ลักษณะพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณโปรตีนแตกต่างกัน	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-7	ผลของความถี่ต่อค่า storage modulus (G') loss modulus (G") และ loss tangent (tan delta) ของโดแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน ที่แสดงลักษณะทางการไหลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความถี่ 0.1-100 rad/s	72-73
4-8	ปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loos) และน้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (cooking yield) ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน	76
4-9	แสดงลักษณะเนื้อสัมผัส ความแข็ง และการยึดเกาะที่ผิวหน้า ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน	78
4-10	แสดงภาพพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน จากกล้องกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล ที่กำลังขยาย 40 เท่า	80
4- 11	อัตราการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลองของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน เปรียบเทียบกับขนมปังขาว (ตัวอย่างอ้างอิง)	81
4-12	ลักษณะพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน	84
4-13	ผลของความถี่ต่อค่า storage modulus (G') loss modulus (G") และ loss tangent (tan delta) ของโดแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน ที่แสดงลักษณะทางการไหล ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความถี่ 0.1-100 rad/s	85-86
4-14	รูปแบบโปรตีนจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบหลังการอบแห้งที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน ที่สกัดด้วยสภาวะนอน-รีดิวซิง และสภาวะรีดิวซิง	88
4-15	ผลของปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสต่อปริมาณของหมู่อะมิโนอิสระของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์แตกต่างกัน	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-16 แสดงภาพพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส แตกต่างกัน จากกล้องกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล ที่กำลังขยาย 40 เท่า 92

4-17 อัตราการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลองของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน เปรียบเทียบกับขนมปังขาว (ตัวอย่างอ้างอิง) 93

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันผู้บริโภคส่วนใหญ่หันมาให้ความสำคัญกับการเลือกรับประทานอาหารมากขึ้น เนื่องจากปัญหาทางด้านสุขภาพที่เกิดจากการรับประทานอาหาร ได้แก่ โรคอ้วน โรคความดันโลหิตสูง โรคหัวใจและหลอดเลือด และโรคเบาหวาน เป็นต้น โดยสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากการบริโภคอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตมากเกินจำเป็น (Marachai, Kwangpan, & Phimolsiripol, 2013) ค่าดัชนีไกลซีมิก (glycemic index, GI) เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพของอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต โดยวิเคราะห์ความสามารถในการย่อย และการดูดซึมของคาร์โบไฮเดรตภายในระยะเวลา 2 ชั่วโมง การบริโภคอาหารที่มี GI ต่ำ การย่อยและการดูดซึมจะช้ากว่า ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดจะยังคงอยู่ในระดับที่ปกติ ช่วยให้รู้สึกอิ่มนาน ซึ่งเป็นผลดีในการรักษาระดับอินซูลินและไขมันในเลือดที่เหมาะสม จึงทำให้ส่งผลดีต่อสุขภาพในระยะยาว (Frost et al., 1999; Hatekar & Ghodke, 2009) อาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต เช่น ข้าวสาลี ขนมปัง พาสต้า และถั่ว จะมี GI ที่แตกต่างกันออกไป โดย GI มีค่าตั้งแต่ 0-100 แบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ GI สูง (70-100), GI ปานกลาง (56-69) และ GI ต่ำ (1-55) (Eagappan, Mathew, & Sasikumar, 2015) ทั้งนี้ค่า GI ของอาหารต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย นั่นคือ องค์ประกอบของสตาร์ช กระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหาร และส่วนประกอบผลิตภัณฑ์อาหารอื่น ๆ ที่มีอยู่ เช่น ไขมัน โปรตีน ใยอาหาร เป็นต้น (ยุทธนา พิมลศิริผล, 2561) ซึ่งแนวคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารให้มี GI ต่ำ อาจทำได้โดยการปรับเปลี่ยนกรรมวิธีการผลิตหรือเลือกใช้ส่วนผสมที่มี GI ต่ำ

ผลิตภัณฑ์พาสต้า (pasta products) เป็นผลิตภัณฑ์อาหารเส้นที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา (ค.ศ. 2010-2020) การบริโภคพาสต้าเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าจาก 9 ล้านตันต่อปี เป็น 17 ล้านตันต่อปี (BBM Magazine, 2021; News Italian food, 2021) วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตพาสต้า คือ แป้งสาลีดูรัม (durum wheat) ซึ่งแป้งสาลีมีปริมาณกลูเตนสูง ทำให้ผู้ที่ป่วยเป็นโรคแพ้กลูเตน (coeliac disease) ไม่สามารถรับประทานอาหารประเภทนี้ได้ (มาโนชญ์ สุธีรวัฒนานนท์, 2558) จึงมีการใช้วัตถุดิบหลายชนิดทดแทนแป้งสาลีในการผลิตผลิตภัณฑ์พาสต้าปราศจากกลูเตน เช่น แป้งข้าวเจ้า (ขนิษฐา หมวดเอียด, 2561; หทัยชนก ศรีประไพ, ฉัตรชนก บุญ

ไชย, และยศสินี หัวดง, 2561) แป้งถั่ว (กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์ และอโนชา สุขสมบูรณ์, 2557; จิรนาถ ทิพย์รักษา และสุภักษร นุดวงแก้ว, 2551) รวมทั้งแป้งกล้วย (Zandonadi et al., 2012)

กล้วย (*Musa spp.*) เป็นผลไม้ในวงศ์ *Musaceae* (Bi et al., 2017) เป็นวัตถุดิบที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเนื้อกล้วยเป็นแหล่งของสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต ในขณะที่เปลือกกล้วยอุดมไปด้วยแร่ธาตุ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (bioactive compounds) และใยอาหาร (dietary fiber) เช่น เพคติน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส (Khoozani, Bekhit, & Birch, 2019) ข้อมูลจากงานวิจัยก่อนหน้านี้รายงานว่าแป้งกล้วยเป็นแหล่งของสตาร์ชต้านทานการย่อยชนิดที่ 2 (resistant starch type 2) (Nednapis Vatanasuchart, Niyomwit, & Wongkrajang, 2012) ทั้งนี้มีหลายปัจจัยที่ส่งผลถึงการย่อยได้ของสตาร์ช (starch digestibility) ในแป้งกล้วย เช่น สายพันธุ์ (Nednapis Vatanasuchart et al., 2012) ระดับความแก่ (Campuzano, Rosell, & Cornejo, 2018) การทำให้สุก (cooking) (Bi et al., 2017) และการเตรียมแป้งกล้วยจากเนื้อกล้วยและจากกล้วยทั้งผล (Ramli, Alkarkhi, Yeoh, Min-Tze, & Easa, 2009) อย่างไรก็ตามมีข้อมูลว่าหากในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารมีการทำให้สุก หรือต้องมีการทำให้สุกก่อนการบริโภค ก็จะทำให้ GI ของแป้งกล้วยสูงขึ้น (Bi et al., 2017) จึงจะต้องมีการศึกษาถึงการใช้ส่วนผสมอื่น ๆ เพื่อลด GI ของผลิตภัณฑ์อาหารที่ใช้แป้งกล้วยเป็นส่วนผสม

ในปัจจุบันมีรายงานถึงผลของโปรตีน ได้แก่ เวย์โปรตีนเข้มข้น (Menon, Padmaja, Jyothi, Asha, & Sajeev, 2016; ยุทธนา พิมลศิริผล, 2561) โปรตีนไข่ขาว (Zheng, Stanley, Gidley, & Dhital, 2015) และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด (Fujiwara, 2014) ที่มีต่อการลดการย่อยของแป้งในผลิตภัณฑ์อาหารชนิดต่าง ๆ เช่น พาสต้า (Gopalakrishnan, Menon, Padmaja, Sajeev, & Moorthy, 2011; Zheng et al., 2015) ก๋วยเตี๋ยว (Menon et al., 2016; ยุทธนา พิมลศิริผล, 2561) และขนมปัง (Fujiwara, 2014) โดยโปรตีนจะไปทำให้เกิด protein-starch network ซึ่งสามารถขัดขวางการย่อยของเอนไซม์ที่ย่อยสตาร์ชได้ (Gopalakrishnan et al., 2011; Zheng et al., 2015)

นอกจากนั้นมีรายงานว่าการใช้เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (transglutaminase enzyme) ก็สามารถทำให้ปริมาณการปล่อยกลูโคส (glucose release) ในผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวลดลง (Wee & Henry, 2019) และสามารถลดค่า GI ในผลิตภัณฑ์อาหารได้ (Gan, Ong, Wong, & Easa, 2009) เช่น จากงานวิจัยของ Gan et al. (2009) พบว่าการเพิ่มเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ 0.5% โดยน้ำหนัก ลงในส่วนผสมของ แป้งสาลี:โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (95:5) ในการเตรียมเป็นผลิตภัณฑ์บะหมี่ มีผลทำให้ค่า GI ลดลงจาก 52.7 (control) เป็น 51.7 โดยเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจะกระตุ้นให้เกิดพันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) ระหว่างกรดอะมิโนระหว่างโมเลกุลของโปรตีน จึง

สามารถไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ย่อยสตาร์ชมากขึ้น จึงมีผลทำให้ค่า GI ของอาหารลดลง (Fotgcren, 2019)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาพาสต้าที่ใช้แป้งกล้วยดิบ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มี GI ต่ำ โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม ชนิดและปริมาณของโปรตีน รวมทั้งผลของการใช้เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเป็นส่วนผสมในพาสต้าแป้งกล้วยดิบ ที่มีต่อคุณลักษณะทางกระแสวิทยา คุณลักษณะของพาสต้า โครงสร้างทางจุลภาค ค่า GI และลักษณะทางประสาทสัมผัสของพาสต้าจากแป้งกล้วยดิบ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม ต่อสมบัติทางกายภาพ และค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้ง คุณลักษณะของพาสต้า และค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

2. เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของโปรตีน ต่อลักษณะทางกระแสวิทยาของโด คุณลักษณะของพาสต้า โครงสร้างทางจุลภาค และค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

3. เพื่อศึกษาผลของปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ต่อลักษณะทางกระแสวิทยาของโด รูปแบบของโปรตีน ปริมาณหมู่อะมิโนอิสระ คุณลักษณะของพาสต้า โครงสร้างทางจุลภาค ค่าดัชนีไกลซีมิก องค์ประกอบทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

สมมติฐานของการวิจัย

1. แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้ง คุณลักษณะของพาสต้า และค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

2. ชนิดและปริมาณของโปรตีน มีผลต่อลักษณะทางกระแสวิทยาของโด คุณลักษณะของพาสต้า โครงสร้างทางจุลภาค และค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

3. ปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส มีผลต่อลักษณะทางกระแสวิทยาของโด รูปแบบของโปรตีน ปริมาณหมู่อะมิโนอิสระ คุณลักษณะของพาสต้า โครงสร้างทางจุลภาค ค่าดัชนีไกลซีมิก องค์ประกอบทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเพิ่มมูลค่า และเพิ่มแนวทางในการใช้ประโยชน์จากกล้วยได้

2. สามารถลดการเกิดของเสียในการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากกล้วยได้

3. สามารถลดค่าดัชนีไกลซีมิก และปรับปรุงคุณภาพของพาสต้าแป้งกล้วยดิบให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคได้

4. เป็นทางเลือกใหม่ให้แก่ผู้บริโภคที่รักสุขภาพ และผู้ที่มีโรคประจำตัว ได้แก่ ผู้ป่วยโรคแพ้กลูเตน ผู้ป่วยโรคเบาหวาน และผู้ป่วยโรคหัวใจและหลอดเลือด เป็นต้น

ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม นำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืด ดัชนีการดูดซับน้ำ ดัชนีการละลายน้ำ ค่าสี (L*, a* และ b*) และค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้ง แล้วนำแป้งกล้วยที่ผลิตได้มาเตรียมพาสต้า แล้วนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะของพาสต้า ได้แก่ คุณภาพของพาสต้าหลังการต้ม (cooking time, cooking loss และ cooking yield) และค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ จากนั้นพิจารณาคัดเลือกชนิดของแป้งกล้วย (สายพันธุ์ แป้งจากเนื้อกล้วย แป้งจากกล้วยทั้งผล) ที่ทำให้ได้พาสต้าที่มีค่า GI ต่ำที่สุด และพิจารณาร่วมกับคุณลักษณะอื่น ๆ ของพาสต้า

2. นำพาสต้าที่คัดเลือกได้จากข้อ 1 มาแปรชนิดของโปรตีน 3 ชนิด (ไข่ขาวผง เวย์โปรตีน และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด) และปริมาณของโปรตีน 3 ระดับ นำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกระแสวิทยาของโด คุณลักษณะของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ ได้แก่ คุณภาพของพาสต้าหลังการต้ม (cooking time, cooking loss และ cooking yield) ลักษณะเนื้อสัมผัส (hardness, adhesiveness และ tensile strength) โครงสร้างทางจุลภาค และค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ จากนั้นพิจารณาคัดเลือกชนิดและปริมาณของโปรตีนที่เหมาะสม โดยคัดเลือกชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ทำให้ได้พาสต้าที่มีค่า GI ต่ำที่สุด และพิจารณาร่วมกับคุณลักษณะอื่น ๆ ของพาสต้า

3. นำพาสต้าที่คัดเลือกได้จากข้อ 2 มาแปรปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 4 ระดับ นำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกระแสวิทยาของโด รูปแบบของโปรตีนด้วยวิธี SDS-PAGE ปริมาณหมู่อะมิโนอิสระ คุณภาพของพาสต้าหลังการต้ม (cooking time, cooking loss และ cooking yield) ลักษณะเนื้อสัมผัส (hardness, adhesiveness และ tensile strength) โครงสร้างทางจุลภาค ค่าดัชนีไกลซีมิก องค์ประกอบทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของพาสต้าจากแป้งกล้วยดิบ

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดัชนีไกลซีมิก

ค่าดัชนีไกลซีมิก (glycemic index, GI) เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพของอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตใช้วิเคราะห์ว่าคาร์โบไฮเดรตที่บริโภค สามารถย่อยสลายได้ง่ายหรือยากเพียงใด เป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าภายในเวลา 2 ชั่วโมงหลังรับประทานอาหาร เมื่อคาร์โบไฮเดรตเข้าสู่ระบบการย่อยและดูดซึมของร่างกาย ระดับน้ำตาลในเลือดจะเพิ่มขึ้นมากหรือน้อย โดยการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน คือ น้ำตาลกลูโคส หรือขนมปังขาว ที่มีค่า GI เท่ากับ 100 โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลุ่มอาหารซึ่งเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตตามค่า GI ออกเป็น 3 กลุ่ม ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 การแบ่งกลุ่มของอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตตามค่าดัชนีไกลซีมิก (GI)

ระดับ GI	ค่า GI	ชนิดอาหาร
สูง	70-100	ขนมปังขาว คอร์นเฟลค ข้าวเมล็ดสั้น มันฝรั่งอบ มันฝรั่งทอด ไอศครีม ลูกเกด ผลไม้อบแห้ง กล้วยสุก แครอท ผลไม้ที่มีรสหวาน เช่น แตงโม
กลาง	56-69	อาหารเส้น ถั่วคั่ว ถั่วฝักเขียว มันเทศ น้ำส้มคั้น บลูเบอร์รี่ ข้าวโพดหวาน ข้าวโพดคั่ว ซุปถั่ว โฮลวีท ข้าวกล้อง
ต่ำ	0-55	ถั่วชนิดต่าง ๆ ผัก อาหารที่มีเส้นใยสูง ธัญพืชที่มีน้ำตาลต่ำ โยเกิร์ตไขมันต่ำและไม่หวาน เกรฟฟรุต แอปเปิ้ล มะเขือเทศ กล้วยดิบ

ที่มา: ยุทธนา พิมลศิริผล (2561)

ข้อดีของการคำนึงถึงค่า GI ในการบริโภคอาหาร

การรับประทานอาหารที่มีค่า GI สูงในปริมาณมากจะทำให้คาร์โบไฮเดรตในอาหารถูกย่อยเป็นกลูโคสและถูกดูดซึมอย่างรวดเร็ว มีผลไปกระตุ้นให้มีการหลั่งฮอร์โมนอินซูลิน ซึ่งเป็นฮอร์โมนที่ทำให้กลูโคสถูกนำเข้าสู่เซลล์ต่าง ๆ ในร่างกายเพื่อเผาผลาญไปเป็นพลังงาน แต่หลังจาก

การรับประทานอาหารไป 2-4 ชั่วโมง ปริมาณอาหารที่ถูกดูดซึมในทางเดินอาหารลดลง แต่ฤทธิ์ของอินซูลินยังคงอยู่ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดลดลงมากจนอาจทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดต่ำและทำให้รู้สึกอยากอาหาร ส่วนคนที่รับประทานอาหารที่มีค่า GI ต่ำ ระดับน้ำตาลในเลือดยังคงอยู่ในระดับปกติ หลังจากการรับประทานอาหาร 4-6 ชั่วโมง ร่างกายจะหลั่งฮอร์โมนบางชนิดออกมาเพื่อรักษาระดับน้ำตาลในเลือดให้คงที่ โดยกระตุ้นการสลายไกลโคเจน ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในร่างกาย และเพิ่มการสร้างกลูโคสจากแหล่งอาหารอื่น เช่น ไขมัน การรับประทานอาหารที่มีค่า GI สูง จึงมีผลให้ระดับกรดไขมันในเลือดเพิ่มขึ้น มากกว่าการรับประทานอาหารที่มีค่า GI ต่ำ ดังนั้นผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวานควรคำนึงถึงค่า GI ของอาหารที่บริโภค ซึ่งผู้ป่วยโรคเบาหวานควรบริโภคอาหารที่มีค่า GI ต่ำ (low GI) เพราะนอกจากประโยชน์ต่าง ๆ ที่เกิดจากการย่อย และดูดซึมช้า ยังเป็นอาหารที่ช่วยให้รู้สึกอิ่มง่ายและนาน ทำให้เกิดผลดีในการรักษาระดับอินซูลินและไขมันในเลือดที่เหมาะสม ส่งผลดีต่อสุขภาพในระยะยาว ในปัจจุบันมีผู้สนใจอาหารที่มีค่า GI ต่ำ และนำไปใช้ในการดูแลสุขภาพของผู้ป่วยเบาหวานผลปรากฏว่าการเลือกอาหารที่มีค่า GI ต่ำ ให้ผู้ป่วยเบาหวานรับประทาน สามารถช่วยควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดได้ดียิ่งขึ้น (ยุทธนา พิมลศิริผล, 2561)

ทั้งนี้ค่า GI ของอาหารต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย นั่นคือ องค์ประกอบของสตาร์ช (ปริมาณอะไมโลส อะไมโลเพกติน และสตาร์ชต้านทานการย่อย) สัดส่วนและชนิดของน้ำตาล รวมถึงโครงสร้างของสตาร์ช (starch) ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ การปรุง กระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหาร และส่วนประกอบผลิตภัณฑ์อาหารอื่น ๆ ที่มีอยู่ เช่น ไขมัน โปรตีน ใยอาหาร เป็นต้น มีผลให้ค่า GI ของอาหารอย่างเดียวกันมีความแตกต่างกันไป ผู้ผลิตในอุตสาหกรรมอาหารมีแนวคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารที่มีค่า GI ต่ำ ด้วยการใช้ส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารที่หลากหลาย รวมทั้งการปรับเปลี่ยนกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหาร (ยุทธนา พิมลศิริผล, 2561)

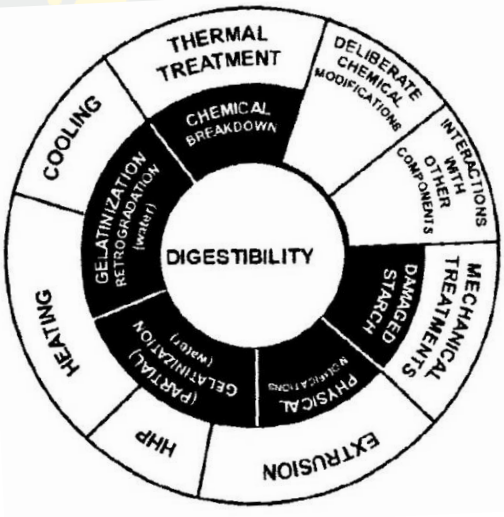
การลดค่าดัชนีไกลซีมิกในอาหาร

การลดค่า GI นั้นมีหลายวิธีที่นิยมในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเริ่มจากวิธีการพื้นฐาน ได้แก่ การทดแทนวัตถุดิบที่ใช้ โดยเลือกวัตถุดิบที่มีค่า GI ลดลงหรือต่ำกว่ามาผสม ซึ่งเป็นหลักกลยุทธ์ทางโภชนาการหรือเป็นการใช้รูปแบบการแลกเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรต ซึ่งสามารถเลือกใช้วัตถุดิบหรือส่วนผสมมาแลกเปลี่ยนหรือทดแทนกันได้ เช่น การทดแทนแป้งขัดขาวหรือข้าวขาวที่มีค่า GI สูง ด้วยการใช้ธัญพืชไม่ขัดสี หรือแป้งโฮลล์เกรน หรือพืชตระกูลถั่ว ซึ่งมีค่า GI ต่ำกว่ามาทดแทน เช่น การใช้แป้งถั่วหรือการใช้วัตถุดิบที่ดัดแปรทั้งทางธรรมชาติ และทางกายภาพ เคมี หรือ

เอนไซม์ เช่น สตาร์ชต้านทานการย่อยเข้ามาทดแทนแป้งหรือสตาร์ชปกติที่ใช้ทั่วไป การเติมโปรตีนเข้าไปเป็นส่วนผสมหรือทดแทน ได้แก่ กลูเตน เวย์โปรตีน เป็นต้น นอกจากนี้อาจจะเป็นการเติมใยอาหาร หรือโพลีแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (non-starch polysaccharides, NSP) เพื่อเพิ่มความหนืด และเพิ่มส่วนที่ย่อยไม่ได้ในร่างกาย และทำให้การทำงานของเอนไซม์เป็นไปได้ยากขึ้น เช่น การใช้เจลจากผลสำรอง ใยอาหารจากมันสำปะหลัง หรือวัตถุดิบที่เป็นเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสต่าง ๆ เป็นต้น (ยุทธนา พิมลศิริผล, 2561)

การลดอัตราการย่อยสตาร์ชและค่า GI มักจะมาจากผลของวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของใยอาหารทั้งชนิดละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำ เช่น เฮมิเซลลูโลส เพกติน เป็นต้น หรือการมีปริมาณสตาร์ชต้านทานการย่อย (resistant starch, RS) ในวัตถุดิบที่ใช้ ซึ่งจะเห็นได้ว่า NSP นับเป็นกลุ่มของใยอาหารที่เป็นส่วนที่ร่างกายไม่สามารถย่อยสลายได้ โดยใยอาหารจะไม่ถูกย่อยด้วยกรดในกระเพาะอาหาร และเอนไซม์ในลำไส้เล็ก ใยอาหารแบ่งตามความสามารถในการละลายน้ำได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ใยอาหารที่ละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำ และความ สามารถของใยอาหารเหล่านี้ คือ การดูดซับอาหารหลายอย่าง ได้แก่ น้ำตาล คลอเรสเตอรอล เกลือแร่บางชนิด ดังนั้นจึงมีผลในการชะลอและลดการดูดซึมของสารอาหารดังกล่าวเข้าสู่ร่างกาย แต่จะไม่ถูกย่อยโดยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหาร ซึ่ง NSP เหล่านี้ อาจเรียกว่า ไฮโดคอลลอยด์ หรือ กัม ไม่ว่าจะเป็น กัวกัม เพกทิน แซนแทนกัม โลคัสบีนกัม เป็นต้น (ยุทธนา พิมลศิริผล, 2561)

นอกเหนือจากวัตถุดิบที่เติมลงไปแล้ว การลดค่า GI จะขึ้นกับกระบวนการต่าง ๆ ที่แปรรูป เช่น กระบวนการให้ความร้อน ความเย็น ความดัน เป็นต้น โดยภาพที่ 2-1 แสดงกระบวนการหรือปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสตาร์ช และส่งผลต่อค่า GI ซึ่งอาจมีผลจากการทำอันตรกิริยา (interactions) ระหว่างวัตถุดิบหรือส่วนผสมด้วย (ยุทธนา พิมลศิริผล, 2561)



ภาพที่ 2-1 กระบวนการแปรรูปต่าง ๆ ที่ส่งผลต่ออัตราการย่อยสตาร์ช (ยุทธนา พิมลศิริผล, 2561)

การย่อยสตาร์ชในอาหาร

ในกระบวนการย่อยอาหารพวกคาร์โบไฮเดรตหรือสตาร์ช เริ่มตั้งแต่อาหารเข้าสู่ปาก ฟันจะทำหน้าที่เคี้ยวบดอาหารให้มีขนาดเล็กลง ในน้ำลายมีเอนไซม์ชื่อแอลฟา-อะไมเลส (α-amylase) ซึ่งสามารถย่อยสตาร์ชให้มีขนาดเล็กลงเป็นเดกซตริน (dextrin) แต่การย่อยอาหารในปากจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เพราะอาหารอยู่ในปากเป็นช่วงระยะเวลาสั้น ๆ จากนั้นอาหารจะถูกกลืนผ่านหลอดอาหารไปยังกระเพาะอาหาร ซึ่งมีเอนไซม์อะไมเลสอยู่แต่ไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากอะไมเลสไม่ทำงานในสภาวะที่มีความเป็นกรดสูง ดังนั้นในกระเพาะอาหารจึงเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส คือ การแตกตัวของคาร์โบไฮเดรตทำให้แป้งโมเลกุลใหญ่มีขนาดเล็กลง จากนั้นกระบวนการย่อยแป้งที่แท้จริงจะเกิดที่ลำไส้เล็กซึ่งมีสภาพเป็นด่างที่เหมาะสมกับสภาวะการย่อย โดยน้ำดีทำให้ลำไส้เล็กสามารถย่อยสตาร์ชจนสุดท้ายได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่สามารถดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดได้ ดังนั้นในเชิงโภชนาการสามารถแบ่งสตาร์ชออกเป็น 3 ประเภท ตามอัตราและระยะเวลาในการย่อย ได้แก่ สตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว (rapidly digestible starch, RDS) สตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างช้า ๆ (slowly digestible starch, SDS) และสตาร์ชต้านทานการย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch, RS) (อริญา ลาภโคกสูง, 2555)

ตารางที่ 2-2 ประเภทของสตาร์ชในอาหารเมื่อพิจารณาตามความสามารถในการถูกย่อย

ประเภทสตาร์ช	แหล่งของสตาร์ช	การย่อยในลำไส้เล็ก
Rapidly digestible starch (RDS)	อาหารที่มีส่วนประกอบของสตาร์ชเมื่อผ่านการหุงต้มใหม่ ๆ	สามารถถูกย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วไปเป็นน้ำตาลกลูโคสภายใน 20 นาที
Slowly digestible starch (SDS)	สตาร์ชจากธัญพืชดิบ ผลิตภัณฑ์เส้นที่ทำสุก	สามารถถูกย่อยสลายได้อย่างช้า ๆ ไปเป็นน้ำตาลกลูโคสได้อย่างสมบูรณ์ โดยใช้เวลาตั้งแต่ 20-120 นาที
Resistant starch (RS)	เมล็ดธัญพืชที่ถูกบด หรือสตาร์ชที่เกิดการคืนตัว	ทนต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็ก

ที่มา: อริญา ลาภโคกสูง (2555)

สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยของเอนไซม์

สตาร์ชที่ทนต่อการย่อย (resistant starch, RS) เป็นสตาร์ชที่จัดอยู่ในกลุ่มสตาร์ชดัดแปร (modified starch) เป็นสตาร์ชและผลิตภัณฑ์ของสตาร์ชที่ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์และถูกดูดซึมในลำไส้เล็กของมนุษย์ได้ โดย RS แสดงพฤติกรรมคล้ายคลึงกับใยอาหาร จากนั้น RS ถูกส่งผ่านไปยังลำไส้ใหญ่ และถูกหมักด้วยจุลินทรีย์ภายในลำไส้ใหญ่ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นกรดไขมันสั้น ๆ เช่น acetic acid, propionic acid และ butyric acid เป็นต้น โดยทั่วไป RS สามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภท ได้แก่

1. physically inaccessible starch (RS1) หมายถึง สตาร์ชที่ไม่สามารถถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์ เนื่องจากเม็ดสตาร์ชถูกห่อหุ้มอยู่ในร่างแหของโปรตีน หรือถูกตรึงอยู่ภายในเซลล์หุ้มเมล็ดพืช ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ ซึ่ง RS ประเภทนี้สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติแต่เป็นส่วนน้อย โดยส่วนใหญ่พบในเมล็ดพืช เช่น ถั่ว หรือเมล็ดธัญพืชที่ผ่านการโม่บดโดยเหลือส่วนของเม็ดสตาร์ชติดอยู่กับผนังเซลล์ อาหารที่ทำจากสตาร์ชชนิดนี้ทนต่อความร้อนในการทำอาหารปกติ และสามารถใช้เป็นส่วนผสมในอาหารได้หลากหลาย

2. resistant granular starch (RS2) เป็นสตาร์ชที่เม็ดสตาร์ชมีคุณสมบัติทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ตามลักษณะของโครงสร้างที่เป็นธรรมชาติของเม็ดสตาร์ชที่ไม่มีรูหรือช่องเปิดให้เอนไซม์เข้าไปในเม็ดสตาร์ช ซึ่งมีลักษณะรวมตัวกันอย่างหนาแน่นในแนวแผ่รัศมี จึงทำให้โครงสร้างมีข้อจำกัดยากต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ โดยส่วนใหญ่ RS ชนิดนี้จะอยู่ในรูปของเม็ดสตาร์ชดิบ (native granular starch) พบได้ในสตาร์ชมันฝรั่ง (potato starch) และกล้วยดิบ (green banana)

3. retrogradation starch (RS3) คือสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยของเอนไซม์ ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของสายอะไมโลสระหว่างการทำการลดอุณหภูมิของสตาร์ชที่ผ่านการเกิดเจลาติไนเซชัน ซึ่งเรียกว่ากระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชัน เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายสามมิติที่มีความแข็งแรง และสามารถทนต่อการย่อยของเอนไซม์

4. chemically modification starch (RS4) เป็นสตาร์ชชนิดใหม่ เกิดจากการดัดแปรทางเคมีที่ทำให้มีพันธะที่ต่างไปจาก α-(1, 4) หรือ α-(1, 6) โดยปฏิกิริยาการดัดแปรทางเคมีแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ครอสลิง (cross linking) เอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) และอีเทอร์ริฟิเคชัน (etherification)

5. amylose-lipid complexed starch (RS5) เป็นสตาร์ชทนต่อการย่อยของเอนไซม์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลอะไมโลสกับไขมันเกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง มีความเสถียรต่อความร้อนสูง และสามารถทนต่อการย่อยของเอนไซม์ได้ (อริญา ลาภโคกสูง, 2555)

พาสต้า

ผลิตภัณฑ์พาสต้า (pasta) เป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่รับประทานเป็นอาหารหลักมาแต่โบราณของชาวยุโรป โดยทั่วไปพาสต้าทำมาจากแป้งเซโมลินา (semolina) ที่โม่ด้วยวิธีพิเศษจากข้าวสาลีชนิดดูรัม ผสมกับน้ำนวดให้เข้ากัน แล้วนำเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (extruder) ออกมาเป็นเส้นรูปร่างแตกต่างกัน เช่น สปาเก็ตตี้ มักกะโรนี เป็นต้น (จิรนาถ ทิพย์รักษา และสุภักษร นุดวงแก้ว, 2551) นอกจากนี้ยังรวมถึงผลิตภัณฑ์พาสต้าแบบตะวันออก เช่น บะหมี่ (noodles) ก๋วยเตี๋ยว วุ้นเส้น เป็นต้น การจำแนกประเภทของพาสต้าอาจแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ สูตรผลิตภัณฑ์ กรรมวิธีการผลิต หรือรูปร่างของผลิตภัณฑ์ (กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์, อโนชา สุขสมบูรณ์, และอาภัสรา แสงนาค, 2560)

ชนิดของพาสต้า

มีทั้งชนิดอบแห้งและแป้งสด ดังนี้ (วิภา โรจนะเมธากุล, 2545)

1. พาสต้าสด (fresh pasta) พาสต้าสดส่วนใหญ่จะใช้ไข่และน้ำปริมาณมาก ดังนั้นก่อนนำไปบริโภคต้องเก็บโดยการแช่เย็นหรือแช่แข็งไว้ เพื่อไม่ให้เกิดการเสื่อมเสีย การที่มีส่วนผสมของไข่ทำให้เส้นพาสต้ามีสีสด มีสี กลิ่นรสที่ดี และมีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มมากขึ้น พาสต้าสดสามารถทำให้แห้งและเก็บได้ที่อุณหภูมิห้อง ข้อสำคัญคือ ต้องทำให้แห้งอย่างสมบูรณ์ก่อนที่จะนำไปเก็บ โดยเส้นพาสต้าสดจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าเส้นพาสต้าแบบแห้งจึงยากต่อการเก็บรักษา แต่เส้นพาสต้าสดให้เนื้อสัมผัสที่นุ่มและต้องการเวลาที่ใช้ในการต้มสุกน้อยกว่าเส้นพาสต้าแบบแห้ง แต่มีข้อระวังคือ อย่าให้เส้นสุกเกินไป เส้นพาสต้าสดจะพองตัวได้เพียงเล็กน้อยซึ่งต่างจากเส้นพาสต้าแบบแห้ง

2. พาสต้าอบแห้ง (dried pasta) พาสต้าอบแห้งเป็นเส้นพาสต้าที่ผ่านการทำแห้งก่อนที่จะนำมาบรรจุ ส่วนใหญ่แล้วจะทำจากแป้งเซโมลินา น้ำ และเกลือ แต่สามารถทำจากแป้ง และเครื่องปรุงชนิดอื่น ๆ ได้ การทำพาสต้าโดยไม่ใช้ไข่จะสามารถทำให้เก็บพาสต้าไว้โดยไม่ต้องแช่เย็นหรือแช่แข็ง เส้นพาสต้าแห้งจะมีความแข็งแรงพอที่จะเก็บไว้ได้โดยไม่แตกหัก เพราะผลิตจากแป้งเซโมลิน่า ซึ่งโม่จากแป้งสาลีดูรัม เป็นแป้งเนื้อแน่นมีกลูเตนสูง ทำให้ได้รูปทรงตามที่ต้องการและมีเนื้อสัมผัสเหนียวนุ่ม

กระบวนการผลิตพาสต้า

จำแนกตามชนิดของวัตถุดิบได้ดังนี้

1. วิธีการผลิตพาสต้าจากข้าวสาลี

วิธีการผลิตพาสต้าจากข้าวสาลี เป็นวิธีการผลิตแบบดั้งเดิม (conventional pasta process) โดยการผสมเซโมลินาข้าวสาลีหรือแป้งกับน้ำให้เป็นโด (dough) ที่มีความชื้น 30-34% นำโดที่ได้มาอัดให้มีรูปร่างต่าง ๆ ผ่านหน้าแปลนหรือช่องเปิดของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (extruder) เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์เป็นเครื่องมือที่รวมหน่วยปฏิบัติการหลายหน่วยเข้าด้วยกัน โดยสามารถผสม นวด และอัดเส้นออกมาให้มีรูปร่างตามต้องการขึ้นกับหน้าแปลนที่ใช้ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์มาทำให้แห้งเพื่อให้พาสต้ามีความชื้นลดลงเหลือ 12.5% ก่อนการบรรจุ (Giese, 1992)

2. วิธีการผลิตพาสต้าจากแป้งชนิดอื่น

วิธีการผลิตพาสต้าจากแป้งชนิดอื่นที่ไม่ใช่แป้งสาลีนั้นไม่ใช้วิธีการผลิตแบบดั้งเดิม เนื่องจากแป้งสาลีนั้นมีโปรตีนกลูเตน เมื่อนำแป้งสาลีผสมกับน้ำแล้วนวดให้เข้ากันจะเกิดเป็นก้อนโดที่มีความแข็งพอเหมาะ แต่สำหรับผลิตภัณฑ์พาสต้าบางประเภท ได้แก่ ก๋วยเตี๋ยว เส้นหมี่ ขนมจีน วุ้นเส้น เป็นต้น สามารถผลิตได้จากแป้งข้าวเจ้า แป้งจากพืชหัว หรือ แป้งจากถั่ว เช่น แป้งมันเทศ แป้งมันฝรั่ง แป้งถั่วเขียว เป็นต้น ซึ่งเป็นที่ไม่มีโปรตีนกลูเตน จึงไม่สามารถใช้การผลิตแบบเดียวกับการทำพาสต้าที่ทำจากข้าวสาลีได้ วิธีการที่นำมาใช้ทำได้หลายวิธี คือ (1) การใช้สมบัติของสตาร์ชซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในแป้ง โดยการให้ความร้อนเช่น การนึ่ง หรือการต้ม เพื่อให้แป้งเกิดเจลและให้โครงสร้างที่แข็งแรงกับผลิตภัณฑ์ (2) การเติมโปรตีนเพื่อให้เป็นโครงสร้างแก่ผลิตภัณฑ์ (3) การใช้สารปรับปรุงคุณภาพที่มีสมบัติเฉพาะ เช่น กัม คาร์ราจีแนน อัลจิเนต เป็นต้น โดยปกติเทคโนโลยีที่ใช้ผลิตพาสต้าจากแป้งที่ไม่ใช่ข้าวสาลีใช้วิธีการให้ความร้อนอุณหภูมิ 90-95 องศาเซลเซียส กับสตาร์ชโดบางส่วน จากนั้นนำมาผสมกับส่วนผสมที่เหลือ สตาร์ชที่ผ่านการให้ความร้อนทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้เกิดการจับกันเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง (Pagani, Gallant, Bouchet, Resmini, 1986)

ลักษณะคุณภาพของพาสต้า

พาสต้าคุณภาพดีจะมีสีเหลืองใสสวย ไม่มีรอยแตกแยก มีความยืดหยุ่น เมื่อนำมาต้มแล้วไม่เปื่อย มีความคงตัวและดูดซึมน้ำได้ดี ในขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพพาสต้า ทำได้โดย

1. การวัดสี ใช้เครื่องวัดสีแบบสะท้อนแสง (light reflectance) เช่น เครื่อง Hunter Color Difference Meter (Model D25) วัดค่าสีของพาสต้าเปรียบเทียบกับสีดำเป็นพื้น อ่านค่าได้ 0-12 โดยค่ายิ่งสูงมีสีเหลืองสวย (เนื่องจากค่าสีดำพื้นอ่านค่าได้ 0)

2. น้ำหนักหลังการต้ม เมื่อนำเส้นพาสต้าหนัก 10 กรัม มาต้มกับน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร จนเดือดเป็นเวลา 12 นาที จากนั้นนำมาทำให้สะเด็ดน้ำ แล้วชั่งน้ำหนักของเส้นหลังต้ม

3. น้ำหนักที่หายไปหลังการต้ม เป็นจำนวนของแข็งจากการระเหยน้ำที่ใช้ต้มพาสต้า คิดเป็นร้อยละน้ำหนักแห้งของพาสต้า

4. ความคงทน ใช้วัดด้วยเครื่องวัดแรงเฉือน (shearing) มีหน่วยเป็นกรัมต่อเซนติเมตร (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2532)

กล้วย

กล้วย (*Musa spp.*) เป็นผลไม้เขตร้อนในวงศ์ *Musaceae* เป็นพืชเมืองร้อน มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปเอเชียโดยเฉพาะเอเชียตอนใต้ และตะวันออกเฉียงใต้ เป็นอาหารชนิดแรก ๆ ของมนุษย์ เป็นผลไม้เก่าแก่พอ ๆ กับข้าว เนื่องจากกล้วยเป็นพืชที่ปลูกง่าย และใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วน ประเทศไทยเป็นแหล่งพันธุกรรมกล้วยหลากหลายชนิดจึงมีกล้วยป่าและกล้วยปลูกอยู่ทั่วไป นับเฉพาะกล้วยกินได้ ไม่รวมกล้วยป่า อาจมีมากกว่าชนิดที่รู้จักแพร่หลาย เช่น กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม กล้วยไข่ กล้วยหักมุก กล้วยเล็บมือนาง ส่วนกล้วยชนิดอื่น ๆ อาจเป็นที่รู้จักเฉพาะในท้องถิ่นเท่านั้น (เพ็ญจันทร์ สุทธานุกูล, 2558b)

กล้วยมีคุณค่าทางโภชนาการและให้พลังงานแก่ร่างกายสูง ไขมันต่ำ เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย ช่วยลดความดันโลหิตสูง เหมาะเป็นอาหารสำหรับคนชรา ผู้เป็นโรคเกี่ยวกับทางเดินอาหาร และผู้ที่ต้องการลดความอ้วน อีกทั้งกล้วยยังเป็นผลไม้ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง แต่นอกจากคุณค่าทางโภชนาการแล้วกล้วยยังมีสรรพคุณทางยาที่หลากหลาย ได้แก่ ใช้เป็นยาต้านอาการท้องร่วง ต้านการเกิดแผลในกระเพาะอาหาร เป็นยาต้านจุลชีพ เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ช่วยลดน้ำตาลในเลือด ช่วยรักษาบาดแผล ต้านการเกิดนิ่ว และต้านมะเร็ง (Qamar & Shaikh, 2018)

สายพันธุ์กล้วย

1. จำแนกตามชื่อวิทยาศาสตร์ (สุนทรีย์ แสงสีโสต, 2543)

กล้วยมีอยู่หลายชนิดดังนั้นจึงมีชื่อเรียกกันมากมาย นักวิทยาศาสตร์จึงได้แบ่งกลุ่มกล้วยไว้เป็นกลุ่มใหญ่ 5 กลุ่ม ดังนี้

1.1 กล้วยป่าออร์นาตา (wild ornata: *Musa ornata*) ในประเทศไทยปลูกมากแถบภาคเหนือเรียกกันว่า กล้วยบัว แต่จังหวัดลำปางเรียกว่า กล้วยป่า

1.2 กล้วยป่าอะคิวมินาตา (wild acuminata: *Musa acuminata*) กล้วยในกลุ่มนี้มีอยู่ 5 ชนิดได้แก่ maleccensis, microcarpa, seamea, banksii และ burmanica ปลูกแพร่หลายในประเทศไทย จึงเรียกว่า กล้วยทอง หรือ กล้วยแข

1.3 กล้วยป่าบาลบิเซียนา (wild balbisana: *Musa balbis*) ปลูกกันแพร่หลายทั่วประเทศ มีชื่อเรียกว่า กล้วยตานี

1.4 กล้วยพันธุ์อะคิวมินาตา (acuminata caltivars) กล้วยกลุ่มนี้มีหลายพันธุ์ เช่น กล้วยเล็บมือนาง กล้วยไข่ กล้วยหอม กล้วยหอมทอง กล้วยหอมเขียว กล้วยหอมค่อม

1.5 กล้วยลูกผสมอะคิวมินาตากับบาลบิเชียนา (acuminata balbisiana) พันธุ์กล้วยในกลุ่มนี้ ได้แก่ กล้วยลังกา กล้วยน้ำ กล้วยหักมุก กล้วยน้ำว้า กล้วยส้ม

2. จำแนกตามลักษณะทางพันธุกรรมหรือจีโนม (genome)

องค์ประกอบของจีโนมมีบทบาทสำคัญในการจำแนกประเภทของกล้วย กลุ่มจีโนมที่สำคัญ ได้แก่ ดิพลอยด์ (diploids: AA, BB, AB) ทริพลอยด์ (triploids: AAA, AAB, ABB) และเททระพลอยด์ (tetraploids: AAAA, AAAB, AABB, ABBB) (Pillay, Tenkouano, Ude, & Ortiz, 2004)

ตั้งแต่ พ.ศ. 2498 นักวิชาการได้เริ่มจำแนกชนิดของกล้วยตามหลักวิชาการสมัยใหม่ขึ้น คือ มีการแยกชนิดตามพันธุกรรม โดยใช้จีโนมของกล้วยเป็นตัวกำหนดในการแยกชนิด กล่าวคือ กล้วยที่บริโภคกันในปัจจุบันนี้มีบรรพบุรุษเพียง 2 ชนิด เท่านั้น คือ กล้วยป่า และกล้วยตานี กล้วยที่มีกำเนิดจากกล้วยป่ามีจีโนมทางพันธุกรรมเป็น AA กล้วยที่มีกำเนิดจากกล้วยตานีมีจีโนมเป็น BB ส่วนกล้วยที่เกิดจากลูกผสมของกล้วยทั้ง 2 ชนิดจะมีจีโนมเป็น AAB, ABB, AABB และ ABBB ปัจจุบันกล้วยในเมืองไทยจำแนกชนิดตามจีโนม ดังนี้

2.1 กลุ่ม AA ที่พบในประเทศไทยมี กล้วยป่า สำหรับกล้วยกินได้ในกลุ่มนี้มีขนาดเล็ก รสหวาน กลิ่นหอม รับประทานสด ได้แก่ กล้วยไข่ กล้วยเล็บมือนาง กล้วยหอมจันทร์ กล้วยไข่ทองร่วง กล้วยไข่จีน กล้วยน้ำนม กล้วยไล กล้วยสา กล้วยหอม กล้วยหอมจำปา และกล้วยทองกาบดำ

2.2 กลุ่ม AAA กล้วยกลุ่มนี้มีจำนวนโครโมโซม 2n = 33 ผลจึงมีขนาดใหญ่กว่ากลุ่มแรก รูปร่างผลเรียวยาว มีเนื้อนุ่ม รสหวาน กลิ่นหอม รับประทานสด ได้แก่ กล้วยหอมทอง กล้วยนาก กล้วยครั่ง กล้วยหอมเขียว กล้วยกุ้งเขียว กล้วยหอมแม้ว กล้วยไข่พระตะบอง และกล้วยคลองจัง

2.3 กลุ่ม BB ในประเทศไทยจะมีแต่กล้วยตานี ซึ่งเป็นกล้วยป่าชนิดหนึ่ง แต่ไม่ได้มีถิ่นกำเนิดในประเทศไทย รับประทานผลอ่อนได้ โดยนำมาใส่แกงเผ็ด ทำส้มตำ ไม่นิยมรับประทาน

ผลแก่เพราะมีเมล็ดมาก แต่คนไทยและคนเอเชียส่วนใหญ่รับประทานปลีและหยวก ไม่มีกล้วยกินได้ในกลุ่ม BB ในประเทศไทย แต่พบว่ามีที่ประเทศฟิลิปปินส์

2.4 กลุ่ม BBB กล้วยในกลุ่มนี้เกิดจากกล้วยตานี (*Musa balbisiana*) เนื้อไม่ค่อยนุ่ม ประกอบด้วยแป้งมาก เมื่อสุกก็ยังมีแป้งมากอยู่จึงไม่ค่อยหวาน ขนาดผลใหญ่ เมื่อนำมาทำให้สุกด้วยความร้อนจะทำให้รสชาติดีขึ้น เนื้อเหนียวนุ่ม เช่น กล้วยเล็บช้างกุด

2.5 กลุ่ม AAB กล้วยกลุ่มนี้เกิดจากการผสมระหว่างกล้วยป่ากับกล้วยตานี เมื่อผลสุกมีรสชาติดีกว่ากล้วยกลุ่ม ABB ได้แก่ กล้วยน้ำ กล้วยน้ำฝาด กล้วยนมสวรรค์ กล้วยนิ้วมือนาง กล้วยไข่โบราณ กล้วยทองเดช กล้วยศรีนวล กล้วยขม และกล้วยนมสาว แต่มีกล้วยกลุ่ม AAB บางชนิดที่มีความคล้ายกับ ABB กล่าวคือ เนื้อจะค่อนข้างแข็ง มีแป้งมาก เมื่อสุกเนื้อไม่นุ่ม ทั้งนี้อาจได้รับเชื้อพันธุกรรมของกล้วยป่าที่ต่าง sub species กัน จึงทำให้ลักษณะต่างกัน กล้วยในกลุ่มนี้เรียกว่า plantain subgroup ซึ่งจะต้องทำให้สุกโดยการต้ม ปิ้ง เผา เช่นเดียวกับกลุ่ม ABB ได้แก่ กล้วยกล้าย กล้วยงาช้าง กล้วยนิ้วจระเข้ กล้วยหิน และกล้วยพม่าแหกคุก

2.6 กลุ่ม ABB กล้วยกลุ่มนี้เป็นลูกผสมระหว่างกล้วยป่ากับกล้วยตานี มีแป้งมาก ขนาดผลใหญ่ ไม่นิยมรับประทานสด เพราะเมื่อสุกรสไม่หวานมาก บางครั้งมีรสฝาด เมื่อนำมาต้ม ปิ้ง ย่าง และเชื่อม จะทำให้รสชาติดีขึ้น ได้แก่ กล้วยหักมุกเขียว กล้วยหักมุกนวล กล้วยเปลือกหนา กล้วยส้ม กล้วยนางพญา กล้วยนมหมี กล้วยน้ำว้า สำหรับกล้วยน้ำว้าแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามสีของเนื้อ คือ น้ำว้าแดง น้ำว้าขาว และน้ำว้าเหลือง คนไทยรับประทานกล้วยน้ำว้าทั้งผลสด ต้ม ปิ้ง และนำมาประกอบอาหาร นอกจากนี้ยังมีกล้วยน้ำว้าดำ ซึ่งเปลือกมีสีครั่งปนดำ แต่เนื้อมีสีขาว รสชาติอร่อยคล้ายกล้วยน้ำว้าขาว สำหรับกล้วยตีบ เหมาะที่จะรับประทานผลสด เพราะเมื่อนำไปย่าง หรือต้มจะมีรสฝาด

2.7 กลุ่ม ABBB กล้วยในกลุ่มนี้เป็นลูกผสมเช่นกัน จึงมีแป้งมาก และมีอยู่พันธุ์เดียว คือ กล้วยเทพรส หรือกล้วยทิพรส ผลมีขนาดใหญ่มาก บางทีมีดอกเพศผู้หรือปลี บางทีไม่มี ถ้าหากไม่มีดอกเพศผู้ จะไม่เห็นปลี และมีผลขนาดใหญ่ ถ้ามีดอกเพศผู้ ผลจะมีขนาดเล็กกว่า มีหลายหวีและหลายผล การมีปลีและไม่มีปลีนี้เกิดจากการกลายพันธุ์แบบกลับไปกลับมาได้ ดังนั้นจะเห็นว่าในกอเดียวกันอาจมีทั้งกล้วยเทพรสมีปลี และไม่มีปลี หรือบางครั้งมี 2 - 3 ปลี ในสมัยโบราณเรียกกล้วยเทพรสที่มีปลีว่า กล้วยทิพรส กล้วยเทพรสที่สุกงอมจะหวาน เมื่อนำไปต้มมีรสฝาด

2.8 กลุ่ม AABB เป็นลูกผสมมีเชื้อพันธุกรรมของกล้วยป่ากับกล้วยตานี กล้วยในกลุ่มนี้มีอยู่ชนิดเดียวในประเทศไทย คือ กล้วยเงิน ผลขนาดใหญ่ รูปร่างคล้ายกล้วยไข่ เมื่อสุกผิวสีเหลืองสดใส เนื้อผลสีส้ม มีแป้งมาก รับประทานผลสด

นอกจากกล้วยดังที่ได้กล่าวแล้ว ยังมีกล้วยป่าที่เกิดในธรรมชาติซึ่งมีเมล็ดมาก ทั้งกล้วยในสกุล *Musa acuminata* และ *Musa itinerans* หรือที่เรียกว่า กล้วยหก หรือกล้วยอ่างขาง และกล้วยป่าที่เป็นกล้วยประดับ เช่น กล้วยบัวสีส้ม และกล้วยบัวสีชมพู (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, ม.ป.ป.)

