

การพัฒนาแป้งผสมจากมันสำปะหลังหมักร่วมกับผงข้าวกล้องงอกและแป้งข้าว:
คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ สมบัติเชิงหน้าที่
และคุณภาพทางจุลชีววิทยา

Development of Fermented Cassava Composite Flour with Germinated
Brown Rice Powder and Rice Flours: Physicochemical Properties,
Bioactive Compounds, Functional Properties
and Microbiological Qualities

ธีรวัฒน์ อ่อนลมูล¹, ฐิตินันท์ บุญแซมชู², และสัณห์สิน สันจรรณศักดิ์^{2*}
Theerawat Onlamool¹, Thitinan Bunchaemchoo² and Santat Sinjaroonsak^{2*}

(Received: 10 June 2026; Revised: 28 June 2026; Accepted: 28 June 2026)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแป้งผสมจากมันสำปะหลังหมักร่วมกับผงข้าวกล้องงอกและผงแป้งข้าว และประเมินคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ องค์ประกอบทางโภชนาการ และคุณภาพทางจุลชีววิทยาของแป้งที่พัฒนาได้ มันสำปะหลังสดถูกเตรียมโดยการล้าง ปอกเปลือก หั่น แขน้ำ ต้ม และหมักด้วยหัวเชื้อ *Rhizopus oligosporus* ร้อยละ 5 (w/w) เป็นเวลา 36 ชั่วโมง จากนั้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3 วัน และบดเป็นผงแป้งมันสำปะหลังหมัก ก่อนนำไปพัฒนาเป็นแป้งผสม 3 สูตร ได้แก่ สูตรผสมกับผงข้าวขาวและผงข้าวกล้องงอก สูตรผสมกับผงข้าวเหนียวและผงข้าวกล้องงอก และสูตรผสมกับผงข้าวขาว ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก โดยเปรียบเทียบกับผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยว แป้งมันสำปะหลังทางการค้า และแป้งสาลีเนกประสงค์ทางการค้า พบว่า แป้งผสมที่พัฒนามีความชื้น 7.75–9.12% ค่า pH 5.31–5.56 และมีปริมาณเถ้าสูงกว่าแป้งทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แป้งสูตรที่พัฒนาได้มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูง

¹ วิทยาลัยนวัตกรรมการอาหารและอุตสาหกรรมบริการ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี, เพชรบุรี, ประเทศไทย

¹ College of Food and Hospitality Innovation, Phetchaburi Rajabhat University, Phetchaburi, Thailand

¹ คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์, นราธิวาส, ประเทศไทย

² Faculty of Agriculture, Princess of Naradhiwas University, Narathiwat, Thailand

*Corresponding Author: santat.s@pnu.ac.th

กว่าแป้งทางการค้า โดยมีค่า IC_{50} อยู่ในช่วง 272.69–293.86 mg/mL และมีปริมาณ GABA 0.717–0.799 mg/g ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางโภชนาการพบว่ามีโปรตีนทั้งหมด 4.59–5.68 g/100 g เส้นใยหยาบ 2.50–3.39 g/100 g และมีแร่ธาตุสำคัญ ได้แก่ ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม แคลเซียม เหล็ก และสังกะสี ผลตรวจจุลินทรีย์พบว่าทุกสูตรมีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดระดับ 10^3 CFU/g ยีสต์และรา <100/g และไม่พบ *Salmonella* sp., *Staphylococcus aureus* และ *Bacillus cereus* อย่างไรก็ตาม แป้งสูตรที่พัฒนาได้มีค่าความสว่างต่ำกว่าแป้งทางการค้า งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าผงแป้งหมักมันสำปะหลังร่วมกับผงข้าวกล้องงอกสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาแป้งผสมเชิงหน้าที่มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้นได้

คำสำคัญ: ข้าวกล้องงอก มันสำปะหลังหมัก แป้งผสม ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ *Rhizopus oligosporus*

Abstract

This study aimed to develop composite flour from fermented cassava combined with germinated brown rice and rice flours, and to evaluate its physicochemical properties, bioactive compounds, functional properties, proximate composition, mineral content, and microbiological quality. Fresh cassava roots were washed