กล้วยน้ำว้า

กล้วยน้ำว้าเป็นพืชล้มลุกในสกุล *Musa* วงศ์ *Musaceae* มีชื่อสามัญว่า Pisang Awak และมีจีโนมเป็น ABB กล้วยน้ำว้ามีลำต้นเทียมสูงไม่เกิน 3.5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 15 เซนติเมตร กาบลำต้นด้านนอกสีเขียวอ่อน มีประดำเล็กน้อย ด้านในสีเขียวอ่อน ก้านใบมีร่องค่อนข้างแคบ เส้นกลางใบสีเขียวอมชมพู ก้านช่อดอกไม่มีขน ใบประดับรูปไข่ค่อนข้างป้อม ม้วนงอขึ้นปลายมน ด้านบนสีแดงอมม่วงมีนวล ด้านล่างสีแดงเข้ม เครือห้อยลง โดยกล้วย 1 เครือ จะมีหวีกล้วยประมาณ 7-10 หวี แต่ละหวีมีผลกล้วย 10-16 ผล ผลอ่อนมีลักษณะเปลือกผลสีเขียวและเป็นเหลี่ยม ดังภาพที่ 2-2 ผลห่ามจะมีสีเขียวอมเทา มีเหลี่ยมน้อยหรืออวบกลมไม่มีเหลี่ยม ส่วนผลสุกเปลือกผลจะเป็นสีเหลือง (เบญจมาศ ศิลาย้อย, 2558; พืชเกษตร, 2014)

a b

c

ภาพที่ 2-2 ลักษณะต้น เครือ และผลของกล้วยน้ำว้า

(a) ต้น (พีระศักดิ์ ฉายประสาท, ม.ป.ป.)

(b) เครือกล้วยน้ำว้า (พีระศักดิ์ ฉายประสาท, ม.ป.ป.)

(c) กล้วยน้ำว้าดิบ (เกษตรโปรดักส์, ม.ป.ป.)

กล้วยน้ำว้าปลูกทั่วไปในประเทศไทย รับประทานกันมากในทุก ๆ ภาค และปลูกเป็นการค้าทั่วไป โดยในปี 2559 ประเทศไทยผลิตกล้วยน้ำว้าได้ 918,539.97 ตัน สามารถส่งไปจำหน่ายได้ทั้งในและต่างประเทศ เนื่องจากกล้วยน้ำว้าสามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายกว่ากล้วยชนิดอื่น เนื้อกล้วยน้ำว้ามีคุณค่าทางอาหารมาก ใช้เป็นอาหารเด็กอ่อน รับประทานสด ทำเป็นแป้งกล้วย และทำเป็นขนมหลายชนิด (เบญจมาศ ศิลาย้อย, 2558; รัศมีจันทร์ เกงขุนทด, พัชรี ทับทิมศรี, และแดนชัย เครื่องเงิน, ม.ป.ป.; สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรเขต 1, 2560)

ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบทางโภชนาการของกล้วยน้ำว้าดิบและกล้วยน้ำว้าสุก 100 กรัม

สารอาหาร	กล้วยน้ำว้าดิบ	กล้วยน้ำว้าสุก
ความชื้น (%)	69.0	71.6
พลังงาน (แคลอรี)	110.0	100.0
ไขมัน (กรัม)	0.2	0.3
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	8.0	12.0
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	0.9	0.8
เหล็ก (มิลลิกรัม)	35.0	32.0
วิตามินเอ (I.U.)	483.0	375.0
วิตามินบี 1 (มิลลิกรัม)	0.04	0.03
วิตามินบี 2 (มิลลิกรัม)	0.02	0.04
ไนอาซีน (มิลลิกรัม)	0.6	0.6
วิตามินซี (มิลลิกรัม)	31	14.0

ที่มา: วนัสนันท์ ธิบูรณ์บุญ (2555)

โดยที่ I.U. ย่อมาจาก International Unit คือ เป็นหน่วยวัดมาตรฐานสากลซึ่งเป็นหน่วยที่ใช้อ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพสารออกฤทธิ์แต่ละชนิด

กล้วยหอม

กล้วยหอม *Musa* (AAA group) มีหลากหลายสายพันธุ์ เช่น กล้วยหอมจันท์ กล้วยหอมทอง กล้วยหอมเขียว โดยกล้วยหอมเป็นผลไม้ที่อุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการอย่างครบถ้วน เช่น วิตามิน ใยอาหาร ที่ช่วยในการขับถ่าย มีสารแทนนินซึ่งช่วยยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์

Escherichia coli เป็นต้น กล้วยหอมเป็นผลไม้เมืองร้อน สามารถปลูกได้เกือบทุกประเทศที่มีภูมิอากาศร้อนชื้น สำหรับประเทศไทยสามารถปลูกได้ทั่วไป ในปี 2559 ประเทศไทยผลิตกล้วยหอมได้ 117,427 ตัน ใช้ในประเทศ 113,703 ตัน และส่งออกไปยังประเทศต่าง ๆ อาทิ จีน ลาว และญี่ปุ่น 3,725 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรเขต 1, 2560; สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, ม.ป.ป.)

กล้วยหอมมีลำต้นอยู่เหนือดินสูงประมาณ 2.5-3.5 เมตร กาบลำต้นด้านนอกมีสีเขียว และมีแถบประสีดำ มีเส้นลายสีชมพู ใบกล้วยหอมเป็นใบเดี่ยว เป็นแบบขนาน มีกเนใบที่มีร่องค่อนข้างกว้าง เส้นกลางใบมีสีเขียว กล้วยหอม 1 เครือ มีประมาณ 6-10 หวี แต่ละหวีมี 10-16 ผล ผลกว้าง 3-4 เซนติเมตร และยาว 21-25 เซนติเมตร ปลายผลมีจุก ผลดิบมีสีเขียว ดังภาพที่ 2-3 ผลสุกมีสีเหลือง แต่จุกยังเป็นสีเขียว แล้วค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อสุกมาก (พืชเกษตร, 2015)

a b

c

ภาพที่ 2-3 ลักษณะต้น เครือ และผลของกล้วยหอม

(a) ต้น (รักเกษตร, 2559)

(b) เครือ (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, ม.ป.ป.)

(c) ผล (คนรักเกษตร, ม.ป.ป.)

ตารางที่ 2-4 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งกล้วยหอม (*Musa* AAA group) ระดับความแก่ระยะที่ 1

องค์ประกอบ	แป้งกล้วยหอม (กรัม/100 กรัม)
ความชื้น	7.06 ± 0.44
โปรตีน	3.97 ± 0.35
ไขมัน	0.34 ± 0.07
เถ้า	3.67 ± 0.44
ใยอาหาร	6.03 ± 0.73
คาร์โบไฮเดรต	78.93 ± 1.83

ที่มา: Moongngarm (2013)

ระดับความแก่ของกล้วย

กล้วยที่มีระดับความแก่แตกต่างกันจะส่งผลถึงสมบัติต่าง ๆ ของกล้วย ในที่นี้จะขอกล่าวถึงวิธีการแบ่งระดับความแก่ของกล้วย 2 วิธี (คณาจารย์ภาควิชาพืชสวน, 2559)

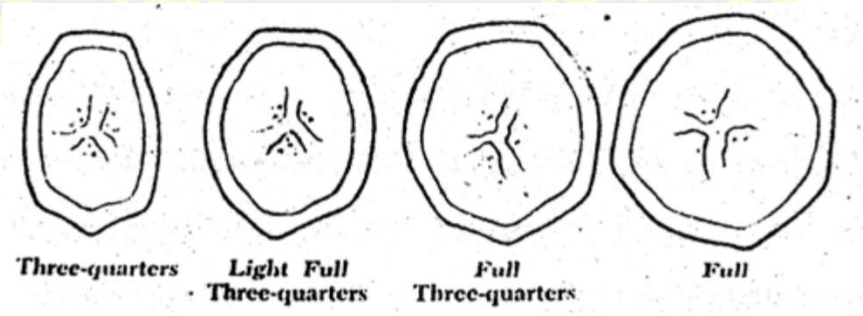
1. ระดับความแก่ของกล้วยที่ดูจากการผ่าทางขวางของผลกล้วย ดังภาพที่ 2-4

ระยะที่ 1 Three quarters = เทียบได้กับกล้วยแก่ 50%

ระยะที่ 2 Light full Three quarters = เทียบได้กับกล้วยแก่ 70%

ระยะที่ 3 Full Three quarters = เทียบได้กับกล้วยแก่ 80%

ระยะที่ 4 Full = เทียบได้กับกล้วยแก่ 85-90%



ภาพที่ 2-4 ระดับความแก่ของกล้วยที่ดูจากการผ่าทางขวางของผลกล้วย (คณาจารย์ภาควิชาพืชสวน, 2559)

2. ระดับความแก่ 7 ระยะของกล้วย จำแนกจากสีผิวของเปลือกกล้วย ดังภาพที่ 2-5

ระยะที่ 1 Entirely green = เปลือกเขียวทั้งผล ผลแข็ง ไม่มีการสุก

ระยะที่ 2 Green with trace of yellow = เริ่มเปลี่ยนสีเขียวเป็นสีเหลืองเล็กน้อย

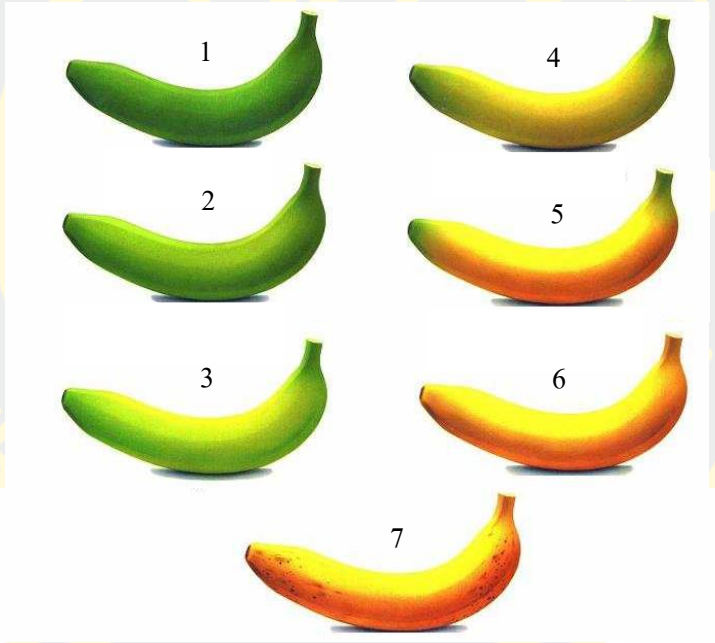
ระยะที่ 3 More green than yellow = เปลี่ยนจากสีเขียวเป็นเหลือง แต่มีสีเขียวมากกว่าสีเหลือง

ระยะที่ 4 More yellow than green = เปลือกมีสีเหลืองมากกว่าสีเขียว

ระยะที่ 5 Green tip = เปลือกเป็นสีเหลือง แต่ปลายยังเขียวอยู่

ระยะที่ 6 All yellow = เปลือกมีสีเหลืองทั้งผล (ผลสุก)

ระยะที่ 7 Yellow flecked with brown = ผิวสีเหลืองมีจุดกระสีน้ำตาล



ภาพที่ 2-5 ระดับความแก่ 7 ระยะของกล้วย โดยจำแนกจากสีผิวของเปลือกกล้วย (Fernandes & Bonaldo, 2011)

แป้งและสตาร์ชกล้วย

1. ขนาดและรูปร่างของแป้งกล้วย

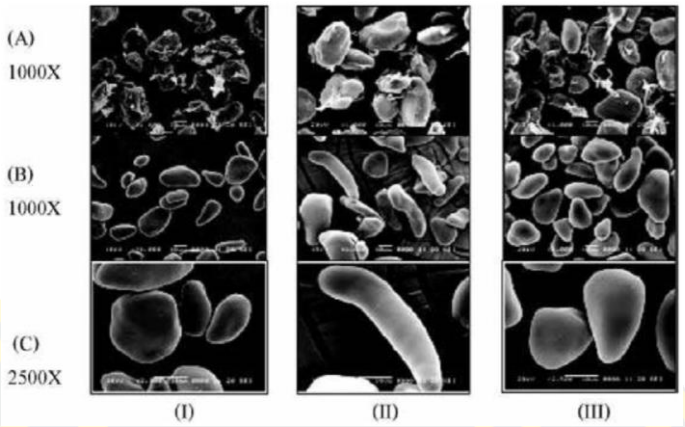
แป้งกล้วยดิบ (unripe banana flour) เป็นแป้งที่แปรรูปจากกล้วยดิบก่อนนำไปประกอบอาหารเพื่อบริโภค มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยมีปริมาณคาร์โบไฮเดรต วิตามิน และเกลือแร่สูงกว่าแป้งหลายชนิด เช่น แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น แป้งกล้วยดิบยังเป็นแหล่งของแป้ง

ทนต่อการย่อย มีกลิ่นรสเฉพาะตัว มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี รวมตัวกับน้ำได้ดี คือ เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวใส เมื่อปล่อยให้เย็นจะเกิดลักษณะคล้ายวุ้น เนื่องจากเป็นแป้งที่มีอะไมโลสสูง ทำให้มีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะ เหมาะที่จะนำไปประกอบอาหาร (วนัสนันท์ ธิบูรณ์บุญ, 2555)

ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชที่สกัดได้จากกล้วยแต่ละสายพันธุ์มีขนาดที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2-5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสายพันธุ์กล้วยของไทยมีขนาดเม็ดสตาร์ชใหญ่กว่าสายพันธุ์อื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตาม Eggleston, Swennen, & Akoni (1992); Nimsung, Thongngam, & Naivikul (2007) รายงานว่ากล้วยแต่ละสายพันธุ์มีรูปร่างของเม็ดสตาร์ชที่คล้าย ๆ กัน คือ มีลักษณะเป็นรูปไข่เป็นวงรีที่เรียวยาว และไม่สม่ำเสมอ ดังภาพที่ 2-6

ตารางที่ 2-5 ขนาดของม็ดสตาร์ชของกล้วยพันธุ์ต่าง ๆ

สตาร์ชกล้วย	ขนาดเม็ดสตาร์ช (ไมโครเมตร)	ที่มา
Agbagba	26.60	Eggleston et al. (1992)
Bobby Tannap	24.10	Eggleston et al. (1992)
Enyeru	19.89	Ssonko & Muranga (2017)
Mbwazirume	21.98	Ssonko & Muranga (2017)
กล้วยไข่	32-55	Nimsung et al. (2007)
กล้วยหอมทอง	47-60	Nimsung et al. (2007)
กล้วยน้ำว้า	40-45	Nimsung et al. (2007)

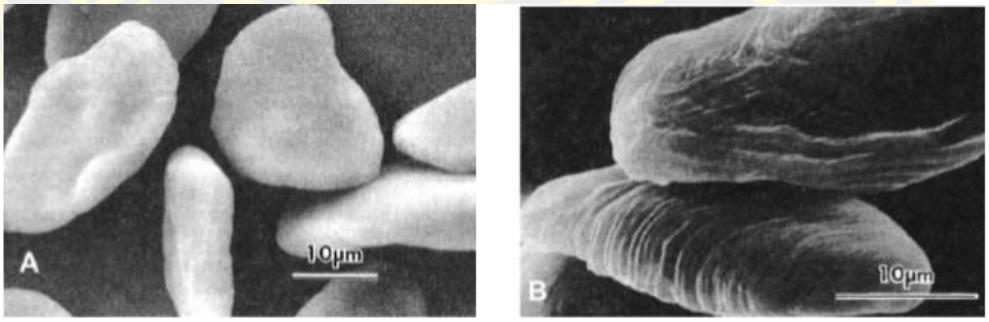


ภาพที่ 2-6 ภาพที่ถูกส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron micrographs) ของกล้วย 3 สายพันธุ์ ที่กำลังขยาย 1,000 และ 2,500 เท่า (Nimsung et al., 2007)

(I) กล้วยไข่ (II) กล้วยหอมทอง (III) กล้วยน้ำว้า

(A) เม็ดฟลาวร์ (B และ C) เม็ดสตาร์ช

นอกจากนั้นยังพบขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชของแป้งกล้วยจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อถูกทำให้สุก (cooking) โดย วนัสนันท์ ธิบูรณ์บุญ (2555) อธิบายว่าลักษณะผิวของเม็ดแป้งกล้วยดิบจะมีลักษณะเรียบ ส่วนลักษณะผิวของเม็ดแป้งกล้วยสุกจะเป็นรอยขนานกันบนพื้นผิว ซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของเอนไซม์อะไมเลสระหว่างการทำให้สุก ดังภาพที่ 2-7



a b

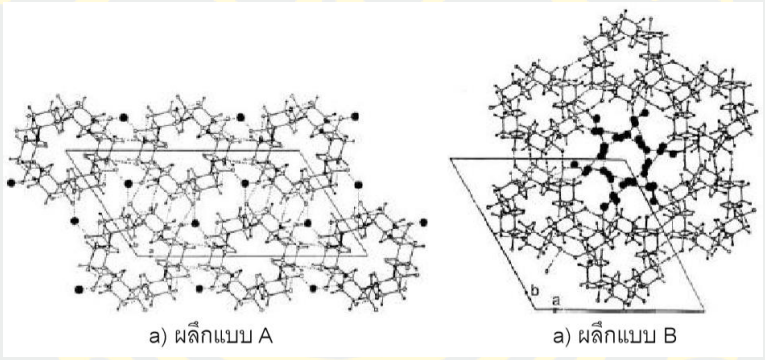
ภาพที่ 2-7 ลักษณะของเม็ดแป้งกล้วยสายพันธุ์ Valery ที่ตรวจสอบด้วยกล้อง scanning electron micrographs (SEM) (วนัสนันท์ ธิบูรณ์บุญ, 2555)

(a) เม็ดแป้งกล้วยดิบ

(b) เม็ดแป้งกล้วยสุก (cooking)

2. โครงสร้างผลึกของสตาร์ชกล้วย

โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช โดยทั่วไปสามารถแบ่งลักษณะของโครงสร้างผลึกได้ 3 แบบ คือ A B และ C ซึ่งโครงสร้างผลึกแบบ A และ B จะแสดงในรูปของ unit cell ดังภาพที่ 2-8 โดยจะเห็นว่าผลึกแบบ A จะมีน้ำแทรกอยู่ 4 โมเลกุลต่อ 1 unit cell ส่วนผลึกแบบ B มีน้ำแทรกอยู่ถึง 36 โมเลกุลต่อ 1 unit cell ซึ่งแสดงว่าผลึกแบบ A มีการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ที่หนาแน่นกว่าผลึกแบบ B ส่วนผลึกแบบ C นั้นจะมีการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ในลักษณะผสมกันระหว่างแบบ A และ B โดยโครงสร้างผลึกที่ต่างกันจะมีลักษณะการหักเหแสงที่ต่างกัน ดังนั้นการตรวจสอบชนิดของโครงสร้างเม็ดสตาร์ชจึงสามารถดูได้จากลักษณะการหักเหรังสี x-ray โดยใช้เครื่อง x-ray driffractometer (ขวัญแก้ว แซ่เอือง, 2554)

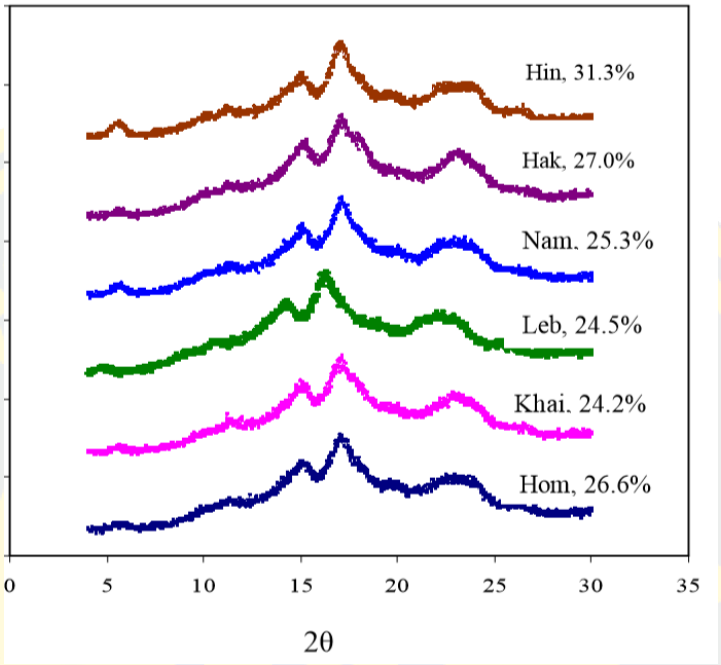


ภาพที่ 2-8 รูปแบบ unit cell ของผลึกแบบ A และ B (ขวัญแก้ว แซ่เอือง, 2554)

ลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชที่ได้จากการหักเหรังสี x-ray โดยใช้เครื่อง x-ray driffractometer สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ A, B, C และ V โดยผลึกแบบ A ส่วนใหญ่มีอยู่ในสตาร์ชจากธัชพืช เช่น แป้งข้าวโพด และแป้งสาสี ซึ่งรูปแบบ x-ray driffraction ของสตาร์ชเหล่านี้แสดงยอดการเลี้ยวเบนที่ประมาณ 15^{o}, 17^{o}, 18^{o} และ 23^{o} ที่ 2θ ผลึกแบบ B สตาร์ชที่ได้มักมาจากหัวของพืช เช่น สตาร์ชมันสำปะหลัง มีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ประมาณ 17^{o} ที่ 2θ ส่วนผลึกแบบ C จะผสมระหว่าง A และ B ได้แก่ แป้งจากถั่วต่าง ๆ และผลึกแบบ V คือ การคอมเพล็กซ์ระหว่างกรดไขมันและอะไมโลส (amylose-lipid complex) เช่น ในแป้งข้าวโพดที่มีอะไมโลสสูง ๆ (Marimuthu, Sundaram, & Gurumoorthi, 2013) และจากการศึกษาด้วย x-ray driffraction ของสตาร์ชกล้วยเป็นโครงสร้างผลึกแบบ B-type (Khoozani et al., 2019; Nednapis Vatanasuchart et al., 2012)

แป้งกล้วยจัดเป็นแหล่งของ RS2 ซึ่งก็คือ เม็ดสตาร์ชดิบที่ทนต่อการย่อยของเอนไซม์ อีกทั้งแป้งกล้วยมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B-type มีลักษณะการหักเหของรังสี x-ray ดังแสดงในภาพที่

2-9 โดยโครงสร้างผลึกแบบ B-type จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ยากกว่าโครงสร้างผลึกแบบ A-type และ C-type (Jay-lin, n.d.; Nednapis Vatanasuchart et al., 2012)



ภาพที่ 2-9 ลักษณะการหักเหรังสี x-ray ของสายพันธุ์แป้งกล้วยในไทย โดยมีโครงสร้างผลึกแบบ B-type (Nednapis Vatanasuchart et al., 2012)

ทั้งนี้ความสามารถในการถูกย่อยของสตาร์ช (starch digestibility) ในแป้งกล้วยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น

1. สายพันธุ์กล้วย

งานวิจัยของ Nednapis Vatanasuchart et al. (2012) รายงานเกี่ยวกับแป้งที่ย่อยได้ (digestible starch) และแป้งต้านทานการย่อย (non-digestible starch) จากกล้วยหกสายพันธุ์ (edible green unripe) ในไทย อายุ 90-120 วัน ได้แก่ กล้วยหอม กล้วยไข่ กล้วยเล็บมือนาง กล้วยน้ำว้า กล้วยหักมุก และกล้วยหิน ผลการวิจัยพบว่าแป้งกล้วย (banana flour) มีปริมาณแป้งต้านทานการย่อย 52.2-68.1% ในทางตรงกันข้ามสตาร์ชกล้วย (banana starch) มีปริมาณแป้งต้านทานการย่อย 70.1-79.2% สูงกว่าแป้งกล้วย อย่างไรก็ตามแป้งกล้วยส่วนใหญ่มีอัตราการย่อยในหลอดทดลองช้ากว่าสตาร์ชกล้วย

จิรนาถ บุญคง, ทิพวรรณ บุญมี, และพัชราวรรณ เรือนแก้ว (2557) ได้พัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารจากแป้งกล้วยดิบที่มีสมบัติต้านทานการย่อยด้วยเอนไซม์ โดยแปรผันแป้งกล้วยดิบ 3 ชนิด

ได้แก่ แป้งกล้วยน้ำว้าดิบ (อายุ 14-16 สัปดาห์หลังแทงปลี) แป้งกล้วยหอมทองดิบ (13-15 สัปดาห์หลังแทงปลี) และแป้งกล้วยไข่ดิบ (6-8 สัปดาห์หลังแทงปลี) โดยนำมาวิเคราะห์ปริมาณ RS พบว่าแป้งกล้วยหอมทองดิบมีปริมาณ RS สูงกว่าแป้งกล้วยไข่ดิบและแป้งกล้วยน้ำว้าดิบ โดยมีปริมาณ RS เท่ากับ 58.91, 53.44 และ 50.40% ตามลำดับ

นอกจากนี้ Bi et al. (2017) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการย่อยในหลอดทดลองของแป้งกล้วยสามสายพันธุ์ ได้แก่ *Musa* Dwarf Red banana (MDR), *Musa* ABB Pisang Awak (MPA) และ *Musa* AAA Cavendish (MC) ผลการวิจัยพบว่าแป้ง MC มีอัตราการย่อยต่ำที่สุด ดังนั้นจึงมีปริมาณ RS สูงสุด (90.46)

2. ระดับความแก่ของกล้วย

งานวิจัยของ Campuzano et al. (2018) ได้รายงานเกี่ยวกับระดับความแก่ของกล้วยต่อการย่อยได้ของแป้งกล้วยสายพันธุ์ Cavendish (AAA) ที่ระดับความแก่ระยะ 1 ถึง 4 เพื่อสร้างข้อมูลในแต่ละระดับความแก่ของกล้วย พบว่ากล้วยสายพันธุ์ Cavendish แสดงรูปแบบผลึกแบบ B-type ซึ่งในระดับความแก่ระหว่างระยะ 1 และ 2 ร้อยละความเป็นผลึกลดอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระยะ 3 และ 4 สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ RS พบว่าปริมาณ RS ลดลงตามระดับความแก่ของกล้วยที่เพิ่มขึ้น 38.28, 37.61, 11.12 และ 12.99 ตามลำดับ

3. กระบวนการทำให้สุก (cooking)

งานวิจัยของ Bi et al. (2017) รายงานว่าหลังจากแป้งและสตาร์ชจากกล้วย MDR, MPA และ MC ถูกทำให้สุกเป็นเวลา 10 นาที ในอ่างน้ำเดือด (boiling water bath) การย่อยของแป้งและสตาร์ชกล้วยสุกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับแป้งและสตาร์ชกล้วยที่ยังไม่ถูกทำให้สุก ทั้งนี้สตาร์ชกล้วยสุกมีอัตราการย่อย (digestion rates) สูงกว่าแป้งกล้วยสุก โดยผลการวิจัยพบว่าอัตราการย่อยของสตาร์ชกล้วยสุกมีอัตราการย่อยประมาณ 80% ซึ่งสูงกว่าอัตราการย่อยของแป้งกล้วยสุกที่มีอัตราการย่อยประมาณ 40-60% เนื่องจากส่วนประกอบอื่น ๆ ของแป้งกล้วยช่วยป้องกันกระบวนการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง จึงทำให้มีอัตราการย่อยต่ำ

4. กระบวนการทำแห้ง

Khoozani et al. (2019) ได้ศึกษาผลของวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze-drying) และวิธีการอบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ได้แก่ ที่ 50 80 และ 110 องศาเซลเซียส ต่อการย่อยของสตาร์ช (digestible starch) ในแป้งกล้วยสีเขียวทั้งผล (whole green banana flour) พบว่าแป้งกล้วยสีเขียวทั้งผลที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีปริมาณ RS ที่ใกล้เคียงกับแป้งกล้วยสีเขียวทั้งผลที่ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ซึ่งแป้งกล้วยสีเขียวทั้งผลที่ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีปริมาณ RS สูง

ที่สุด และมีสตาร์ชที่ย่อยได้ต่ำที่สุด ในขณะที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างมากของสตาร์ชที่ย่อยได้ในตัวอย่างแป้งกล้วยสีเขียวทั้งผลที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 และ 110 องศาเซลเซียส

5. การเตรียมแป้งกล้วยจากเนื้อกล้วยเปรียบเทียบกับการเตรียมแป้งกล้วยจากกล้วยทั้งผล

ปัจจุบันมีการเตรียมแป้งกล้วยอยู่ 2 ลักษณะ ได้แก่ เตรียมจากเนื้อกล้วยอย่างเดียว (กล้วยปอกเปลือก) และเตรียมจากกล้วยทั้งผล (กล้วยไม่ปอกเปลือก) ซึ่งการเตรียมแป้งกล้วยที่แตกต่างกันทำให้องค์ประกอบทางเคมีมีปริมาณที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2-6 จะเห็นได้ว่าแป้งกล้วยหอมที่ไม่ปอกเปลือกมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตและ total starch น้อยกว่าแป้งกล้วยหอมที่ปอกเปลือก ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ total fiber ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าหากรับประทานกล้วยที่มีเปลือก ผู้รับประทานจะได้ใยอาหาร ซึ่งใยอาหาร คือส่วนที่ไม่ใช่สตาร์ช เมื่อทานเข้าไปแล้วจึงไม่ถูกย่อยเป็นกลูโคส ผลพลอยได้ของอาหารที่ใส่แป้งกล้วยทั้งผล คือ จะทำให้อาหารมีปริมาณสตาร์ชลดลง และจะถูกย่อยเป็นกลูโคสได้น้อยลง

ตารางที่ 2-6 องค์ประกอบของแป้งกล้วยหอม (cavendish) ปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือก ที่ระดับความแก่ระยะ 2

ส่วนประกอบ (กรัม/100 กรัม)	**แป้งกล้วยหอม**	
	ไม่ปอกเปลือก	**ปอกเปลือก**
โปรตีน	4.33	4.14
ไขมัน	0.701	0.453
เถ้า	2.72	1.084
คาร์โบไฮเดรต	83.94	86.92
Total starch	68.42	78.43
Resistant starch	33.86	40.14
Total fiber	15.52	8.49
Soluble fiber	2.07	1.34
Insoluble fiber	13.45	7.15
Soluble fiber/ Insoluble fiber ratio	1:6	1:5

ที่มา: Bezerra, Rodrigues, Amante, & Silva (2013)

จากงานวิจัยของ Ramli et al. (2009) ได้ศึกษาการย่อยในหลอดทดลองของแป้งกล้วยดิบสายพันธุ์ Cavendish (*Musa acuminate L.*, cv cavendshii) และ Dream (*Musa acuminata colla.* AAA, cv 'Berangan') จากเนื้อกล้วยเพียงอย่างเดียวและจากกล้วยทั้งผล ทดแทนแป้งสาลี 10% ในผลิตภัณฑ์บะหมี่เหลือง (yellow noodles) พบว่าการเติมแป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผลลงในบะหมี่เหลืองของกล้วยทั้ง 2 สายพันธุ์ มีผลทำให้ค่า GI ลดลง เมื่อเทียบกับการเติมแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยเพียงอย่างเดียว

การใช้แป้งกล้วยเพื่อลด GI ในอาหาร

ดังที่กล่าวไปแล้วว่าแป้งกล้วยเป็นแหล่งของ RS2 ซึ่งมีรายงานหลายงานวิจัยที่ใช้แป้งกล้วยเป็นส่วนผสมในอาหาร เพื่อเพิ่มปริมาณ RS ในอาหาร โดยในที่นี้ขอกล่าวถึงการใช้แป้งกล้วยในผลิตภัณฑ์อาหารเส้น

Srikaeo, Mingyai, & Sopade (2011) ศึกษาการย่อยได้ของแป้งกล้วยดิบในผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยว โดยการเติมแป้งกล้วยดิบลงในผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยว 20% พบว่ามีผลทำให้ RS เพิ่มขึ้นจาก 1.00 เป็น 2.47 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง และมีผลทำให้ GI ลดลงจาก 85 เป็น 73

วนัสนันท์ ธิบูรณ์บุญ (2555) ได้ศึกษาการใช้แป้งกล้วยน้ำว้าดิบในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวเพื่อเพิ่มปริมาณ RS โดยแปรปริมาณแป้งกล้วยน้ำว้าดิบทดแทนแป้งข้าวเจ้า 0, 20, 40, 60, 80 และ 100% พบว่า เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ทดแทนแป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าดิบ 100% มีปริมาณ RS สูงสุดเท่ากับ 13.15% แต่อย่างไรก็ตามในการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าผู้บริโภคส่วนใหญ่ชอบเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ทดแทนแป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าดิบที่ 0% ของแป้งข้าวเจ้า ส่วนที่ทดแทนแป้งข้าวเจ้าด้วยกล้วยน้ำว้าดิบ 100% ได้รับคะแนนความชอบน้อยที่สุดในทุกด้าน

จิรนาถ บุญคง et al. (2557) ได้ศึกษาการนำแป้งกล้วยหอมทองดิบทดแทนเซโมลินาในผลิตภัณฑ์พาสต้าที่ระดับ 0, 15, 30, และ 45% พบว่า พาสต้าที่ทดแทนเซโมลินาด้วยแป้งกล้วยหอมทองดิบทุกสูตร มีปริมาณกลูโคสที่ได้จากการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ต่ำกว่าสูตรควบคุม (ทดแทน 0%) แสดงว่าพาสต้าที่ทดแทนเซโมลินาด้วยแป้งกล้วยหอมทองดิบมีอัตราการย่อยสลายต่ำกว่า โดยพาสต้าที่ทดแทนเซโมลินาด้วยแป้งกล้วยหอมทองดิบ 45% มีอัตราการย่อยสลายต่ำสุด

ผลของชนิดโปรตีนและเอนไซม์ที่มีต่อการลดอัตราการย่อยของสตาร์ช

มีหลายงานวิจัยในการลดค่า GI ในอาหารโดยการเติมโปรตีนเป็นส่วนผสมในอาหารเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดค่า GI ในอาหารได้ โดยโปรตีนอาจส่งผลให้เกิดโครงข่ายโปรตีนที่แข็งแรง (Zheng et al., 2015; ยุทธนา พิมลศิริผล, 2561) จึงทำให้สตาร์ชถูกย่อยเป็นกลูโคสได้ช้าลง ในที่นี้จะขอกล่าวถึงโปรตีนที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมของอาหารและผลของโปรตีนที่มีต่อการลดการย่อยของสตาร์ช

1. โปรตีนไข่ขาว

ไข่ขาว (egg white) อาหารที่ให้โปรตีนชนิดสมบูรณ์ที่ไม่มีไขมันและคลอเลสเตอรอล มีคาร์โบไฮเดรตในปริมาณน้อย อุดมไปด้วยวิตามินและเกลือแร่ มีสารปนเปื้อนที่มีโทษต่อร่างกายน้อยกว่าโปรตีนจากแหล่งอาหารอื่น ไข่ขาวมีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย (essential amino acid) ในปริมาณสูง โดยโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของไข่ขาว คือ อัลบูมิน ซึ่งเป็นโปรตีนที่สร้างจากตับในร่างกาย มีบทบาทในการสร้างภูมิคุ้มกันในร่างกายและซ่อมแซมร่างกายในส่วนที่ได้รับความเสียหาย ทางการแพทย์ระบุว่าไข่ขาวสามารถเปลี่ยนเป็นโปรตีนของร่างกายได้ 100% โปรตีนไข่ขาวจึงมักถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญในอุตสาหกรรมอาหารสมัยใหม่ในการปรับปรุงและรักษาคุณภาพของอาหาร เนื่องจากไข่ขาวมีคุณสมบัติในการเกิดโฟมและเจล (เลอลักษณ์ เสถียรรัตน์ และไอลดา ชูประสิทธิ์, 2559; สุใจ ทานิสุด, 2562)

ไข่ขาวมีส่วนประกอบของโปรตีนมากกว่า 24 ชนิด ที่มีปริมาณที่แตกต่างกันไป ได้แก่ ovalbumin 54-66% ส่วนโปรตีนอื่น ๆ ได้แก่ ovotransferrin (12-13%) ovomucoid (9.5-11%) ovomucin (3.5%) lysozyme (3.4-3.5%) ovoflavoprotein (0.8%) ovomacroglobulin (0.5%) ovoinhibitor (1.5-3.5%) avidin (0.5%) ovoglobulins G2 และ G3 (1.0-6%) riboflavin binding protein (1%) และเอนไซม์อื่น ๆ อีกทั้งยังอุดมไปด้วยวิตามิน (A, B1, B2, B3, B5, B6, B8, B9 และ B12) และแร่ธาตุ แมกนีเซียม แคลเซียม ซีลีเนียม สังกะสี และเหล็ก เป็นต้น (ทิพย์วลี จุลมณฑิลิก และศศิธร คงเรือง, 2562)

1.1 โปรตีนในไข่ขาว ประกอบด้วย (สุใจ ทานิสุด, 2562)

1.1.1 โอแวลบูมิน (ovalbumin) เป็นโปรตีนที่มีมากที่สุดในไข่ขาว มีอยู่ประมาณ 54% ของน้ำหนักโปรตีนในไข่ขาวจัดเป็นพวกฟอสโฟไกลโคโปรตีน (phosphoglycoprotein) เพราะมีคาร์โบไฮเดรตและหมู่ฟอสเฟตเกาะอยู่กับโซ่พอลิเปปไทด์ มีจุดไอโซอิเล็กตริก (isoelectric point) ที่ pH 4.6 และตกตะกอนที่ pH 4.6-4.8 ทนความร้อนได้ดี

1.1.2 โคแนลบลูมิน (conalbumin) มีประมาณ 13% ของน้ำหนักโปรตีนไข่ขาว มีจุดไอโซอิเล็กตริกที่ pH 6.6 เป็นโปรตีนที่ทนต่อความร้อนได้น้อยกว่าโอแวลบูมิน แต่สูญเสียสภาพธรรมชาติ (protein denaturation) ได้ดีกว่าโอแวลบูมิน

1.1.3 โอโวมิวคอยด์ (ovomucoid) พบประมาณ 1.2% ของน้ำหนักโปรตีนไข่ขาว มีจุดไอโซอิเล็กตริกที่ pH 3.9-4.3 ในสภาวะที่เป็นกรดจะทนต่อการถูกแปลงสภาพโดยความร้อน แต่ในสารละลายด่างโปรตีนนี้จะถูกแปลงสภาพอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นไกลโคโปรตีนที่มีความเฉพาะเจาะจงกับเอนไซม์ทริปซิน (trypsin) สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทริปชิน ซึ่งเป็นเอนไซม์โปรตีเอสทำหน้าที่ย่อยโปรตีน

1.1.4 ไลโซโซม (lysosome) พบประมาณ 3.5% ของน้ำหนักโปรตีนไข่ขาว มีจุดไอโซอิเล็กตริกที่ pH 10.7 เป็นเอนไซม์ที่สามารถทำลายผนังเซลล์ของแบคทีเรีย การทำลายเอนไซม์นี้โดยใช้ความร้อนขึ้นกับ pH และอุณหภูมิ ไลโซไซม์ที่อยู่ในไข่ขาวจะทนความร้อนได้น้อยกว่าเมื่ออยู่ตามลำพังในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ระหว่าง pH 7 และ 9 ไข่ขาวที่ต้มเป็นเวลา 10 นาที ที่ 63.5 องศาเซลเซียส ไลโซไซม์จะถูกทำลายมากขึ้น

1.2 คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของไข่ขาวผง

คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของอาหารเป็นตัวกำหนดการใช้งานและการเลือกใช้เป็นส่วนผสมสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ โดยไข่ขาวผงมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ดังแสดงในตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของไข่ขาวผง

คุณสมบัติเชิงหน้าที่	**หน่วย**	**ไข่ขาวผง**
ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน (emulsification capacity)	%	17.77
ความคงตัวของการเกิดอิมัลชัน (emulsification stability)	%	14.70
ความสามารถในการเกิดฟอง (foaming capacity)	%	28.08
ความคงตัวของฟอง (foaming stability)	%	78.30
ความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption capacity)	กรัม	1.80
ความสามารถในการดูดซับน้ำมัน (oil absorption capacity)	กรัม	0.50
อุณหภูมิในการแข็งตัว (coagulation temperature)	องศาเซลเซียส	63.00
ดัชนีการละลาย (solubility Index)	%	96.00
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solids)	%	95.88

ที่มา: Ndife, Udobi, & Amaechi (2010)

2. เวย์โปรตีน

เวย์โปรตีน (whey protein) คือ โปรตีนที่สกัดได้มาจากนมวัว โดยนำน้ำนมวัวที่คัดแยกจากกระบวนการทำเนยแข็งมาสกัดส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรต และไขมันออก ให้เหลือส่วนที่เป็นโปรตีนบริสุทธิ์เข้มข้นจากนั้นนำมาผ่านกระบวนการทำให้แห้งเพื่อให้อยู่ในรูปผง โดยเวย์โปรตีนประกอบด้วย โปรตีน แลกโทส และแร่ธาตุ โดยเฉพาะในส่วนของโปรตีนนั้นมีคุณค่าทางโภชนาการสูง และมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ (functional properties) เพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ ในเวย์มีโปรตีนประมาณ 20% ของโปรตีนทั้งหมดในน้ำนม (อัจฉริยา สอางชัย, 2551) ซึ่งประกอบด้วย เบตาแลคโตโกลบูลิน (β -lactoglobulin) 50-60% อัลฟาแลคตาลบูมิน (α-lactalbumin) 15-20% ซีรั่มอัลบูมิน (serum albumin) 10% นอกจากนี้ยังประกอบด้วย อิมมูโนโกลบูลิน (immunoglobulin) โปรตีนที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ (phospholipid - protein complex) เอนไซม์ และเปปไทด์ของเคซีน (casein-derived peptide)

2.1 ชนิดของเวย์โปรตีน โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

2.1.1 เวย์โปรตีนคอนเซนเตรท (whey protein concentrate, WPC) ขบวนการผลิต WPC ได้จากการนำเวย์ที่ได้ในขบวนการผลิตขั้นต้น มาผ่านการกรอง Ultrafiltration หรือกระบวนการอื่น ๆ เพื่อแยกแลกโตสและไขมันที่มีผสมอยู่มากออกไป แล้วทำให้แห้ง ผงเวย์โปรตีนที่ได้จะมีความเข้มข้นของเวย์โปรตีนประมาณ 29-89% โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผงสีครีมอ่อน มีกลิ่นรสตามธรรมชาติแบบนม WPC ที่สกัดได้จะอุดมไปด้วยกรดอะมิโนครบถ้วนทั้ง 20 ชนิด มีกรดอะมิโนจำเป็นครบถ้วนทั้ง 8 ชนิด ที่ร่างกายไม่สามารถสร้างเองไม่ได้ และยังมี branched-chain amino acid สูง ซึ่งจะช่วยเพิ่มระดับ growth hormone ช่วยเพิ่มการสังเคราะห์โปรตีนและไกลโคเจนเพื่อช่วยเพิ่มขนาดของกล้ามเนื้อ และ WPC ยังมี bioactive compound สูง ช่วยป้องกันการติดเชื้อและเพิ่มภูมิคุ้มกันได้อีกด้วย

2.1.2 เวย์โปรตีนไอโซเลต (whey protein isolate, WPI) ได้จากการนำ WPC มาผ่านกระบวนการผลิตเพิ่มเติมคือ ion-exchange (IE) หรือ cross-flow microfiltration (CFM) เพื่อแยกเอาแลกโตสและไขมันที่ ยังคงมีผสมอยู่บ้างออกไปอีก ทำให้ความเข้มข้นของเวย์โปรตีนสูงขึ้น คือ มากกว่า 90% กระบวนการ IE ใช้วิธีแยกโมเลกุลของสารต่าง ๆ ออกจากกัน โดยอาศัยประจุไฟฟ้าบนโมเลกุลที่ต่างกัน สามารถทำให้เวย์โปรตีนบริสุทธิ์ได้มากที่สุด โดยอาจทำให้มีความเข้มข้นของเวย์โปรตีนถึง 97-98% โดยน้ำหนักแห้ง แต่กระบวนการ CFM ซึ่งใช้ตัวกรองที่ทำจากเซรามิก สามารถรักษาโปรตีนชนิดย่อย ๆ ที่มีคุณสมบัติพิเศษต่าง ๆ ไว้ได้ดีกว่า และมีปริมาณเกลือโซเดียมน้อยกว่าเวย์โปรตีนที่ผ่านกระบวนการ IE WPI มีลักษณะเป็นผงสีครีมอ่อนและมีกลิ่นรสธรรมชาติแบบนมเช่นกัน และมีราคาแพงกว่า WPC

2.1.3 เวย์โปรตีนไฮโดรไลซ์ (hydrolysed whey protein, HWP) คือ WPC หรือ WPI ที่ผ่านกระบวนการ hydrolyze ทำให้โมเลกุลของเวย์โปรตีนที่มีขนาดใหญ่มาก ถูกย่อยจนอยู่ในรูปของโมเลกุลเล็ก ๆ ที่เรียกว่า peptides และบางส่วนอาจถูกย่อยจนถึงขั้นกรดอะมิโน มีหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ชี้ว่าโปรตีนที่อยู่ในรูปของ peptides สั้น ๆ ร่างกายสามารถดูดซึมไปใช้ได้ดีกว่าในรูปโมเลกุลใหญ่ และดีกว่ากรดอะมิโนอิสระ จึงเชื่อกันว่า HWP เป็นเวย์โปรตีนที่ถูกย่อยและดูดซึมได้เร็วที่สุด นอกจากนี้ HWP ยังมีโอกาสทำให้เกิดการแพ้โปรตีนน้อยลงกว่าเวย์โปรตีนชนิดอื่น ๆ จึงมักใช้ในสูตรนมสำหรับทารกหรือในทางการแพทย์เพื่อจุดประสงค์พิเศษต่าง ๆ ข้อเสียของ HWP คือมีรสชาติที่ขมมาก ในกระบวนการ hydrolyze อาจทำลายโปรตีนชนิดย่อย ๆ ที่มีคุณสมบัติพิเศษบางตัวไป และมีราคาแพง

ตารางที่ 2-8 องค์ประกอบของ whey protein concentrate (WPC) และ whey protein isolate (WPI)

องค์ประกอบ	หน่วย	WPC	WPI
โปรตีน	%	70.5	92.6
แลกโทส	%	14.8	1.1
ไขมัน	%	5.2	-
น้ำ	%	4.9	4.1
เถ้า	%	3.3	1.9
แคลเซียม	mg·100 g^{-1} product	570	150
แมกนีเซียม	%	85	10
โพแทสเซียม	%	480	1
โซเดียม	%	270	600
คลอไรด์	%	110	60
ฟอสเฟต	%	420	40

ที่มา: Lorenzen & Schrader (2006)

2.2 คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของเวย์โปรตีน (อัจฉริยา สองชัย, 2551)

ปัจจุบันนิยมนำเวย์โปรตีนไปเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ผลิตภัณฑ์เนื้อ ผลิตภัณฑ์นม และเครื่องดื่ม เพราะนอกจากจะมีคุณค่าทางโภชนาการสูงแล้วยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงหน้าที่ด้านต่าง ๆ ของโปรตีนในผลิตภัณฑ์ ได้แก่ การละลาย ความหนืด การอุ้มน้ำ และการเกิดเจล

2.2.1 การละลาย (solubility) เวย์โปรตีนมีความสามารถในการละลายสูง ในช่วงค่า pH กว้างตั้งแต่ 3-8 แต่ในผลิตภัณฑ์อาหารโปรตีนจะละลายได้มากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความร้อนที่ใช้ในการแปรรูปและ pH ในอาหาร เมื่อค่า pH อยู่ระหว่าง 3-5 การให้ความร้อนสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส จะทำให้โปรตีนเสียความสามารถในการละลายไปบางส่วนเนื่องจากเกิดการรวมตัวกันตกตะกอนที่ isoelectric point (pH 4.5-5.5) นอกจากนี้อิออน เช่น Ca^{2+} ทำให้โปรตีนเสียความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจาก Ca^{2+} ซึ่งเป็น free ion จะจับกับโมเลกุลของโปรตีนแล้วรวมตัวกันตกตะกอน

2.2.2 ความหนืดและความสามารถในการอุ้มน้ำ (viscosity and water holding capacity) เมื่อเวย์โปรตีนได้รับความร้อน พันธะที่ทำหน้าที่ยึดโครงสร้างจะถูกทำลาย โมเลกุลของโปรตีนจะแผ่ตัวออก บริเวณที่จับกับน้ำจะขยายตัวเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดและความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

2.2.3 การเกิดเจล (gelation) เมื่อได้รับความร้อนเวย์โปรตีนจะกลายเป็นเจลที่ไม่คืนสภาพ (irreversible gel) โดยสร้างลักษณะโครงสร้างตาข่ายและจับกับน้ำเป็น gel matrix เกิดเป็นเจลที่แข็งแรงเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำและความชื้น ซึ่งจะช่วยในการเพิ่มผลผลิต (yield) ในผลิตภัณฑ์ เช่น แฮม ซูริมิ และโยเกิร์ต เวย์โปรตีนจะเริ่มเป็นเจลเมื่อได้รับความร้อนประมาณ 65 องศาเซลเซียส เจลที่เกิดขึ้นอาจมีลักษณะแตกต่างกัน ตั้งแต่รวมกันเป็นก้อนหรือเป็นเจลที่มีการเยิ้มน้ำ จนกระทั่งเป็นเจลที่เรียบเนียน มีความมันวาว แข็ง และยืดหยุ่นได้เช่นเดียวกับเจลของไข่ขาว

3. โปรตีนถั่วเหลือง (soy protein)

เมล็ดถั่วเหลืองประกอบด้วยโปรตีน 38-42% ไตรกลีเซอไรด์ 16-20% และคาร์โบไฮเดรต 33% โดยน้ำหนักแห้ง เมล็ดถั่วเหลืองไม่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ โดยคาร์โบไฮเดรตในเมล็ดถั่วเหลือง ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ซูโครส ออลิโกแซกคาไรด์ (แรฟฟิโนส และสตาคีโอส) และน้ำตาลอื่น ๆ (อะราบิโนส กลูโคส และเวอร์บาสโคส) ในปริมาณเล็กน้อย

โปรตีนถั่วเหลืองเป็นโกลบูลาร์โปรตีน (globular protein) สามารถจำแนกได้เป็น 4 ส่วน (fraction) ตามอัตราการตกตะกอน (sedimentation rate) ได้แก่ 2S 7S 11S และ 15S ซึ่งโปรตีนแต่ละส่วนมีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน โปรตีนหลักหรือโปรตีนที่มีปริมาณมากที่สุดในถั่วเหลือง ได้แก่ 7S globulin หรือเบตา-คอนไกลซินิน (B-conglycinin) ปริมาณประมาณ 18.5% ของโปรตีนถั่วเหลือง และ 11S globulin หรือไกลซินิน (glycinin) มีปริมาณประมาณ 51% ของโปรตีนถั่วเหลือง โปรตีนในเมล็ดถั่วเหลืองจัดเป็นโปรตีนคุณภาพดีสามารถทดแทนโปรตีนจากสัตว์ได้ เนื่องจากมีกรดอะมิโนจำเป็น (essential amino acid) ทั้งชนิดและปริมาณที่สมดุลกว่าโปรตีนจากพืชชนิดอื่น โดยมีไลซีนในปริมาณสูง

ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองมีปริมาณโปรตีนที่แตกต่างกันไป เช่น แป้งถั่วเหลือง (soy flour) มีโปรตีน 50-59% โปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้น (soy protein concentrate, SPC) มีโปรตีน 65-72% และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด (soy protein isolate, SPI) มีโปรตีนมากกว่า 90% ขึ้นไป โปรตีนถั่วเหลืองมีสมบัติเชิงหน้าที่หลากหลาย ได้แก่ การเกิดโฟม การเป็นอิมัลซิไฟเออร์ และการเกิดเจล (นันทพร โพธิวุฒิคุณ, 2557)

3.1 คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนถั่วเหลือง

3.1.1 การพองตัว (swelling) เป็นการวัดการรับน้ำเข้าโครงสร้างของโปรตีน ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างโปรตีน เมื่อโปรตีนได้รับความร้อนจึงสูญเสียสภาพทางธรรมชาติทำให้ส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic residues) เปิดตัวออกมา ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง การพองตัวจึงลดลง โปรตีนจึงไม่ดูดซับน้ำ แต่เกิดเป็นโครงสร้างของเจล (gel matrix) ที่กักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างแทน การพองตัวของโปรตีนจึงขึ้นอยู่กับคุณภาพของถั่วเหลือง กระบวนการผลิต และสภาวะทางเคมี เป็นต้น

3.1.2 ความสามารถในการละลาย (solubility) การที่โปรตีนสูญเสียโครงสร้างดั้งเดิมทางธรรมชาติ อันเนื่องมาจากอุณหภูมิสูง (75-94 องศาเซลเซียส) ค่า pH สูง สารเคมี เช่น ยูเรีย เกลือของโลหะหนัก และสารทำละลายอินทรีย์ เป็นผลให้โปรตีนเสียกิจกรรมทางชีววิทยา ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางจตุรภูมิ ทำให้ความสามารถในการละลายของโปรตีนลดลง โปรตีนเกาะตัวกันเป็นก้อน และมีความขุ่นเพิ่มขึ้น

3.1.3 ความหนืด (viscosity) เป็นความต้านทานการไหลของของไหล คุณสมบัตินี้เกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลาย การพองตัว และเป็นสัดส่วนของการดูดซับน้ำทั้งหมด เมื่อโปรตีนเกิดการพองตัว ขนาดของโปรตีนเพิ่มขึ้นทำให้มีความต้านทานการไหลมากขึ้น ความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อนจนกระทั่งเกิดการสูญเสียสภาพของโปรตีน ซึ่งส่งผลให้ความหนืดลดลง แล้วเกิดเจลที่สามารถเก็บกักน้ำไว้ในโครงสร้างได้ ความเข้มข้นของโปรตีนมากขึ้นส่งผลให้พันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความหนืดสูงขึ้น

3.1.4 ความสามารถในการเกิดโฟม (foam capacity) โฟมเป็นระบบระหว่างเฟสของก๊าซและของเหลว โดยที่มีของเหลวล้อมรอบฟองอากาศอยู่โดยรอบ โปรตีนถั่วเหลืองมีความสามารถในการเกิดโฟม โดยทำให้ฟองอากาศที่มีฟิล์มของโปรตีนถั่วเหลืองเคลือบผิวหน้าอยู่ซึ่งมีน้ำล้อมรอบอยู่มีความเสถียรได้ กลไกที่เกิดขึ้นเกี่ยวข้องกับการชะลอการไหลออกของน้ำจากบริเวณผิวหน้าแผ่นฟิล์ม (film drainage) ที่เคลือบระหว่างฟองอากาศเอาไว้ โดยฟิล์มที่เกิดขึ้นมีความยืดหยุ่นสามารถป้องกันไม่ให้เกิดการแตกแยกและฉีกขาดออกจากกัน ซึ่งพบว่าโฟมที่เกิดจาก

โปรตีน 11s โกลบูลิน สามารถชะลอการระบายน้ำออกจากแผ่นฟิล์มได้ดี ทั้งนี้ความสามารถในการเกิดโฟมของโปรตีนถั่วเหลืองขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ค่า pH และปริมาณพันธะไดซัลไฟด์ของโปรตีน

3.1.5 ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน (emulsification) การที่โมเลกุลโปรตีนมีโครงสร้างทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic residues) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ จึงทำให้โปรตีนมีสมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) อิมัลชัน (emulsion) จัดเป็นสารแขวนลอยประเภทหนึ่งที่เป็นระบบของของเหลว 2 เฟส (2-phase liquid system) โดยมีของเหลวชนิดหนึ่งกระจายตัวอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง สามารถแบ่งระบบอิมัลชันออกได้เป็น 2 ระบบ ได้แก่ ระบบน้ำในน้ำมัน (water in oil) และระบบน้ำมันในน้ำ (oil in water) กล ไกการทำงานของโปรตีนในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์เป็นการหันส่วนที่มีขั้วและมีประจุเข้าหาน้ำและหันส่วนที่ไม่มีขั้วเข้าหาน้ำมัน การจัดเรียงตัวดังกล่าวทำให้ลดแรงตึงผิวที่รอยต่อระหว่างน้ำและน้ำมันลง จึงทำให้น้ำและน้ำมันเป็นเนื้อเดียวกัน โปรตีนถั่วเหลืองมีความเป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobicity) สูง และสามารถคลายตัวออกเป็นโครงสร้างสายยาวได้ง่าย จึงสามารถแผ่ตัวออกระหว่างรอยต่อและเข้าจับกับส่วนที่เป็นไขมันได้ดี จึงมีความสามารถในการเกิดและลดความตึงผิวของอิมัลชันได้ จึงทำให้ไม่เกิดการรวมกลุ่ม (coalesence) ของหยดไขมันขึ้น ความเสถียรของอิมัลชันเพิ่มขึ้นได้เมื่อเพิ่มส่วนของโปรตีน 7S โกลบูลิน คุณสมบัตินี้จึงขึ้นกับความเข้มข้นของโปรตีน ค่า pH การสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน และสารรีดิวซิ่ง

3.1.6 ความสามารถในการเกิดเจล (gel capacity) เมื่อโปรตีนเกิดการสูญเสียสภาพที่ความเข้มข้นสูง ก่อให้เกิดเจลขึ้นได้ ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความเข้มข้นของโปรตีน พันธะไดซัลไฟด์ ค่า pH และเกลือในสารละลาย กระบวนการเกิดเจล มี 2 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การเริ่มสูญเสียสภาพที่ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเรียกได้ว่าเป็นการเกิดเจลเบื้องต้น (pregel) 2) เป็นการรวมตัวกันของโมเลกุลโปรตีนที่สูญเสียสภาพเกิดเป็นโครงสร้างของเจล (gel matrix) ที่สามารถเก็บกักน้ำ ไขมัน น้ำตาล กลิ่นรส และสารอื่น ๆ ไว้ได้ จัดเป็นขั้นตอนที่ไม่ผันกลับ ซึ่งมีการเชื่อมโยงโครงสร้างของเจลด้วยพันธะไดซัลไฟด์ ไฮโดรเจน และแรงดึงดูดไฮโดรโฟบิกระหว่างโมเลกุลของโปรตีนถั่วเหลือง (ขจีรัตน์ ระรื่นรมย์, 2548)

ปัจจุบันมีการใช้โปรตีนไข่ขาว เวย์โปรตีน และโปรตีนถั่วเหลือง ในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด

ชนิดา ครูส่ง และอรสา สุริยาพันธ์ (2553) ได้ศึกษาผลของการเติมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด (SPI) ต่อคุณภาพของขนมเมล็ดขนุนกวน โดยแปรปริมาณ SPI 0, 3, 6, และ 9% โดยน้ำหนักแป้งเมล็ดขนุน พบว่าการเพิ่มปริมาณ SPI ส่งผลให้ค่าความแน่นเนื้อสูงขึ้น และในการทดสอบทาง

ประสาทสัมผัสพบว่าขนมเมล็ดขนุนกวนที่เติม SPI 3% มีคะแนนความชอบอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งมากกว่าขนมเมล็ดขนุนกวนที่เติม SPI 6 และ 9%

ภัควัฒน์ เดชชีวะ และอรอนงค์ นัยวิกุล (2559) ศึกษาผลของไข่ขาวผง (egg white powder, EWP) ต่อคุณภาพของสปาเก็ตตี้แป้งข้าว โดยนำแป้งข้าวโม่แห้งผสมกับ EWP ในอัตราส่วน 0, 2.5, 5.0, 7.5 และ 10% ของน้ำหนักแห้ง พบว่าสปาเก็ตตี้แป้งข้าวผสม WEP 5.0% มีค่าความแน่นเนื้อ และค่าความต้านทานการดึงขาดสูงที่สุด นอกจากนี้ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าสปาเก็ตตี้แป้งข้าวผสม EWP 5.0% ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุด

งานวิจัยของ Menon et al. (2016) ได้พัฒนาก๋วยเตี๋ยวแป้งปราศจากกลูเตนจากมันเทศด้วยการเสริมเวย์โปรตีนเข้มข้น (WPC) 10, 20, และ 30% พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ WPC ในก๋วยเตี๋ยวมากขึ้น ความแน่นเนื้อ (firmness) ของก๋วยเตี๋ยวดิบ (raw) จะลดลง แต่ในทางกลับกันเมื่อก๋วยเตี๋ยวถูกทำให้สุก (cooking) ค่าความแน่นเนื้อจะสูงขึ้น และในการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าก๋วยเตี๋ยวที่เสริมด้วย WPC 10 และ 20% มีความชอบโดยรวมสูงกว่าก๋วยเตี๋ยวที่เสริมด้วย WPC 30%

นอกจากมีการใช้โปรตีนทั้ง 3 ชนิด เช่น โปรตีนไข่ขาว เวย์โปรตีน และโปรตีนถั่วเหลือง ในการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารเส้นแล้ว มีรายงานว่ามีการใช้โปรตีนทั้ง 3 ชนิดนี้ในการใช้เป็นส่วนผสมของอาหาร และพบว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า GI ของอาหารได้

Gopalakrishnan et al. (2011) ได้ศึกษาการใช้โปรตีนสามชนิด ได้แก่ เวย์โปรตีนเข้มข้น (WPC) แป้งถั่วเหลืองสกัดไขมัน (defatted soy flour) และผงปลา (fish powder) ในการทดแทนมันเทศสีขาว เพื่อลดค่า GI ในผลิตภัณฑ์พาสต้า โดยพบว่า WPC ที่ทดแทน 10 และ 20% ในผลิตภัณฑ์พาสต้า มีผลทำให้อัตราการย่อยในหลอดทดลอง (in vitro starch digestibility) ในนาทีที่ 120 ลดลงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับโปรตีนอีกสองชนิด นอกจากนั้นยังพบว่า WPC ที่ทดแทน 10% มีปริมาณ RDS ต่ำที่สุด และมี RS สูงที่สุด โดยเกิดจาก WPC ส่งผลให้เกิด protein-starch network ที่แข็งแกร่งกว่าโปรตีนอีกสองชนิด

งานวิจัยของ Fujiwara (2014) ได้เติมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด (SPI) ลงในผลิตภัณฑ์ขนมปัง 0, 3, 5, 8 และ 10% พบว่าการเติม SPI ลงในขนมปัง 10% มีผลทำให้ค่า GI ลดลงมากที่สุด จาก 109 (0%) เป็น 97

Zheng et al. (2015) ได้ศึกษาการใช้กัมและโปรตีนในการผลิตพาสต้าปราศจากกลูเตนจากแป้งกล้วยดิบ พบว่าในตัวอย่างแป้งกล้วยดิบที่เติมแซนแทนกัม กัวร์กัม และไข่ขาว 2.5, 2.5 และ 31% ตามลำดับ มีอัตราการย่อยอาหาร (digestion rates) ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างแป้งสาลีที่เติมแซนแทนกัม กัวร์กัม และไข่ขาว 2.5, 2.5 และ 31% ตามลำดับ โดยอาจเกิดจากไข่ขาวส่งผลให้เกิดโครงข่ายโปรตีนที่แข็งแรง แต่อย่างไรก็ตามโครงข่ายโปรตีนไม่ได้เป็นเพียงปัจจัยเดียว

ที่ควบคุมอัตราการย่อยของพาสต้าแป้งกล้วย เนื่องจากโปรตีนไข่ขาวอาจไม่ให้คุณสมบัติการป้องกันเทียบเท่ากับโปรตีนกลูเตน ซึ่งกัมก็อาจมีปฏิกิริยากับเม็ดแป้งโดยการสร้างชั้นฟิล์มรอบ ๆ เม็ดแป้ง ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อเอนไซม์ในการเข้าถึงเม็ดแป้ง โดยโปรตีนไข่ขาวและกัมอาจมีผลเสริมฤทธิ์กันเนื่องจากมันสามารถสร้างโด (dough) ที่แข็งแรงได้ แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติต้านทานเอนไซม์โดยธรรมชาติของแป้งกล้วยดิบนั้นมีความไวต่อเอนไซม์ต่ำ จึงเป็นผลทำให้พาสต้าจากแป้งกล้วยดิบมีอัตราการย่อยอาหารต่ำกว่าพาสต้าจากแป้งสาลี

งานวิจัยของ Menon et al. (2016) ได้พัฒนาก๋วยเตี๋ยวแป้งปราศจากกลูเตนจากมันเทศด้วยการเสริมเวย์โปรตีนเข้มข้น (WPC) 10, 20 และ 30% พบว่าในนาทีที่ 120 ก๋วยเตี๋ยวที่เสริมด้วย WPC 30% มีความสามารถในการย่อยได้ของสตาร์ชต่ำสุด และมีปริมาณ RS สูงสุด

ยุทธนา พิมลศิริผล (2561) กล่าวว่า มีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้เวย์โปรตีนเข้มข้น (WPC) ในการทดแทนสตาร์ชมันเทศเพื่อลดค่า GI ในผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยว โดยพบว่า WPC ที่ทดแทน 10, 20 และ 30% มีผลทำให้ปริมาณ RS ในผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวเพิ่มขึ้น จาก 15.6% เป็น 20.2, 23.8 และ 25.9% ตามลำดับ จึงทำให้ค่า GI ลดลงจาก 79 เป็น 74 70 และ 69 ตามลำดับ

4. เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (transglutaminase, TGase)

เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสหรือ protein-glutamine-γ-glutamy transferase เป็นเอนไซม์ที่สามารถพบได้ในสิ่งมีชีวิตในพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ มีหน้าที่ประสานให้เกิดโครงสร้างของโปรตีน (protein networking) ทำให้โครงสร้างโปรตีนแข็งแรงขึ้นจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น อุตสาหกรรมซูริมิ (surimi) และอุตสาหกรรมโยเกิร์ต เป็นต้น (ไฉน ตาคำแสน และนพพล เล็กสวัสดิ์, ม.ป.ป.)

TGase เป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการย้ายหมู่เอซิล (actyl transfer) ระหว่างหมู่แกมมาคาร์บอกซิเอไมด์ของกรดอะมิโนกลูตามีนของสายเพปไทด์ หรือโปรตีน และสารประกอบอเมีน ถ้าหมู่เอมีนเป็นหมู่เอพซิลอน (epsilon) อะมิโนของไลซีนในสายเพปไทด์ TGase จะทำให้เกิดการเชื่อมโดยพันธะโควาเลนท์ของเพปไทด์ 2 สายเกิดเป็นพันธะใหม่เรียกว่า เอพซิลอนแกมมากลูตามิลไลซีน ในสภาวะที่ไม่มีเอมีน TGase จะเร่งปฏิกิริยาการย่อยหมู่แกมมาคาร์บอกซิเอไมด์ของกลูตามีนโดยทำปฏิกิริยากับน้ำได้เป็นกรดกลูตามิกและแอมโมเนีย

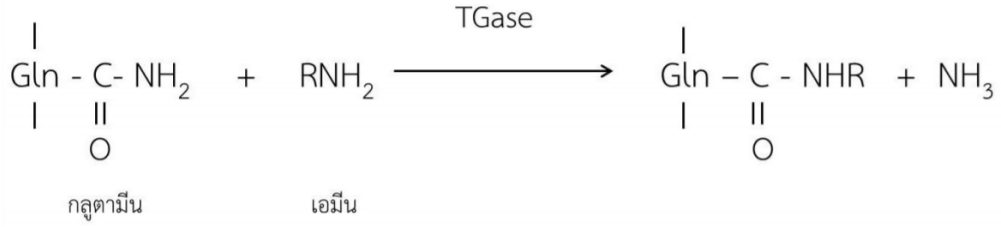
TGase มีหมู่ซิสเตอีนอยู่ในบริเวณเร่งเพื่อทำปฏิกิริยา เกิดปฏิกิริยาที่หมู่แกมมาคาร์บอกซิเอไมด์ของกลูตามีนได้เป็นแกมมากลูตามิลไทโอเอสเทอร์ และแอมโมเนีย ต่อมาจะทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีนเกิดเป็นพันธะไอโซเพปไทด์ ถ้าไม่มีหมู่ไพรมารีเอมีน น้ำจะเป็นตัวรับหมู่เอซิลทำให้กลูตามีนเปลี่ยนเป็นกรดกลูตามิก นอกจากนี้สายเพปไทด์ที่มีไลซีนก็สามารถทำปฏิกิริยากับส่วนของกลูตามีนได้เกิดเป็นพันธะ G-L ระหว่างโปรตีน จัดเป็นโปรตีน จัดเป็นพันธะโควาเลนท์ ซึ่งมีความ

แข็งแรง ซึ่งอาจเกิดในสายเพปไทด์หรือระหว่างสายเพปไทด์จึงมีการใช้ TGase ดัดแปลงสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน เช่น การละลาย การเกิดอิมัลชัน และเพิ่มคุณค่าทางอาหาร โดยป้องกันการสูญเสียไลซีน (วราภรณ์ กาพันสิทธิ์ และนพพล เล็กสวัสดิ์, ม.ป.ป.)

ปฏิกิริยาเคมีที่ TGase ช่วยเร่งปฏิกิริยา มี 3 ลักษณะ

1. ปฏิกิริยาย้ายหมู่เอซิล (acyl transfer) จากกรดอะมิโนกลูตามีน

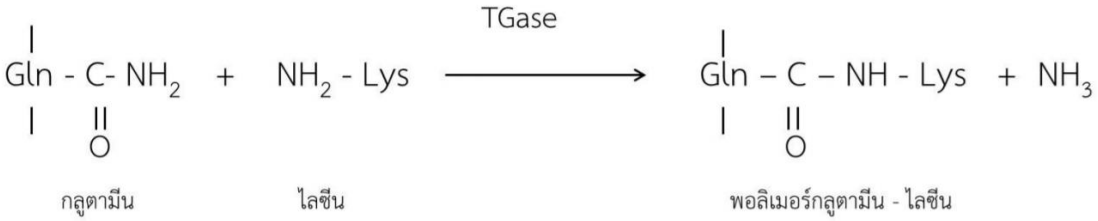
ปฏิกิริยานี้ TGase จะไปเร่งการย้ายระหว่าง γ-carboxyamide ซึ่งเป็น accyt donor ของกรดอะมิโนกลูตามีนในโปรตีนและ primary amine (RNH_2) ทำให้เกิดเป็นโปรตีนรูปแบบใหม่ ดังแสดงในภาพที่ 2-10 ซึ่งทำให้สายยาวขึ้น



ภาพที่ 2-10 ปฏิกิริยาการย้ายหมู่เอซิลจากกรดอะมิโนกลูตามีนของ TGase (ไฉน ตาคำแสน และนพพล เล็กสวัสดิ์, ม.ป.ป.)

2. ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างกรดอะมิโนกลูตามีนและเอมีนของไลซีน

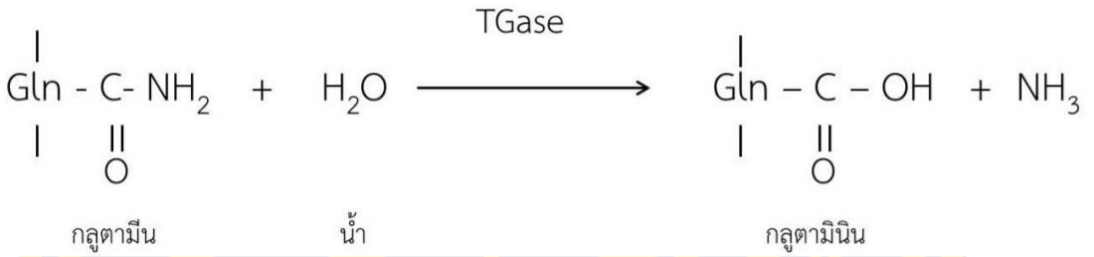
ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเมื่อมีกรดอะมิโนอิสระของไลซีนในโปรตีน (NH_2-Lys) เป็นปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างกลูตามีนกับกรดอะมิโน ทำให้เกิดเป็นสายโปรตีนสายยาวเกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2-11 ซึ่งจากข้อนี้นั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่อไปได้



ภาพที่ 2-11 ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างกรดอะมิโนกลูตามีนและเอมีนของไลซีนของ TGase (ไฉน ตาคำแสน และนพพล เล็กสวัสดิ์, ม.ป.ป.)

3. ปฏิกิริยาแยกหมู่เอมีนของโปรตีนที่มีกรดอะมิโนกลูตามีน

ในกรณีที่ไม่มีเอมีนปฐมภูมิ หรือกรณีที่กรดอะมิโนอิสระของไลซีนในโปรตีนถูกบดบังด้วยสารประกอบบางชนิด ปฏิกิริยาจะทำให้เกิดเป็นกลูตามินินซึ่งไม่ใช่ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 ปฏิกิริยาแยกหมู่เอมีนของโปรตีนที่มีกรดอะมิโนกลูตามีนของ TGase (ไฉน ตาคำแสน และนพพล เล็กสวัสดิ์, ม.ป.ป.)

จากลักษณะที่ TGase ไปช่วยเร่งปฏิกิริยาทำให้ทราบได้ว่า สารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา คือ กลูตามีนในโปรตีนกับ alkylamine (RNH_2) ซึ่งจะได้สารผลิตภัณฑ์ออกมาเป็น protein N^5-alkylglutamine และแอมโมเนีย (NH_3) สำหรับโคแฟกเตอร์ของ TGase คือ แคลเซียม (calcium) หรือ Ca^{2+}

ในปัจจุบันมีการใช้เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเป็นส่วนผสมในอาหาร เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหารเส้น

กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์, นภาลัย ประสิทธิ์เขตร์กิจ, และอโนชา สุขสมบูรณ์ (2554) ได้ศึกษาผลของการเติมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (TGase) ต่อคุณภาพของบะหมี่เสริมใบมะรุมหลังการต้ม โดยแปรปริมาณ TGase 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, และ 0.9% (โดยน้ำหนักแป้ง) พบว่าค่าความต้านทานการดึงขาด และค่าความแน่นเนื้อของบะหมี่เสริมใบมะรุมต้มสุกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ TGase เพิ่มขึ้นจาก 0-0.3% แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อ TGase เพิ่มขึ้น 0.5-0.9% และจากผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าบะหมี่เสริมใบมะรุมที่เติม TGase 0.3% ได้คะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุด

กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์, อารีรัตน์ ทองสุทธิ, พรอนงค์ ตันติวรัตนถิกุล, และอโนชา สุขสมบูรณ์ (2561) ได้ศึกษาผลของการเติมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (TGase) ต่อคุณภาพของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปแบบไม่ทอดเสริมสาหร่ายเกลียวทอง โดยแปรปริมาณ TGase 0, 0.1, 0.3, และ 0.5% (โดยน้ำหนักแป้ง) พบว่าเมื่อปริมาณ TGase เพิ่มขึ้น ค่าความแน่นเนื้อและค่าความต้านทานการดึงขาดเพิ่มขึ้นตามลำดับ และจากผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าบะหมี่เสริมสาหร่ายเกลียวทองผงที่เติม TGase 0.3 และ 0.5% ได้คะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุด

นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงการใช้ TGase เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารเส้นที่มีผลต่อการย่อยของสตาร์ชด้วย

จากงานวิจัยของ Gan et al. (2009) พบว่าการใช้เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (TGase) จากจุลินทรีย์ 0.5% ของแป้งสาลี:โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (SPI) ในอัตราส่วนร้อยละ 95:5 มีผลทำให้อัตราย่อยสตาร์ชของก๋วยเตี๋ยวลดลง จึงทำให้ค่า GI ลดลงจาก 52.7 (control) เป็น 51.7 อีกทั้งยังพบว่ามีความต้านทานการดึงขาดและความยืดหยุ่นสูง

Wee & Henry (2019) ได้ศึกษาผลของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (TGase) ต่อการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลองของก๋วยเตี๋ยวจากแป้งสาลี โดยแปรปริมาณ TGase 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0% พบว่าปริมาณการปล่อยกลูโคส (glucose release) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ TGase ตัวอย่างที่มี TGase 2.0% มีปริมาณการปล่อยกลูโคสลดลงประมาณ 16% หลังจาก 120 นาทีของการย่อย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุดิบและสารเคมี

1. กล้วยน้ำว้าดิบ สายพันธุ์ปากช่อง 50 ระดับความแก่ระยะที่ 1 (เปลือกสีเขียวทั้งผล ผลแข็ง ไม่มีส่วนที่สุก) จากสวนกล้วย ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย

2. กล้วยหอมดิบ สายพันธุ์เพชรบุรีระดับความแก่ระยะที่ 1 (เปลือกสีเขียวทั้งผล ผลแข็ง ไม่มีส่วนที่สุก) จากสวนกล้วย ตำบลบางม่วง อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา ประเทศไทย

3. ไข่ขาวผง (Egg white powder) ร้านศรีเมืองเบเกอรี่ แอนด์ซัพพลาย ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย

4. เวย์โปรตีน (Whey protein concentrate) F028WPC บริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด ประเทศไทย

5. โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (Soy protein isolate) (รหัส EX: 33, ปริมาณโปรตีน 92%) จัดจำหน่ายโดย ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอส. ซายน์ อุปกรณ์เคมี ประเทศไทย

6. เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (Transglutaminase) บริษัท แวลู อินดัสเตรียล โปรดักส์ จำกัด ประเทศไทย

7. กัวร์กัม (Guar gum) Food grade บริษัท Asia pacific specialty chemicals limited ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

8. แซนแทนกัม (Xanthan gum) คุณสุนทร แซ่โง้ว

9. โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (Sodium hypochlorite solution) บริษัท RFCL limited ประเทศอินเดีย

10. กรดซิตริก (Citric acid) บริษัท Ajax finechem ประเทศนิวซีแลนด์

11. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) บริษัท Ajax finechem ประเทศนิวซีแลนด์

12. กรดมาลิก (Maleic acid) บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย

13. แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต (Calcium chloride dihydrate) บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย

14. กรดแกลเชียลแอซีติก (Glacial acetic acid) RCI labscan limited บริษัท V.S. chem house ประเทศไทย

15. เอทานอล (Ethanol) RCI labscan limited บริษัท V.S. chem house ประเทศไทย

16. ชุด Resistant starch kit บริษัท Megazyme ประเทศไอร์แลนด์

17. Fluorescein isothiocyanate isomer I, FITC

18. Rhodamine B isothiocyanate, RITC

19. ทริส-ไฮดรอกซีเมทิล-เมทิลเอมีน (Tris-hydroxymethyl-methylamine) บริษัท Kemaus ประเทศออสเตรเลีย

20. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย

21. โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulphate, SDS) บริษัท VWR international จำกัด

22. เมทานอล (Methanol) RCI labscan limited บริษัท V.S. chem house ประเทศไทย

23. แอลซีรีน (L-serine) บริษัท Himedia laboratories ประเทศอินเดีย

24. คูแมสซี่ บริลเลียนท์ บลู (Coosmassie brilliant blue R-250) บริษัท Fluka chemika

25. ไกลซีน (Glycine) บริษัท Fisher scientific UK limited ประเทศสหราชอาณาจักร

26. แอมโมเนียม เปอร์ซัลเฟต (Ammonium persulphate) บริษัท Vivantis technologies ประเทศมาเลเซีย

27. อะคริลาไมด์ (Acrylamide 30%) บริษัท Sigma-aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

28. เตตระเมทิลเอทิลีนไดเอมีน (Tetramethylethylenediamine, TEMED) บริษัท Applichem ประเทศเยอรมนี

29. เบตา-เมอแคปโตเอทธานอล (β –mercaptoethanol) บริษัท Applichem ประเทศเยอรมนี

30. กลีเซอรอล (Glyerol) บริษัท Ajax finechem ประเทศนิวซีแลนด์

31. โบรโมฟีนอล บลู (Bromophenol blue) บริษัท Ajax finechem ประเทศนิวซีแลนด์

32. OPA reagent (phthaldialdehyde 97%) บริษัท Sigma-aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

33. กรดบอริก (Boric acid) บริษัท Fisher scientific UK limited ประเทศสหราชอาณาจักร

34. โซเดียม อะไซด์ (Sodium azide) บริษัท Ajax finechem ประเทศนิวซีแลนด์

อุปกรณ์ และเครื่องมือ

อุปกรณ์เตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

1. ตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray dryer) บริษัท อีเคฟู้ดเทค ประเทศไทย
2. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) Shel lab รุ่น 1350 FX ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องบดละเอียด
4. ตะแกรงร่อน (Sieves) ขนาด 80 เมซ
5. เครื่องผสมไฟฟ้า (Kitchen aid) รุ่น Professional 5 Plus และหัวผสมแบบตะขอ ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. เครื่องรีดเส้นพาสต้า (Pasta machine)

อุปกรณ์ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและเคมี

1. เครื่องวัดความชื้น (Moisture analyzer) Sartorius รุ่น MA 30 ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เครื่องวัดความหนืด (Rapid visco analyser, RVA) รุ่น RVA 4500 ประเทศสวีเดน
3. เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) Stable micro system รุ่น TA-XT plus ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. เครื่องวัดสี (Hunter lab miniscan) รุ่น XE Plus ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง Sartorius รุ่น BA 4100S ประเทศเยอรมนี
6. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง Sartorius รุ่น AC 211S ประเทศเยอรมนี
7. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) Shel lab รุ่น 1350 FX ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดใช้เลเซอร์ในการสแกน (Confocal microscope) Nikon รุ่น Ni-E ประเทศญี่ปุ่น
9. เครื่องหมุนเหวี่ยงชนิดตั้งโต๊ะ (Centrifuge) Hermle รุ่น Z326K ประเทศเยอรมนี
10. เครื่องหมุนเหวี่ยงชนิดตั้งโต๊ะ (Centrifuge) Mini low speed centrifuge รุ่น TD4 ยี่ห้อ Xiangzhi/Medspin บริษัท โปรวิชั่น ไซแอนติฟิค จำกัด ประเทศไทย
11. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Shaking water bath) รุ่น CB22-20-SB-D ประเทศเดนมาร์ก
12. เครื่องรีโอมิเตอร์ (Rotational Rheometer) รุ่น ARES G2, TA Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา
13. เตาเผาไฟฟ้า (Hot plate) รุ่น EC46 ประเทศอังกฤษ
14. เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH meter) Schott รุ่น TA-XT5 ประเทศอังกฤษ

15. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer UV/VIS) รุ่น Genesys 10S ประเทศสหรัฐอเมริกา

16. ชุดอุปกรณ์เตรียมเจล (Mini-PROTEIN 3 System Components) เพื่อวิเคราะห์รูปแบบโปรตีนด้วยวิธี Sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) ประเทศสหรัฐอเมริกา

17. ชุดวิเคราะห์โปรตีน (Kjeldahl apparatus) ประกอบด้วย

17.1 เครื่องย่อยสาร (Digestion unit) Buchi, รุ่น K-424 ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

17.2 เครื่องกำจัดไอกรด (Scrubber unit) Buchi, รุ่น B-414 ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

17.3 เครื่องกลั่นสาร (Distillation unit) Buchi, รุ่น B-324 ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

18. เครื่องวิเคราะห์ไขมัน (Soxhlet apparatus) Gerhardth รุ่น S306AK ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

19. เตาเผา (Muffle furnace) Ney รุ่น 6-160A สหราชอาณาจักร

20. อุปกรณ์เครื่องแก้ว เช่น กระบอกตวง บีกเกอร์ ขวดปรับปริมาตร

21. อุปกรณ์เครื่องครัว เช่น ถาดสแตนเลส อ่างสแตนเลส

22. อุปกรณ์ในการทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส เช่น ถ้วย แก้วน้ำ และช้อนพลาสติก

วิธีดำเนินการวิจัย

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม ต่อสมบัติทางกายภาพ และค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้ง คุณลักษณะของพาสต้า และค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

1.1 การเตรียมแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม

เตรียมแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม ดัดแปลงมาจากวิธีของ Khoozani et al. (2019); Nednapis Vatanasuchart et al. (2012) โดยนำกล้วย 2 สายพันธุ์ ได้แก่ กล้วยน้ำว้า (*Musa* ABB group) สายพันธุ์ปากช่อง 50 และกล้วยหอมทอง (*Musa* AAA group) สายพันธุ์เพชรบุรี ที่ระดับความแก่ระยะที่ 1 (ดังภาพที่ 3-1) มาล้างด้วยน้ำกลั่นที่มีโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 5% (0.5 มิลลิลิตร/ลิตร) แล้วแช่กล้วยดิบในสายละลายกรดซิตริก 0.5% (w/v) เป็นเวลา 15 นาที ระบายน้ำออก เพื่อลดการเกิดสีน้ำตาลของเอนไซม์ จากนั้นแบ่งกล้วยดิบแต่ละสายพันธุ์ออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 คือ กล้วยดิบไม่ปอกเปลือก (กล้วยทั้งผล) และส่วนที่ 2 คือ กล้วยดิบปอกเปลือก (เนื้อกล้วย) เมื่อปอกเปลือกส่วนที่ 2 เรียบร้อยแล้ว นำกล้วยดิบทั้ง 2 ส่วน ไปสไลด์ให้มีความหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร แล้วนำไปแช่ลงในสารละลายกรดซิตริก 0.5% (w/v) เป็นเวลา 15 นาที ระบายน้ำออก นำไปกระจายให้ทั่วบนถาดสแตนเลส จากนั้นนำไปอบในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนได้ความชื้นต่ำกว่า 10% บดให้เป็นผงด้วยเครื่องบดละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช จากนั้นบรรจุในถุงสูญญากาศ และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำไปวิเคราะห์

a b

ภาพที่ 3-1 ระดับความแก่ระยะที่ 1 ของ a) กล้วยน้ำว้า และ b) กล้วยหอม

1.2 การวิเคราะห์ค่าสี

วัดค่าสีของตัวอย่างแป้งโดยใช้เครื่องวัดสี Hunter Lab, รุ่น Miniscan XE Plus วัดค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง-สีเขียว (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง-สีน้ำเงิน (b*) โดยต้องดำเนินการเทียบมาตรฐาน (calibration) ของเครื่องวัดสีก่อนวัด นำตัวอย่างแป้งมาใส่ในจานสำหรับวัดสีให้เต็มพื้นที่ของจานโดยไม่มีช่องว่าง แล้วนำมาวัดค่าสีในระบบ CIE ซึ่งจะอยู่ในหน่วยดังนี้

ค่าสี L* มีช่วงตั้งแต่ 0 หมายถึง สีดำ จนถึง 100 หมายถึง สีขาว

ค่าสี a* มีค่าเป็นบวก หมายถึง สีแดง ถ้ามีค่าเป็นลบ หมายถึง สีเขียว

ค่าสี b* มีค่าเป็นบวก หมายถึง สีเหลือง ถ้ามีค่าเป็นลบ หมายถึง สีน้ำเงิน

1.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงด้านความหนืด

นำตัวอย่างแป้ง 3 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นปราศจากไอออน 25 กรัม มาวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง rapid visco analyser โดยใช้สภาวะดังนี้ (1) holding ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที (2) heated ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.42 นาที (3) holding ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.7 นาที (4) cooling ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.88 นาที (5) holding ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที ใช้ความเร็วรอบที่ 960 รอบต่อนาที (rpm) สำหรับ 10 วินาทีแรก และหลังจากนั้นใช้ความเร็วรอบที่ 160 รอบต่อนาที รายงานผลในรูปของค่าความหนืดสูงสุดในช่วงการให้ความร้อน (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุดระหว่างการทำให้เย็น (trough) ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (breakdown) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดสูงสุด (setback from peak) ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (setback from trough) และอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature)

1.4 การวิเคราะห์ดัชนีการละลายน้ำและดัชนีการดูดซับน้ำ

การวิเคราะห์ดัชนีการละลายน้ำและดัชนีการดูดซับน้ำ ตามวิธีของ ดารารัตน์ นาคละออ, อาภัสรา แสงนาค, และกุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์ (2554) ชั่งตัวอย่างแป้ง 2.5 กรัม ใส่ในหลอดหมุนเหวี่ยงที่มีฝาและทราบน้ำหนักแน่นอน เติมน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันโดยคนด้วยแท่งแก้วและคนทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที ล้างส่วนที่ติดมากับแท่งแก้วลงในหลอดหมุนเหวี่ยงโดยใช้น้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ 2200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที เทส่วนใสลงในถ้วยอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนัก นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่ แล้วชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณดัชนีการละลายน้ำ สำหรับหลอดหมุนเหวี่ยงพร้อมส่วนที่เหลือในหลอดนำไปชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณค่าการดูดซับน้ำ ดังสมการ

ดัชนีการละลายน้ำ = $\frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างส่วนที่ละลายน้ำ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$

ดัชนีการดูดซับน้ำ = $\frac{\text{น้ำหนักหลอดหมุนเหวี่ยงพร้อมตะกอน – น้ำหนักหลอดหมุนเหวี่ยง}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}$

1.5 การวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้ง

วิเคราะห์สตาร์ชที่ย่อยได้ในแต่ละเวลาที่ดัดแปลงจาก Goñi, Garcia-Alonso, & Saura-Calixto (1997); McCleary *et al*. (2002) และ Kunyanee & Luangsakul (2020) โดยใช้ชุด Resistant starch kit ของบริษัท Megazyme ตามวิธีในภาคผนวก ก-1 โดยนำแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม มาย่อยด้วยเอนไซม์ pancreatic α-amylase เป็นเวลา 30 60 90 120 150 และ 180 นาที แล้วนำตัวอย่างที่ผ่านการย่อยมาวิเคราะห์ปริมาณกลูโคส โดยการย่อยด้วย amyloglucosidase เป็นเวลา 20 นาที เติม GOPOD reagent แล้วบ่มต่ออีก 20 นาที จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาค่าต่าง ๆ ดังนี้

หาปริมาณการย่อยของสตาร์ช ดังสมการ

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

โดย ΔE คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

F คือ การเปลี่ยนหน่วยค่าการดูดกลืนแสงเป็น μg คำนวณได้จาก F = 100/ค่าการดูดกลืนแสงของกลูโคสมาตรฐาน

W คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (mg) คำนวณได้จาก W = น้ำหนักตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ ×[(100 – ความชื้น)/100]

หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการย่อยของสตาร์ชกับเวลา (30-180 นาที) โดยแสดงผลเป็นกราฟ จะได้ค่า C_∞, C และ t เพื่อหาค่า k ดังสมการ

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

โดย C คือ ร้อยละของสตาร์ชที่ถูกย่อยที่เวลา t

C_∞ คือ ร้อยละของสตาร์ชที่ถูกย่อยที่ 180 นาที

k คือ ค่าคงที่ไคเนติค (min^{-1})

t คือ เวลาในการย่อย (min)

หาพื้นที่ใต้กราฟ (area under the curve, AUC) คำนวณได้จาก

$$AUC = C_\infty (t_f - t_0) - (C_\infty \div k)(1 - \exp(-k (t_f - t_0)))$$

โดย C_∞ คือ ค่าสมดุลของปริมาณการย่อยของสตาร์ช

t_f คือ เวลาสุดท้าย (180 นาที)

t_0 คือ เวลาเริ่มต้น (0 นาที)

k คือ ค่าคงที่ไคเนติค (min^{-1})

หาค่าดัชนีการย่อย (hydrolysis index, HI) คำนวณได้จาก

$$HI = (AUC\ sample / AUC\ reference) \times 100$$

หมายเหตุ reference คือ ขนมปังขาว

หาค่าดัชนีไกลซีมิก (GI) คำนวณได้จาก (Goñi et al., 1997)

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

1.6 การเตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม

เตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม โดยใช้สูตรและวิธีที่ดัดแปลงจาก Zheng et al. (2015) ดังตารางที่ 3-1 โดยนำแป้งกล้วยดิบ (46.0%) ผสมกับกัวร์กัม (2.5%) และแซนแทนกัม (2.5%) ร่อนผ่านตะแกรง แล้วนำไปผสมให้เข้ากัน ประมาณ 3 นาที ในเครื่องผสม (kitchen aid) เติมไข่ขาวผง (6.0%) และเติมน้ำ (43.0%) ลงไป ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสม โดยใช้หัวผสมแบบตะขอ ที่ความเร็วระดับปานกลางจนเข้ากัน ใช้เวลาประมาณ 30 นาที จากนั้นพักโดประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วนำโดไปรีดผ่านเครื่องรีดแป้ง จนมีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร จากนั้นตัดเส้นด้วยเครื่องรีดแป้งให้มีความกว้างประมาณ 0.6 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง บรรจุพาสต้าในถุงพลาสติกโพลีเอทิลีนและปิดผนึกให้สนิทเพื่อรอการวิเคราะห์คุณภาพต่อไป

ตารางที่ 3-1 ส่วนผสมในการเตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม

ส่วนผสม	ส่วนผสม (% w/w)	หน่วยกรัม (g)
แป้งกล้วยดิบ	46.0	200
กัวร์กัม	2.5	10.87
แซนแทนกัม	2.5	10.87
ไข่ขาวผง	6.0	26.09
น้ำ	43.0	186.96

ที่มา: ดัดแปลงจาก Zheng et al. (2015)

1.7 การวิเคราะห์คุณภาพของพาสต้าแป้งกล้วยดิบหลังการต้ม

วิเคราะห์คุณภาพพาสต้าของพาสต้าแป้งกล้วยดิบหลังการต้ม ตามวิธี American Association of Cereal Chemist. (AACC) (2000) โดยหักเส้นพาสต้าให้มีความยาว 5 เซนติเมตร ก่อนนำไปวิเคราะห์

1.7.1 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการต้มพาสต้าแป้งกล้วยดิบให้สุก (cooking time)

ชั่งเส้นพาสต้า (ความยาวเส้น 5 เซนติเมตร) 5 กรัม ต้มในน้ำเดือด 200 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ที่มีกระจกนาฬิกาปิด จับเวลาที่ใช้ในการต้มที่ทำให้พาสต้าสุก โดยตรวจสอบตัวอย่างทุก ๆ 30 วินาที โดยการใช้กระจกสไลด์ 2 แผ่นกดเส้นพาสต้า สังเกตจุดตรงกลางของเส้นพาสต้าไม่ให้มีส่วนทึบแข็งเหลืออยู่

1.7.2 ปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loss)

ชั่งเส้นพาสต้า (ความยาวเส้น 5 เซนติเมตร) 5 กรัม ต้มในน้ำเดือด 200 มิลลิลิตร โดยใช้เวลาในการต้มที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองที่ 1.7.1 นำน้ำที่เหลือหลังจากการต้มพาสต้าใส่ในบีกเกอร์ (ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน) นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักบีกเกอร์หลังการอบ แล้วคำนวณหาปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม

$$\text{ร้อยละปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม} = \frac{(\text{น้ำหนักบีกเกอร์หลังการอบ} - \text{น้ำหนักบีกเกอร์เปล่า})}{\text{น้ำหนักพาสต้าก่อนต้ม}} \times 100$$

1.7.3 น้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (cooking yield)

ชั่งเส้นพาสต้า (ความยาวเส้น 5 เซนติเมตร) 5 กรัม ต้มในน้ำเดือด 200 มิลลิลิตร โดยใช้เวลาในการต้มที่เหมาะสมเท่ากับที่หาได้จากการทดลองที่ 1.7.1 จากนั้นทิ้งให้สะเด็ดน้ำประมาณ 1 นาที แล้ววางบนตะแกรง และซับความชื้นส่วนเกินด้วยกระดาษแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

$$\text{ร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังการต้ม} = \frac{\text{น้ำหนักพาสต้าสุก}}{\text{น้ำหนักพาสต้าก่อนต้ม}} \times 100$$

1.8 การวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิก

วิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม โดยนำพาสต้ามาต้มตามเวลาที่เหมาะสมที่วิเคราะห์ได้ในข้อ 1.7.1 แล้วนำมากดผ่านตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร แล้วนำส่วนที่ผ่านตะแกรงไปวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิกตามวิธีในข้อที่ 1.5

1.9 การประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส

นำพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม มาประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส เตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ใช้ในการทดสอบโดยใช้เวลาในการต้มพาสต้าแป้งกล้วยดิบให้สุกตามเวลาที่หาได้จากการทดลองในข้อ 1.7.1 แล้วนำมาประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบโดยรวม ใช้วิธีการให้คะแนนตามลำดับความชอบแบบ 9 ระดับ (9-point hedinic scale) โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน แบบประเมินตามภาคผนวก ค

1.10 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ CRD (completely randomized design) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey's multiple comparison test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สำหรับการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสวางแผนการทดลองแบบ RCBD (randomized complete block design) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey's multiple comparison test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม Minitab®18

1.11 การพิจารณาคัดเลือกชนิดของแป้งกล้วยที่เหมาะสม

คัดเลือกชนิดของแป้งกล้วยดิบ (สายพันธุ์ แป้งจากเนื้อกล้วย และแป้งจากกล้วยทั้งผล) ที่ทำให้ได้พาสต้าที่มีค่า GI ต่ำที่สุด พิจารณาร่วมกับคุณลักษณะอื่น ๆ ของพาสต้า และการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของพาสต้าด้วย

ตอนที่ 2 ศึกษาชนิดและปริมาณของโปรตีน ต่อลักษณะทางกระแสวิทยาของโด คุณลักษณะของพาสต้า โครงสร้างทางจุลภาค และค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

2.1 การเตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

เตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ได้จากการคัดเลือกในตอนที่ 1 มาแปรชนิดของโปรตีน 3 ชนิด ได้แก่ ไข่ขาวผง (E) เวย์โปรตีน (W) และโปรตีนถั่วเหลือง (S) และแปรปริมาณของโปรตีนดังสูตรในตารางที่ 3-2 โดยใช้วิธีเตรียมเช่นเดียวกับข้อ 1.6 และจากขั้นตอนการเตรียม พบว่า โดของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่เติมโปรตีนถั่วเหลือง สูตร S2 และ S3 ไม่สามารถขึ้นโดได้ เนื่องจากโดมีความแห้งเกินไป จนส่วนผสมไม่สามารถเกาะกันเป็นโดได้ จึงเติมน้ำเพิ่มลงไป 4.81% ของแป้งกล้วยดิบ จึงสามารถขึ้นเป็นโดและรีดเป็นเส้นพาสต้าได้

ตารางที่ 3-2 ส่วนผสมในการเตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีส่วนผสมของชนิดโปรตีนและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน

สูตร	แป้งกล้วยดิบ (กรัม)	% ของแป้งกล้วยดิบ					
		กัวร์กัม	แซนแทนกัม	E	W	S	น้ำ
E1	200	5.44	5.44	4.35	-	-	93.48
E2	200	5.44	5.44	8.70	-	-	93.48
E3	200	5.44	5.44	13.05	-	-	93.48
W1	200	5.44	5.44	-	4.35	-	93.48
W2	200	5.44	5.44	-	8.70	-	93.48
W3	200	5.44	5.44	-	13.05	-	93.48
S1	200	5.44	5.44	-	-	4.35	93.48
S2	200	5.44	5.44	-	-	8.70	98.29
S3	200	5.44	5.44	-	-	13.05	98.29

E คือ ไข่ขาวผง W คือ เวย์โปรตีน S คือ โปรตีนถั่วเหลือง

2.2 การประเมินลักษณะทางการไหลของโด

ประเมินลักษณะทางการไหลของโดแป้งกล้วยดิบที่มีชนิดและปริมาณโปรตีนแตกต่างกัน ด้วยวิธี frequency sweep test โดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์ ที่ความถี่ 0.1 ถึง 100 rad/s ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แสดงผลในรูปของค่า storage modulus (G') loss modulus (G") และ Tan (deltas) ตามวิธีของ Romero, Santra, Rose, & Zhang (2017) ดังรายละเอียดในภาคผนวก ข-1

2.3 การวิเคราะห์คุณภาพของพาสต้าแป้งกล้วยดิบหลังการต้ม

วิเคราะห์คุณภาพหลังการต้มของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีชนิดและปริมาณโปรตีนแตกต่างกัน ตามวิธี American Association of Cereal Chemist. (AACC) (2000) โดยวิเคราะห์หาเวลาที่เหมาะสมในการต้มพาสต้าให้สุก (cooking time) ปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loss) และน้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (cooking yield) ตามวิธีในข้อ 1.7

2.4 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส

วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีชนิดและปริมาณโปรตีนแตกต่างกันที่ต้มสุกแล้ว โดยใช้เวลาในการต้มที่เหมาะสมเท่ากับที่หาได้จากการทดลองในข้อที่ 2.3 แล้วนำไปวัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส Texture Analyzer (TA-XT2) วัดค่าความแข็ง (hardness) และค่าการยึดเกาะที่ผิวหน้า (adhesiveness) ของพาสต้าที่ต้มสุกแล้วโดยใช้หัววัด P/35 ตามวิธีในภาคผนวก ข-2

2.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล (confocal microscope)

ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีชนิดและปริมาณโปรตีนแตกต่างกัน (เส้นแห้ง) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล ดัดแปลงวิธีจาก Zheng et al. (2015) ใช้เทคนิคการย้อม 2 ครั้ง ด้วย Fluorescein isothiocyanate isomer I, FITC (ละลาย FITC ในอะซิโตนให้ได้ความเข้มข้น 0.001% w/v) และ Rhodamine B isothiocyanate, RITC (ละลาย RITC ในเมทานอลให้ได้ความเข้มข้น 0.001% w/v) โดย FITC จะเป็นการย้อมเม็ดสตาร์ช แสดงผลเป็นสีเขียว ตอบสนองที่ความยาวคลื่น 561 นาโนเมตร และ RITC จะเป็นการย้อมโปรตีน แสดงผลเป็นสีแดง ตอบสนองที่ความยาวคลื่น 488 นาโนเมตร

<u>วิธีเตรียมตัวอย่าง</u>

ตัดตัวอย่างขนาด 5×5 เซนติเมตร วางบนกระจกสไลด์ หยดสีย้อม FITC (ย้อมเม็ดสตาร์ช) ลงไปก่อน ทิ้งไว้ 1 นาที หลังจากนั้นจึงหยดสีย้อม RITC (ย้อมโปรตีน) ตามลงไป ทิ้งไว้ 1 นาที จากนั้นใช้กระจกปิดสไลด์ปิดทับบนตัวอย่าง แล้วนำแผ่นสไลด์ไปสังเกตดูโครงสร้างภายในโดยใช้เลนส์วัตถุ (objective lens) ที่กำลังขยาย 40 เท่า

<u>วิธีวิเคราะห์</u>

เปิดเลเซอร์ที่ 488 และ 561 นาโนเมตร ดูภาพตัวอย่างที่เลนส์ตา ปรับโฟกัสภาพตัวอย่างให้ชัดเจนโดยใช้ปุ่มปรับภาพที่กล้องจุลทรรศน์ เลือกความละเอียดในการปรับภาพเป็นแบบหยาบหรือแบบละเอียด จากนั้นใช้โหมดคอนโฟคอล ปรับรูรับแสง (pinhole) เพื่อเลือกเฉพาะแสงจากระนาบโฟกัสของตัวอย่าง แสดงภาพตัวอย่างในโหมดคอนโฟคอลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

2.6 การวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิก

วิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีชนิดและปริมาณโปรตีนแตกต่างกัน โดยนำพาสต้ามาต้มตามเวลาที่เหมาะสมที่วิเคราะห์ได้ในข้อ 2.3 แล้วนำมากดผ่านตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร แล้วนำส่วนที่ผ่านตะแกรงไปวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิกตามวิธีในข้อที่ 1.5

2.7 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ CRD (completely randomized design) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey's multiple comparison test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม Minitab®18

2.8 การพิจารณาคัดเลือกชนิดและปริมาณของโปรตีนที่เหมาะสม

คัดเลือกชนิดและปริมาณของโปรตีนที่เหมาะสม โดยคัดเลือกชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ทำให้ได้พาสต้าที่มีค่า GI ต่ำที่สุด และพิจารณาร่วมกับคุณลักษณะอื่น ๆ ของพาสต้าด้วย

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ต่อลักษณะทางกระแสวิทยาของโด รูปแบบของโปรตีน ปริมาณหมู่อะมิโนอิสระ คุณลักษณะของพาสต้า โครงสร้างทางจุลภาค ค่าดัชนีไกลซีมิก องค์ประกอบทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

3.1 การเตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

เตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ได้จากการคัดเลือกในตอนที่ 2 โดยมาแปรปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 4 ระดับ ดังสูตรในตารางที่ 3-3 โดยใช้วิธีเตรียมเช่นเดียวกับข้อ 1.6

ตารางที่ 3-3 ส่วนผสมในการเตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีส่วนผสมของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในปริมาณแตกต่างกัน

สูตร	แป้งกล้วยดิบ (กรัม)	% ของแป้งกล้วยดิบ				
		กัวร์กัม	แซนแทนกัม	S	TG	น้ำ
TG0	200	5.44	5.44	8.70	0.00	98.29
TG1	200	5.44	5.44	8.70	2.18	98.29
TG2	200	5.44	5.44	8.70	4.35	98.29
TG3	200	5.44	5.44	8.70	6.52	98.29

S คือ โปรตีนถั่วเหลือง TG คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส

3.2 การประเมินลักษณะทางการไหลของโด

ประเมินลักษณะทางการไหลของโดแป้งกล้วยดิบที่มีปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน ด้วยวิธี frequency sweep test โดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์ ตามวิธีในข้อ 2.2

3.3 การวิเคราะห์รูปแบบของโปรตีนด้วยวิธี sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE)

วิเคราะห์รูปแบบของโปรตีนด้วยวิธี SDS-PAGE เพื่อศึกษาน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนจากเส้นพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกันหลังการอบแห้ง ซึ่งใช้วิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธีของ Y. Kim, Kee, Lee, & Yoo (2014) โดยนำตัวอย่างมาสกัดและนำไปแยกโปรตีนด้วยวิธีทางไฟฟ้าโดยใช้ SDS- PAGE เทียบกับโปรตีนมาตรฐาน (protein marker) ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 16-250 กิโลดาลตัน ตามวิธีในภาคผนวก ก-2

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณของหมู่อะมิโนอิสระ (free amino group)

วิเคราะห์ปริมาณของหมู่อะมิโนอิสระ เพื่อศึกษาการเชื่อมข้ามของกรดอะมิโนในเส้นพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกันหลังการอบแห้ง ดัดแปลงมาจากวิธีของ Huang et al. (2010) ตามวิธีในภาคผนวก ก-3

3.5 การวิเคราะห์คุณภาพของพาสต้าแป้งกล้วยดิบหลังการต้ม

วิเคราะห์คุณภาพหลังการต้มของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน ตามวิธี American Association of Cereal Chemist. (AACC) (2000) โดยวิเคราะห์หาเวลาที่เหมาะสมในการต้มพาสต้าให้สุก (cooking time) ปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loss) และน้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (cooking yield) ตามวิธีในข้อ 1.7

3.6 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส

นำพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกันที่ผ่านการต้มสุก มาวิเคราะห์แล้ววัดค่าความแข็ง (hardness) และค่าการยึดเกาะที่ผิวหน้า (adhesiveness) ตามวิธีในข้อ 2.4

3.7 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล (confocal microscope)

ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกันหลังต้มสุกแล้ว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล ตามวิธีในข้อ 2.5

3.8 การวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิก

วิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน โดยนำพาสต้ามาต้มตามเวลาที่เหมาะสมที่วิเคราะห์ได้ในข้อ 3.5 แล้วนำมากด

ผ่านตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร แล้วนำส่วนที่ผ่านตะแกรงไปวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิกตามวิธีในข้อที่ 1.5

3.9 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

นำพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกันมาประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส เตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ใช้ในการทดสอบโดยใช้เวลาในการต้มพาสต้าแป้งกล้วยดิบให้สุกตามเวลาที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.5 จากนั้นทำตามวิธีในข้อที่ 1.9

3.10 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

คัดเลือกพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ที่ทำให้ได้พาสต้าที่มีค่า GI ต่ำที่สุด พิจารณาร่วมกับคุณลักษณะอื่น ๆ ของพาสต้า และการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของพาสต้า แล้วนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยวิธี AOAC (2016) ดังนี้

3.9.1 ปริมาณความชื้น ตามวิธีในภาคผนวก ก-4

3.9.2 ปริมาณโปรตีน ตามวิธีในภาคผนวก ก-5

3.9.3 ปริมาณไขมัน ตามวิธีในภาคผนวก ก-6

3.9.4 ปริมาณเถ้า ตามวิธีในภาคผนวก ก-7

3.9.5 ปริมาณเส้นใยหยาบ ตามวิธีในภาคผนวก ก-8

3.11 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

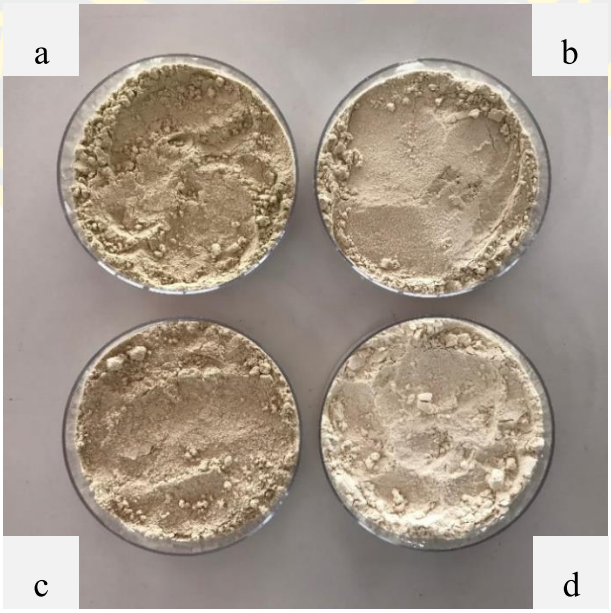
วางแผนการทดลองแบบ CRD (completely randomized design) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey's multiple comparison test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สำหรับการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสวางแผนการทดลองแบบ RCBD (randomized complete block design) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey's multiple comparison test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม Minitab®18

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลของแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม ต่อสมบัติทางกายภาพ และค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้ง คุณลักษณะของพาสต้า และค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

4.1.1 ผลการเตรียมแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม

แป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ประกอบด้วย แป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล (HW) แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม (HP) แป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล (NW) และแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NP) มีลักษณะเป็นผงละเอียด มีสีที่แตกต่างกันตั้งแต่สีขาวนวลไปจนถึงสีน้ำตาลอ่อน ดังภาพที่ 4-1 ทั้งนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม (HP) มีสีออกเหลือง ส่วนแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NP) มีสีขาวนวล และแป้งกล้วยดิบที่เตรียมจากกล้วยทั้งผล (HW และ NW) จะมีสีเข้มขึ้น ซึ่งสีที่เข้มขึ้นนั้นมาจากส่วนที่เป็นเปลือก อาจกล่าวได้ว่าสีของแป้งกล้วยดิบที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และการเตรียมแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและจากกล้วยทั้งผล



ภาพที่ 4-1 แสดงลักษณะและสีของแป้งกล้วยดิบ

(a) แป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล (HW)

(b) แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม (HP)

(c) แป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล (NW)

(d) แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NP)

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าสี

จากการวิเคราะห์ค่าสีของแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด พบว่า สายพันธุ์ของกล้วยและชนิดของแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและจากกล้วยทั้งผล มีผลให้ค่าสี L* a* และ b* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ดังตารางที่ 4-1 โดยอาจเกิดจากปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำแห้งและรงควัตถุในกล้วยแต่ละสายพันธุ์ที่แตกต่างกัน (วิจิตรา เหลียวตระกูล, วชิรญา เหลียวตระกูล, และวรรภา วงศ์แสงธรรม, 2563) และจากตารางแสดงให้เห็นว่าชนิดของแป้งกล้วยดิบมีผลต่อค่าความสว่าง (L*) โดยแป้งกล้วยดิบรวมเปลือก (HW และ NW) มีค่าน้อยกว่าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วย (HP และ NP) ซึ่งอาจเกิดจากในเปลือกกล้วยมีเอนไซม์บางชนิดที่ทำให้เกิดสีน้ำตาล (browning enzyme) เช่น โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase, PPO) และการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) โดยจะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง (Yangılar, 2015) จึงทำให้องค์ประกอบในเปลือกกล้วยมีสีน้ำตาลเข้ม (กนกกานต์ วีระกุล, จิราภรณ์ สอดจิตร์, และเหรียญทอง สิงห์จานุสงค์, 2558) จากผลการทดลอง พบว่า แป้งกล้วยดิบรวมเปลือก (HW และ NW) มีค่า a* และ b* สูงกว่าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วย (HP และ NP) ทั้งนี้อาจเนื่องจากในเปลือกกล้วยมีคลอโรฟิลล์ จึงไปทำให้แป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผลมีสีคล้ำหรือมีสีน้ำตาลเพิ่มขึ้น ในส่วนของสายพันธุ์กล้วย พบว่า แป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้า (NW และ NP) มีสีที่สว่างกว่าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอม (HW และ HP) อาจเนื่องจากในกล้วยหอมมีรงควัตถุที่เป็นแคโรทีนอยด์ (Pereira & Maraschin, 2015) มากกว่า จึงทำให้มีสีน้ำตาลเข้มกว่าแป้งกล้วยน้ำว้า

ตารางที่ 4-1 ค่าสี L* a* และ b* ของแป้งกล้วยดิบ

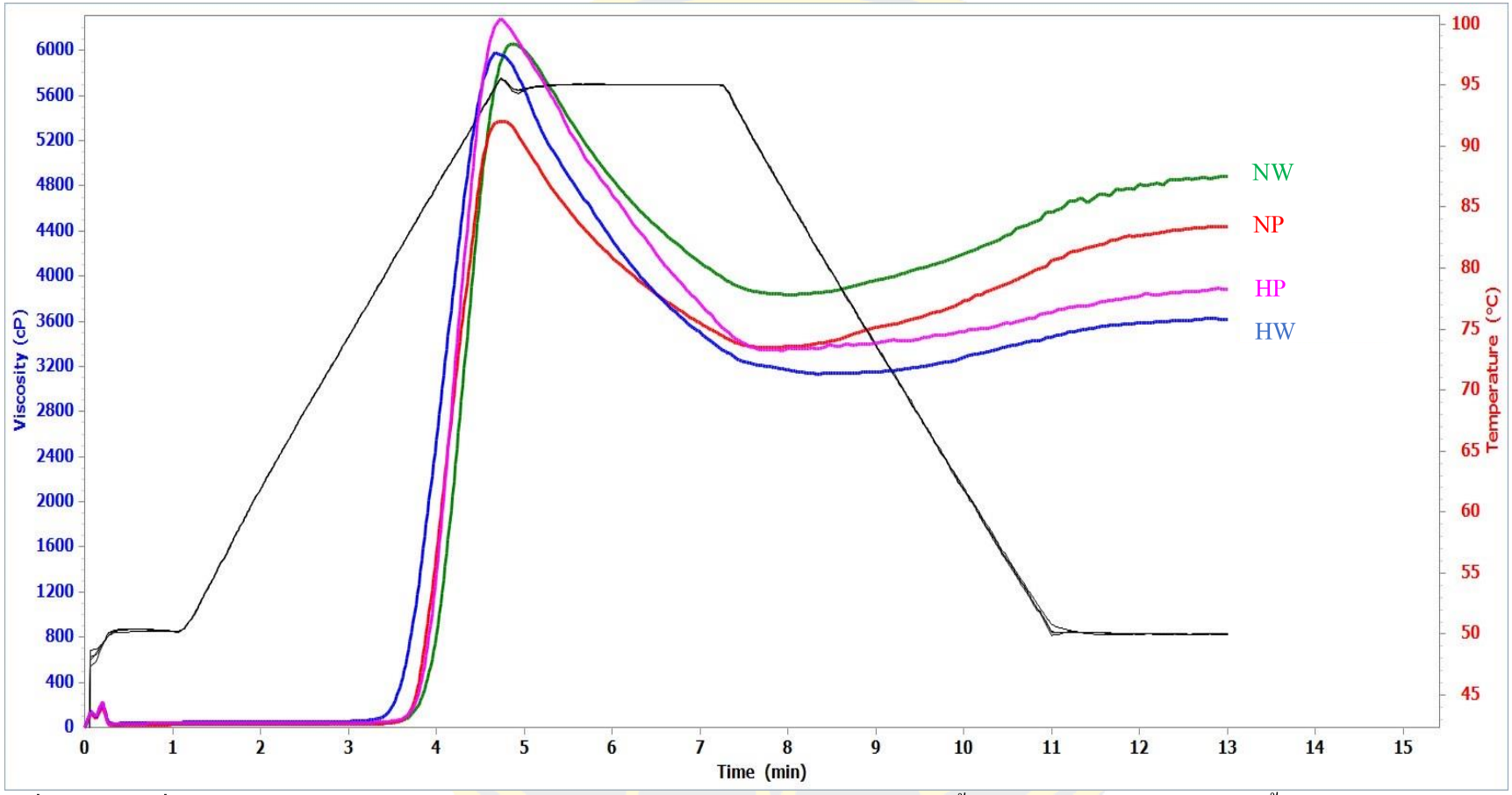
ชนิดของแป้งกล้วยดิบ	L*	a*	b*
HW	76.22 ± 0.04^{d}	1.62 ± 0.02^{b}	15.86 ± 0.01^{a}
HP	80.87 ± 0.06^{b}	1.36 ± 0.01^{c}	12.51 ± 0.02^{c}
NW	76.61 ± 0.07^{c}	2.28 ± 0.02^{a}	14.03 ± 0.04^{b}
NP	87.31 ± 0.03^{a}	0.59 ± 0.03^{d}	12.02 ± 0.03^{d}

$^{a,b,\cdots}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

HW คือ แป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล HP คือ แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม NW คือ แป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล NP คือ แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า

4.1.3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงด้านความหนืด

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง rapid visco analyser ดังภาพที่ 4-2 พบว่า แป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มีอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) ใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 80.07-83.45 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4-2) และจะเห็นได้ว่าสายพันธุ์ของกล้วยมีผลต่ออุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด โดยแป้งกล้วยหอมดิบ (HW และ HP) ต่ำกว่าแป้งกล้วยน้ำว้าดิบ (NW และ NP) อาจเกิดจากแป้งกล้วยหอมดิบสามารถดูดน้ำและเกิดความหนืดในระหว่างการให้ความร้อนได้มากกว่า จึงเกิดความหนืดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า



ภาพที่ 4-2 การเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยดิบ (HW คือ แป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล HP คือ แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม NW คือ แป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล NP คือ แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า)

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ที่แสดงถึงความสามารถในการจับตัวกันของสตาร์ชกับน้ำ เกิดการพองตัวของสตาร์ชในระหว่างการให้ความร้อน พบว่า แป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มีค่าความหนืดสูงสุดอยู่ที่ 5409.67-6220.33 cP ซึ่งเป็นค่าความหนืดสูงสุดที่สูงเมื่อเทียบกับแป้งสาลี ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักของพาสต้าโดยทั่วไป โดยแป้งสาลีจะมีค่าความหนืดสูงสุดอยู่ที่ 2594.51 cP (216.21 RVU) (พรรณทิพา เจริญไทยกิจ, 2555) ทั้งนี้เม็ดสตาร์ชแป้งสาลีมีกำลังการพองตัวอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอะไมโลสและไขมัน (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ในขณะที่สตาร์ชจากแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด สามารถรวมตัวกับน้ำได้ดี และเมื่อได้รับความร้อนจะมีกำลังการพองตัวสูง (เพ็ญจันทร์ สุทธานุกุล, 2558a) เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป เม็ดสตาร์ชจะพองตัวเพิ่มขึ้นและถึงจุดที่แตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาจากเม็ดสตาร์ช จึงทำให้ความหนืดลดลง และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติที่สามารถอุ้มน้ำได้ แต่จะไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก ความหนืดจึงคงตัวเกิดเป็นเจลเหนียว โดยจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว (setback) (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ซึ่งสายพันธุ์ของกล้วยมีผลต่อค่า setback from peak, setback from trough และค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) โดยแป้งกล้วยน้ำว้า (NW และ NP) มีค่าสูงกว่าแป้งกล้วยหอม (HW และ HP) ค่าความหนืดสุดท้ายจะสัมพันธ์กับปริมาณของอะไมโลส ทั้งนี้มีรายงานว่าแป้งกล้วยน้ำว้ามีปริมาณอะไมโลสเท่ากับ 32.05% ซึ่งสูงกว่าแป้งกล้วยหอมที่มีปริมาณอะไมโลสอยู่ที่ 26.10% (Bi et al., 2017) โดยแป้งกล้วยที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิด retrogradation ได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

ตารางที่ 4-2 การเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยดิบ

Parameters	HW	HP	NW	NP
Peak viscosity	6044.33 ± 206.89[a]	6220.33 ± 54.60[a]	6064.33 ± 32.56[a]	5409.67 ± 193.24[b]
Trough	3180.33 ± 55.22[b]	3151.00 ± 162.82[b]	3852.00 ± 75.29[a]	3333.00 ± 140.50[b]
Breakdown	2864.00 ± 162.75[a]	3069.33 ± 108.77[a]	2212.33 ± 43.15[b]	2076.67 ± 84.95[b]
Final viscosity	3655.00 ± 64.97[c]	3819.67 ± 59.16[c]	4912.67 ± 71.01[a]	4380.00 ± 114.53[b]
Setback from peak	474.67 ± 22.28[c]	668.67 ± 104.89[b]	1060.67 ± 16.01[a]	1047.00 ± 39.84[b]
Setback from trough	-2389.33 ± 144.25[b]	-2400.67 ± 16.50[b]	-1151.67 ± 41.65[a]	-1029.67 ± 122.91[a]
Peak time (min)	4.71 ± 0.08[b]	4.69 ± 0.03[b]	4.91 ± 0.08[a]	4.71 ± 0.03[a]
Pasting temperature (^{o}C)	80.07 ± 0.80[b]	81.47 ± 0.98[ab]	83.45 ± 0.85[a]	82.27 ± 0.53[a]

[a,b,...] หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

HW คือ แป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล HP คือ แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม NW คือ แป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล NP คือ แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า

4.1.4 ผลการวิเคราะห์ดัชนีการละลายน้ำและดัชนีการดูดซับน้ำ

จากผลการวิเคราะห์ดัชนีการละลายน้ำ ดังตารางที่ 4-3 พบว่า ชนิดของแป้งกล้วยดิบมีผลต่อดัชนีการละลายน้ำ โดยแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล (HW) มีดัชนีการละลายน้ำสูงกว่าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม (HP) อาจเกิดจากในเปลือกกล้วยหอมอาจมีองค์ประกอบที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น เพคติน และน้ำตาล มากกว่าส่วนเนื้อ แต่ในทางตรงข้าม พบว่า แป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล (NW) มีดัชนีการละลายน้ำต่ำกว่าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NP) อาจเนื่องจากเนื้อกล้วยน้ำว้ามีส่วนที่ละลายน้ำมากกว่าส่วนเปลือกกล้วย จึงทำให้มีดัชนีการละลายน้ำที่สูงกว่า นอกจากนี้สายพันธุ์ของกล้วยก็มีผลต่อดัชนีการละลายน้ำ โดยแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล (HW) มีดัชนีการละลายน้ำสูงกว่าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล (NW) อาจเนื่องจากในเปลือกกล้วยหอมมีองค์ประกอบที่ละลายน้ำได้ เช่น เพคติน ทั้งนี้มีรายงานว่าในเปลือกกล้วยหอมมีเพคติน 17.31 ± 0.07 ซึ่งมากกว่าเปลือกกล้วยน้ำว้าที่มีเพคติน 15.89 ± 0.02 (Khamsucharit, Laohaphatanalert, Gavinlertvatana, Sriroth, & Sangseethong, 2018) ในส่วนของดัชนีการดูดซับน้ำ พบว่า ชนิดของแป้งมีผลต่อดัชนีการดูดซับน้ำ โดยแป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผล (HW และ NW) ดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วย (HP และ NP) อาจเนื่องจากส่วนของเปลือกมีองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น เพคติน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่ความสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าสตาร์ช (Alkarkhi, Ramli, Yong, & Easa, 2011) และอาจเกิดจากแป้งกล้วยดิบรวมเปลือกมีปริมาณใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วย ยกตัวอย่าง HW มีอัตราส่วนของใยอาหารที่ละลายน้ำได้กับใยอาหารที่ไม่ละลายในน้ำเท่ากับ 1:6 ในขณะที่ HP อัตราส่วนของใยอาหารที่ละลายน้ำได้กับใยอาหารที่ไม่ละลายในน้ำเท่ากับ 1:5 (Bezerra et al., 2013) จึงทำให้แป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผลมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีกว่า และจากตารางจะเห็นได้ว่าสายพันธุ์ของกล้วยที่แตกต่างกันก็มีผลต่อดัชนีการดูดซับน้ำเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4-3 ดัชนีการละลายน้ำและดัชนีการดูดซับน้ำของแป้งกล้วยดิบ

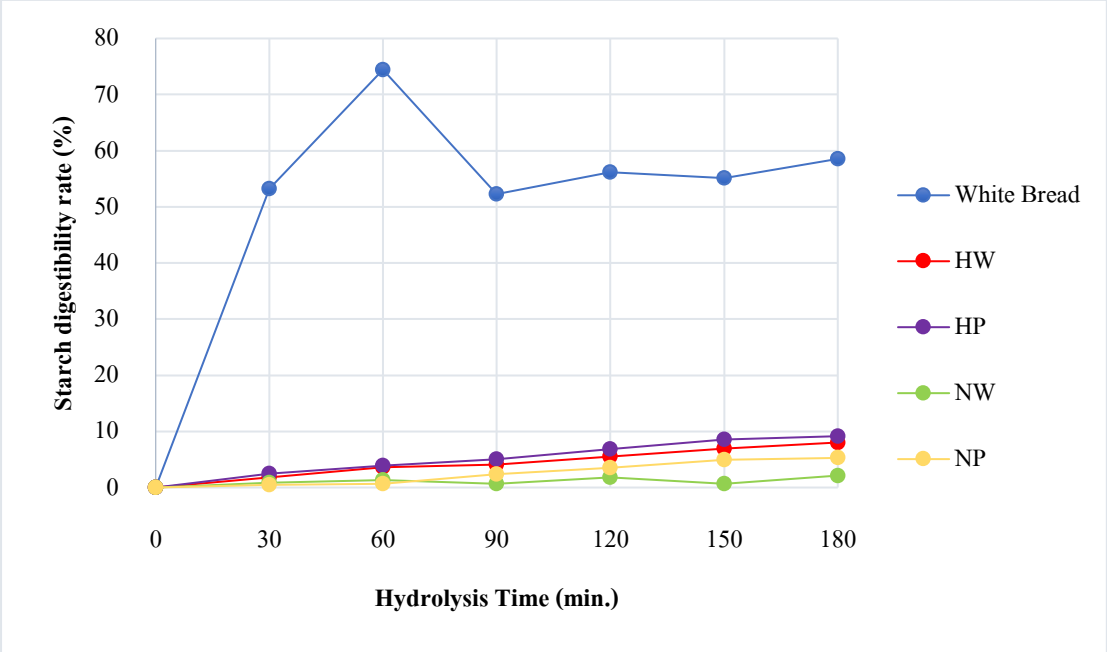
ชนิดของแป้งกล้วยดิบ	ดัชนีการละลายน้ำ (g/g)	ดัชนีการดูดซับน้ำ (g/g)
HW	9.24 ± 0.10^{b}	3.22 ± 0.02^{a}
HP	8.45 ± 0.09^{c}	2.83 ± 0.01^{bc}
NW	7.32 ± 0.17^{d}	3.00 ± 0.08^{b}
NP	9.97 ± 0.11^{a}	2.79 ± 0.11^{c}

$^{a,b,\cdots}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

HW คือ แป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล HP คือ แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม NW คือ แป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล NP คือ แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า

4.1.5 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้ง

จากกราฟอัตราการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลอง (ภาพที่ 4-3) พบว่า ความสามารถในการถูกย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลองของแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มีค่าต่ำกว่าขนมปังขาว (ตัวอย่างอ้างอิง) เนื่องจากแป้งกล้วยดิบประกอบด้วย RS2 โดย RS2 เป็นสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกหนาแน่นและเป็นระเบียบ จึงทำให้ยากต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Khoozani et al., 2019) และจากกราฟแสดงให้เห็นว่าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้า (NW และ NP) มีอัตราการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลองต่ำกว่าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอม (HW และ HP) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nednapis Vatanasuchart et al. (2012) ที่รายงานเกี่ยวกับความสามารถในการย่อยของสตาร์ชของเอนไซม์จากกล้วยสายพันธุ์ต่าง ๆ โดยจากงานวิจัย รายงานว่า แป้งกล้วย (flour) จากกล้วยน้ำว้า มีความสามารถในการย่อยได้ต่ำกว่าแป้งกล้วยจากกล้วยหอมในช่วง 30-180 นาทีของการย่อย



ภาพที่ 4-3 อัตราการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลองของแป้งกล้วยดิบชนิดต่าง ๆ (HW คือ แป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล HP คือ แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม NW คือ แป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล NP คือ แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า) เปรียบเทียบกับขนมปังขาว (ตัวอย่างอ้างอิง)

จากผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิก (GI) ของแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ดังตารางที่ 4-4 พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) จะเห็นได้ว่าชนิดของแป้งกล้วยดิบมีผลต่อค่า GI โดยแป้งกล้วยดิบรวมเปลือก (HW และ NW) มีค่า GI และมีอัตราการย่อยของสตาร์ชต่ำกว่าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วย (HP และ NP) ซึ่งอาจเกิดจากแป้งกล้วยดิบรวมเปลือก (HW และ NW) มีส่วนของเปลือกกล้วย ซึ่งเปลือกกล้วยมีเส้นใยอาหารหรือโพลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (non-starch polysaccharides, NPS) เช่น เพคติน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ทำให้เกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนระหว่างสตาร์ชและ NPS จึงสามารถต้านทานและจำกัดการเข้าถึงของเอนไซม์ที่ย่อยแป้งได้ (Bi et al., 2017; Nednapis Vatanasuchart et al., 2012) นอกจากนี้ยัง พบว่า สายพันธุ์ของกล้วยก็มีผลต่อค่า GI โดยแป้งจากกล้วยน้ำว้าดิบ (NW และ NP) มีค่า GI และอัตราการย่อยของสตาร์ชต่ำกว่าแป้งจากกล้วยหอมดิบ (HW และ HP) สังเกตจากแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยที่สายพันธุ์แตกต่างกัน พบว่า แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NP) มีค่า GI ต่ำกว่าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอม (HP) ซึ่งอาจขึ้นอยู่กับปริมาณอะไมโลสของกล้วยน้ำว้าดิบ (24.11 ± 0.36) มากกว่ากล้วยหอมดิบ (17.65 ± 0.54) (Moongngarm, 2013) ทั้งนี้ค่าGI ที่วิเคราะห์ได้สอดคล้องกับรายงานของ Kamchansuppasin et al. (2021) ที่รายงานเกี่ยวกับค่า GI ของผลไม้ไทย โดยจากงานวิจัย พบว่า กล้วยน้ำว้ามีค่า GI 30.5 ± 2.7 ซึ่งต่ำกว่ากล้วยหอม ที่มีค่า GI 57.0 ± 7.2

ตารางที่ 4-4 ค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้งกล้วยดิบ

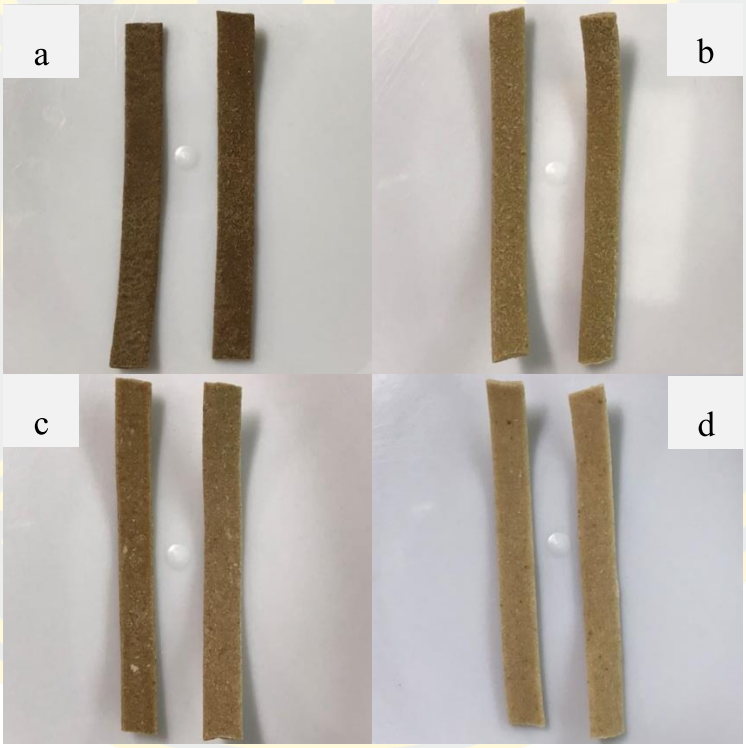
ชนิดของแป้งกล้วยดิบ	ค่าดัชนีไกลซีมิก
HW	44.27 ± 0.28^{b}
HP	45.22 ± 0.06^{a}
NW	40.46 ± 0.18^{d}
NP	42.37 ± 0.20^{c}

$^{a,b,\cdots}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

HW คือ แป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล HP คือ แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม NW คือ แป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล NP คือ แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า

4.1.6 ผลการเตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม

เส้นพาสต้าที่เตรียมจากแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม มีสีที่แตกต่างกันออกไป แสดงดังภาพที่ 4-4 แต่มีความเรียบของเส้นที่ใกล้เคียงกัน โดยเส้นพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล (HWP) และพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล (NWP) มีสีน้ำตาลเข้มกว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม (HPP) และพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NPP) ซึ่ง HWP มีสีน้ำตาลเข้มมากที่สุด และ NPP มีสีอ่อนที่สุด ซึ่งสีของพาสต้าจากแป้งกล้วยดิบสอดคล้องกับสีของแป้งกล้วยดิบ (ภาพที่ 4-1)



ภาพที่ 4-4 ลักษณะของเส้นพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

(a) พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล (HWP)

(b) พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม (HPP)

(c) พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล (NWP)

(d) พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NPP)

4.1.7 ผลการวิเคราะห์คุณภาพของพาสต้าแป้งกล้วยดิบหลังการต้ม

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพของเส้นพาสต้าแป้งกล้วยดิบหลังการต้ม พบว่า พาสต้าแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มีเวลาที่เหมาะสมในการต้มเส้นพาสต้าแป้งกล้วยดิบให้สุก (cooking time) แตกต่างกัน ดังตารางที่ 4-5 แต่จะสังเกตเห็นว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผลของกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ (HWP และ NWP) มีเวลาที่เหมาะสมในการต้มเส้นพาสต้าให้สุกน้อยกว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วย (HPP และ NPP) อาจเนื่องจากเปลือกกล้วยอุดมไปด้วยเส้นใยสูง และเมื่อเส้นใยถูกนำไปต้มก็สามารถดูดน้ำได้มากกว่า จึงทำให้พาสต้าที่มีส่วนประกอบของเปลือกกล้วยสุกเร็วกว่า (Rodríguez-Ambriz, Islas-Hernández, Agama-Acevedo, Tovar, & Bello-Pérez, 2008) แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มีปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loss) และน้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (cooking yield) แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

ตารางที่ 4-5 เวลาที่เหมาะสมในการต้มพาสต้าแป้งกล้วยดิบให้สุก (cooking time) ปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loss) และน้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (cooking yield) ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

ชนิดของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ	Cooking Time (min)	Cooking Loss (%)[ns]	Cooking Yield (%)[ns]
HWP	13.00 ± 0.00	7.92 ± 0.06	314.33 ± 0.66
HPP	14.00 ± 0.00	7.65 ± 0.93	334.50 ± 14.60
NWP	12.30 ± 0.00	7.04 ± 0.13	346.81 ± 3.21
NPP	13.00 ± 0.00	7.71 ± 0.99	337.80 ± 31.60

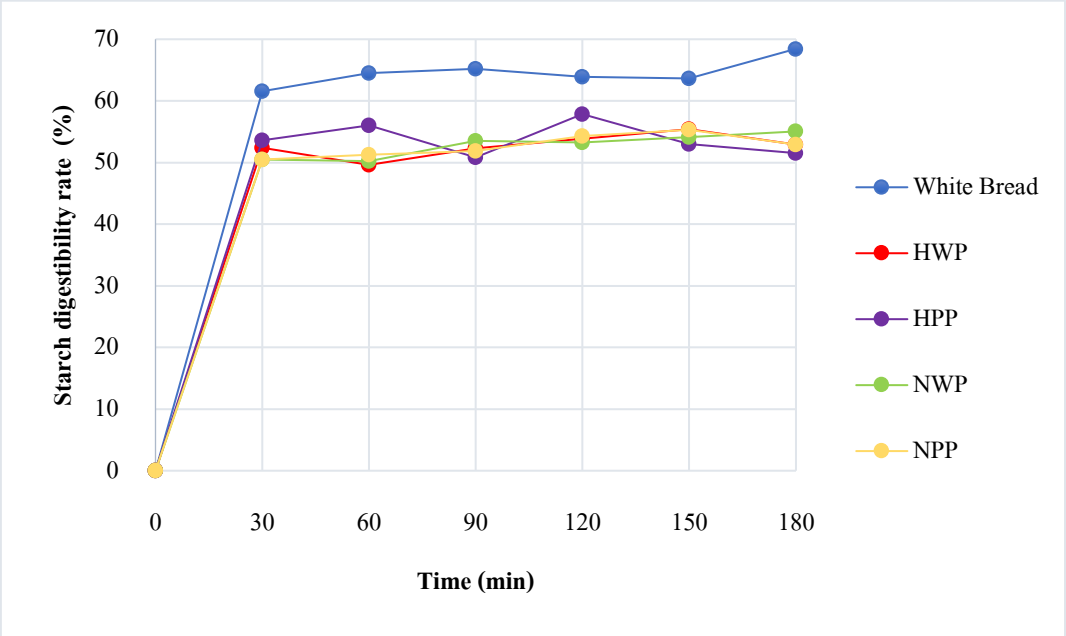
[ns] หมายถึง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

HWP คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล HPP คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม NWP คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล NPP คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า

4.1.8 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้า

จากกราฟอัตราการย่อยสตาร์ชในหลอดทดลองของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ 4 ชนิด ดังภาพที่ 4-5 แสดงให้เห็นว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 กว่าชนิด มีความสามารถในการถูกย่อยต่ำกว่าขนมปังขาว (ตัวอย่างอ้างอิง) เกิดจาก RS2 ในแป้งกล้วยดิบเป็นสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกหนาแน่นและ

เป็นระเบียบ จึงทำให้ยากต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Khoozani et al., 2019) แต่อย่างไรก็ตามจากกราฟจะเห็นได้ว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ก็มีอัตราการย่อยที่ใกล้เคียงกันในช่วง 150-180 นาทีของการย่อย



ภาพที่ 4-5 อัตราการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลองของพาสต้าแป้งกล้วยดิบชนิดต่าง ๆ (HWP คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล HPP คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม NWP คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล NPP คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า) เปรียบเทียบกับขนมปังขาว (ตัวอย่างอ้างอิง)

จากผลการวิเคราะห์ค่า GI ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) โดยมีค่า GI อยู่ที่ 83.81-85.53 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม GI สูง เมื่อเทียบกับค่า GI ของแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ดังตารางที่ 4-6 ที่มีค่า GI ต่ำ (40.46-45.22) อาจกล่าวได้ว่า เมื่อเส้นพาสต้าแป้งกล้วยดิบถูกต้มให้สุก RS2 ที่อยู่ในพาสต้าก็จะถูกเปลี่ยนเป็น RDS และ SDS จึงทำให้ RS2 ที่เหลือลดลง เพราะเมื่อเส้นพาสต้าถูกต้มให้สุก พันธะไฮโดรเจนจะแตกออก เม็ดสตาร์ชก็จะเกิดการพองตัว (swelled) และแตกออก (burst) ทำให้บริเวณที่จับกับเอนไซม์เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้อัตราการย่อยเพิ่มขึ้น (Utrilla-Coello et al., 2014) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bi et al. (2017) ที่รายงานเกี่ยวกับอัตราการย่อยในหลอดทดลองของแป้งกล้วยดิบสายพันธุ์ต่าง ๆ พบว่าแป้งกล้วยดิบแต่ละสายพันธุ์เมื่อถูกนำไปให้ความร้อนหรือทำให้สุก (cooked) อัตราการย่อยในหลอดทดลองจะเพิ่มสูงขึ้น จาก 8-17% เป็น 40-60%

ตารางที่ 4-6 ค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

ชนิดของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ	ค่าดัชนีไกลซีมิก[ns]
HWP	85.40 ± 2.39
HPP	83.81 ± 1.10
NWP	85.53 ± 0.22
NPP	84.10 ± 1.00

[ns] หมายถึง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

HWP คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล HPP คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม NWP คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล NPP คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า

4.1.9 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

จากผลการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบโดยรวมของพาสต้าปราศจากลูเตนจากแป้งกล้วยดิบ ดังตารางที่ 4-7 พบว่า พาสต้าปราศจากกลูเตนจากแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ได้รับคะแนนความชอบทางด้านกลิ่นเนื้อสัมผัส และรสชาติแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) แต่เมื่อพิจารณาคะแนนความชอบต่อคุณลักษณะทางด้านลักษณะปรากฏ สี และความชอบโดยรวม พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NPP) ได้รับคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสทางด้านลักษณะปรากฏ สี และความชอบโดยรวมสูงที่สุด แต่แตกต่างจากพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม (HPP) อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผลของกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ (HWP และ NWP) มีคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสที่ต่ำกว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยของกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ (HPP และ NPP) โดยเฉพาะคุณลักษณะทางด้านสี เนื่องจากพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผล (HWP และ NWP) มีส่วนประกอบของเปลือกกล้วย ทำให้เส้นพาสต้ามีสีน้ำตาลเข้ม อาจทำให้ผู้ทดสอบไม่คุ้นเคย จึงให้คะแนนทางด้านดังกล่าวต่ำ

ตารางที่ 4-7 คะแนนการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

ชนิดของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่น[ns]	เนื้อสัมผัส[ns]	รสชาติ[ns]	ความชอบโดยรวม
HWP	4.83 ± 1.88[c]	4.53 ± 2.00[b]	5.07 ± 1.60	5.37 ± 1.19	5.00 ± 1.34	5.13 ± 1.36[b]
HPP	6.20 ± 1.71[ab]	6.10 ± 1.81[a]	5.50 ± 1.59	5.77 ± 1.55	5.57 ± 1.65	6.10 ± 1.69[a]
NWP	5.50 ± 1.74[bc]	5.07 ± 1.68[b]	5.10 ± 1.54	5.43 ± 1.38	5.37 ± 1.52	5.50 ± 1.57[ab]
NPP	6.47 ± 1.67[a]	6.53 ± 1.59[a]	5.63 ± 1.40	5.63 ± 1.60	5.47 ± 1.65	6.13 ± 1.67[a]

[a,b,…] หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

[ns] หมายถึง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

HWP คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล HPP คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม NWP คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล NPP คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า

พิจารณาเลือกพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่เหมาะสม

ในการพิจารณาเลือกพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่เหมาะสม พิจารณาโดยเลือกพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีค่า GI ต่ำที่สุด แต่จากผลการทดลอง พบว่า ค่า GI ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ไม่แตกต่างกัน จึงเลือกพิจารณาคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสร่วมด้วย พบว่า พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยของกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ (HPP และ NPP) มีคะแนนคุณลักษณะด้านความชอบโดยรวมมากกว่า 6 คะแนนขึ้นไป ซึ่งอยู่ในระดับที่รับได้ คือ ชอบเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยของกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ (HPP และ NPP) มีคุณลักษณะอื่น ๆ ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องคัดเลือกสายพันธุ์กล้วยที่มีปริมาณผลผลิตมาก หาได้ง่าย และราคาถูก โดยกล้วยหอมมีผลผลิตต่อปี 117,427 ตัน ในขณะที่กล้วยน้ำว้ามีผลผลิตต่อปี 918,539 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรเขต 1, 2560) ดังนั้นจึงเลือกพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NPP) ไปทดลองในขั้นตอนต่อไป

4.2 ผลการศึกษาชนิดและปริมาณของโปรตีน ต่อลักษณะทางกระแสวิทยาของโด คุณลักษณะของพาสต้า โครงสร้างทางจุลภาค และค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

4.2.1 การเตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน

ในตอนนี้มีปัจจัยที่ศึกษา 2 ปัจจัย คือ ชนิดและปริมาณของโปรตีน โดยเตรียมพาสต้าจากแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่คัดเลือกได้จากข้อ 4.1 โดยแปรชนิดของโปรตีน ได้แก่ ไข่ขาวผง (E) เวย์โปรตีน (W) และโปรตีนถั่วเหลือง (S) และแปรปริมาณของโปรตีน ดังสูตรในตารางที่ 3-2 จากการทดลอง พบว่า ส่วนผสมของพาสต้าจากแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S สูตร S2 และ S3 ไม่สามารถเป็นโด (dough) ได้ จึงได้มีการเพิ่มปริมาณน้ำลงไปอีก 4.81% ของแป้งกล้วยดิบจึงสามารถเกิดเป็นโดและรีดเป็นเส้นพาสต้าได้ จากการสังเกต พบว่า พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดของโปรตีนต่างกัน มีสีที่แตกต่างกันออกไป ดังภาพที่ 4-6 โดยพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S ให้สีที่สว่างที่สุด นอกจากนี้ยัง พบว่า ชนิดและปริมาณของโปรตีนมีผลทำให้ลักษณะของเส้นแตกต่างกัน โดยเมื่อพิจารณาชนิดของโปรตีน พบว่า พาสต้าที่ผสม E จะมีลักษณะเส้นที่เรียบและแน่นที่สุด อาจเกิดจากไข่ขาวผงเมื่อกระจายตัวในน้ำจะกลายเป็นของเหลวเหมือนกาว จึงสามารถประสานส่วนผสมต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ทำให้เส้นเรียบเนียน ในขณะที่พาสต้าที่ผสม W และ S บางความเข้มข้นเส้นไม่เรียบ เปราะ และแตกง่าย อาจเกิดจากตัววัตถุดิบมีลักษณะเป็นผง แม้จะใส่น้ำลงไป โปรตีนก็ยังไม่ละลายและอาจยังแยกออกจากส่วนของแป้งอยู่ จึงทำให้เส้นไม่เรียบเนียน และเมื่อพิจารณาปริมาณของโปรตีน พบว่า พาสต้าที่ผสม E ทำให้เส้นมีความเรียบเนียนในทุกปริมาณ ส่วนพาสต้าที่ผสม W และ S จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ

โปรตีน โดยพาสต้าที่ผสม W ที่ใส่ปริมาณโปรตีนต่ำกว่าสูตร W2 เส้นไม่เรียบเนียน และเปราะ ส่วนพาสต้าที่ผสม S หากใส่ปริมาณมากดังสูตร S3 ทำให้เส้นไม่เรียบ เปราะ และแตกหักง่าย ซึ่งพาสต้าที่ผสม S สูตร S3 มีเส้นที่เปราะ และแตกหักง่ายมากที่สุด จากนั้นนำพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณโปรตีนแตกต่างกันไปตรวจสอบคุณภาพทางด้านเคมี กายภาพ และค่าดัชนีไกลซีมิกต่อไป

ภาพที่ 4-6 ลักษณะพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณโปรตีนแตกต่างกัน

E, W และ S คือ ชนิดของโปรตีน ได้แก่ ไข่ขาวผง, เวย์โปรตีน และโปรตีนถั่วเหลือง ตามลำดับ

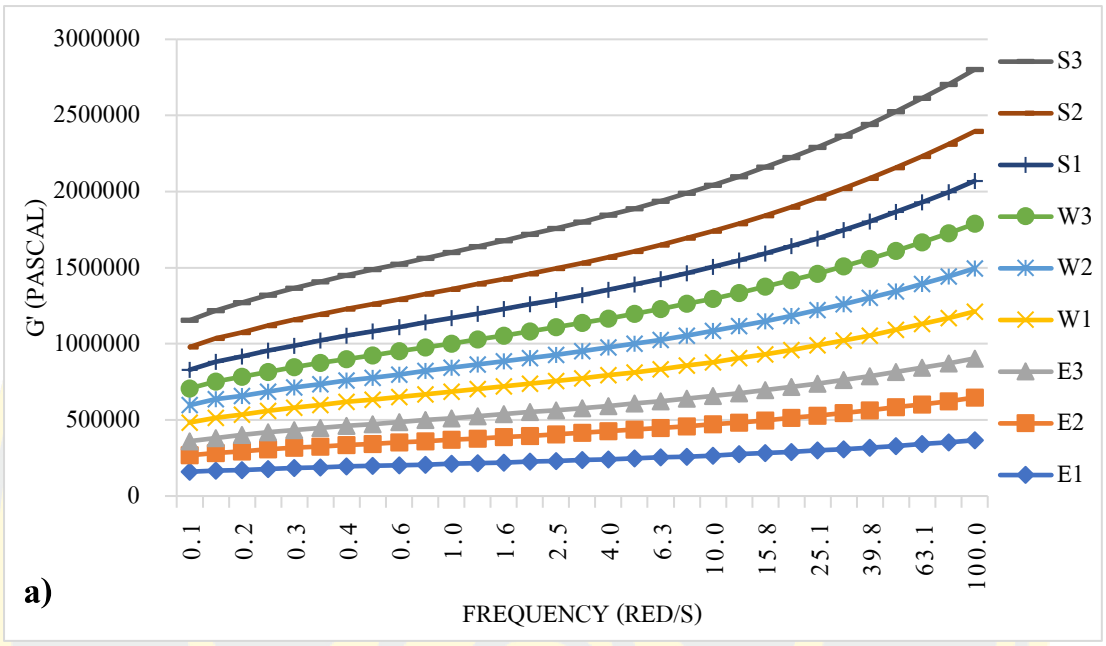
1, 2 และ 3 คือ ปริมาณของโปรตีน ได้แก่ 4.35, 8.70 และ 13.05% ของแป้งกล้วยดิบ ตามลำดับ

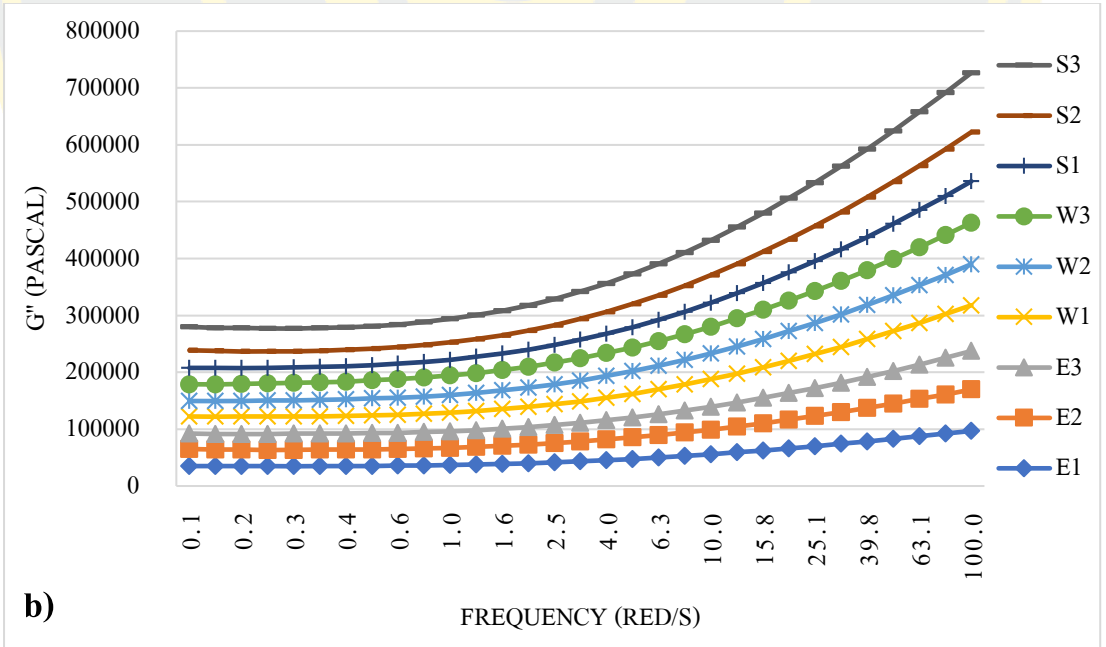
4.2.2 ผลการประเมินลักษณะทางการไหลของโด

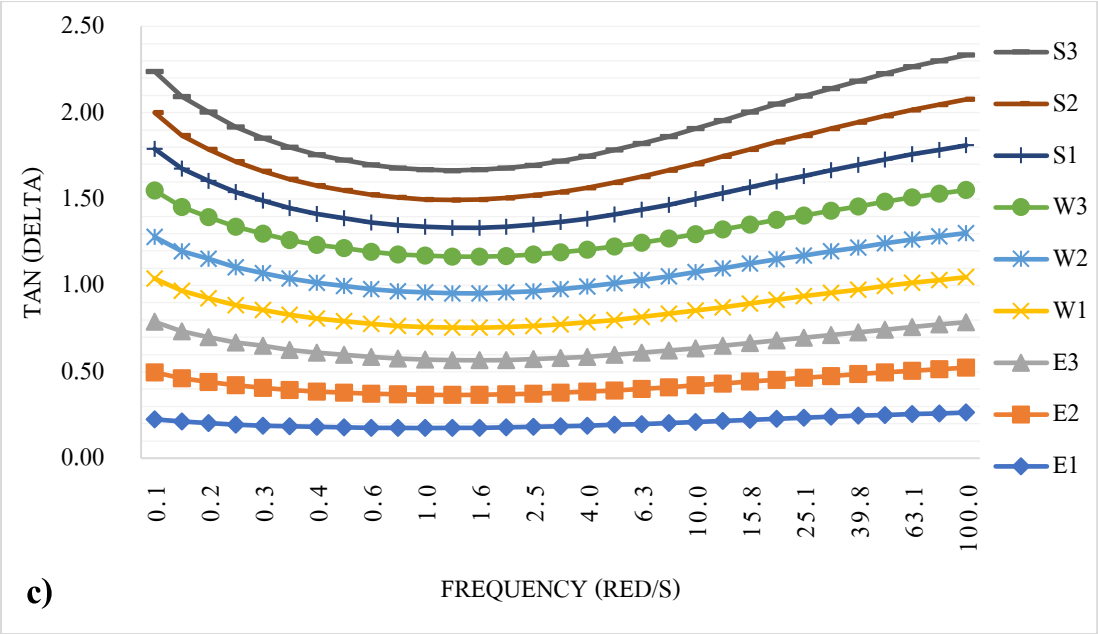
การประเมินลักษณะทางการไหลของโดแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน โดยเครื่องรีโอมิเตอร์ ด้วยวิธี frequency sweep test (ความถี่ 0.1-100 rad/s) เป็นการดูอิทธิพลของการใช้แรงเฉือนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านการไหลของโด

แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 4-7 แสดงค่าเป็น storage modulus (G') คือ พลังงานที่ถูกเก็บไว้ในวัสดุเมื่อได้รับความเค้นหรือความเครียด วัสดุจะเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ในการเสียรูปร่างไว้ภายใน เพื่อใช้ในการคืนสู่รูปเดิมเมื่อถอนแรงเค้น แสดงลักษณะความเป็นของแข็งที่มีความยืดหยุ่น (elastic) และค่า loss modulus (G") คือ พลังงานที่ถูกใช้ในการสร้างและสลายพันธะในระหว่างที่เกิดการเสียรูปร่างและจะสูญสลายไปไม่คืนสู่รูปเดิมเมื่อถอนแรงเค้น พลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากความหนืดแสดงลักษณะความเป็นของเหลวที่มีความข้นหนืด (ปิยพร ศิริคง, 2559) จากผลการศึกษา พบว่า เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ค่า G' และ G" ของโดแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกันทุกตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และจากกราฟจะเห็นได้ว่า ค่า G' สูงกว่าค่า G" แสดงให้เห็นว่าโดแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่มีชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกันทุกตัวอย่างมีลักษณะความเป็นของแข็งที่มีความยืดหยุ่น (solid-like characteristic) มากกว่าความเป็นของเหลวที่มีความข้นหนืด (liquid-like characteristic) และการเพิ่มปริมาณโปรตีนของโปรตีนแต่ละชนิด ทำให้ค่า G' และ G" สูงขึ้น เนื่องจากโปรตีนช่วยเพิ่มความเป็น solid มากขึ้น โดยโปรตีนมีความสามารถในการดูดซับน้ำจากส่วนผสม ทำให้โดมีความแห้งและแข็งเพิ่มขึ้น และจากกราฟจะเห็นได้ว่าโดแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S มีค่า G' และ G" สูงที่สุด รองลงมาคือโดแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม W และโดแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม E ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่า loss tangent (tan delta) โดยค่า tan delta คือ สัดส่วนของการแสดงสถานะเป็นวัสดุไหลหนืดต่อสถานะยืดหยุ่น (tan delta = G"/G') ถ้าค่า tan delta > 1 แสดงว่าวัสดุนั้นมีความไหลหนืดมากกว่าความยืดหยุ่น และถ้าค่า tan delta < 1 แสดงว่าวัสดุนั้นมีความยืดหยุ่นมากกว่าความไหลหนืด (ปาริดา จันทร์สว่าง, 2020) จากผลการศึกษา พบว่า โดแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม E ทุกสูตร และโดแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม W สูตร W1 มีค่า tan delta < 1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของโดที่มีความยืดหยุ่น และสามารถคืนตัวได้ ส่วนโดแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม W สูตร W2, W3 และโดแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S ทุกสูตร มีค่า tan delta > 1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของโดที่มีความสามารถในการคืนตัวน้อย หรือไม่สามารถคืนตัวได้ จากรายงานการศึกษาลักษณะการไหลของโดของ Marco & Rosell (2008) ในการเติมโปรตีนไอโซเลท ได้แก่ ถั่วลันเตา ถั่วเหลือง ไข่ขาว และเวย์โปรตีน ลงในแป้งข้าวเจ้า พบว่า โดแป้งข้าวเจ้าที่เติมโปรตีนไอโซเลททุกตัวอย่างมีค่า G’ สูงกว่าค่า G” แสดงลักษณะความเป็นของแข็งที่มีความยืดหยุ่น ค่า G' ของโดแป้งข้าวเจ้าที่มีไข่ขาวและเวย์โปรตีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่า ค่า G’ และ G’’ ของโดแป้งข้าวเจ้าที่มีถั่วเหลืองมีค่าสูงที่สุด พฤติกรรมที่แตกต่างกันนี้เกิดจากลักษณะและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนแต่ละชนิด

(TomiĆ, Torbica, & BeloviĆ, 2020) ซึ่งความหนืดที่เพิ่มขึ้นเกิดจากความสามารถในการจับกับน้ำที่สูงของโปรตีนถั่วเหลือง (Marco & Rosell, 2008)







ภาพที่ 4-7 ผลของความถี่ต่อค่า a) storage modulus (G') b) loss modulus (G") c) loss tangent (tan delta) ของโดแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน ที่แสดงลักษณะทางการไหลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความถี่ 0.1-100 rad/s โดย E1 คือ ไข่ขาวผง 4.35%, E2 คือ ไข่ขาวผง 8.70%, E3 คือ ไข่ขาวผง 13.05%, W1 คือ เวย์โปรตีน 4.35%, W2 คือ เวย์โปรตีน 8.70%, W3 คือ เวย์โปรตีน 13.05%, S1 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 4.35%, S2 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 8.70% และ S3 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 13.05% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

4.2.3 ผลการวิเคราะห์คุณภาพของพาสต้าหลังการต้ม

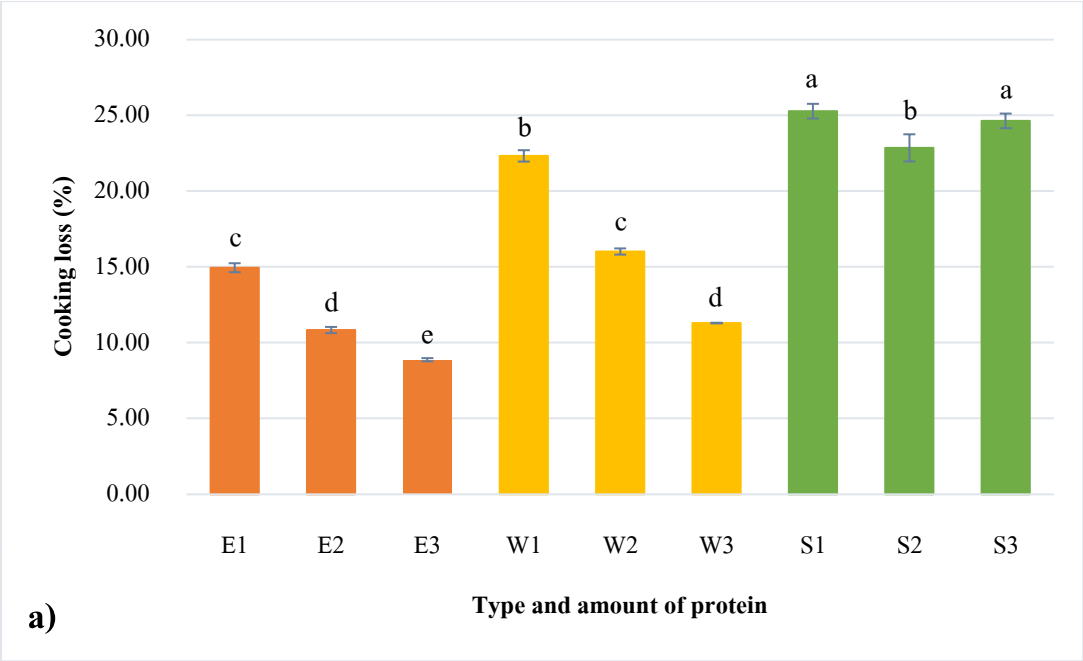
ผลการวิเคราะห์คุณภาพหลังการต้มของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน พบว่า ชนิดและปริมาณของโปรตีนมีผลทำให้เวลาที่เหมาะสมในการต้มพาสต้าให้สุก (cooking time) แตกต่างกัน (ตารางที่ 4-8) โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของโปรตีนเพิ่มขึ้น cooking time ก็จะนานขึ้น และพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม E มี cooking time นานกว่าโปรตีนชนิดอื่น ๆ ตามมาด้วยพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม W และพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S มี cooking time น้อยที่สุด อาจเป็นเพราะเส้นพาสต้าที่ผสม S มีลักษณะเส้นไม่เรียบเนียน เมื่อนำไปต้มจึงทำให้น้ำสามารถเข้าไปในเส้นได้ง่ายในระหว่างการทำให้สุก (cooking) (Detchewa & Naivikul, 2020) นอกจากนั้นโปรตีนถั่วเหลืองยังสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าโปรตีนชนิดอื่น จึงทำให้มีน้ำเข้าไปในเส้นมาก จึงทำให้เส้นสุกเร็ว ในส่วนของคุณภาพของพาสต้าหลังการต้ม พบว่า ชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน มีผลต่อปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loss) และน้ำหนักที่ได้หลังการต้ม

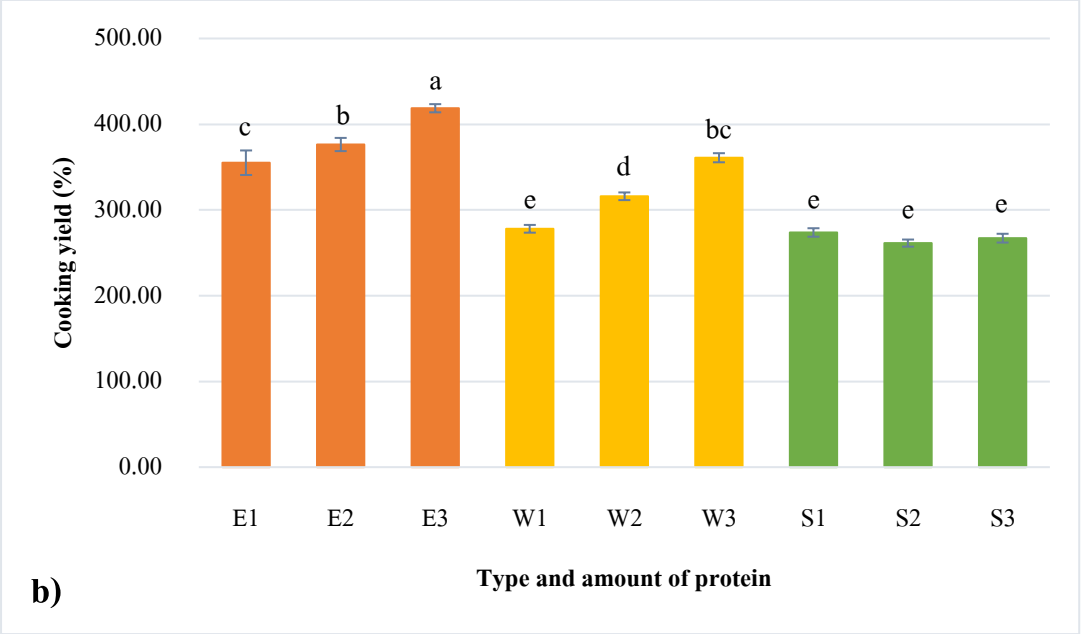
(cooking yield) ในส่วนของ cooking yield (ภาพที่ 4-8b) พบว่า ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยเมื่อพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม E และ W มีปริมาณเพิ่มขึ้น cooking yield ก็เพิ่มขึ้นด้วย แต่จากภาพจะเห็นได้ว่า cooking yield ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S ในปริมาณที่แตกต่างกัน มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$) และในส่วนของค่า cooking loss (ภาพที่ 4-8a) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับคุณภาพของเส้นพาสต้าในแง่ของดัชนีความต้านทานการแตกตัวหรือการสลายตัว (disintegration) ในระหว่างการทำให้สุก พบว่า ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เมื่อปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น cooking loss ก็จะลดลง ซึ่งความแตกต่างของ cooking loss ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโครงข่ายเจล (gel network) ของเส้นพาสต้า จากรายงานการศึกษาของ Detchewa & Naivikul (2020) ได้ศึกษาผลของไข่ขาวผงต่อคุณภาพของ cooking loos ของสปาเก็ตตี้แป้งข้าวปราศจากกลูเตน พบว่า การเพิ่มปริมาณไข่ขาวผง 2.5 และ 5.0% ของส่วนผสมแห้ง ลงในเส้นสปาเก็ตตี้ สามารถเพิ่มความแข็งแรงของโครงข่ายเจลได้ โดย cooking loss ลดลงเมื่อเทียบกับคอนโทล และจากภาพจะเห็นได้ว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม E มี cooking loss ต่ำที่สุด และพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S มี cooking loss สูงที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Phongthai, D'Amico, Schoenlechner, Homthawornchoo, & Rawdkuen (2017) ได้รายงานผลของชนิดโปรตีน ประกอบด้วย ไข่ขาว โปรตีนถั่วเหลือง และ เวย์โปรตีน ต่อคุณภาพของพาสต้าแป้งข้าวเจ้า พบว่า พาสต้าแป้งข้าวเจ้าที่มีไข่ขาวมี cooking loss ต่ำที่สุด ตามมาด้วยพาสต้าแป้งข้าวเจ้าที่มีเวย์โปรตีน และพาสต้าแป้งข้าวเจ้าที่มีโปรตีนถั่วเหลือง มี cooking loss สูงที่สุด อาจเป็นเพราะไข่ขาวจะสร้างเรติเคิล (reticule) เสริมสร้างโครงข่ายโปรตีนและยังยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ชระหว่างการทำให้สุกได้ และยังมีรายงานว่าไข่ขาวมีประสิทธิภาพในการลด cooking loss ได้มากกว่าเวย์โปรตีนอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของโปรตีนถั่วเหลืองที่มี cooking loss สูงที่สุด อาจเป็นเพราะโปรตีนถั่วเหลืองประกอบด้วยใยอาหาร (1.1%) มากกว่าไข่ขาว (0%) และเวย์โปรตีน (0%) (Messia et al., 2021) ส่งผลทำให้โครงข่ายสตาร์ชอ่อนตัวลง ทำให้ค่า cooking loss มากขึ้น นอกจากนั้นโปรตีนถั่วเหลืองอาจไม่สามารถเกิดโครงข่ายที่ห่อหุ้มสตาร์ชไว้ในระหว่างการต้มได้เหมือนโปรตีนไข่ขาว จึงทำให้พาสต้าที่ใส่โปรตีนถั่วเหลืองมีค่า cooking loss สูง

ตารางที่ 4-8 เวลาที่เหมาะสมในการต้มพาสต้าแป้งกล้วยดิบให้สุก (cooking time) ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณโปรตีนแตกต่างกัน

สูตร	Cooking Time (min)
E1	09.00 ± 0.00
E2	11.00 ± 0.00
E3	13.00 ± 0.00
W1	07.00 ± 0.00
W2	07.30 ± 0.00
W3	09.00 ± 0.00
S1	05.30 ± 0.00
S2	05.30 ± 0.00
S3	06.00 ± 0.00

E1 คือ ไข่ขาวผง 4.35%, E2 คือ ไข่ขาวผง 8.70%, E3 คือ ไข่ขาวผง 13.05%, W1 คือ เวย์โปรตีน 4.35%, W2 คือ เวย์โปรตีน 8.70%, W3 คือ เวย์โปรตีน 13.05%, S1 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 4.35%, S2 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 8.70% และ S3 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 13.05% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

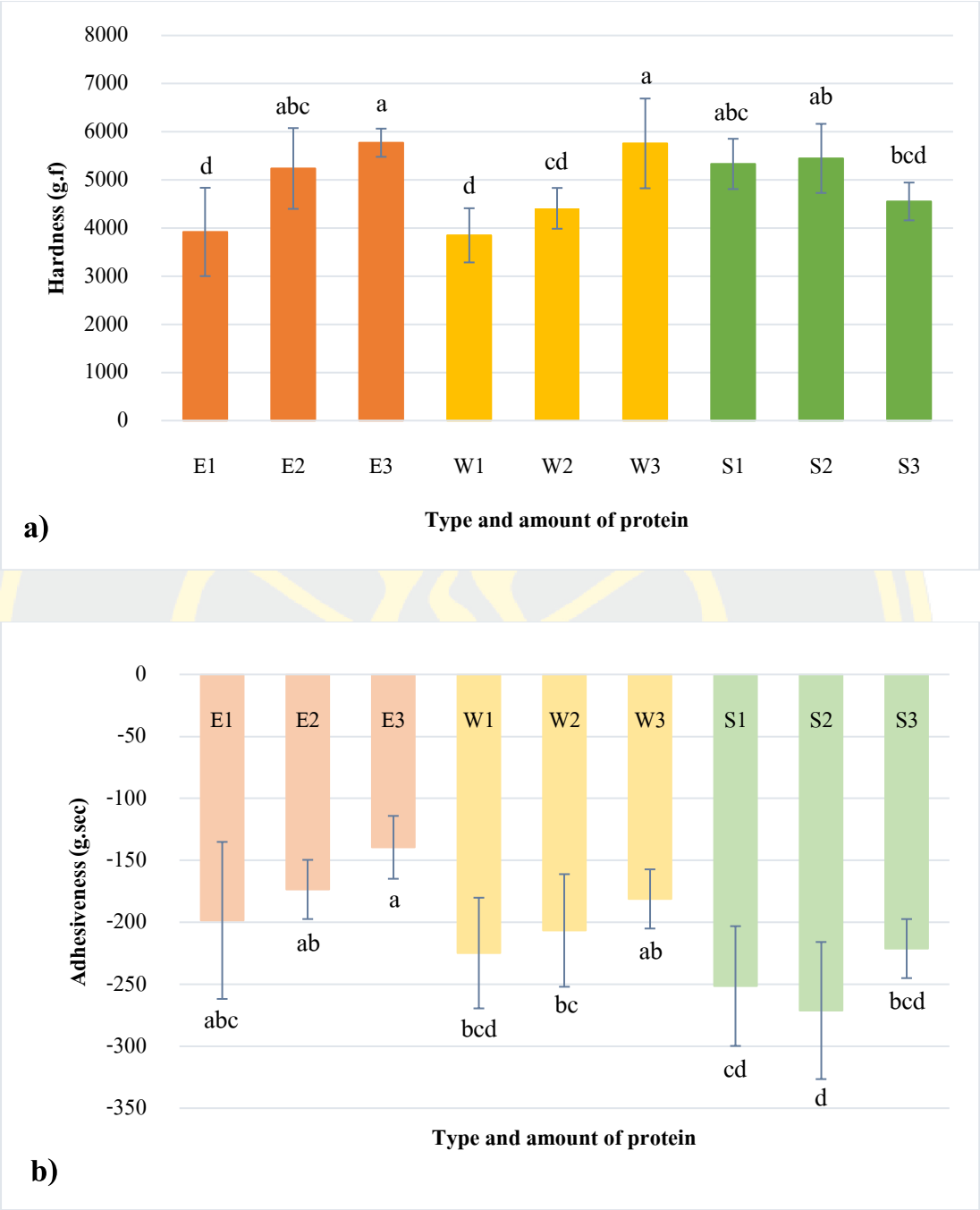




ภาพที่ 4-8 แสดง a) ปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loos) และ b) น้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (cooking yield) ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน โดย E1 คือ ไข่ขาวผง 4.35%, E2 คือ ไข่ขาวผง 8.70%, E3 คือ ไข่ขาวผง 13.05%, W1 คือ เวย์โปรตีน 4.35%, W2 คือ เวย์โปรตีน 8.70%, W3 คือ เวย์โปรตีน 13.05%, S1 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 4.35%, S2 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 8.70% และ S3 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 13.05% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส

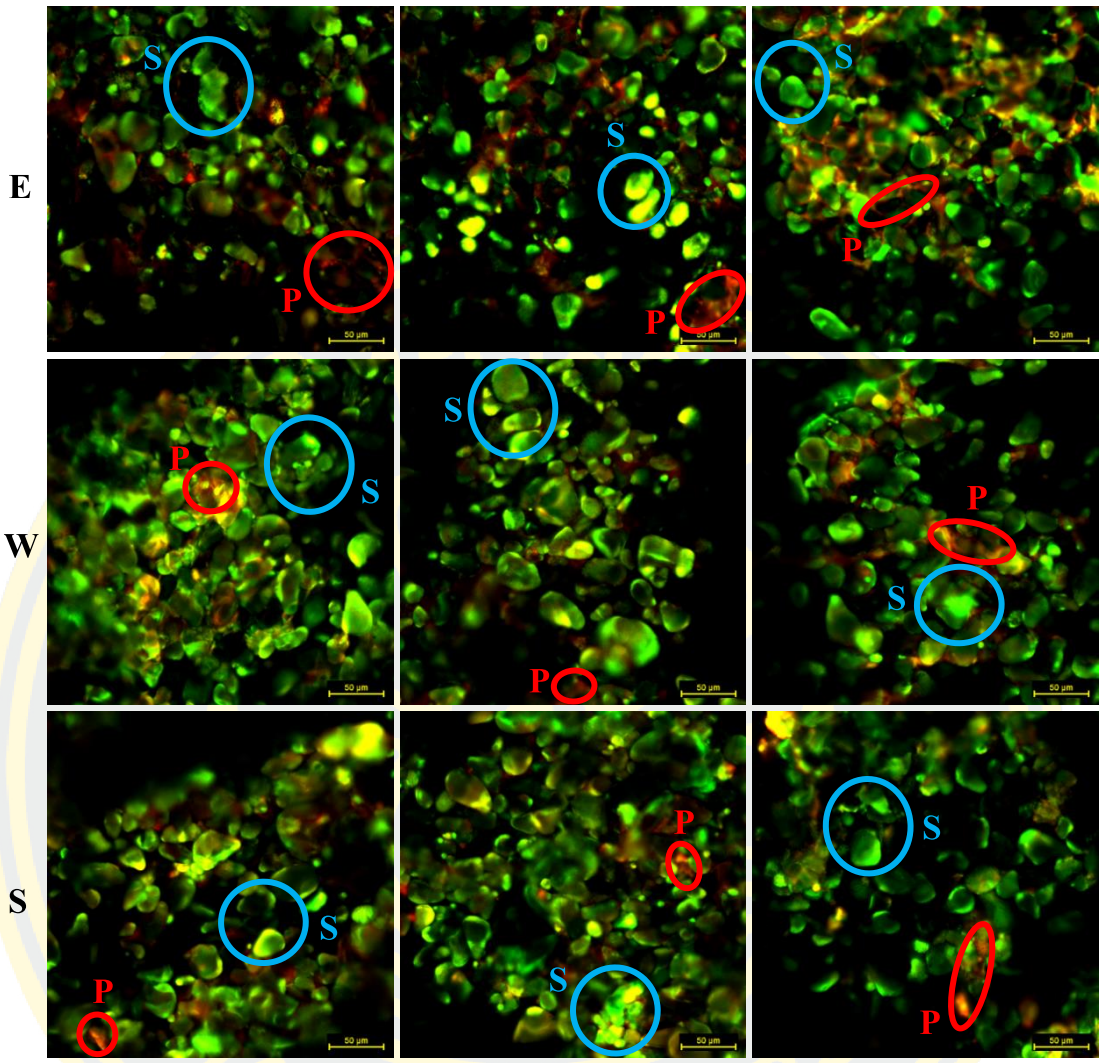
ผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน ด้วยเครื่อง Texture Analyzer แสดงค่าความแข็ง (hardness) และค่าการยึดเกาะที่ผิวหน้า (adhesiveness) ดังภาพที่ 4-9 พบว่า ชนิดและปริมาณของโปรตีนมีผลทำให้ค่า hardness แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (ภาพที่ 4-9a) จากภาพจะเห็นได้ว่า เมื่อพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม E และพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม W มีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น ค่า hardness ก็จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเส้นพาสต้าได้รับความร้อนจึงอาจไปส่งเสริมการการเกิดเจลาติไนเซชั่นและการทำให้โปรตีนเสียสภาพธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดโครงสร้างโปรตีนขึ้นใหม่ที่แข็งแรงและช่วยชะลอการพองตัวของเม็ดสตาร์ชและการละลายในระหว่างการทำให้สุก จึงทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความแข็งแรงมากขึ้น (Charoenthaikij et al., 2018) แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S มีปริมาณเพิ่มขึ้น ค่า hardness ไม่แตกต่างกัน แต่มีแนวโน้มลงลง อาจเกิดจากในขั้นตอนการนวดแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S ในสูตร S2 และ S3 ไม่สามารถนวดให้เกิดโดได้ในสูตรปกติ จึงต้องเพิ่มน้ำ 4.81% ของแป้งกล้วยดิบ จึงเกิดโดและรีดเป็นเส้นพาสต้าได้ และจากการสังเกตเส้นพาสต้าที่ผสม S มีลักษณะไม่เรียบเนียน อาจเกิดจากโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่องกัน อีกทั้งโปรตีนถั่วเหลืองมีเส้นใยอาหารมากกว่าโปรตีนไข่ขาวและเวย์โปรตีน จึงอาจทำให้โครงข่ายโครงสร้างของเส้นพาสต้าอ่อนแอลง ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของเส้นมีความแข็งลดลง (Cao et al., 2021) ในส่วนของค่า adhesiveness (ภาพที่ 4-9b) พบว่า ชนิดของโปรตีนมีผลทำให้ค่า adhesiveness มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แต่ปริมาณของโปรตีนไม่มีผลทำให้ค่า adhesiveness แตกต่างกัน ($p\geq0.05$) โดยจากภาพจะเห็นได้ว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S มีค่า adhesiveness สูงที่สุด เนื่องจาก S เป็นของแข็ง และไม่ละลายน้ำ เมื่อใส่ลงในส่วนผสมจึงไม่ไปปกคลุมเม็ดสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชที่อยู่ในส่วนผสมของพาสต้าไปอยู่บนผิวของเส้น เมื่อถูกต้มและเกิดเจลลาติไนเซชั่นเส้นจึงติดกันมาก ในส่วนของค่าความต้านทานต่อการดึงขาด (tensile strength) ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากเส้นพาสต้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนในทุกทรีทเม้นต์ ไม่แข็งแรง และไม่มีความยืดหยุ่น จึงไม่สามารถผูกเส้นพาสต้าให้ติดกับหัววัดได้ (เส้นขาด)



ภาพที่ 4-9 แสดงลักษณะเนื้อสัมผัส a) ความแข็ง (hardness) และ b) การยึดเกาะที่ผิวหน้า (adhesiveness) ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน โดย E1 คือ ไข่ขาวผง 4.35%, E2 คือ ไข่ขาวผง 8.70%, E3 คือ ไข่ขาวผง 13.05%, W1 คือ เวย์โปรตีน 4.35%, W2 คือ เวย์โปรตีน 8.70%, W3 คือ เวย์โปรตีน 13.05%, S1 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 4.35%, S2 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 8.70% และ S3 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 13.05% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

4.2.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล (confocal microscope)

จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล แสดงผลเป็นภาพโครงสร้าง 3 มิติ เห็นสีจากการย้อมเม็ดสตาร์ชด้วย FITC แสดงผลเป็นสีเขียว และย้อมโปรตีนด้วย RITC แสดงผลเป็นสีแดง ดังภาพที่ 4-10 จากภาพจะเห็นได้ว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกันนั้นมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน คือ พบเม็ดสตาร์ชอยู่กระจัดกระจายเป็นกลุ่ม ๆ โดยโปรตีนจะแทรกอยู่ในกลุ่มของเม็ดสตาร์ชแบบหลวม ๆ ไม่พบการสานเป็นร่างแหหรือโครงข่ายโปรตีนล้อมรอบเม็ดสตาร์ช ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องรายงานการวิจัยของ Zheng et al. (2015) มีการศึกษาโครงสร้างพื้นผิวด้านนอกและพื้นผิวด้านในของพาสต้าจากแป้งกล้วยที่มีส่วนผสมของไข่ขาวเปรียบเทียบกับพาสต้าจากแป้งสาลีที่มีส่วนผสมของไข่ขาวที่ต้มสุกแล้ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล พบว่า พื้นผิวด้านนอกของพาสต้าจากแป้งกล้วยที่มีส่วนผสมของไข่ขาว เม็ดสตาร์ชกล้วยจะกระจายอย่างหลวม ๆ และมีโครงข่ายโปรตีนที่มีความหนาแน่นน้อยแทรกตัวอยู่ ส่วนพื้นผิวด้านในของพาสต้า พบ เม็ดสตาร์ชอัดกันอย่างหนาแน่นและล้อมรอบด้วยกลุ่มก้อนของโปรตีน ในส่วนของพาสต้าจากแป้งสาลีที่มีส่วนผสมของไข่ขาว พื้นผิวด้านนอกจะเห็นโครงข่ายร่างแหโปรตีน (กลูเตน) ห่อหุ้มเม็ดสตาร์ชอยู่ ทำให้มองไม่เห็นเม็ดสตาร์ช ส่วนพื้นผิวด้านในของพาสต้าจะเห็นโครงข่ายกลูเตนที่มีโครงสร้างซับซ้อนและเชื่อมต่อกันสูงและล้อมรอบเม็ดสตาร์ชไว้อย่างชัดเจน



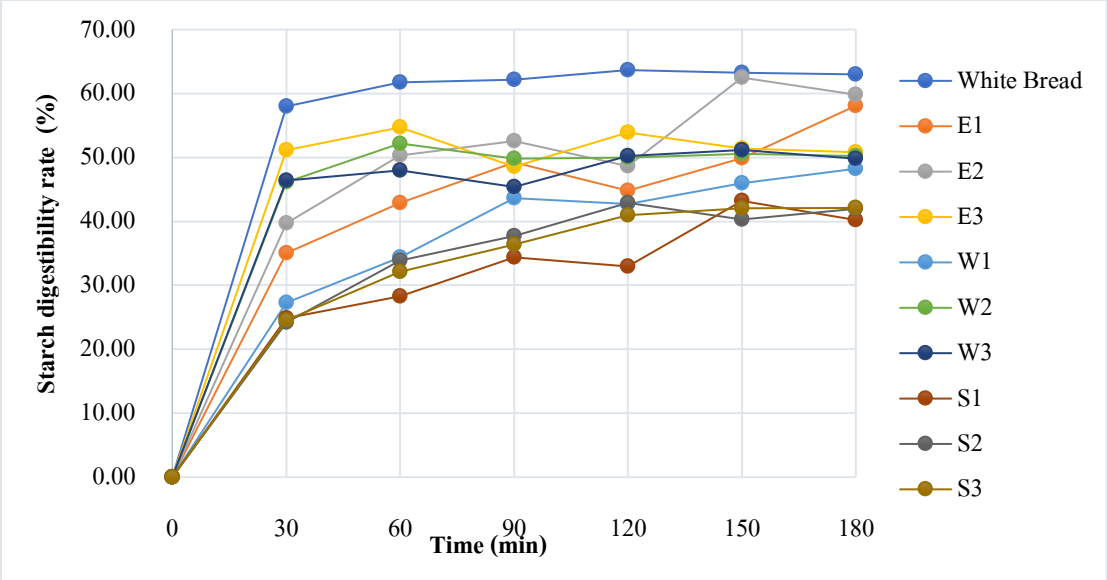
ภาพที่ 4-10 แสดงภาพพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน จากกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล ที่กำลังขยาย 40 เท่า

E, W และ S คือ ชนิดของโปรตีน ได้แก่ ไข่ขาวผง, เวย์โปรตีน และโปรตีนถั่วเหลือง ตามลำดับ

1, 2 และ 3 คือ ปริมาณของโปรตีน ได้แก่ 4.35, 8.70 และ 13.05% ของแป้งกล้วยดิบ ตามลำดับ

4.2.6 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิก

จากกราฟอัตราการย่อยในหลอดทดลองของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน ดังภาพที่ 4-11 แสดงให้เห็นว่าอัตราการย่อยในหลอดทดลองของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน มีค่าต่ำกว่าขนมปังขาว (ตัวอย่างอ้างอิง) และจากภาพจะเห็นได้ว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S ทุกสูตร มีความสามารถในการย่อยในหลอดทดลองต่ำกว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม E และ W ตลอดระยะเวลา 30 - 180 นาทีของการย่อย



ภาพที่ 4- 11 อัตราการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลองของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน เปรียบเทียบกับขนมปังขาว (ตัวอย่างอ้างอิง) โดย E1 คือ ไข่ขาวผง 4.35%, E2 คือ ไข่ขาวผง 8.70%, E3 คือ ไข่ขาวผง 13.05%, W1 คือ เวย์โปรตีน 4.35%, W2 คือ เวย์โปรตีน 8.70%, W3 คือ เวย์โปรตีน 13.05%, S1 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 4.35%, S2 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 8.70% และ S3 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 13.05% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

จากผลการศึกษาค่าดัชนีไกลซีมิก (GI) ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน ดังตารางที่ 4-8 จากผลการทดลอง พบว่า ชนิดของโปรตีนมีผลต่อค่า GI โดยพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม E และพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม W จัดอยู่ในกลุ่มของค่า GI สูง (78.41-86.28) ซึ่งสูงกว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S ที่มีค่า GI ต่ำที่สุด (69.69-70.05) โดยพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S ในสูตร S2 จัดอยู่ในกลุ่มของค่า GI สูง ส่วนพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อ

กล้วยน้ำว้าที่ผสม S ในสูตร S1 และ S3 จัดอยู่ในกลุ่มของค่า GI ปานกลาง โดยพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S ในทุกสูตร มีค่า GI ต่ำที่สุด อาจเกิดจากโปรตีนถั่วเหลืองมีอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลที่ pH 5.0 ต่ำ (เป็น pH ของเส้นพาสต้าในงานวิจัยนี้) อยู่ที่ประมาณ 46 องศาเซลเซียส (J. H. J. Kim, 2015) จึงทำให้เกิดการรวมตัวกันของโปรตีนที่เกิดจากการสูญเสียสภาพและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เกิดจากความร้อน โดยเกิดการก่อตัวของพอลิเปปไทด์บางส่วนและการรวมตัวกัน ซึ่งจะกักน้ำไว้และทำให้เกิดความแข็งแกร่งของโครงสร้าง (Fujiwara, 2014) ซึ่งทำให้เกิดการขัดขวางการพองตัว และการเกิดเจลาติไนซ์ของสตาร์ชได้มากกว่าโปรตีนชนิดอื่น อีกทั้งพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S ยังมี cooking time ต่ำกว่าโปรตีนชนิดอื่น (ตารางที่ 4-8) เกิดจากเส้นที่ไม่ต่อเนื่องกัน น้ำจึงแทรกเข้าไปในเส้นได้ง่าย เวลาในการต้มจึงต่ำ จึงอาจทำให้เม็ดสตาร์ชไม่เกิดการพองตัวและแตกออกจากความร้อนในการต้มสุกมากเมื่อเทียบกับพาสต้าที่ผสมโปรตีนชนิดอื่น และอาจยังมี RS2 จึงสามารถต้านทานการย่อยของสตาร์ชได้มากกว่า ทำให้มีค่า GI ต่ำที่สุด จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณของโปรตีน E และ S ไม่มีผลต่อค่า GI ในขณะที่ปริมาณของ W มีผลต่อค่า GI ซึ่งเคยมีงานวิจัยกล่าวถึงการลดค่า GI จากการเติมโปรตีนหลายชนิดแตกต่างกัน โดย Fujiwara (2014) ได้เติมโปรตีนถั่วเหลือง (SPI) ลงในผลิตภัณฑ์ขนมปังจากแป้งสาลี 0, 3, 5, 8 และ 10% ของแป้งสาลี พบว่าการเติม SPI ลงในขนมปัง 10% ของแป้งสาลี มีผลทำให้ค่า GI ลดลงมากที่สุด จาก 109 (0%) เป็น 97 เนื่องจากโปรตีนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดโครงข่ายโปรตีนไปล้อมรอบเม็ดสตาร์ชไว้มากขึ้น จึงช่วยปกป้องเม็ดสตาร์ชจากการย่อยของเอนไซม์ ทำให้อัตราการย่อยของสตาร์ชลดลง และจากรายงานของ ยุทธนา พิมลศิริผล (2561) กล่าวว่า มีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้เวย์โปรตีนเข้มข้น (WPC) ในการทดแทนสตาร์ชมันเทศเพื่อลดค่า GI ในผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยว โดยพบว่า WPC ที่ทดแทน 10, 20 และ 30% มีผลทำให้ปริมาณ RS ในผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวเพิ่มขึ้น จาก 15.6% เป็น 20.2, 23.8 และ 25.9% ตามลำดับ จึงทำให้ค่า GI ลดลงจาก 79 เป็น 74 70 และ 69 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-9 ค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณโปรตีนแตกต่างกัน

สูตร	ค่าดัชนีไกลซีมิก
E1	81.69 ± 3.41^{ab}
E2	84.58 ± 0.87^{ab}
E3	83.48 ± 2.07^{ab}
W1	78.41 ± 0.63^{b}
W2	86.28 ± 2.14^{a}
W3	78.52 ± 4.21^{b}
S1	69.69 ± 2.48^{c}
S2	70.05 ± 5.87^{c}
S3	69.80 ± 2.13^{c}

$^{a,b,\cdots}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

E1 คือ ไข่ขาวผง 4.35%, E2 คือ ไข่ขาวผง 8.70%, E3 คือ ไข่ขาวผง 13.05%, W1 คือ เวย์โปรตีน 4.35%, W2 คือ เวย์โปรตีน 8.70%, W3 คือ เวย์โปรตีน 13.05%, S1 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 4.35%, S2 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 8.70% และ S3 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 13.05% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

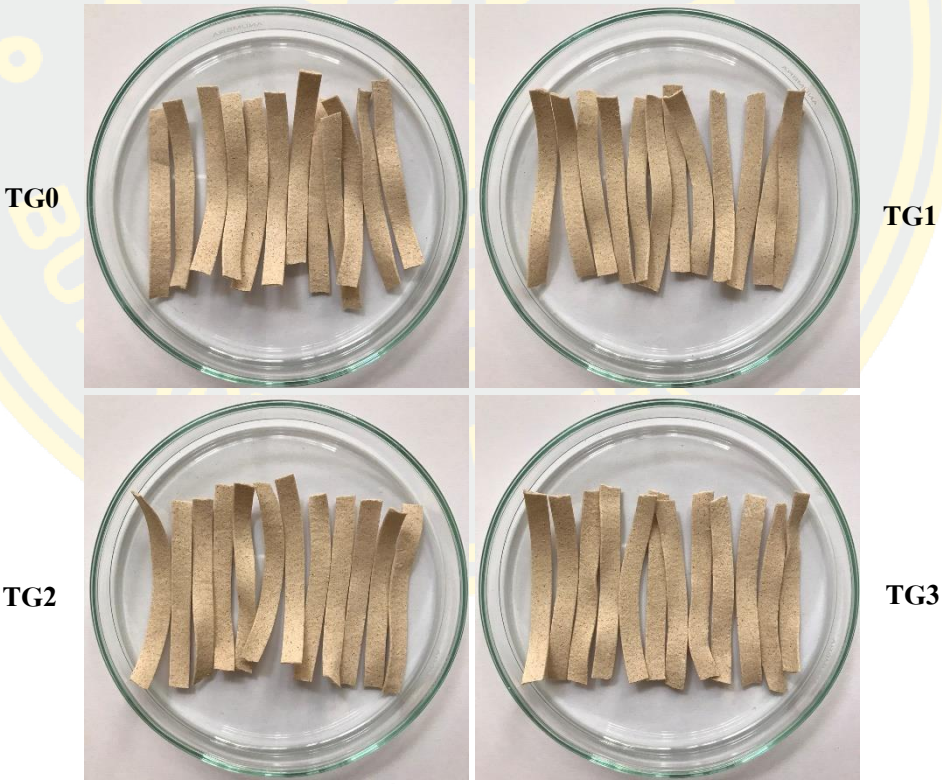
พิจารณาเลือกชนิดและปริมาณโปรตีนที่เหมาะสมในการเตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

ในการพิจารณาเลือกพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกันที่เหมาะสม พิจารณาโดยเลือกชนิดและปริมาณโปรตีนที่ทำให้ได้พาสต้าแป้งกล้วยดิบที่มีค่า GI ต่ำที่สุด และจากผลการทดลอง พบว่า พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S ทุกสูตร มีค่า GI ต่ำที่สุด แต่มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$) จึงเลือกพิจารณาคุณภาพของพาสต้าหลังการต้ม และลักษณะเนื้อสัมผัสร่วมด้วย โดยพบว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S ในสูตร S2 มีปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้มน้อยที่สุด และมีค่าความแข็งสูงที่สุด ดังนั้นจึงเลือกพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S ในสูตร S2 ไปทดลองในขั้นตอนต่อไป

4.3 ผลของปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ต่อลักษณะทางกระแสวิทยาของโด รูปแบบของโปรตีน ปริมาณหมู่อะมิโนอิสระ คุณลักษณะของพาสต้า โครงสร้างทางจุลภาค ค่าดัชนีไกลซีมิก องค์ประกอบทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

4.3.1 ผลการเตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส

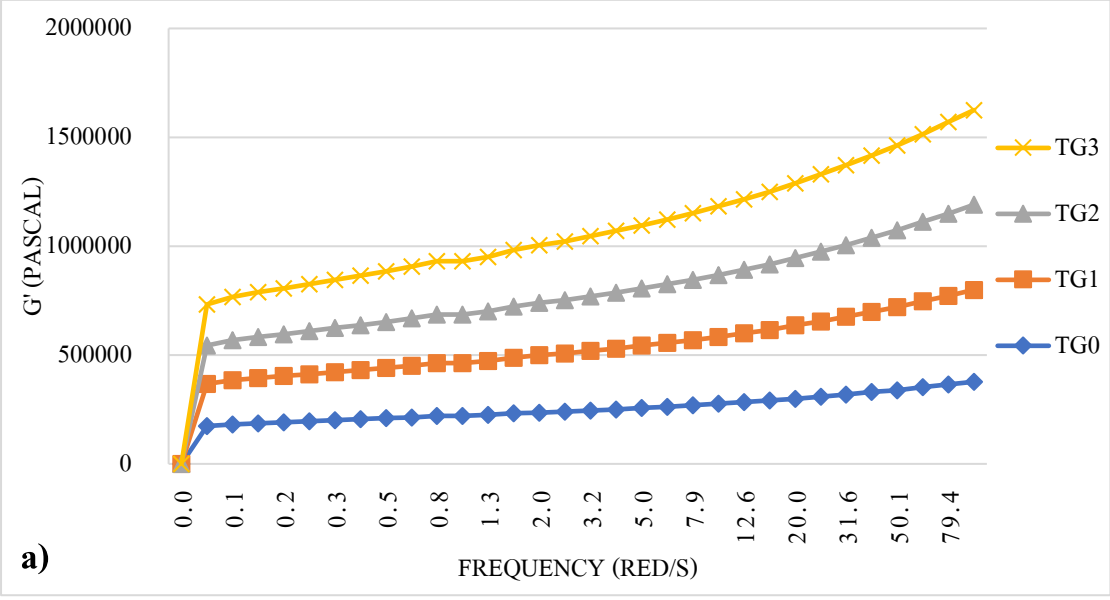
จากผลการทดลองข้อ 4.2 พบว่า พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าผสม S ในสูตร S2 มีค่า GI อยู่ในเกณฑ์ GI สูง และคุณภาพของเส้นยังไม่เหมาะสม จึงต้องการลดค่า GI และปรับปรุงคุณภาพของเส้นพาสต้าให้ดีขึ้น โดยมีรายงานว่าการใส่เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในปริมาณที่เหมาะสมลงในส่วนผสมที่มีโปรตีนสามารถลดค่า GI และปรับปรุงคุณภาพของเส้นพาสต้าได้ ในตอนนี้จึงศึกษาการแปรปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสลงในพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสม S และได้ลักษณะของเส้นพาสต้าดังภาพที่ 4-12 จากนั้นนำไปตรวจสอบคุณภาพทางเคมีกายภาพ ค่าดัชนีไกลซีมิก รวมทั้งการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสต่อไป

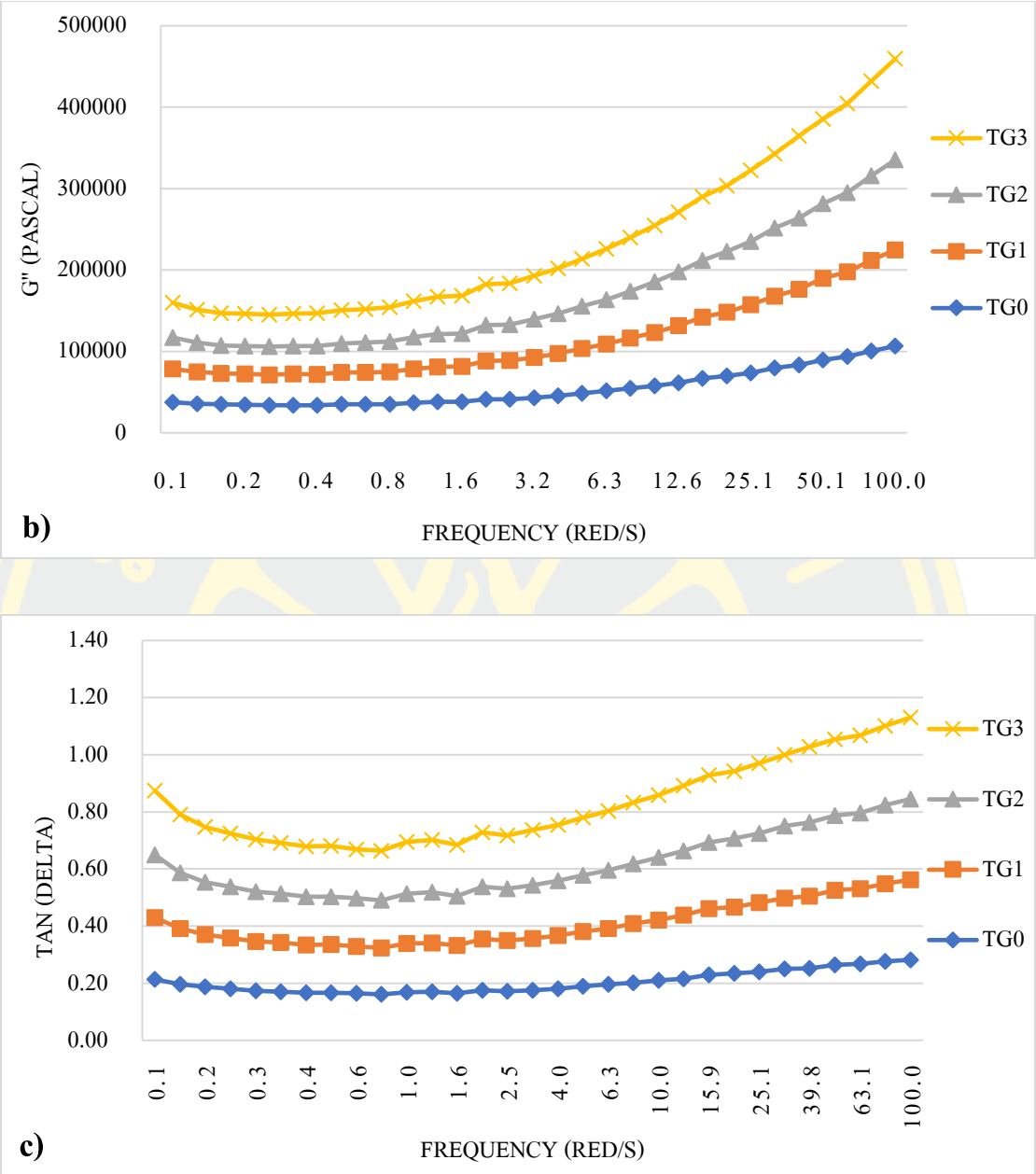


ภาพที่ 4-12 ลักษณะพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน โดย TG0 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 0%, TG1 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 2.18%, TG2 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 4.35% และ TG3 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 6.52% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

4.3.2 ผลการประเมินลักษณะทางการไหลของโด (Rheology)

การประเมินลักษณะทางการไหลของโดแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน โดยเครื่องรีโอมิเตอร์ ด้วยวิธี frequency sweep test (ความถี่ 0.1-100 rad/s) ได้ผลแสดงค่าเป็น storage modulus (G'), loss modulus (G") และ loss tangent (tan delta) ดังภาพที่ 4-14 จากผลการศึกษา พบว่า เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ค่า G' และ G" ของโดแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และจากกราฟจะเห็นได้ว่า ค่า G' สูงกว่าค่า G" แสดงให้เห็นว่าโดแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส มีลักษณะความเป็นของแข็งที่มีความยืดหยุ่น (solid-like characteristic) มากกว่าความเป็นของเหลวที่มีความข้นหนืด (liquid-like characteristic) ซึ่งสอดคล้องกับค่า tan delta โดยโดแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส มีค่า tan delta < 1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของโดที่ค่อนข้างแข็งและมีความยืดหยุ่น และจากผลการทดลอง พบว่า ค่า G’ และ G” ของโดแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG3 มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือสูตร TG2, TG1 และ TG0 ตามลำดับ รายงานของ Ruzengwe, Amonsou, & Kudanga (2020) ได้ศึกษากระแสวิทยาในการเพิ่มปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในไฮโดรเจลที่มีโปรตีนจากถั่วหรั่ง (bambara protein isolate) พบว่า เมื่อเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเพิ่มขึ้น 0, 5, 10 และ 15 U/g ค่า G’ และ G’ เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 20 และ 25 U/g ค่า G’ และ G’ ลดลง

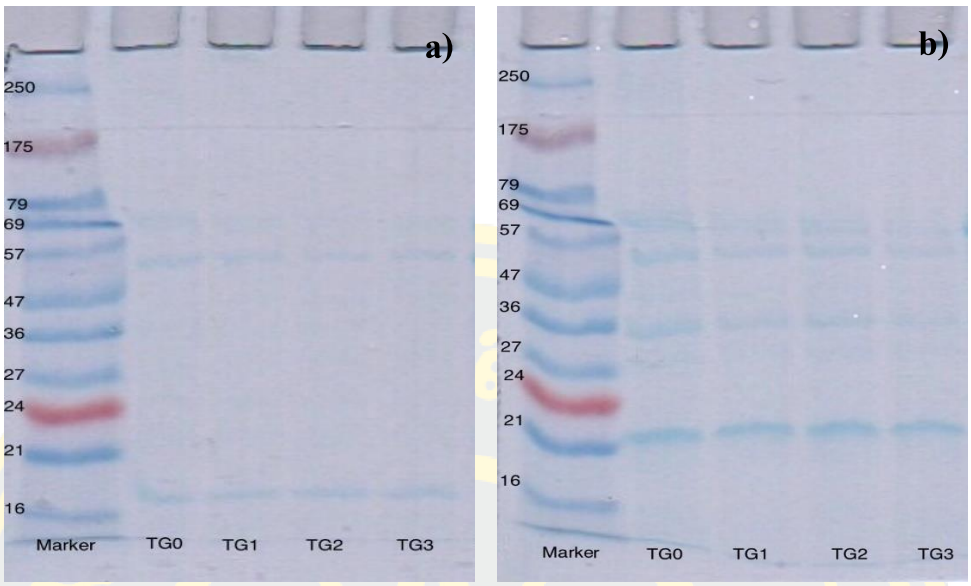




ภาพที่ 4-13 ผลของความถี่ต่อค่า a) storage modulus (G') b) loss modulus (G") c) loss tangent (tan delta) ของโดแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน ที่แสดงลักษณะทางการไหลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความถี่ 0.1-100 rad/s โดย TG0 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 0%, TG1 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 2.18%, TG2 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 4.35% และ TG3 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 6.52% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

4.3.3 ผลการวิเคราะห์รูปแบบของโปรตีนด้วยวิธี sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE)

จากผลการวิเคราะห์รูปแบบโปรตีนด้วยวิธี Sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) ในตัวอย่างพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน ที่สกัดด้วยสภาวะนอน-รีดิวซิง (non-reducing) และสภาวะรีดิวซิง (reducing) ดังภาพที่ 4-15 พบว่า สภาวะที่ใช้ในการสกัดมีผลต่อความเข้มของแถบโปรตีนที่ได้ โดยตัวอย่างที่สกัดในสภาวะรีดิวซิงมีแถบโปรตีนสีเข้มกว่าตัวอย่างที่สกัดในสภาวะนอน-รีดิวซิง เกิดจากการสกัดตัวอย่างในสภาวะรีดิวซิง มีการเติมสารละลายเบต้า-เมอร์แคปโตเอทานอล (2-mercaptoethanol) ที่เป็นตัวรีดิวซิงในสารละลายตัวอย่าง ไปทำให้สะพานไดซัลไฟด์ภายในโมเลกุลถูกรีดิวซ์ให้ลดลง จึงสามารถตรวจจับหน่วยย่อยใหม่ของโปรตีนได้อย่างชัดเจน ตัวอย่างที่สกัดในสภาวะรีดิวซิงจึงมีแถบโปรตีนสีเข้มขึ้น (Phongthai et al., 2017) จากผลการศึกษาตัวอย่างที่สกัดในสภาวะนอน-รีดิวซิงพบโปรตีนที่มีขนาดโมเลกุล 18, 53 และ 69 kDa (กิโลดาลตัน) และตัวอย่างที่สกัดในสภาวะรีดิวซิงพบโปรตีนที่มีขนาดโมเลกุล 22, 36, 53 และ 69 kDa ทั้งนี้จากการศึกษาของ Murphy (2008) รายงานว่า β-Conglycinin เป็นโปรตีนที่พบในถั่วเหลือง ประกอบด้วยเปปไทด์สามชนิด คือ α, α′ และ β เชื่อมโยงกันเป็นไตรเมอร์ (trimer) และกล่าวว่ามีรายงานจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี SDS-PAGE พบว่า α, α′ และ β-Conglycinin มีขนาดโมเลกุล 72, 68 และ 52 kDa ตามลำดับ (Medieros, 1982 cited by Murphy, 2008) ในขณะที่มีรายงานอื่นกล่าวว่า α, α′ และ β-Conglycinin มีขนาดโมเลกุล 76, 72 และ 53 kDa ตามลำดับ (Sebastiani et al., 1990 cited by Murphy, 2008) นอกจากนี้จากผลการทดลอง พบว่า การเพิ่มปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสทั้งในสภาวะนอน-รีดิวซิงและสภาวะรีดิวซิง ไม่พบการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโปรตีน ทั้งขนาดโมเลกุลของโปรตีน และแถบความเข้มของโปรตีน แต่อย่างไรก็ตามจากการสังเกตจะเห็นได้ว่า ในสภาวะรีดิวซิงโมเลกุลที่มีขนาด 36 kDa เมื่อปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเพิ่มขึ้น ความเข้มของแถบโปรตีนมีแนวโน้มจางลงเล็กน้อย ตามภาพที่ 4-15b อาจอธิบายได้ว่าโปรตีนอาจเกิดการ cross-link กันเพียงบางส่วน ทั้งนี้การที่เราเห็นผลของการ cross-link ของโปรตีนจากการทำงานของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสไม่ชัดเจน อาจเนื่องจากโปรตีนอาจไปจับกับแซนแทนกัมที่มีประจุลบในส่วนผสม เกิดเป็นโครงข่ายร่างแห (network) ได้ (Zhang, Zhang, Vardhanabhuti, 2014) ทำให้โมเลกุลของโปรตีนไม่อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับการเข้าไปเชื่อมข้ามโดยเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส

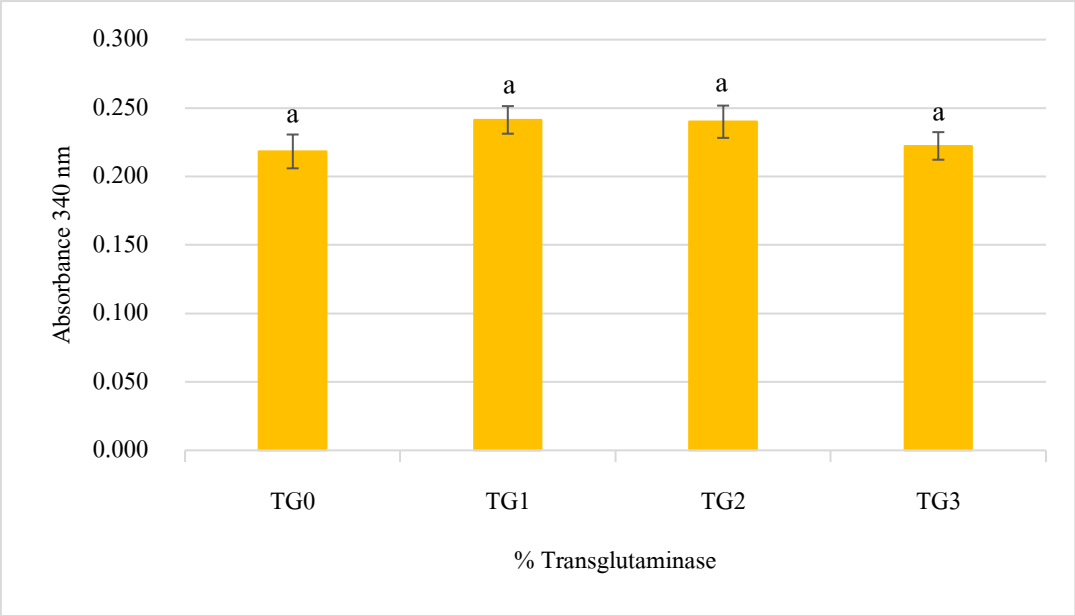


ภาพที่ 4-14 รูปแบบโปรตีนจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบหลังการอบแห้งที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน ที่สกัดด้วย a) สภาวะนอน-รีดิวซิง และ b) สภาวะรีดิวซิง โดย TG0 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 0%, TG1 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 2.18%, TG2 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 4.35% และ TG3 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 6.52% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

4.3.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของหมู่อะมิโนอิสระ (free amino group)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณหมู่อะมิโนอิสระของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน ดังภาพที่ 4-16 พบว่า ปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อปริมาณหมู่อะมิโนอิสระอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) แต่พอสังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเพิ่มขึ้น ในสูตร TG1, TG2 และ TG3 ปริมาณของหมู่อะมิโนอิสระมีแนวโน้มลดลง จากรายงานการศึกษาของ Huang et al. (2010) ที่ศึกษาผลของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 0, 0.5, 1.0, และ 1.5% ของแป้งข้าวโอ๊ต ต่อปริมาณหมู่อะมิโนอิสระของโดแป้งข้าวโอ๊ต พบว่า เมื่อปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเพิ่มขึ้น ปริมาณหมู่อะมิโนอิสระค่อย ๆ ลดลง แต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเติมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสมากกว่า 1.0% ของแป้งข้าวโอ๊ต อาจเป็นเพราะการหายไปของกลุ่มไลซีนที่เป็น substrate ของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส การมีไลซีนในปริมาณต่ำจะจำกัดการทำงานของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส และประกอบกับว่าข้าวโอ๊ตมีปริมาณโปรตีนที่ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษานี้ ที่เมื่อเติมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ TG1-TG3 จะมีปริมาณของหมู่อะมิโนอิสระที่ไม่แตกต่างกัน อีกทั้งในแป้ง

กล้วยดิบนั้นมีปริมาณโปรตีนต่ำ และการเติมโปรตีนถั่วเหลืองอาจยังไม่มากพอ ที่จะทำให้เห็นผลของการเพิ่มปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส



ภาพที่ 4-15 ผลของปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสต่อปริมาณของหมู่อะมิโนอิสระของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์แตกต่างกัน โดย TG0 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 0%, TG1 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 2.18%, TG2 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 4.35% และ TG3 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 6.52% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

4.3.5 ผลการวิเคราะห์คุณภาพของพาสต้าแป้งกล้วยดิบหลังการต้ม

ผลการวิเคราะห์คุณภาพของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4-8 เมื่อเติมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสลงไป ทำให้พาสต้ามีเวลาที่เหมาะสมในการต้มให้สุก (cooking time) ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับพาสต้าที่ไม่เติมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส โดยสูตร TG3 มี cooking time ต่ำสุด ในส่วนของคุณภาพของพาสต้าหลังการต้ม พบว่า ปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกันไม่มีผลต่อปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loss) แต่มีผลต่อน้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (cooking yield) โดยจากตารางจะเห็นได้ว่าค่า cooking yield มีแนวโน้มลดลง เมื่อมีปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่า cooking yield ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG0, TG1 และ TG2 มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) โดยพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG3 มี cooking yield ต่ำ

ที่สุด อาจเนื่องจากเกิดการเชื่อมข้ามมากที่สุด จึงเกิดการรวมตัวกันของโปรตีนแทรกตัวตามโครงสร้างของสตาร์ช (Tomić et al., 2020) จึงทำให้เส้นพาสต้าไม่เรียบและมีความแข็งแรงลดลง

ตารางที่ 4-10 เวลาที่เหมาะสมในการต้มพาสต้าแป้งกล้วยดิบให้สุก (cooking time) ปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loss) และน้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (cooking yield) ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน

สูตร	Cooking Time (min)	Cooking Loss (%)^{ns}	Cooking Yield (%)
TG0	5.30 ± 0.00	22.65 ± 0.70	252.06 ± 5.31^{a}
TG1	4.30 ± 0.00	20.56 ± 0.17	248.58 ± 5.99^{ab}
TG2	4.30 ± 0.00	22.14 ± 0.80	247.23 ± 8.85^{ab}
TG3	4.00 ± 0.00	21.53 ± 1.20	233.71 ± 4.71^{b}

$^{a,b,\cdots}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

^{ns} หมายถึง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

โดย TG0 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 0%, TG1 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 2.18%, TG2 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 4.35% และ TG3 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 6.52% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

4.3.6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน ด้วยเครื่อง Texture Analyzer แสดงค่าความแข็ง (hardness) และค่าการยึดเกาะที่ผิวหน้า (adhesiveness) ดังตารางที่ 4-9 พบว่า พาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน มีผลต่อค่า hardness แต่ไม่มีผลต่อค่า adhesiveness จากตารางจะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสทำให้เส้นพาสต้ามีแนวโน้มที่มีค่า hardness ลดลง โดยเฉพาะเมื่อใส่เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG2 และ TG3 อาจเกิดจากเมื่อกิจกรรมของ TG มากขึ้น ทำให้เกิดอันตรกิริยา (interactoin) ระหว่างโปรตีนกับโปรตีนที่เกาะกันเองเป็นก้อนมากขึ้น (Ruzengwe et al., 2020) และจากการสังเกตโครงสร้างของพาสต้าด้วยกล้องคอนโฟคอลในการศึกษานี้ (ภาพที่ 4-16) เห็นได้ชัดว่าโปรตีนจับกับโปรตีนด้วยกันเอง และสตาร์ชจับกับสตาร์ช จึงอาจไปทำให้โครงสร้างของสตาร์ชไม่ต่อเนื่องกัน ความแข็งจึงลดลง และจากผลการทดลอง พบว่า พาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน มีค่า

adhesiveness แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ในส่วนของค่าความต้านทานต่อการดึงขาด (tensile strength) ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากเส้นพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์ในทุกทรีทเม้นต์ ไม่แข็งแรง และไม่มีความยืดหยุ่น จึงไม่สามารถผูกเส้นพาสต้าให้ติดกับหัววัดได้ (เส้นขาด)

ตารางที่ 4-11 ลักษณะเนื้อสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน

สูตร	Hardness (g.f)	Adhesiveness (g.sec)^{ns}
TG0	5508.08 ± 902.40^{a}	-301.22 ± 43.15
TG1	5770.52 ± 893.70^{a}	-293.18 ± 41.50
TG2	3992.61 ± 745.95^{b}	-296.77 ± 40.82
TG3	4186.03 ± 806.16^{b}	-320.79 ± 42.30

$^{a,b,\cdots}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

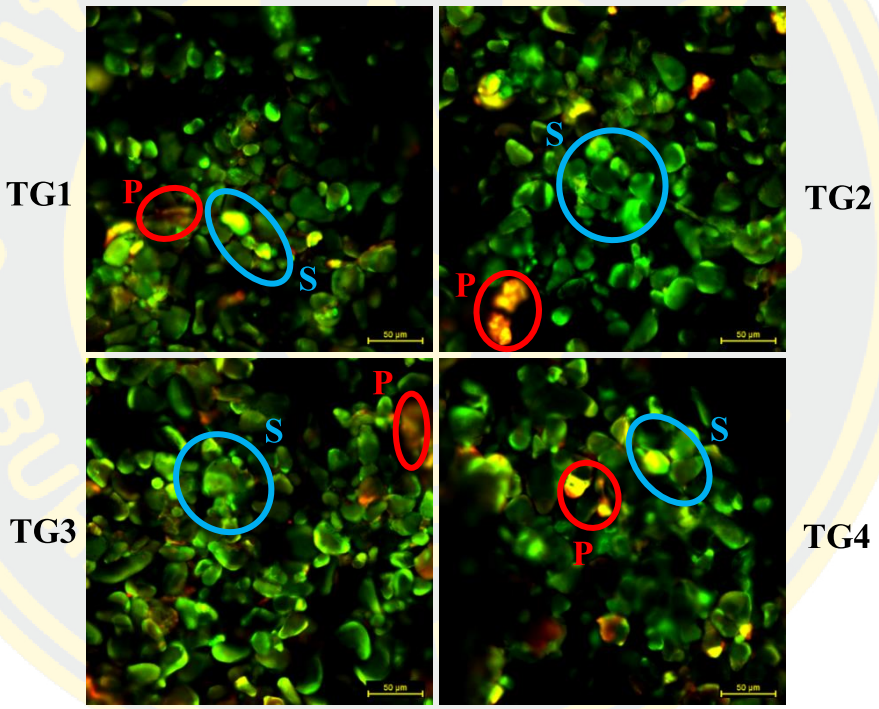
^{ns} หมายถึง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

โดย TG0 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 0%, TG1 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 2.18%, TG2 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 4.35% และ TG3 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 6.52% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

4.3.7 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล (confocal microscope)

จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล แสดงผลเป็นภาพโครงสร้าง 3 มิติ เห็นสีจากการย้อมเม็ดสตาร์ชด้วย FITC แสดงผลเป็นสีเขียว และย้อมโปรตีนด้วย RITC แสดงผลเป็นสีแดง ดังภาพที่ 4-17 จากภาพจะเห็นได้ว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าผสมโปรตีนถั่วเหลือง จะพบเม็ดสตาร์ชอยู่กระจัดกระจายเป็นกลุ่ม ๆ โดยโปรตีนจะจับกันเองและแทรกอยู่ในกลุ่มของเม็ดสตาร์ชแบบหลวม ๆ ไม่มีการสานเป็นร่างแหหรือโครงข่ายโปรตีนล้อมรอบเม็ดสตาร์ช อีกทั้งในระบบยังมีไฮโดรคอลลอยด์ ได้แก่ กัวร์กัม และแซนแทนกัม ซึ่งไฮโดรคอลลอยด์ที่มีประจุจับกับโปรตีน ทำให้เกิดเป็นก้อนโปรตีนที่ห่อหุ้มด้วยไฮโดรคอลลอยด์แทรกอยู่ระหว่างเม็ดสตาร์ช ซึ่งแม้ผลจาก SDS-PAGE จะแสดงให้เห็นถึงการเชื่อมข้ามของโปรตีน แต่เนื่องจากโปรตีน

ที่ใส่ลงไปไม่เกิดโครงสร้างที่ห่อหุ้มเม็ดสตาร์ช จึงอาจไม่ส่งผลต่อคุณลักษณะ รวมทั้งโครงสร้างของเส้นพาสต้าด้วย ทั้งนี้ผลการศึกษาผลของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในระบบที่เป็นกลูเตนฟรีด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลยังพบไม่มากนัก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในระบบที่มีกลูเตน พบว่า ภาพภายใต้กล้องมีความแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง จากรายงานการศึกษาของ Wee & Henry (2019) ที่ศึกษาโครงสร้างของบะหมี่จากแป้งสาลีที่เติมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 0, 1 และ 2% ของน้ำหนักแป้ง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล พบว่า การเติมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดชั้นเมทริกซ์โปรตีนล้อมรอบเม็ดสตาร์ชหนาขึ้น ตามลำดับ ซึ่งส่งผลต่อเนื้อสัมผัสและสมบัติด้านการต้มสุกอย่างชัดเจน

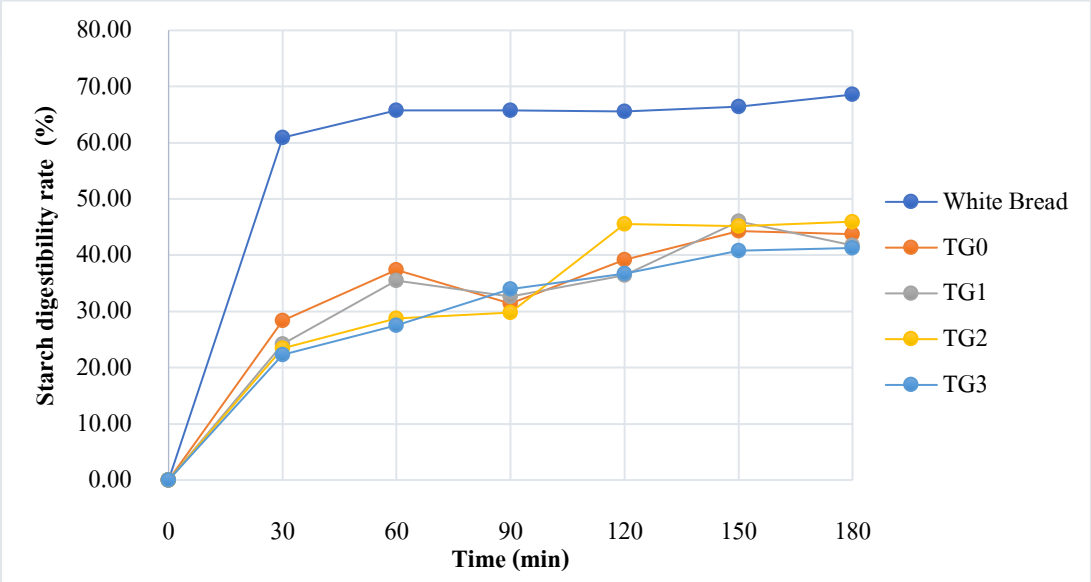


ภาพที่ 4-16 แสดงภาพพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกันจากกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล ที่กำลังขยาย 40 เท่า โดย TG0 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 0%, TG1 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 2.18%, TG2 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 4.35% และ TG3 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 6.52% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

4.3.8 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิก

จากกราฟอัตราการย่อยในหลอดทดลองของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน ดังภาพที่ 4-18 แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการถูกย่อยของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน มีค่าต่ำกว่าขนมปัง2

ขาว (ตัวอย่างอ้างอิง) โดยความสามารถในการถูกย่อยของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการย่อย แต่มีความสามารถในการถูกย่อยที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งแตกต่างจากการศึกษาของ Wee & Henry (2019) ที่ได้ศึกษาผลของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ต่อการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลองของก๋วยเตี๋ยวจากแป้งสาลี โดยแปรปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0% ของน้ำหนักแป้ง พบว่า ปริมาณการปล่อยกลูโคส (glucose release) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส โดยตัวอย่างที่มีปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 2.0% ของน้ำหนักแป้ง มีปริมาณการปล่อยกลูโคสลดลงประมาณ 16% หลังจาก 120 นาทีของการย่อย อาจเกิดจากเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสที่จับกับโครงข่ายโปรตีนสร้างสิ่งกีดขวางที่แข็งแรงขึ้นไปห่อหุ้มเม็ดสตาร์ชไว้ จึงสามารถจำกัดการเข้าถึงการย่อยของเอนไซม์ได้ นอกจากนั้น Gan et al. (2009) พบว่า การใช้เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ 0.5% ของแป้งสาลี: โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (SPI) ในอัตราส่วนร้อยละ 95:5 มีผลทำให้อัตราย่อยสตาร์ชของก๋วยเตี๋ยวลดลง จึงทำให้ค่า GI ลดลงจาก 52.7 (control) เป็น 51.7 อาจเกิดจากเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสประสานให้เกิดโครงสร้างของโปรตีน (protein networking) โดยการกระตุ้นสร้างพันธะโควาเลนท์ระหว่างกรดอะมิโนกลูตามีน (glutamine) และไลซีน (lysine) ทำให้โครงสร้างโปรตีนแข็งแรงขึ้น (ยุทธนา พิมลศิริผล, 2561)



ภาพที่ 4-17 อัตราการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลองของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน เปรียบเทียบกับขนมปังขาว (ตัวอย่างอ้างอิง) โดย TG0 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 0%, TG1 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 2.18%, TG2 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 4.35% และ TG3 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 6.52% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

ทั้งนี้มีข้อสังเกตว่าการลดค่า GI จากการเติมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสมักพบในอาหารที่มีข้าวสาลีเป็นส่วนผสม ซึ่งแป้งสาลีมีโปรตีนกลูเตนที่เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายห่อหุ้มเม็ดสตาร์ชไว้ และการเติมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสก็เป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างตาข่ายนั้น ซึ่งจะสามารถป้องกันสตาร์ชจากการย่อยของเอนไซม์ได้มากขึ้น ค่า GI จึงลดลง จากผลการวิเคราะห์ค่า GI ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน ดังตารางที่ 4-10 พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) โดยมีค่า GI อยู่ที่ 65.05 – 68.98 จัดอยู่ในกลุ่ม GI ปานกลาง โดยค่า GI ที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลที่ได้อธิบายไปข้างต้น จะเห็นได้ชัดว่าโปรตีนถั่วเหลืองที่ใส่ลงไปในส่วนผสมไม่ได้เกิดโครงสร้างตาข่ายหรือเมทริกซ์ไปหุ้มเม็ดสตาร์ช แต่โปรตีนอยู่แบบกระจัดกระจาย เป็นกลุ่มก้อนแทรกอยู่ระหว่างกลุ่มของเม็ดสตาร์ช จึงไม่สามารถต้านทานและจำกัดการเข้าถึงของเอนไซม์ที่ย่อยแป้งได้ การเติมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสที่แตกต่างกันจึงไม่มีผลทำให้ค่า GI ลดลง หรือแตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 4-12 ค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน

สูตร	GI^{ns}
TG0	66.68 ± 2.94
TG1	66.17 ± 1.81
TG2	65.05 ± 2.84
TG3	68.98 ± 3.95

^{ns} หมายถึง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

4.3.9 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

จากผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบโดยรวม ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4-11 พบว่า พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน ไม่มีผลต่อคะแนนความชอบทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม โดยมีคะแนนความชอบแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เนื่องจากเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสมีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่นและไม่มีรสชาติ เมื่อใส่ลงไปในเส้นพาสต้าจึงไม่ทำให้ไม่มีผลต่อคะแนนความชอบทางด้านดังกล่าว แต่มีผลต่อคะแนนความชอบทางด้านเนื้อสัมผัส ทำให้คะแนนความชอบทางด้านเนื้อสัมผัสแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG0, TG1 และ TG3 ได้รับคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสสูงที่สุด แต่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) โดยพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG2 ต่ำสุด เนื่องจากเส้นมีความเละมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่า hardness ดังตารางที่ 4-10 อย่างไรก็ตาม แม้ว่าคะแนนความชอบจะไม่แตกต่างกัน แต่จากตารางจะเห็นได้ว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG1 ก็ได้รับคะแนนความชอบทางด้านเนื้อสัมผัสสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็ง (hardness) ที่พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG1 มีค่าความแข็งสูงที่สุด ทั้งนี้ พบว่า ผู้ทดสอบชอบเส้นพาสต้าที่มีเนื้อสัมผัสที่แน่นที่สุดและไม่เละจนเกินไป

ตารางที่ 4-13 คะแนนการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน

สูตร	ลักษณะปรากฏ[ns]	สี[ns]	กลิ่น[ns]	เนื้อสัมผัส	รสชาติ[ns]	ความชอบโดยรวม[ns]
TG0	6.60 ± 1.33	6.80 ± 1.13	6.40 ± 1.22	6.27 ± 0.81[ab]	6.10 ± 1.16	6.57 ± 1.25
TG1	6.97 ± 1.19	7.00 ± 0.95	6.33 ± 1.32	6.77 ± 1.14[a]	6.63 ± 1.27	7.07 ± 1.01
TG2	6.60 ± 1.38	6.70 ± 1.18	6.33 ± 1.63	5.83 ± 1.80[b]	6.23 ± 1.68	6.62 ± 1.35
TG3	7.03 ± 1.33	7.13 ± 1.20	6.43 ± 1.36	6.10 ± 1.03[ab]	6.40 ± 1.22	6.60 ± 1.04

[a,b,…] หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

[ns] หมายถึง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

โดย TG0 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 0%, TG1 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 2.18%, TG2 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 4.35% และ TG3 คือ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 6.52% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

4.3.10 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

จากผลการวิเคราะห์พาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน ทั้งหมดดังที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า พาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG1 มีลักษณะเนื้อสัมผัสด้าน hardness สูงที่สุด และยังได้รับคะแนนความชอบทางด้านเนื้อสัมผัสสูงที่สุด จึงได้คัดเลือกพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG1 มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบกับพาสต้าแป้งสาลีทางการค้า (Semolina)

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 4-12 พบว่า พาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG1 มีปริมาณไขมัน เส้นใย เถ้า และคาร์โบไฮเดรตสูงกว่าพาสต้าแป้งสาลีทางการค้าเพียงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG1 มีปริมาณโปรตีนต่ำกว่าพาสต้าแป้งสาลีทางการค้า (Wheat) ค่อนข้างมาก ซึ่งโดยปกติแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าจะประกอบด้วยโปรตีนประมาณ 1.14-5.56% (Nimsung et al., 2007; Nednapis Vatanasuchart, Butsuwan, & Narasri, 2015) ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของกล้วยน้ำว้า และในการศึกษานี้ได้เติมประมาณโปรตีนถั่วเหลือง 8.70% ของแป้งกล้วยดิบ ลงในตัวอย่างเส้นพาสต้าทุก ๆ ทรีทเม้น และเมื่อคัดเลือกพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG1 มาวิเคราะห์องค์ทางเคมี พบว่า มีปริมาณโปรตีนเท่ากับ 7.65%

ตารางที่ 4-14 องค์ประกอบทางเคมีของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG1 เปรียบเทียบกับพาสต้าแป้งสาลีทางการค้า

ตัวอย่าง	% ของน้ำหนักตัวอย่าง					
	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน^{ns}	เส้นใย	เถ้า	คาร์โบไฮเดรต
Semolina	10.87 ± 0.03^{b}	12.56 ± 0.05^{a}	0.04 ± 0.01	0.13 ± 0.01^{b}	0.77 ± 0.01^{b}	75.76 ± 0.12^{b}
TG1	12.31 ± 0.10^{a}	7.65 ± 0.07^{b}	0.05 ± 0.02	0.31 ± 0.04^{a}	2.03 ± 0.03^{a}	77.96 ± 0.16^{a}

Semolina คือ พาสต้าแป้งสาลีทางการค้า TG 1 คือ พาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 2.18% ของแป้งกล้วยดิบ

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

1. จากการศึกษาผลของแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม ต่อคุณลักษณะของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ พบว่า แป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มีค่าสี การเปลี่ยนแปลงด้านความหนืด ดัชนีการละลายน้ำ ดัชนีการดูดซับน้ำ และค่าดัชนีไกลซีมิก (GI) ที่แตกต่างกัน ซึ่งค่า GI ของแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มีค่า GI 40.46-45.22 แต่เมื่อนำแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ไปทำเป็นเส้นพาสต้า และนำไปผ่านกระบวนการต้มให้สุก พบว่า คุณภาพของพาสต้าหลังการต้มและค่า GI มีผลไม่แตกต่างกัน โดยค่า GI ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับค่า GI ของแป้งกล้วยดิบ โดยมี GI 83.81-85.53 เมื่อทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่า พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม และพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า ได้รับคะแนนความชอบทางด้านประสาทสัมผัสสูงที่สุด จึงคัดเลือกสายพันธุ์กล้วยที่หาได้ง่ายและมีราคาถูกกว่า ได้แก่ แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าไปทดลองในขั้นตอนต่อไป

2. จากการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่แตกต่างกัน ต่อคุณลักษณะของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ พบว่า ชนิดและปริมาณโปรตีนมีผลทำให้ storage modulus (G') loss modulus (G") และ loss tangent (tan delta) เพิ่มขึ้น ปริมาณของโปรตีนไข่ขาวผงและเวย์โปรตีนทำให้ปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loos) ลดลง น้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (cooking yield) เพิ่มขึ้น และยังทำให้ค่าความแข็ง (hardness) ของเส้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่ชนิดของโปรตีนถั่วเหลืองส่งผลให้ cooking loos มากที่สุด และทำให้ cooking yield น้อยที่สุด แต่ปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองไม่มีผลต่อ cooking yield และ hardness และจากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้ confocal microscope นั้น ไม่พบการเกิดโครงข่ายของโปรตีนไปล้อมรอบเม็ดแป้ง มีเพียงแต่ก้อนโปรตีนเข้าไปแทรกอยู่ภายในกลุ่มของเม็ดแป้ง และในส่วนของค่าดัชนีไกลซีมิก (GI) พบว่าปริมาณของโปรตีนไม่มีผลต่อค่า GI ในขณะที่ชนิดของโปรตีน พบว่า พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมโปรตีนถั่วเหลืองส่งผลให้มีค่า GI ต่ำที่สุด ดังนั้นจึงเลือกพิจารณาชนิดของโปรตีนถั่วเหลืองเป็นหลัก โดยพบว่า พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมโปรตีนถั่วเหลืองในสูตร S2 มี cooking loss น้อยที่สุด และมีค่า hardness สูงที่สุด ดังนั้นจึงเลือกพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมโปรตีนถั่วเหลืองในสูตร S2 ไปทดลองในขั้นตอนต่อไป

3. จากการศึกษาผลของปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสที่แตกต่างกัน ต่อคุณลักษณะของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ พบว่า การเพิ่มปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสมีผลทำให้ค่า G', G" และ tan delta เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่า การเติมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสอาจทำให้เกิดการเชื่อมข้ามจากผลที่แสดงโดย SDS-PAGE แต่ไม่พบความแตกต่างของปริมาณของหมู่อะมิโนอิสระ คุณภาพของพาสต้าหลังการต้ม ค่าการยึดเกาะที่ผิวหน้า (adhesiveness) โครงสร้างทางจุลภาค และค่า GI แต่มีผลต่อ hardness โดยปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสที่เพิ่มขึ้นทำให้ hardness มีแนวโน้มลดลง โดยพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG0 และ TG1 มีค่า hardness สูงที่สุดและไม่แตกต่างกัน และจากการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่าปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสไม่มีผลต่อความชอบทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม แต่มีผลต่อความชอบทางด้านเนื้อสัมผัส โดยพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG0, TG1 และ TG3 มีคะแนนความชอบสูงที่สุดและไม่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตาม พาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG1 มีคะแนนความชอบสูงที่สุด อีกทั้งยังมีค่า hardness ที่สูงที่สุด จึงคัดเลือกพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG1 มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบกับพาสต้าแป้งสาลีทางการค้า พบว่า พาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในสูตร TG1 มีปริมาณโปรตีนต่ำกว่าพาสต้าแป้งสาลีทางการค้าค่อนข้างมาก แสดงให้เห็นว่าการเติมโปรตีนถั่วเหลืองอาจยังไม่เพียงพอ ซึ่งอาจส่งผลให้ไปจำกัดการทำงานของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสได้ จึงอาจทำให้ผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นมีผลไม่แตกต่างกัน

ข้อเสนอแนะ

1. การนำแป้งกล้วยดิบไปผ่านความร้อนทำให้สมบัติในการต้านทานการย่อยลดลง ดังนั้น หากต้องการสมบัติในการต้านทานการย่อยเพื่อลด GI ของอาหาร อาจมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์โดยใช้แป้งกล้วยที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน

2. อาจมีการเพิ่มปริมาณโปรตีนในส่วนผสมให้มากขึ้น เพื่อให้โปรตีนที่ใส่ลงไปสามารถไปห่อหุ้มเม็ดสตาร์ชเพื่อลดการย่อยให้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม อาจมีการศึกษาถึงปริมาณส่วนผสมหรือกระบวนการผลิตที่จะสามารถทำให้ใส่โปรตีนได้มากขึ้น

บรรณานุกรม

เกษตรโปรดักส์. (ม.ป.ป.). กล้วยน้ำว้าดิบ-สุก. เข้าถึงได้จาก https://khaikasetproduct.makewebeasy.com/product/557/กล้วยน้ำว้าดิบ-สุก-cultivated-banana

เบญจมาศ ศิลาย้อย. (2558). กล้วย (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เพ็ญจันทร์ สุทธานุกูล. (2558a). โครงการวิจัยคัดเลือกพันธุ์และพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตกล้วยเพื่อการบริโภคสด เพิ่มมูลค่าเป็น ผลิตภัณฑ์และการนำสารสำคัญจากกล้วยไปใช้ประโยชน์. กรมวิชาการเกษตร,

เพ็ญจันทร์ สุทธานุกูล. (2558b). ชุดโครงการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตกล้วยเศรษฐกิจเพื่อเพิ่มปริมาณ ผลผลิตคุณภาพ คุณภาพผลผลิตและเพิ่มมูลค่าทางการตลาดกล้วย. กรมวิชาการเษตร.

เลอลักษณ์ เสถียรรัตน์, และไอลดา ชูประสิทธิ์. (2559). การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไส้กรอกไข่ขาวด้วยการผสมสันในไก่. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบัน ครั้งที่ *4* (233-238).

ไฉน ตาคำแสน, และนพพล เล็กสวัสดิ์. (ม.ป.ป.). เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส. สาขาวิชาวิศวกรรมกระบวนการอาหาร สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร, คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

กนกกานต์ วีระกุล, จิราภรณ์ สอดจิตร์, และเหรียญทอง สิงห์จานุสงค์. (2558). การสกัดใยอาหารจากเปลือกกล้วยน้ำว้าโดยใช้เอนไซม์และการนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์โยเกิร์ต. *SDU Research Journal, 8*(3).

กล้าณรงค์ ศรีรอด, และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. (2546). เทคโนโลยีของแป้ง (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์, และอโนชา สุขสมบูรณ์. (2557). ผลของการทดแทนแป้งถั่วดำ ต่อคุณภาพของพาสต้าข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 45*(2), 541-544.

กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์, นภาลัย ประสิทธิ์เขตร์กิจ, และอโนชา สุขสมบูรณ์. (2554). ผลของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสต่อคุณภาพของบะหมี่เสริมใบมะรุมผง. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 42*(2), 497-500.

กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์, อโนชา สุขสมบูรณ์, และอาภัสรา แสงนาค. (2560). การพัฒนาผลิตภัณฑ์พาสต้าข้าวเจ้าเพื่อสุขภาพเสริมแป้งถั่ว. รายงานวิจัย, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.

กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์, อารีรัตน์ ทองสุทธิ, พรอนงค์ ตันติวรัตนถิกุล, และอโนชา สุขสมบูรณ์. (2561). ผลของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสต่อคุณภาพของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปแบบไม่ทอดเสริมสาหร่ายเกลียวทอง. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, *49*(2), 69-72.

ขจีรัตน์ ระรื่นรมย์. (2548). ผลของส่วนผสมต่อโครงสร้างทางกายภาพและพันธะเคมีของเนื้อเทียมโปรตีนถั่วเหลือง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ขนิษฐา หมวดเอียด. (2561). การพัฒนาผลิตภัณฑ์เส้นพาสต้าปราศจากกลูเตนอบแห้งจากแป้งข้าวสังข์หยด. วารสารวิจัยราชมงคลกรุงเทพ, *12*(2), 91-102.

ขวัญแก้ว แซ่เอือง. (2554). สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชที่แยกได้จากเนื้อในเมล็ดมะม่วงของมะม่วง (*Mangifera indica L.)* พันธุ์ที่ปลูกเป็นหลักในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

คณาจารย์ภาควิชาพืชสวน. (2559). การปลูกเลี้ยงดูกล้วยน้ำว้าและกล้วยไข่. คณะเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คนรักเกษตร. (ม.ป.ป.). หนุนเกษตรกรปลูกกล้วยหอมส่งออก. เข้าถึงได้จาก http://it.cmtc.ac.th/std2561/web/it1a/group3/menu1/3-1.html

จิรนาถ ทิพย์รักษา, และสุภักษร นุดวงแก้ว. (2551). พาสต้าเสริมเส้นใยจากแป้งถั่วแดงหลวง. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร, *4*(1), 16-22.

จิรนาถ บุญคง, ทิพวรรณ บุญมี, และพัชราวรรณ เรือนแก้ว. (2557). การใช้แป้งกล้วยหอมทองดิบที่มีสมบัติต้านทานการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในผลิตภัณฑ์พาสต้า. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร, *10*(1), 19-29.

ชนิดา ครูส่ง, และอรสา สุริยาพันธ์. (2553). ผลของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่อคุณภาพของขนมเมล็ดขนุนกวน. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, *41*(3/1), 253-256.

ดารารัตน์ นาคละออ, อาภัสรา แสงนาค, และกุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์. (2554). การปรับปรุงคุณภาพของแป้งเมล็ดขนุนโดยวิธีการพรีเจลาทิไนซ์. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, *16*, 12-21.

ทิพย์วลี จุลมณีลิก, และศศิธร คงเรือง. (2562). สมบัติเชิงหน้าที่และการประยุกต์ใช้โปรตีนไข่ขาวไฮโดรไลเสต. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม, *14*(1), 69-87.

นันทพร โพธิวุฒิคุณ. (2557). สมบัติ เสถียรภาพ และสภาพสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเสริมเส้นใยเซลลูโลส. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปาริดา จันทร์สว่าง. (2020). การศึกษาศักยภาพการวิเคราะห์สมบัติวิสโคอิลาสติกในตัวอย่างอาหารด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. วารสารวิชาการ ที่ประชุมสภาข้าราชการ พนักงาน และลูกจ้าง มหาวิทยาลัยแห่งประเทศไทย, *9*(2), 102-111.

ปิยพร ศิริคง. (2559). ผลของการใช้แป้งพรีเจลาติไนซ์จากถั่วเขียวและไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตนที่ทำจากแป้งข้าวเจ้า. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, มหาวิทยาลัยนเรศวร.

พรรณทิพา เจริญไทยกิจ. (2555). การพัฒนาขนมปังจากแป้งสาลีผสมแป้งข้าวเหนียว. รายงานวิจัย, คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

พีระศักดิ์ ฉายประสาท. (ม.ป.ป.). การผลิตกล้วยน้ำว้าและการแปรรูป. เข้าถึงได้จาก http://www.agi.nu.ac.th/postharvest/downloads/upload_file/281118140156_Banana.pdf

พืชเกษตร. (2014). กล้วยน้ำว้า สรรพคุณ และการปลูกกล้วยน้ำว้า. เข้าถึงได้จาก https://puechkaset.com/กล้วยน้ำว้า

พืชเกษตร. (2015). กล้วยหอม และการปลูกกล้วยหอม. เข้าถึงได้จาก https://puechkaset.com/กล้วยหอม

ภัควัฒน์ เดชชีวะ, และอรอนงค์ นัยวิกุล. (2559). ผลของโปรตีนไข่ขาวผงต่อสมบัติทางเนื้อสัมผัส คุณภาพการหุงต้ม และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของสปาเกตตีแป้งข้าวปราศจากกลูเทน. วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์, *11*(2), 37-46.

มาโนชญ์ สุธีรวัฒนานนท์. (2558). การเพิ่มปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในผลิตภัณฑ์พาสต้าข้าวเจ้า. รายงานการวิจัย, สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร, สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ยุทธนา พิมลศิริผล. (2561). การลดค่าดัชนีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์อาหาร (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: แดเน็กซ์อินเตอร์คอร์ปอเรชั่น.

รักเกษตร. (2559). วิธีการปลูกกล้วยหอมทองเพื่อการค้า. เข้าถึงได้จาก https://www.rakkaset.com/2016/09/blog-post_32.html

รัศมีจันทร์ เกงขุนทด, พัชรี ทับทิมศรี, และแดนชัย เครื่องเงิน. (ม.ป.ป.). การผลิตกล้วยน้ำว้าอบด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ครั้งที่ 3.

วิจิตรา เหลียวตระกูล, วชิรญา เหลียวตระกูล, และวรรภา วงศ์แสงธรรม. (2563). ผลของระดับความสุกและสภาวะการทำแห้งต่อคุณภาพของแป้งกล้วยหอมเขียวและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังจากแป้งกล้วยหอมเขียว. รายงานวิจัย, คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร.

วนัสนันท์ ธิบูรณ์บุญ. (2555). การผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวที่มีปริมาณแป้งทนย่อยสูงโดยใช้แป้งกล้วยดิบ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

วราภรณ์ กาพันสิทธิ์, และนพพล เล็กสวัสดิ์. (ม.ป.ป.). เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส. สาขาวิชาวิศวกรรมกระบวนการอาหาร สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร, คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วิภา โรจนะเมธากุล. (2545). การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหารเส้นเพื่อการควบคุมคุณภาพ. วารสารอาหาร, *32*(2), 86-91.

สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. (ม.ป.ป.). พันธุ์กล้วยในประเทศไทย. เข้าถึงได้จาก http://saranukromthai.or.th/sub/book/book.php?book=30&chap=6&page=t30-6-infodetail05.html

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรเขต 1. (2560). เดินหน้า ดันกล้วยไทย บุกตลาดโลก. เข้าถึงได้จาก https://www.chiangmainews.co.th/page/archives/633777/

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. (ม.ป.ป.). คู่มือการแปรรูปผลิตภัณฑ์กล้วย. เข้าถึงได้จาก https://i4biz.nrct.go.th/download/ebook/10036.pdf

สุใจ ทานิสุด. (2562). การเตรียมและตรวจสอบเอกลักษณ์อนุภาคผสมระหว่างเคราตินและไข่ขาวระดับไมโคร ด้วยวิธีการทำให้เกิดอิมัลชันโดยการแพร่ของตัวทำละลาย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีศึกษา, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

สุนทรีย์ แสงสีโสต. (2543). กล้วย : ผลไม้สารพัดประโยชน์. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, *48*(153), 3-5.

หทัยชนก ศรีประไพ, ฉัตรชนก บุญไชย, และยศสินี หัวดง. (2561). การพัฒนาผลิตภัณฑ์พาสต้าสดจากแป้งข้าวกล้อง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, *7*(1), 58-69.

อรอนงค์ นัยวิกุล. (2532). ข้าวสาลี. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อริญา ลาภโคกสูง. (2555). ผลของปริมาณอะมิโลสและโครงสร้างอะมิโลเพคตินในสตาร์ชข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยของเอนไซม์ชนิดที่ *3.* วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อัจฉริยา สองชัย. (2551). การผลิตน้ำเสาวรส *Passiflora edulis, var. flavicarpa* เสริมเวย์โปรตีนเข้มข้น. สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร, วิทยานิพยธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Alkarkhi, A. F. M., Ramli, S. b., Yong, Y. S., & Easa, A. M. (2011). Comparing physicochemical properties of banana pulp and peel flours prepared from green and ripe fruits. *Food Chemistry, 129*(2), 312-318. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.060

American Association of Cereal Chemist. (AACC). (2000). *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemist*. Minnesota: American Association of Cereal Chemists.

BBM Magazine. (2021). Annual pasta consumption increased by 1 million tons. Retrieved from https://magazinebbm.com/blog/annual-pasta-consumption-increased-by-1-million-tons-1851

Bezerra, C., Rodrigues, A., Amante, E., & Silva, L. (2013). Nutritional potential of green banana flour obtained by drying in spouted bed. *Revista Brasileira de Fruticultura, 35*(4), 1140-1146. doi:10.1590/S0100-29452013000400025

Bi, Y., Zhang, Y., Jiang, H., Hong, Y., Gu, Z., Cheng, L., Li, Z., & Li, C. (2017). Molecular structure and digestibility of banana flour and starch. *Food Hydrocolloids, 72*, 219-227. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.06.003

Campuzano, A., Rosell, C. M., & Cornejo, F. (2018). Physicochemical and nutritional characteristics of banana flour during ripening. *Food Chemistry, 256*, 11-17. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.113

Cao, Z., Liu, Y., Zhu, H., Li, Y., Xiao, Q., & Yi, C. (2021). Effect of Soy Protein Isolate on Textural Properties, Cooking Properties and Flavor of Whole-Grain Flat Rice Noodles. *Foods, 10*, 1085. doi:10.3390/foods10051085

Charoenthaikij, P., Prommin, A., Suratananun, A., Itthisophonkul, T., Naknaen, P., & Phongpa-ngan, P. (2018). Physicochemical Properties and Sensory Quality of Gluten-free Brown Rice Pasta Enriched with Egg White Protein. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 28*(3), 627-638. doi:10.14416/j.kmutnb.2018.04.004

Detchewa, P., & Naivikul, O. (2020). Effect of egg white protein powder on the textural properties, cooking qualities and sensory evaluation of gluten-free rice spaghetti. *VRU Research and Development Journal Humanities and Social Science, 11*(2), 37-46.

Eagappan, K., Mathew, M. M., & Sasikumar, S. (2015). Assessment of glycaemic index and glycaemic load in selected banana varieties. *International Journal of Research in Health Sciences, 3*(1), 89-93.

Eggleston, G., Swennen, R., & Akoni, S. (1992). Physicochemical studies on starches isolated from plantain cultivars, plantain hybrids and cooking bananas. *Starch - Stärke, 44*(4), 121-128. doi:10.1002/star.19920440402

Fernandes, S. O., & Bonaldo, S. M. (2011). Antracnose (Colletotrichum musae) control and conservation in post-harvest dwarf banana in northern mato grosso. *Enciclopédia Biosfera, 7*(13), 237.

Fotgcren. (2019). *Transglutaminase main reaction: crosslinking or transamidation*. Retrieved from https://www.youtube.com/watch?v=8eKqvL2myz0

Frost, G., Leeds, A. A., Doré, C. J., Madeiros, S., Brading, S., & Dornhorst, A. (1999). Glycaemic index as a determinant of serum HDL-cholesterol concentration. *THE LANCET, 353*(9158), 1045-1048. doi:10.1016/s0140-6736(98)07164-5

Fujiwara, N. (2014). *Quality and Estimated Glycemic Index of Bread Fortified with Soy Protein Isolate.* Master of science Cereal Science, North Dakota State University.

Gan, C.-Y., Ong, W.-H., Wong, L.-M., & Easa, A. M. (2009). Effects of ribose, microbial transglutaminase and soy protein isolate on physical properties and in-vitro starch digestibility of yellow noodles. *LWT - Food Science and Technology, 42*(1), 174-179. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.05.004

George, W., & Latimer, J. (2016). *Official methods of analysis of AOAC International (1)*. Rockville, MD: AOAC International.

Giese, J. (1992). Pasta: New twists on an old product. *Food Technology, 46*, 118-126.

Goñi, I., Garcia-Alonso, A., & Saura-Calixto, F. (1997). A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutrition Research, 17*(3), 427-437. doi:https://doi.org/10.1016/S0271-5317(97)00010-9

Gopalakrishnan, J., Menon, R., Padmaja, G., Sajeev, M. S., & Moorthy, S. N. (2011). Nutritional and Functional Characteristics of Protein-Fortified Pasta from Sweet Potato. *Food and Nutrition Sciences, 02*, 944-955. doi:10.4236/fns.2011.29129

Hatekar, M. S., & Ghodke, S. K. (2009). Glycemic index:An overview. *Agro Food Industry Hi Tech, 20*(2), 30-32.

Huang, W., Li, L., Wang, F., Wan, J., Tilley, M., Ren, C., & Wu, S. (2010). Effects of transglutaminase on the rheological and Mixolab thermomechanical characteristics of oat dough. *Food Chemistry, 121*(4), 934-939. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.01.008

Jay-lin, J. (n.d.). *Structures and health benefits of resistant starch.*powerpoint.

Kamchansuppasin, A., Sirichakwal, P. P., Bunprakong, L., Yamborisut, U., Kongkachuichai, R., Kriengsinyos, W., & Nounmusig, J. (2021). Glycaemic index and glycaemic load of commonly consumed Thai fruits. *International Food Research Journal, 28*(4), 788-794.

Khamsucharit, P., Laohaphatanalert, K., Gavinlertvatana, P., Sriroth, K., & Sangseethong, K. (2018). Characterization of pectin extracted from banana peels of different varieties. *Food Science and Biotechnology, 27*(3), 623-629. doi:10.1007/s10068-017-0302-0

Kim, J. H. J. (2015). *Examination of the gelling properties of canola and soy protein isolates.* Master of Science Thesis, Department of Food and Bioproduct Sciences, University of Saskatchewan. Khoozani, A. A., Bekhit, A. E.-D. A., & Birch, J. (2019). Effects of different drying conditions on the starch content, thermal properties and some of the physicochemical parameters of whole green banana flour. *International Journal of Biological Macromolecules, 130*, 938-946. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.010

Kim, Y., Kee, J. I., Lee, S., & Yoo, S.-H. (2014). Quality improvement of rice noodle restructured with rice protein isolate and transglutaminase. *Food Chemistry, 145*, 409-416. doi:10.1016/j.foodchem.2013.08.078

Kunyanee, K., & Luangsakul, N. (2020). The effects of ultrasound – assisted recrystallization followed by chilling to produce the lower glycemic index of rice with different amylose content. *Food Chemistry, 323*, 126843. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126843

Lorenzen, P. C., & Schrader, K. (2006). A comparative study of the gelation properties of whey protein concentrate and whey protein isolate. *Lait, 86*, 259-271.

Marachai, W., Kwangpan, S., & Phimolsiripol, Y. (2013). Glycemic index and certain qualities of macaroni containing lablab flour (Dolichos lablab). *Food and Applied Bioscience Journal, 1*(3), 146-159.

Marco, C., & Rosell, C. M. (2008). Effect of different protein isolates and transglutaminase on rice flour properties. *Journal of Food Engineering, 84*(1), 132-139. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.05.003

Marimuthu, M., Sundaram, U., & Gurumoorthi, P. (2013). X-ray Diffraction and Starch Analysis of Nano Sized Seed Powder of Velvet Bean (Mucuna pruriens). *Indo American Journal of Pharm Research, 3*(2), 4319-4329.

Messia, M. C., Cuomo, F., Falasca, L., Trivisonno, M. C., De Arcangelis, E., & Marconi, E. (2021). Nutritional and Technological Quality of High Protein Pasta. *Foods, 10*(3), 589.

McCleary, B., McNally, M., Rossiter, P., Aman, P., Amrein, T., Arnouts, S., Arrigoni, E., Bauer, L., Bavor, C., Brunt, K., Bryant, R., Bureau, S., Camire, M., Champ, M., Chen, Q., Chin, M. L., Colilla, W., Coppin, J., Costa, D., & Zheng, T. (2002). Measurement of Resistant Starch by Enzymatic Digestion in Starch and Selected Plant Materials: Collaborative Study. *Journal of AOAC International, 85*, 1103-1111. doi:10.1093/jaoac/85.5.1103

Menon, R., Padmaja, G., Jyothi, A. N., Asha, V., & Sajeev, M. S. (2016). Gluten-free starch noodles from sweet potato with reduced starch digestibility and enhanced protein content. *Journal of Food Science and Technology, 53*. doi:10.1007/s13197-016-2330-9

Moongngarm, A. (2013). Chemical compositions and resistant starch content in starchy foods. *American Journal of Agricultural and Biological Science, 8*, 107-113. doi:10.3844/ajabssp.2013

Murphy, P. A. (2008). 8 - Soybean Proteins. In L. A. Johnson, P. J. White, & R. Galloway (Eds.), *Soybeans* (pp. 229-267): AOCS Press.Ndife, J., Udobi, C., & Amaechi, N. (2010). Effect of oven drying on the functional and nutritional properties of whole egg and its components. *African Journal of Food Science, 4*(5), 254-257.

News Italian food. (2021). World Pasta Day, consumers going crazy for Italian pasta. Retrieved from https://news.italianfood.net/2021/10/21/the-world-is-increasingly-hungry-for-pasta/

Nimsung, P., Thongngam, M., & Naivikul, O. (2007). Compositions, Morphological and Thermal Properties of Green Banana Flour and Starch. *Kasetsart Journal (Natural Science), 41*, 324-330.

Pagani, M. A., Gallant, D. J., Bouchet, B., Resmini, P. (1986). Ultrastructure of Cooked Spaghetti. *Food Microstructure, 5*(1), 111-129.

Pereira, A., & Maraschin, M. (2015). Banana (Musa spp) from peel to pulp: ethnopharmacology, source of bioactive compounds and its relevance for human health. *Journal of ethnopharmacology, 160*, 149-163. doi:10.1016/j.jep.2014.11.008

Phongthai, S., D'Amico, S., Schoenlechner, R., Homthawornchoo, W., & Rawdkuen, S. (2017). Effects of protein enrichment on the properties of rice flour based gluten-free pasta. *LWT - Food Science and Technology, 80*. doi:10.1016/j.lwt.2017.02.044

Pillay, M., Tenkouano, A., Ude, G., & Ortiz, R. (2004). *Molecular characterization of genomes in Musa and its applications*. Nigeria: Science Publishers.

Qamar, S., & Shaikh, A. (2018). Therapeutic potentials and compositional changes of valuable compounds from banana- A review. *Trends in Food Science & Technology, 79*, 1-9. doi:https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.016

Ramli, S., Alkarkhi, A., Yeoh, S. Y., Min-Tze, L., & Easa, A. (2009). Effect of banana pulp and peel flour on physicochemical properties and in vitio starch digestibility of yellow alkaline noodles. *International journal of food sciences and nutrition, 60*(4), 326-340. doi:10.1080/09637480903183503

Rodríguez-Ambriz, S. L., Islas-Hernández, J. J., Agama-Acevedo, E., Tovar, J., & Bello-Pérez, L. A. (2008). Characterization of a fibre-rich powder prepared by liquefaction of unripe banana flour. *Food Chemistry, 107*(4), 1515-1521. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.10.007

Romero, H. M., Santra, D., Rose, D., & Zhang, Y. (2017). Dough rheological properties and texture of gluten-free pasta based on proso millet flour. *Journal of Cereal Science, 74*, 238-243. doi:https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.02.014

Ruzengwe, F. M., Amonsou, E. O., & Kudanga, T. (2020). Transglutaminase-mediated crosslinking of Bambara groundnut protein hydrogels: Implications on rheological, textural and

microstructural properties. *Food Research International, 137*, 109734. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109734

Srikaeo, K., Mingyai, S., & Sopade, P. (2011). Physicochemical properties, resistant starch content and enzymatic digestibility of unripe banana, edible canna, taro flours and their rice noodle products. *International Journal of Food Science & Technology, 46*, 2111-2117. doi:10.1111/j.1365-2621.2011.02724.x

Ssonko, U. L., & Muranga, F. (2017). Partial characterization of starches from major banana (matooke) cultivars grown in Uganda. *Food Science & Nutrition, 5*, 1145-1153. doi:10.1002/fsn3.505

Tomi**Ć**, J., Torbica, A., & Belovi**Ć**, M. (2020). Effect of non-gluten proteins and transglutaminase on dough rheological properties and quality of bread based on millet (Panicum miliaceum) flour. *LWT, 118*, 108852. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108852

Utrilla-Coello, R. G., Rodríguez-Huezo, M. E., Carrillo-Navas, H., Hernández-Jaimes, C., Vernon-Carter, E. J., Alvarez-Ramirez, J. (2014). In vitro digestibility, physicochemical, thermal and rheological properties of banana starches. *Carbohydrate polymers, 101*, 154-162. doi:https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.09.019

Vatanasuchart, N., Butsuwan, P., & Narasri, W. (2015). Nutritional composition, in vitro starch digestibility and estimated glycemic index of three varieties of 'Kluai Namwa' banana (Musa sapientum L.) and its products. *Maejo International Journal of Science and Technology, 9*(2), 265-277. doi:10.14456/mijst.2015.19

Vatanasuchart, N., Niyomwit, B., & Wongkrajang, K. (2012). Resistant starch content, in vitro starch digestibility and physico-chemical properties of flour and starch from Thai bananas. *Maejo International Journal of Science and Technology, 6*(2), 259-271.

Wee, M. S. M., & Henry, C. J. (2019). Effects of Transglutaminase on the Protein Network and In Vitro Starch Digestibility of Asian Wheat Noodles. *Foods, 8*(12). doi:10.3390/foods8120607

Yangılar, F. (2015). Effects of Green Banana Flour on the Physical, Chemical and Sensory Properties of Ice Cream. *Food technology and biotechnology, 53*(3), 315-323. doi:10.17113/ftb.53.03.15.3851

Zandonadi, R. P., Botelho, R. B., Gandolfi, L., Ginani, J. S., Montenegro, F. M., & Pratesi, R. (2012). Green banana pasta: an alternative for gluten-free diets. *J Acad Nutr Diet, 112*(7), 1068-1072. doi:10.1016/j.jand.2012.04.002

Zhang, S., Zhang, Z., Vardhanabhuti, B. (2014). Effect of charge density of polysaccharides on self-assembled intragastric gelation of whey protein/polysaccharide under simulated gastric conditions. *Food Funct, 5*(8), 1829-1838. doi:10.1039/c4fo00019f

Zheng, Z., Stanley, R., Gidley, M., & Dhital, S. (2015). Structural properties and digestion of green banana flour as a functional ingredient in pasta. *Food Funct., 7*. doi:10.1039/C5FO01156F

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ก-1 การวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิก โดยใช้ชุด Resistant starch kit ของบริษัท Megazyme (Goñi et al., 1997; Kunyanee & Luangsakul, 2020; McCleary et al., 2002)

การเตรียมสาร

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) 4 โมลาร์

ชั่ง NaOH 160 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปราศจากไอออน (deionized water, DI) จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ DI

2. สารละลายโซเดียมมาลิเอตบัฟเฟอร์ (sodium maleate buffer) pH 6.0

ชั่ง maleic acid 23.2 กรัม ละลายในน้ำ DI 1600 มิลลิลิตร ปรับ pH 6.0 ด้วย NaOH ความเข้มข้น 4 โมลาร์ แล้วเติม calcium chloride dehydrate ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) 1.47 กรัม และ sodium azide 0.4 กรัม คนละลายให้เข้ากัน จากกนั้นปรับปริมาตรเป็น 2000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ DI
การเก็บรักษา: เก็บได้ 12 เดือน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส)

3. สารละลายโซเดียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ (sodium acetate buffer) pH 4.5

เติม glacial acetic acid ความเข้มข้น 99% 5.8 มิลลิลิตร ลงในน้ำ DI 900 มิลลิลิตร ปรับ pH 4.5 ด้วย NaOH ความเข้มข้น 4 โมลาร์ จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ DI
การเก็บรักษา: เก็บได้ 2 เดือน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

4. equeous ethanol 50% v/v

ตวง ethanol ความเข้มข้น 99% 505 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ DI แล้วเก็บในขวดที่ปิดฝาสนิท
การเก็บรักษา: เก็บได้มากกว่า 2 ปี ที่อุณหภูมิห้อง

5. dilute amyloglucosidase (300 U/mL)

ดูดสารละลาย amyloglucosidase concentrated 2 มิลลิลิตร ลงในสารละลาย sodium maleate buffer (pH 6.0) 20 มิลลิลิตร เก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส
การเก็บรักษา: ทนต่อการ freeze/thaw ซ้ำ เก็บได้ 5 ปี ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส

6. GOPOD reagent

เจือจาง GOPOD reagent buffer ด้วยน้ำ DI และปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร จากนั้นแบ่งสารละลายเจือจาง GOPOD 20 มิลลิลิตร ลงไปผสมกับ GOPOD reagent enzyme เขย่าให้เข้ากัน แล้วเทกลับไปยังสารละลายเจือจาง GOPOD เขย่าให้เข้ากัน เก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส
การเก็บรักษา: เก็บได้ 3 เดือน ที่อุณหภูมิ 2-5 องศาเซลเซียส หรือมากกว่า 12 เดือน ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ห้าม freeze/thaw เกิน 1 ครั้ง

7. pancreatic α-amylase (เตรียมและใช้ทันที)

ชั่ง pancreatic α-amylase 1 กรัม ลงในสารละลาย sodium maleate buffer (pH 6.0) 100 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน 5 นาที จากนั้นเติม dilute Amyloglucosidase 1.0 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน แล้วนำไป centrifuge ที่ 3000 rpm (รอบต่อนาที) หรือ มากว่า 1500 g เป็นเวลา 10 นาที แล้วเทส่วนใส่ลงในบีกเกอร์

วิธีการวิเคราะห์

นำพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล จากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม ที่ต้มสุกแล้วมาบดด้วยตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร (เลียนแบบการบดเคี้ยวอาหาร) จากนั้นชั่งตัวอย่างที่บดแล้วประมาณ 0.5 กรัม (กรณีตัวอย่างมีความชื้น 60-80% ชั่ง 0.5 กรัม แต่หากตัวอย่างมีความชื้นต่ำกว่า 60% ชั่ง 0.1 กรัม) ใส่ในหลอดทดลองที่มีฝาปิดหรือ centrifuge tube แล้วนำมาย่อยด้วยเอนไซม์ pancreatic α-amylase (10 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) 4 มิลลิลิตร ปิดฝาให้สนิทแล้วเขย่าด้วยเครื่อง vortex จากนั้นนำไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (shaking water bath) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดให้นำหลอดทดลองออกมาจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ แล้วเติม ethanol (99% v/v) 4 มิลลิลิตร ทันที นำไป centrifuge ที่ความเร็วรอบ 3000 rpm เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนใสด้านบนลงในขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติม ethanol (50% v/v) 8 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง แล้วนำไป centrifuge อีกครั้งที่ 3000 rpm เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนใสที่ได้ลงในขวดปรับปริมาตรเดิม แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วย sodium acetate buffer (pH 4.5) จากนั้นดูดสารละลาย 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง และเติมสารละลาย dilute amyloglucosidase (300 U/mL) ปริมาตร 10 ไมโครลิตร แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเติม GOPOD reagent ปริมาตร 3 มิลลิลิตร แล้วนำไปบ่มต่ออีกที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร โดยใช้ blank เป็นสารละลาย sodium acetate buffer (pH 4.5) ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ GOPOD reagent ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และคำนวณหาปริมาณการย่อยของสตาร์ช

การวัดค่ากลูโคสมาตรฐาน (D-glucose standard) เตรียมโดยผสม D-glucose 0.1 มิลลิลิตร กับ GOPOD reagent 3 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

การคำนวณ

หาปริมาณการย่อยของสตาร์ช ดังสมการ

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

โดย ΔE คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

F คือ การเปลี่ยนหน่วยค่าการดูดกลืนแสงเป็น μg คำนวณได้จาก F = 100/ค่าการดูดกลืนแสงของกลูโคสมาตรฐาน

W คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (mg) คำนวณได้จาก W = น้ำหนักตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ ×[(100 – ความชื้น)/100]

หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการย่อยของสตาร์ชกับเวลา (30-180 นาที) โดยแสดงผลเป็นกราฟ จะได้ค่า C_∞, C และ t เพื่อหาค่า k ดังสมการ

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

โดย C คือ ร้อยละของสตาร์ชที่ถูกย่อยที่เวลา t

C_∞ คือ ร้อยละของสตาร์ชที่ถูกย่อยที่ 180 นาที

k คือ ค่าคงที่ไคเนติค (min^{-1})

t คือ เวลาในการย่อย (min)

หาพื้นที่ใต้กราฟ (area under the curve, AUC) คำนวณได้จาก

$$AUC = C_\infty (t_f - t_0) - (C_\infty \div k)(1 - \exp(-k (t_f - t_0)))$$

โดย C_∞ คือ ค่าสมดุลของปริมาณการย่อยของสตาร์ช

t_f คือ เวลาสุดท้าย (180 นาที)

t_0 คือ เวลาเริ่มต้น (0 นาที)

k คือ ค่าคงที่ไคเนติค (min^{-1})

หาค่าดัชนีการย่อย (hydrolysis index, HI) คำนวณได้จาก

$$HI = (AUC\ sample / AUC\ reference) \times 100$$

หมายเหตุ reference คือ ขนมปังขาว

หาค่าดัชนีไกลซีมิก (GI) คำนวณได้จาก (Goñi *et al*., 1997)

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

ก-2 การวิเคราะห์รูปแบบของโปรตีนด้วยวิธี sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) ดัดแปลงจาก (Y. Kim et al., 2014)

วัสดุและอุปกรณ์

1. ชุดอุปกรณ์ในการเตรียมเจล (mini-protein 3 system components)
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (power supply)
3. เครื่องแก้วต่าง ๆ เช่น บีกเกอร์ กรวยกรอง ขวดรูปชมพู่ เป็นต้น
4. กระดาษกรอง
5. เครื่องชั่ง
6. เครื่องปั่น

สารเคมี

1. ทริส (ไฮดรอกซีเมทิล) อะมิโนมีเทน (tris-hydroxymethyl-aminomethane)
2. กรดไฮโดรคลอริค (hydrochloric acid, HCl 37%)
3. โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulphate, SDS)
4. เบต้า-เมอร์แคปโตเอทานอล (β -mercaptoethanol)
5. กลีเซอรอล (glycerol)
6. โบรโมฟีนอลบลู 1% (bromophenol blue 1%)
7. เมทานอล (methanol)
8. กรดแกลเชียลอะซิติก (glacial acetic acid)
9. โครแมสซีบิลเลียนบลู อาร์-250 (coomassie brilliant blue R-250)
10. ไกลซีน (glycine)
11. แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (ammonium persulphate)
12. สารละลายอะคริลาไมด์ (acrylamide solution 30%)
13. TEMED (tetramethylethylenediamine)
14. โปรตีนมาตรฐาน (protein marker) น้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 16-250 กิโลดาลตัน

ขั้นตอนการเตรียมสารเคมี

1. ทริส-ไฮโดรคลอริค (tris- hydrochloric acid, tris-HCl) 1.5 โมลาร์ (pH 8.8)

ชั่ง tris-hydroxymethyl-aminomethane 18.15 กรัม ละลายในน้ำ DI 50 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ปรับ pH 8.0 ด้วย HCl 1 นอร์มอล และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ DI

2. ทริส-ไฮโดรคลอริค (tris-HCl) 0.5 โมลาร์ (pH 6.8)

ชั่ง tris-hydroxymethyl-aminomethane 3.00 กรัม ละลายในน้ำ DI 40 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ปรับ pH 6.8 ด้วย HCl 1 นอร์มอล และปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ DI

3. สารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulphate, SDS) 10%

   ชั่ง SDS 10 กรัม ละลายในน้ำ DI 100 มิลลิลิตร

4. staining solution

methanol	400	มิลลิลิตร
glacial acetic acid	100	มิลลิลิตร

   ปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ DI แล้วเติม coosmassie brilliant blue R-250 0.1%

5. destaining solution

methanol	400	มิลลิลิตร
glacial acetic acid	100	มิลลิลิตร

   ปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ DI

6. electrode buffer หรือ tank buffer

tris-hydroxymethyl-aminomethane	3.00	กรัม
glycine	1.44	กรัม
SDS 10%	1.00	กรัม
น้ำ DI	800	มิลลิลิตร

   ปรับ pH เป็น 8.3 จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ DI

7. สารละลาย ammonium persulphate 10% (เตรียมก่อนทำการทดลอง)

ammonium persulphate	0.1	กรัม
ละลายในน้ำ DI	1	มิลลิลิตร

8. reducing sample buffer หรือ sample loading buffer

tris-HCl 0.5 โมลาร์ (pH 6.8)	0.5	มิลลิลิตร
SDS 10%	0.9	มิลลิลิตร
β –mercaptoethanol	0.1	มิลลิลิตร
glycerol	1.0	มิลลิลิตร
bromophenol blue 1%	2.5	มิลลิลิตร

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. การเตรียมสารตัวอย่าง

นำตัวอย่างเส้นพาสต้าหลังการอบแห้งที่ผ่านการบดแล้วมา 0.5 กรัม เติมน้ำ DI 5 มิลลิลิตร tris-HCl 0.5โมลาร์ (pH 6.8) จำนวน 0.5 มิลลิลิตร สารละลาย SDS 10% จำนวน 0.9 มิลลิลิตร β –mercaptoethanol จำนวน 0.1 มิลลิลิตร (เติมเฉพาะในสภาวะรีดิงซิง ในสภาวะนอน-รีดิวซิงจะไม่เติม β –mercaptoethanol) glycerol จำนวน 1 มิลลิลิตร และ bromophenol blue 1% จำนวน 2.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำสารละลายไป centrifuge 3000 rpm เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นดูดสารละลายที่เป็นส่วนใส 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง แล้วนำตัวอย่างไปต้มในน้ำเดือด เป็นเวลา 1 นาที (เฉพาะในสภาวะรีดิวซิง) จากนั้นนำตัวอย่างทั้งในสภาวะรีดิวซิงและนอน-รีดิงซิงที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อไป

2. วิธีการวิเคราะห์ SDS-PAGE

นำชุดเจลแชมเบอร์มาประกอบให้พร้อมสำหรับทำการวิเคราะห์ โดยเริ่มจากการทำความสะอาดแผ่นกระจก (glass plates) แล้วประกบแผ่นกระจก 2 แผ่น วางลงใน casting frame โดยวางกระจกแผ่นสั้นไว้ด้านหน้าให้ปลายกระจกทั้งสองแผ่นเสมอกันเพื่อป้องกันการรั่ว จากนั้นค่อย ๆ กดล็อกด้วย pressure cams ด้วยความระมัดระวัง เพราะกระจกอาจแตกจากการประกบไม่เข้ารูป แล้วทำการเติม separating gel 12.5% รอให้เกิดเจลที่แข็งตัวดีก่อน (ประมาณ 1 ชั่วโมง) จึงทำการเติม stacking gel 4% และใส่ comb ลงระหว่างช่องกระจกทันที จากนั้นทิ้งไว้ให้เกิดเจลที่แข็งตัวดี (ประมาณ 45 นาที) แล้วดึง comb ออกช้า ๆ หลังจากนั้นนำมาใส่ใน chamber ทำการเติม electrode buffer หรือ tank buffer ให้ท่วมแผ่นเจล แล้วค่อย ๆ โหลดตัวอย่างลงใน sample well 20 ไมโครลิตร (โหลดครั้งละ 10 ไมโครลิตร) และโหลดตัว marker ลงไป 10 ไมโครลิตร ทำการให้กระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ (mA) โดยทำการเปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากนั้นสังเกตสี tracking dye เริ่มเคลื่อนที่เป็นแถบสีน้ำเงินจนกว่าจะเคลื่อนที่หลุดออกจากแผ่นเจลจนหมด จากนั้นค่อย ๆ แกะแผ่นเจลออกจากกระจกโดยระมัดระวังไม่ให้แผ่นเจลขาด แล้วทำการแช่แผ่นเจลใน staining solution เพื่อย้อมสี 2 ครั้ง ครั้งละ 15 นาที แล้วล้างสีโดยแช่ไว้ใน destaining solution จนเจลใส จากนั้นนำไปสแกนด้วยคอมพิวเตอร์

ตารางที่ ก-1 ส่วนผสมในการเตรียมเจลสำหรับวิเคราะห์รูปแบบของโปรตีนด้วยวิธี sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE)

สารสะลาย	Separating gel 7.5%	Stacking gel 4%
30% acrylamine sol.	6.25 ml	2.08 ml
1.5 M Tris-HCl, pH 8.8	3.75 ml	-
0.5 M Tris-HCI, pH 6.8	-	1.25 ml
deionized water	4.77 ml	1.59 ml
10% SDS	0.15 ml	0.05 ml
10% ammonium persulphate	0.075 ml	0.025 ml
TEMED	0.005 ml	0.0025 ml
ปริมาตรรวมทั้งหมด	15.0 ml	5 ml

ก-3 การวิเคราะห์ปริมาณหมู่อะมิโนอิสระ ดัดแปลงจาก (Huang et al., 2010)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. หลอดทดลอง
2. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
3. สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ความยาวคลื่น 340 นาโนเมตร
4. ไมโครปิเปต
5. เครื่องกวนสารละลาย (vortex mixer)
6. เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge)

สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริค (hydrochloric acid 37%)
2. OPA reagent (phthaldialdehyde 97%)
3. ซีรีน (serine)

ขั้นตอนการเตรียม OPA reagent

ชั่ง OPA 40 มิลลิกรัม ละลายใน ethanol 1 มิลลิลิตร เติม sodium tetraborate buffer 0.1 โมลาร์ (pH 9.5) 25 มิลลิลิตร SDS 20% 2.5 มิลลิลิตร β –mercaptoethanol 0.1 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ DI

ขั้นตอนการวิเคราะห์

ชั่งตัวอย่างเส้นพาสต้าหลังการอบแห้งที่บดแล้ว 0.2 กรัม เติมสารละลาย HCl 0.1 โมลาร์ (pH 1.0) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่องกวนสารละลาย และนำไป centrifuge 1000 g นาน 10 นาที นำส่วนใสที่ได้ 0.1 มิลลิลิตร มาเติม OPA reagent 2.5 มิลลิลิตร เขย่าเบา ๆ ให้เข้ากัน แล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 340 นาโนเมตร นำมาเทียบกับกราฟมาตรฐานโดยใช้ L-serine

ก-4 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (George & Latimer, 2016)

อุปกรณ์

1. ภาชนะอะลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น
2. ตู้อบไฟฟ้า
3. โถดูดความชื้น
4. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง

วิธีการวิเคราะห์

1. อบภาชนะสำหรับหาความชื้นในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2-3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้นหลังจากนั้นชั่งน้ำหนัก
2. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 ซ้ำจนได้ผลต่างของน้ำหนักทั้ง 2 ครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม
3. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนอย่างละเอียดประมาณ 1-2 กรัม ใส่ในภาชนะหาความชื้นที่ทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว
4. นำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 5-6 ชั่วโมง
5. นำออกจากตู้อบใส่โถดูดความชื้น หลังจากนั้นชั่งหาน้ำหนัก
6. อบซ้ำอีกครั้งประมาณ 30 นาที และทำเช่นเดิมจนได้ผลต่างของน้ำหนักทั้ง 2 ครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม
7. คำนวณหาปริมาณความชื้นจากสูตร

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{\text{(น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ – น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ) (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)}} \times 100$$

ก-5 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (George & Latimer, 2016)

อุปกรณ์

1. หลอดย่อยโปรตีน (digestion flask)
2. ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask) ขนาด 125 มิลลิลิตร
3. บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร
4. ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 และ 1000 มิลลิลิตร
5. โถดูดความชื้น (desiccator)
6. เครื่องย่อยสำหรับวิเคราะห์โปรตีน (digestion unit)
7. เครื่องกลั่นสำหรับวิเคราะห์โปรตีน (distillation unit)
8. ตู้อบลมร้อน (hot air oven)
9. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง

สารเคมี

1. กรดซัลฟูริก 98% (sulfuric, H2SO4)
2. สารเร่งปฏิกิริยาในการย่อยโปรตีน (selenium reagent mixture)
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 32% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (sodium hydroxide, NaOH)
4. สารละลายกรดบอริก 2% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (boric acid, HBO_3)
5. เชอร์อินดิเคเตอร์ (methyl red และ methylene blue)
6. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.2 นอร์มัล

การเตรียมสารเคมี

1. เตรียมสารละลายกรดบอริก 2% ปริมาณ 500 มิลลิลิตร โดยชั่งกรดบอริก 10 กรัม ลงใน บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นให้ถึงขีด 500 มิลลิลิตรของบีกเกอร์

2. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 32% ปริมาณ 1000 มิลลิลิตร ทำโดยชั่งโซเดียม-ไฮดรอกไซด์ 320 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 2000 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นให้ถึงขีด 1000 มิลลิลิตรของ บีกเกอร์

3. เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.2 นอร์มัล โดยตวงกรดไฮโดรคลอริก 8.7 มิลลิลิตร ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้ได้ 500 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น

ขั้นตอนการวิเคราะห์

ขั้นตอนการย่อย (digestion)

1. อบตัวอย่างด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำออกจากเตาอบใส่ลงในโถดูดความชื้น จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง

2. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักแน่นอนประมาณ 1 กรัม ใส่ลงในหลอดย่อยโปรตีน

3. เติมสารเร่งปฏิกิริยา 10 กรัม

4. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 98% ปริมาตร 25 มิลลิลิตร

5. วางหลอดย่อยในเตาย่อย แล้วประกอบสายยางระหว่างฝาครอบ และเครื่องจับไอกรดให้เรียบร้อย

6. เปิดเครื่องจับไอกรดและเตาย่อย แล้วปรับระดับความร้อนไปที่หมายเลข 5 นาน 5 นาทีแล้วปรับเป็นหมายเลข 9 เริ่มจับเวลาในการย่อยเป็นเวลา 50 นาที จนได้สารละลายใส จากนั้นปิดเตาย่อยแล้วรอจนกระทั่งเย็น และไม่มีไอกรดเหลืออยู่

ขั้นตอนการกลั่น

1. เปิดสวิตซ์ชุดกลั่นโปรตีน และเครื่องทำความเย็นเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง (อุณหภูมิประมาณ 15 องศาเซลเซียส)

2. นำหลอดย่อยโปรตีนต่อเข้ากับชุดเครื่องกลั่น และเติมเชียร์อินดิเคเตอร์ 2-3 หยด ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วนำไปรองรับของเหลวที่ถูกกลั่นออกมาโดยให้ส่วนปลายของอุปกรณ์ควบแน่นจุ่มลงในสารละลาย

3. ตั้งค่าเครื่องให้เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 32% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 80 มิลลิลิตร และเติมกรดบอริก 2% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 60 มิลลิลิตร

4. กลั่นโดยใช้เวลา 3 นาที

ขั้นตอนการไตเตรท (titration)

ไตเตรทสารละลายที่กลั่นได้ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.2 นอร์มัล จนถึงจุดยุติโดยสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวใสเป็นสีฟ้าจาง ๆ จากนั้นคำนวณปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด และปริมาณโปรตีน

การคำนวณ

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (%) = $\frac{\text{Vol. of HCl x N x 1.4}}{\text{W}}$

ปริมาณโปรตีน (%) = ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (%) × F

เมื่อ Vol. of HCl คือ ปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไตเตรทกับสารละลายที่กลั่นได้ (มิลลิลิตร)

N คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (นอร์มัล)

F คือ ค่าแฟกเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณโปรตีน ในที่นี้เท่ากับ 6.25

W คือ น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

ก-6 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (George & Latimer, 2016)

อุปกรณ์

1. เครื่องสกัดไขมัน (soxhlet extractor) และชุดอุปกรณ์ (gerhardt)
2. หลอดใส่ตัวอย่าง
3. กระดาษกรอง
4. ตู้อบไฟฟ้า
5. เครื่องชั่งไฟฟ้า
6. โถดูดความชื้น

สารเคมี

1. ปิโตรเลียมอีเทอร์ จุดเดือด 40-60 องศาเซลเซียส

วิธีการวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างอาหารและบีกเกอร์สำหรับชุดสกัดไขมัน ไปอบไล่ความชื้นที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นในโถอบความชื้นและชั่งให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างอาหารบนกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนัก 3-5 กรัม ห่อให้มิดชิดพับใส่ใน extraction thimble แล้วใส่ลงในบีกเกอร์สำหรับชุดสกัดไขมัน
3. เทปิโตรเลียมอีเทอร์ 150 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
4. ประกอบอุปกรณ์ชุดกลั่นไขมัน พร้อมทั้งเปิดน้ำหล่ออุปกรณ์ควบแน่นและเปิดสวิทช์ให้ความร้อน
5. ปรับความร้อนให้หยดของสารทำละลายกลั่นตัวจากอุปกรณ์ควบแน่นด้วยอัตรา 150 หยดต่อนาที
6. เมื่อครบ 6 ชั่วโมงแล้ว นำหลอดใส่ตัวอย่างออกจาก soxhlet ทิ้งให้ตัวทำละลายไหลจาก soxhlet ลงในบีกเกอร์จนหมด

7. ระเหยตัวทำละลายออกโดยการวางบีกเกอร์ในน้ำต้มเดือด (ควรทำในตู้ควัน) จนปิโตรเลียมอีเทอร์แห้งสนิท

8. นำบีกเกอร์หาไขมันไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนแห้ง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น

9. ชั่งน้ำหนัก แล้วอบซ้ำนานครั้งละ 30 นาที จนกระทั่งผลต่างของน้ำหนักทั้งสองครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม แล้วคำนวณหาปริมาณไขมัน

การคำนวณ

ปริมาณไขมัน (%) = $\frac{\text{น้ำหนักบีกเกอร์ครั้งหลัง – น้ำหนักบีกเกอร์ครั้งแรก}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง}}$ x 100

ก-7 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (George & Latimer, 2016)

อุปกรณ์

1. ตู้อบลมร้อน (hot air oven)
2. เตาเผา (ney)
3. เตาไฟ (hot plate)
4. ถ้วยครูซิเบิล (crucible)
5. โถดูดความชื้น (desiccator)
6. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง

วิธีการวิเคราะห์

1. ตัวอย่างที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

2. เผาด้วยครูซิเบิลในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมงรอประมาณ 30-45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิในเตาเผาลดลงก่อน แล้วนำออกจากเตาเผาใส่ลงในโถดูดความชื้นปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนัก

3. เผาซ้ำอีกครั้ง ครั้งละประมาณ 30 นาที แล้วนำออกจากเตาเผาใส่ลงในโถดูดความชื้นปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนักจนได้ผลต่างของน้ำหนักทั้งสองครั้งติดต่อกันไม่เกิน 0.05 กรัม

4. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน นำไปเผาบนเตาไฟฟ้าจนกระทั่งควันดำหมด แล้วนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสจนกระทั่งได้เถ้าสีขาว ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักเถ้า คำนวณหาร้อยละของเถ้าทั้งหมดในตัวอย่างอาหาร

การคำนวณ

เถ้าทั้งหมด (%) = $\frac{\text{น้ำหนักเถ้า}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}} \times 100$

ก-8 การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยหยาบ (crude fiber) (George & Latimer, 2016)

อุปกรณ์

1. ตู้อบลมร้อน (hot air oven)
2. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (check weigher)
3. โถดูดความชื้น (desiccator)
4. บีกเกอร์สำหรับรีฟรักซ์ ขนาด 600 มิลลิลิตร
5. ตะแกรงสแตนเลส ขนาด 200 เมซ (stainless steel)
6. ถ้วยครูซิเบิล (crucible)
7. เตาเผา (muffle furnace)
8. กระดาษกรองปราศจากไขมัน

สารเคมี

1. สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.26 นอร์มัล (0.13 โมลาร์) กรดซัลฟูริก 96% บริษัท Lab Scan ประเทศไทย เตรียมโดยตวงกรดซัลฟูริกเข้มข้น ปริมาตร 4.86 มิลลิลิตร เติมลงในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรจน 100 มิลลิลิตร

2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 นอร์มัล (sodium hydroxide) บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี เตรียมโดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรจนได้ 100 มิลลิลิตร

3. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1% โดยปริมาตรต่อปริมาตร (กรดไฮโดรคลอริก 37%) บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี เตรียมโดยตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เติมลงในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรจน 100 มิลลิลิตร

4. แอลกอฮอล์ 95% โดยปริมาตรต่อปริมาตร บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี

5. สารละลายไดเอทิลอีเทอร์

วิธีการวิเคราะห์

1. อบแห้งตัวอย่างด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น

2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 20-30 กรัม ใส่ลงบีกเกอร์สำหรับรีฟรักซ์ ขนาด 600 มิลลิลิตร

3. เติมสารละลายกรดซัลฟูริค 0.26 นอร์มัล (0.13 โมลาร์) จำนวน 200 มิลลิลิตรลงบีกเกอร์ และนำไปรีฟรักซ์เป็นเวลา 30 นาที

4. กรองสารละลายขณะร้อน ด้วยตะแกรงขนาด 200 เมช และล้างส่วนที่เหลือด้วยน้ำกลั่นร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

5. เทตัวอย่างกลับสู่บีกเกอร์และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 นอร์มัล (0.3 โมลาร์) จำนวน 200 มิลลิลิตร ลงบีกเกอร์และนำไปรีฟรักซ์เป็นเวลา 30 นาที

6. ทำเช่นเดียวกับข้อ 3

7. ล้างส่วนที่เหลือด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1% โดยปริมาตรต่อปริมาตร 50 มิลลิลิตรแล้วล้างด้วยน้ำร้อนผ่านแผ่นตะแกรง

8. ล้างส่วนที่เหลือด้วยแอลกอฮอล์ 95% โดยปริมาตรต่อปริมาตร) 25 มิลลิลิตร 2 ครั้ง และ diethyl ether 25 มิลลิลิตร 3 ครั้ง ผ่านตะแกรง

9. เทส่วนที่เหลือลงในถ้วยครูซิเบิล (ที่ผ่านการอบและชั่งน้ำหนักแล้ว = a)

10. นำถ้วยครูซิเบิลไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่ (= b)

11. นำถ้วยครูซิเบิลไปเผาด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง

12. ชั่งหาน้ำหนักตัวอย่างหลังเผาหรือน้ำหนักเถ้า (= c)

การคำนวณ

$$\text{เส้นใยหยาบ (\%โดยน้ำหนักแห้ง)} = \frac{[\,(b-a) - (c-a)\,] \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}}$$

เมื่อ a = น้ำหนักถ้วยครูซิเบิลหลังอบแห้งจนน้ำหนักคงที่ (กรัม)

b = น้ำหนักตัวอย่างหลังอบแห้งจนน้ำหนักคงที่ (กรัม)

c = น้ำหนักตัวอย่างหลังเผาหรือน้ำหนักเถ้า (กรัม)

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ทางกายภาพ

ข-1 การประเมินลักษณะทางการไหลของโด (Romero et al., 2017)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องรีโอมิเตอร์ (rheometer)
2. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง

สารเคมี

1. น้ำมันพาราฟิน (paraffin oil)

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างโดให้มีน้ำหนัก 1.7-1.9 กรัม
2. นำตัวอย่างโดมาวัดค่าโดยใช้หัววัด parallel plate (เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร)
3. ตั้งค่าระยะห่าง (gap) ระหว่างตัวอย่างกับหัววัด ประมาณ 2.75 มิลลิเมตร
4. เลื่อนหัววัดลงมาห่างกับตัวอย่างตามที่กำหนด
5. นำโดส่วนเกินออกจากบริเวณหัววัด
6. ทาน้ำมันพาราฟินเล็กน้อยในบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับหัววัด เพื่อป้องกันการคายน้ำของโดในระหว่างการทดสอบ
7. ปิดฝาครอบตัวอย่างก่อนเริ่มทดสอบ
8. ตั้งค่าในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

<u>การตั้งค่าพารามิเตอร์</u>

Step 1) Conditioning-Sample

- Temperature : 25°C Inherit Set Point : Off
- Soak Time : 10.0 s Wait For Temperature : On
- Gas Source : No change
- Maintain LN2 Fill Enabled : Off
- Perform preshear : Off

Step 2) Oscillation-Frequency

- Temperature : 25°C Inherit Set Point : Off
- Soak Time : 10.0 s Wait For Temperature : On
- Strain : 0.1%
- Logarithmic sweep
- Angular frequency : 0.1 to 100 rad/s
- Point per decade : 10

- Acquisition Mode : Correlation is selected
- Delay cycles : 0.5
- Delay time : 1.0 s
- Frequency based correlation : On Save waveform (point display) : On Save image : On Iterative Strain
- Adjustment : Off Use additional harmonics : Off
- Superimpose steady shear rate : Off Maintain Axial Force during acquisition : Off
- Enabled : Off

9. บันทึกค่า G' G " และ Tan (delta) ที่ได้จากโปรแกรม

ข-2 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส

การวัดค่าความแข็ง (hardness)

วัดค่า hardness โดยใช้หัววัด P/35

การเตรียมตัวอย่าง: นำผลิตภัณฑ์พาสต้ามา 50 กรัม ต้มในน้ำเดือด (ใช้น้ำกลั่น 2000 มิลลิลิตร ในการต้ม) ตามเวลาที่เหมาะสมในการต้มพาสต้าให้สุกที่ได้จากการทดลอง ตักเส้นพาสต้าขึ้นแล้วแช่ในน้ำเย็น 1 นาที ตักพาสต้าขึ้นจากน้ำเย็น ทิ้งให้สะเด็ดน้ำเป็นเวลา 2 นาที นำเส้นพาสต้าใส่กล่องพลาสติก ปิดฝา แล้วค่อย ๆ เอาออกมาวัดค่าทีละเส้น โดยวางเส้นพาสต้ายาว 5 เซนติเมตร จำนวน 2 เส้น ให้อยู่ตรงกลางของหัววัด

การวัดค่ายึดเกาะที่ผิวหน้า (adhesiveness)

วัดค่า adhesivenes โดยใช้หัววัด P/35

การเตรียมตัวอย่าง: นำผลิตภัณฑ์พาสต้ามา 50 กรัม ต้มในน้ำเดือด (ใช้น้ำกลั่น 2000 มิลลิลิตร ในการต้ม) ตามเวลาที่เหมาะสมในการต้มพาสต้าให้สุกที่ได้จากการทดลอง ตักเส้นพาสต้าขึ้นแล้วแช่ในน้ำเย็น 1 นาที ตักพาสต้าขึ้นจากน้ำเย็น ทิ้งให้สะเด็ดน้ำเป็นเวลา 2 นาที นำเส้นพาสต้าใส่กล่องพลาสติก ปิดฝา แล้วค่อย ๆ เอาออกมาวัดค่าทีละเส้น โดยวางเส้นพาสต้ายาว 5 เซนติเมตร จำนวน 2 เส้น ให้อยู่ตรงกลางของหัววัด

วิธีการใช้เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (texture analyzer รุ่น TA-XT2)

1. เริ่มทำงาน

1.1 เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่อง Texture Analyzer

1.2 คลิกที่ Start —› Program —› Texture Export —› Texport U.S. English จะปรากฏหน้าต่าง User Section —› คลิก OK

1.3 จากนั้นไปที่ File —› New Project จะปรากฏหน้าต่างของ Project (ถ้าใช้เป็นครั้งแรก) หรือถ้าไม่ต้องการจะตั้ง Project —› Restart จะปรากฏหน้าต่างของกราฟ

1.4 กรณีมีข้อมูลแล้วให้คลิกที่ Open Icon จะปรากฏหน้าต่างของ Open ให้เลือกชื่อไฟล์ตามต้องการ โดยเปลี่ยนชนิดของไฟล์ได้ที่ List First of Type โดย *.ARC คือไฟล์ที่เป็นกราฟ *.RSE คือ ไฟล์ที่เป็นตารางข้อมูล *.PRJ คือไฟล์ที่เป็น Project Document *.MAC คือไฟล์ที่เป็น Macro และ *.LIS คือไฟล์ที่เป็นข้อมูลดิบ

2. การปรับเทียบ (Calibration)

2.1 จะต้องทำการ Calibrate Force ทุกต์รั้งที่ทำการทดสอบ โดยไปที่ T.A บน Menu Bar —› Calibrate Force จะปรากฏหน้าต่างของ Force Calibration ตรวจดูให้แน่ใจว่าไม่มีหัววัด (Probe) ติดอยู่ที่ Calibrate Plateform จากนั้นให้คลิก OK

2.2 จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างใหม่ของ Force Calibration ต่อไปให้วางตุ้มน้ำหนัก 5 กิโลกรัม บน Calibration Plateform แล้วคลิก OK

2.3 เมื่อปรากฏข้อความว่า “Calibration Successful” ให้ยกตุ้มน้ำหนักลงแล้วคลิก OK

3. การทำ T.A.Seting

3.1 ไปที่ T.A —› T.A.Setting จะปรากฏหน้าต่างของ Texture Analyzer Setting ตั้งค่าพารามิเตอร์ดังนี้

<u>กรณีวัดค่า Hardness และ Adhesiveness</u>

Mode	Measure Force in Compression
Option	Return to Start
Pre-Test Speed	2.0 nm/s
Test Speed	2.0 nm/s
Post-Test Speed	2.0 nm/s
Distance	70 %
Trigger Type	Auto-10g
Data Acquisition Rate	200pps

<u>กรณีวัดค่า Tensile strength</u>

Mode	Measure Force in Tension

Option	Return to Start
Pre-Test Speed	3.0 nm/s
Test Speed	3.0 nm/s
Post-Test Speed	5.0 nm/s
Distance	50 nm/s
Trigger Type	Auto-5g
Data Acquisition Rate	200 pps

3.2 ถ้าต้องการบันทึกข้อมูลไว้ให้คลิก Save กรณีจะเรียกใช้ข้อมูลเดิมให้คลิก Load

3.3 เมื่อจะทำขั้นต่อไปให้คลิก Update

4. การทำ Run a Test

4.1 เมื่อวางตัวอย่างบนแท่นทดสอบหรือ Probe ชุดล่างเรียบร้อยแล้ว ให้เลือก T.A. บน Menu Bar —› Run a Test จะปรากฏหน้าต่างของ Run a Test พารามิเตอร์ต่าง ๆ มีความหมายดังนี้

Auto Save: บันทึกข้อมูลโดยอัตโนมัติตาม Drive หรือ Path ที่ตั้งไว้

File Id: ตั้งชื่อ File สำหรับกราฟแสดงผล (5 ตัวอักษร)

File No: ตั้งหมายเลขไฟล์ (จำเป็นในครั้งแรก เพราะจะเพิ่มขึ้นเองโดยอัตโนมัติหลังจากที่แต่ละไฟล์ถูกบันทึก)

Drive: ตำแหน่งที่จะบันทึกข้อมูลไว้

Tile: ตั้งชื่อกราฟ

Note: บันทึกรายละเอียดของตัวอย่างนำมาทดสอบ

Probe and Product Data: เลือกชนิดของ Probe ให้ตรงกับที่นำมาใช้

Configure: ใส่ Production Dimension

Delay Start: เมื่อต้องการเลื่อนเวลาในการเริ่มการวัดออกไป

Clear Previous Graph: เมื่อต้องการให้การทดสอบแต่ละครั้งปรากฏกราฟเพียงเส้นเดียว (เป็นการลบ ARC File เดิมออกเพื่อให้ ARC File ใหม่เข้ามาแทน)

Run Macro: เมื่อต้องการให้วิเคราะห์ผลโดยอัตโนมัติ

PPS: อัตราเร็วในการบันทึกข้อมูลในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ โดยทั่วไปใช้ 200pps

4.2 เมื่อตั้งค่าต่าง ๆ เรียบร้อยแล้วให้คลิก OK เครื่องจะเริ่มทำการทดสอบพร้อมกับปรากฏเส้นกราฟบนหน้าต่างกราฟ ส่วนการทดสอบขั้นต่อไปให้เลือก T.A. บน Menu Bar —› Quick Test Run

4.3 การอ่านค่าที่ได้จากกราฟ

<u>กรณีอ่านค่า hardness และ adhesiveness</u>

เลือก Go to บน Menu bar —› Min Tim —› Max Force เลือก Process data บน Menu bar —› Mark Force —› Mark time —› เลือก Go to บน Menu Bar —› Specified Force เลือกค่าแรงเป็น 0 —› เลือก Process data บน Menu bar —› Anchor —› เลือก Go to บน Menu bar Peak Force —› Specified Force เลือกค่าแรงเป็น 0 —› เลือก Process data บน Menu Bar —› Anchor —› Area

<u>กรณีอ่านค่า tensile strength</u>

เลือก Go to บน Menu bar —› Min Time —› Max Force เลือก Process data บน Menu bar —› Mark Force —› Mark Time

ภาคผนวก ค

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ใบยินยอมเข้าร่วมการวิจัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง ผลของสายพันธุ์กล้วย การใช้แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและจากกล้วยทั้งผล โปรตีน และเอนไซม์ ทรานส์กลูตามิเนส ต่อคุณภาพและค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้า (Effect of cultivars, Utilization of green banana flour and whole green banana flour, protein and transglutaminase on the quality and glycemic index of pasta)

วันให้คำยินยอม วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ก่อนที่จะลงนามในใบยินยอมเข้าร่วมการวิจัยนี้ ข้าพเจ้าได้รับการอธิบายข้อมูลของผลิตภัณฑ์ รวมถึงวิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี 9-Point Hedonic Scale จากผู้วิจัยชื่อ นางสาวนาฏยา อริยสุขโฆษิต และมีความเข้าใจดีแล้ว ข้าพเจ้ายินดีเข้าร่วมการวิจัยนี้ด้วยความสมัครใจ และข้าพเจ้ามีสิทธิที่จะบอกเลิกการเข้าร่วมในโครงการวิจัยนี้เมื่อใดก็ได้ และการบอกเลิกการเข้าร่วมการวิจัยนี้ จะไม่มีผลกระทบใด ๆ ต่อข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าซึ่งเป็นผู้เข้าร่วมการวิจัยนี้ เป็นบุคคลที่มีอายุ 18 ปี ขึ้นไป เข้าร่วมการทดสอบตามความสมัครใจ และสามารถถอนตัวได้ตลอดเวลา

ผู้วิจัยรับรองว่าจะตอบคำถามต่าง ๆ ที่ข้าพเจ้าสงสัยด้วยความเต็มใจ ไม่ปิดบัง จนข้าพเจ้าพอใจ โดยข้อมูลเฉพาะเกี่ยวกับตัวข้าพเจ้าจะถูกเก็บเป็นความลับและจะเปิดเผยในภาพรวมที่เป็นการสรุปผลการวิจัย

ข้าพเจ้าได้อ่านข้อความข้างต้นแล้ว และมีความเข้าใจดีทุกประการ และได้ลงนามในใบยินยอมนี้ด้วยความเต็มใจ

ลงนาม.....ผู้ยินยอม

(.....)

ลงนาม.....พยาน

(.....)

ลงนาม.....ผู้ทำวิจัย

(นางสาวนาฏยา อริยสุขโฆษิต)

แบบสอบถามเกี่ยวกับการแพ้อาหาร

แบบสอบถามนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยเรื่อง ผลของสายพันธุ์กล้วย การใช้แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและจากกล้วยทั้งผล โปรตีน และเอนไซม์ ทรานส์กลูตามิเนส ต่อคุณภาพและค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้า ของสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบว่าผู้เข้าร่วมวิจัยเคยมีประวัติการแพ้อาหารหรือไม่ เพื่อเป็นการคัดเลือกผู้ทดสอบชิมเบื้องต้น ทั้งนี้ขอให้ผู้เข้าร่วมวิจัยตอบแบบสอบถามนี้ตามความเป็นจริง โดยข้อมูลของท่านจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับงานวิจัยนี้ และเป็นความลับ โดยไม่มีผลกระทบใด ๆ ต่อผู้ร่วมวิจัยทั้งสิ้น ขอขอบคุณทุกท่านที่ให้ความร่วมมือ ไว้ ณ โอกาสนี้

คำชี้แจง โปรดทำเครื่องหมาย ✓ ลงใน ❑ หรือเติมข้อความลงในช่องว่างตรงตามความเป็นจริง

ข้อมูลทั่วไป

1. เพศ

❑ ชาย ❑ หญิง

2. อายุ (โปรดระบุ).....ปี

3. ผู้เข้าร่วมวิจัยเคยมีอาการภูมิแพ้ และมีประวัติแพ้ยามาก่อนหรือไม่

❑ ไม่มี

❑ มี (โปรดระบุ).....

❑ ไม่แน่ใจ (โปรดระบุ).....

ข้อมูลการแพ้อาหาร

4. ผู้เข้าร่วมวิจัยเคยมีประวัติการแพ้อาหารหรือไม่

❑ ไม่มี

❑ มี (โปรดระบุ).....

❑ ไม่แน่ใจ (โปรดระบุ).....

5. ผู้เข้าร่วมวิจัยเคยมีอาการแพ้อาหารที่มีส่วนประกอบของนม เช่น ผลิตภัณฑ์นมพร้อมดื่ม ครีม เนย ไอศกรีม นมผง นมข้นหวาน โยเกิร์ต ชีส หรืออาหารที่มีส่วนประกอบของไข่ เช่น ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากไข่ เต้าหู้ไข่ น้ำสลัด ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ หรืออาหารที่มีส่วนประกอบของถั่วเหลือง เช่น

น้ำเต้าหู้ เต้าหู้ถั่วเหลือง ซอสถั่วเหลือง นมถั่วเหลือง โดยแสดงอาการแพ้ เช่น เป็นผื่น ลมพิษ บวม และคันบริเวณผิวหนังหรือส่วนอื่น ๆ ของร่างกาย หายใจลำบาก ปวดท้อง ท้องร่วง คลื่นไส้ อาเจียน เป็นต้น หรือไม่

❑ ไม่มี

❑ มี (โปรดระบุ).....

ขอบพระคุณในความร่วมมือของท่าน

นางสาวนาฏยา อริยสุขโฆษิต

(ผู้วิจัย)

มหาวิทยาลัยบูรพา BURAPHA UNIVERSITY

ข้อมูลสำหรับการเข้าร่วมการวิจัยของกลุ่มตัวอย่าง

หัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง ผลของสายพันธุ์กล้วย การใช้แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและจากกล้วยทั้งผล โปรตีน และเอนไซม์ ทรานส์กลูตามิเนส ต่อคุณภาพและค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้า (Effect of cultivars, Utilization of green banana flour and whole green banana flour, protein and transglutaminase on the quality and glycemic index of pasta)

เรียน ผู้ทดสอบที่เป็นกลุ่มตัวอย่างในงานวิจัย

ท่านเป็นผู้ได้รับเชิญจากผู้วิจัยให้เข้าร่วมเป็นกลุ่มตัวอย่างในงานวิจัย เรื่อง ผลของสายพันธุ์กล้วย การใช้แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและจากกล้วยทั้งผล โปรตีน และเอนไซม์ ทรานส์กลูตามิเนส ต่อคุณภาพและค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้า ก่อนที่ท่านจะตกลงเข้าร่วมเป็นกลุ่มตัวอย่างในงานวิจัยดังกล่าว ขอเรียนให้ท่านทราบถึงเหตุผลและรายละเอียดของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ดังนี้

งานวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาผลของสายพันธุ์กล้วย การใช้แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและจากกล้วยทั้งผล โปรตีน และเอนไซม์ ทรานส์กลูตามิเนส ต่อคุณภาพและค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้า ในการทดลองตอนที่ 1 เป็นการศึกษาผลของสายพันธุ์กล้วย และการผลิตแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล ต่อสมบัติทางกายภาพ และค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้ง คุณลักษณะของพาสต้า และค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ ส่วนการทดลองตอนที่ 2 เป็นการศึกษาชนิดและปริมาณของโปรตีน ต่อลักษณะทางกระแสวิทยาของโด คุณลักษณะของพาสต้า โครงสร้างทางจุลภาค และค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ และการทดลองตอนที่ 3 เป็นการศึกษาผลของปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ต่อลักษณะทางกระแสวิทยาของโด รูปแบบของโปรตีน ปริมาณหมู่อะมิโนอิสระ คุณลักษณะของพาสต้า โครงสร้างทางจุลภาค ค่าดัชนีไกลซีมิก องค์ประกอบทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

โดยท่านจะเป็นผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสของตัวอย่าง ภายใต้คำแนะนำและการดูแลจากผู้วิจัย โดยทำการประเมินลักษณะทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบด้วยระดับคะแนน 9 คะแนน (9-Point Hedonic Scale Test) โดยขนาดตัวอย่างสำหรับการทดสอบทางประสามสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผ่านการต้มสุก ขนาดประมาณ 30 กรัม ใส่ในถ้วยชิมที่ทำด้วยพลาสติก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร การเข้าร่วมการวิจัยครั้งนี้เป็นไปโดยสมัครใจ หากท่านต้องการถอนตัวจากการเป็นกลุ่มตัวอย่าง ท่านสามารถถอนตัวได้ตลอดเวลา โดยไม่ต้องแจ้งผู้ทำวิจัยล่วงหน้า

ประการสำคัญที่ท่านควรทราบ คือ

งานวิจัยนี้ไม่มีผลกระทบต่อกลุ่มตัวอย่างในด้านข้อมูลที่เก็บได้ ผู้วิจัยจะไม่ระบุชื่อจริงของกลุ่มตัวอย่างในแบบสอบถาม โดยใช้รหัสแทน การเข้าถึงข้อมูลมีแค่อาจารย์ที่ปรึกษาหลักและผู้วิจัยเท่านั้น ข้อมูลที่ได้ใช้ในงานวิชาการเท่านั้น หลังจากเก็บข้อมูลไว้แล้ว 1 ปี จะทำลายข้อมูล

ถ้าผู้ทดสอบเกิดอาการแพ้ อันเนื่องมาจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากงานวิจัยนี้ ให้รีบไปพบแพทย์ทันที โดยผู้วิจัยจะรับผิดชอบค่ารักษาพยาบาลของผู้ทดสอบที่เกิดอาการแพ้ อันเนื่องมาจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากงานวิจัยนี้ โดยอาการแพ้จากการบริโภคพาสต้าแป้งกล้วยดิบจะแสดงอาการ เช่น เป็นผื่น ลมพิษ บวมและคันบริเวณผิวหนังหรือส่วนอื่น ๆ ของร่างกาย หายใจลำบาก ปวดท้อง ท้องร่วง คลื่นไส้ อาเจียน เป็นต้น

หากท่านมีปัญหาหรือข้อสงสัยประการใด กรุณาติดต่อ นางสาวนาฏยา อริยสุขโฆษิต โทรศัพท์ 093-7084002 ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ขอขอบคุณในความร่วมมือของท่านมา ณ ที่นี้

นางสาวนาฏยา อริยสุขโฆษิต

แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส วิธี 9-Point Hedonic Scale

หมายเลขผู้ทดสอบ..... วันที่ทดสอบ.....

ผลิตภัณฑ์ พาสต้าแป้งกล้วยดิบ

คำชี้แจง กรุณาทดสอบจากซ้ายไปขวา และให้คะแนนในด้าน ลักษณะปรากฏ กลิ่น เนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบโดยรวม ตามเกณฑ์ให้คะแนน ดังนี้

กำหนดให้	1	หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด	6	หมายถึง ชอบเล็กน้อย
	2	หมายถึง ไม่ชอบมาก	7	หมายถึง ชอบปานกลาง
	3	หมายถึง ไม่ชอบปานกลาง	8	หมายถึง ชอบมาก
	4	หมายถึง ไม่ชอบเล็กน้อย	9	หมายถึง ชอบมากที่สุด
	5	หมายถึง เฉย ๆ		

รหัสตัวอย่าง	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่น	เนื้อสัมผัส	รสชาติ	ความชอบโดยรวม
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

ข้อเสนอแนะ

.....

.....

.....

ขอขอบพระคุณในความร่วมมือ

ภาคผนวก ง

ผลการทดลอง

ตารางภาคผนวก ง-1 ปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loss) และน้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (cooking yield) ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน

สูตร	Cooking Loss (%)	Cooking Yield (%)
E1	14.95 ± 0.30^{c}	355.10 ± 14.30^{c}
E2	10.84 ± 0.20^{d}	376.34 ± 7.71^{b}
E3	8.88 ± 0.11^{e}	418.66 ± 4.78^{a}
W1	22.33 ± 0.38^{b}	278.04 ± 4.51^{e}
W2	16.02 ± 0.20^{c}	315.96 ± 4.49^{d}
W3	11.30 ± 0.02^{d}	360.91 ± 5.32^{bc}
S1	25.28 ± 0.48^{a}	273.73 ± 4.95^{e}
S2	22.86 ± 0.89^{b}	261.34 ± 4.15^{e}
S3	24.64 ± 0.48^{a}	267.10 ± 5.13^{e}

$^{a,b,\cdots}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

โดย E1 คือ ไข่ขาวผง 4.35%, E2 คือ ไข่ขาวผง 8.70%, E3 คือ ไข่ขาวผง 13.05%, W1 คือ เวย์โปรตีน 4.35%, W2 คือ เวย์โปรตีน 8.70%, W3 คือ เวย์โปรตีน 13.05%, S1 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 4.35%, S2 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 8.70% และ S3 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 13.05% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

ตารางภาคผนวก ง-2 ลักษณะเนื้อสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน

สูตร	Hardness (g.f)	Adhesiveness (g.sec)
E1	3918.69 ± 917.34^{d}	-198.47 ± 63.36^{abc}
E2	5236.91 ± 839.03^{abc}	-173.47 ± 23.87^{ab}
E3	5771.77 ± 292.65^{a}	-139.48 ± 25.36^{a}
W1	3848.22 ± 562.63^{d}	-224.79 ± 44.65^{bcd}
W2	4409.01 ± 423.58^{cd}	-206.57 ± 45.44^{bc}
W3	5757.64 ± 931.95^{a}	-181.13 ± 23.89^{ab}
S1	5331.54 ± 522.29^{abc}	-251.43 ± 48.33^{cd}
S2	5446.18 ± 717.64^{ab}	-271.21 ± 55.32^{d}
S3	4551.75 ± 392.76^{bcd}	-221.19 ± 23.83^{bcd}

$^{a,b,\cdots}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

โดย E1 คือ ไข่ขาวผง 4.35%, E2 คือ ไข่ขาวผง 8.70%, E3 คือ ไข่ขาวผง 13.05%, W1 คือ เวย์โปรตีน 4.35%, W2 คือ เวย์โปรตีน 8.70%, W3 คือ เวย์โปรตีน 13.05%, S1 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 4.35%, S2 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 8.70% และ S3 คือ โปรตีนถั่วเหลือง 13.05% (% ของแป้งกล้วยดิบ)

ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิต

ตารางภาคผนวก จ-1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสี L* ของแป้งกล้วยดิบ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	239.292	79.7641	31178.13	0.000*
Error	8	0.020	0.0026		
Total	11	239.313			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสี a* ของแป้งกล้วยดิบ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	4.37629	1.45876	3724.50	0.000*
Error	8	0.00313	0.00039		
Total	11	4.37943			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสี b* ของแป้งกล้วยดิบ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	26.8844	8.96148	11817.33	0.000*
Error	8	0.0061	0.00076		
Total	11	26.8905			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของดัชนีการละลายน้ำของแป้งกล้วยดิบ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	11.6027	3.86756	251.57	0.000*
Error	8	0.1230	0.01537		
Total	11	11.7257			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของดัชนีการดูดซับน้ำของแป้งกล้วยดิบ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	0.34236	0.114120	24.09	0.000*
Error	8	0.03789	0.004737		
Total	11	0.38025			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้งกล้วยดิบ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	26.6666	8.88887	224.43	0.000*
Error	4	0.1584	0.03961		
Total	7	26.8250			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้มของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	0.8626	0.2875	0.61	0.641ns
Error	4	1.8741	0.4685		
Total	7	2.7367			

ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของน้ำหนักที่ได้หลังการต้มของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	1128	376.1	1.23	0.407ns
Error	4	1219	304.7		
Total	7	2347			

ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	4.689	1.563	0.78	0.562 ^{ns}
Error	4	7.974	1.993		
Total	7	12.663	1.563		

^{ns} หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	48.57	16.189	9.24	0.000 *
Block	29	205.50	7.086	4.04	0.000 *
Error	87	152.43	1.752		
Total	119	406.50			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านสีของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	76.09	25.364	11.39	0.000 *
Block	29	173.84	5.995	2.69	0.000 *
Error	87	193.66	2.226		
Total	119	443.59			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-12 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	7.292	2.431	1.61	0.192 ^{ns}
Block	29	144.075	4.968	3.30	0.000 *
Error	87	130.958	1.505		
Total	119	282.325			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

^{ns} หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	3.033	1.011	0.57	0.638 ^{ns}
Block	29	87.700	3.024	1.70	0.032 *
Error	87	154.967	1.781		
Total	119	245.700			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

^{ns} หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-14 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านรสชาติของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	5.500	1.833	0.96	0.416 ^{ns}
Block	29	113.300	3.907	2.04	0.006 *
Error	87	166.500	1.914		
Total	119	285.300			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

^{ns} หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านความชอบโดยรวมของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	21.23	7.078	4.11	0.009*
Block	29	141.37	4.875	2.83	0.000*
Error	87	149.77	1.721		
Total	119	312.37			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้มของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	8	988.344	123.543	698.45	0.000*
Error	18	3.184	0.177		
Total	26	991.528			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-17 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของน้ำหนักที่ได้หลังการต้มของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	8	77669.1	9708.64	206.23	0.000*
Error	18	847.4	47.08		
Total	26	78516.5			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-18 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	8	45218480	5652310	12.92	0.000*
Error	81	35439058	437519		
Total	89	80657538			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-19 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการยึดเกาะที่ผิวหน้าของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	8	130373	16297	9.27	0.000*
Error	81	142376	1758		
Total	89	272749			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-20 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้าที่ผสมชนิดและปริมาณของโปรตีนแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	8	1421.3	177.659	18.94	0.000*
Error	27	253.2	9.379		
Total	35	1674.5			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-21 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณหมู่อะมิโนอิสระของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	0.001267	0.000422	3.42	0.073 ^{ns}
Error	8	0.000988	0.000124		
Total	11	0.002255			

^{ns} หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-22 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้มของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	7.271	2.4235	3.73	0.061 ^{ns}
Error	8	5.194	0.6493		
Total	11	12.465			

^{ns} หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-23 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของน้ำหนักที่ได้หลังการต้มของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	583.6	194.54	4.73	0.035 *
Error	8	329.2	41.15		
Total	11	912.9			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-24 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	24555713	8185238	11.61	0.000*
Error	36	25374321	704842		
Total	39	49930034			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-25 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการยึดเกาะที่ผิวหน้าของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	4550	1517	0.86	0.470 ns
Error	36	63361	1760		
Total	39	67910			

ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-26 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	32.74	10.912	1.23	0.343 ns
Error	12	106.80	8.900		
Total	15	139.53			

ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-27 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	4.867	1.6222	2.25	0.088 ^{ns}
Block	29	135.700	4.6793	6.50	0.000*
Error	87	62.633	0.7199		
Total	119	203.200			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

^{ns} หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-28 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านสีของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	3.425	1.1417	2.06	0.112 ^{ns}
Block	29	96.242	3.3187	5.97	0.000*
Error	87	48.325	0.5555		
Total	119	147.992			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

^{ns} หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-29 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	0.225	0.07500	0.05	0.986 ^{ns}
Block	29	85.875	2.96121	1.87	0.014*
Error	87	138.025	1.58649		
Total	119	224.125			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

^{ns} หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-30 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	13.89	4.631	3.09	0.031*
Block	29	103.74	3.577	2.39	0.001*
Error	87	130.36	1.498		
Total	119	247.99			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-31 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านรสชาติของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	4.758	1.586	1.21	0.313 ^{ns}
Block	29	95.742	3.301	2.51	0.001*
Error	87	114.492	1.316		
Total	119	214.992			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

^{ns} หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-32 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านความชอบโดยรวมของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสแตกต่างกัน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	5.056	1.685	1.60	0.196 ^{ns}
Block	29	67.394	2.324	2.20	0.003*
Error	87	91.881	1.056		
Total	119	164.331			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

^{ns} หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-33 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณความชื้นของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 1% เปรียบเทียบกับพาสต้าแป้งสาลีทางการค้า

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	1	3.13352	3.13352	566.47	0.000*
Error	4	0.02213	0.00553		
Total	5	3.15565			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-34 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณโปรตีนของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 1% เปรียบเทียบกับพาสต้าแป้งสาลีทางการค้า

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	1	36.1659	36.1659	8556.95	0.000*
Error	4	0.0169	0.0042		
Total	5	36.1828			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-35 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณไขมันของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 1% เปรียบเทียบกับพาสต้าแป้งสาลีทางการค้า

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	1	0.000080	0.000080	0.40	0.563ns
Error	4	0.000806	0.000201		
Total	5	0.000886			

ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-36 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณใยอาหารของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 1% เปรียบเทียบกับพาสต้าแป้งสาลีทางการค้า

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	1	0.046970	0.046970	49.57	0.002*
Error	4	0.003790	0.000947		
Total	5	0.050760			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-37 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณเถ้าของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 1% เปรียบเทียบกับพาสต้าแป้งสาลีทางการค้า

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	1	2.39730	2.39730	6719.84	0.000*
Error	4	0.00143	0.00036		
Total	5	2.39872			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางภาคผนวก จ-38 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณคาร์โบไฮเดรตของพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ผสมปริมาณเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 1% เปรียบเทียบกับพาสต้าแป้งสาลีทางการค้า

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	1	7.21607	7.21607	400.15	0.000*
Error	4	0.07213	0.01803		
Total	5	7.28820			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ภาคผนวก ฉ

ภาพประกอบงานวิจัย

ภาพภาคผนวก ฉ-1 กล้วยหอมดิบ สายพันธุ์เพชรบุรี ระดับความแก่ระยะที่ 1 จากสวนกล้วย ตำบลบางม่วง อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา (ภาพซ้าย) กล้วยน้ำว้าดิบ สายพันธุ์ปากช่อง 50 ระดับความแก่ระยะที่ 1 จากสวนกล้วย ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี (ภาพขวา)

ภาพภาคผนวก ฉ-2 กล้วยดิบจากกล้วยทั้งผล (ภาพซ้าย) และกล้วยดิบจากเนื้อกล้วย (ภาพขวา) ที่ถูกสไลด์ให้มีความหนา 1.5 มิลลิเมตร และแช่ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 0.5% (w/v)

ภาพภาคผนวก ฉ-3 กล้วยดิบหลังอบแห้ง (ภาพซ้าย) ก่อนนำไปบดด้วยเครื่องบดละเอียด (ภาพขวา)

ภาพภาคผนวก ฉ-4 เส้นพาสต้าจากแป้งกล้วยดิบแบบสด (ภาพซ้าย) และเส้นพาสต้าจากแป้งกล้วยดิบหลังอบแห้ง (ภาพขวา)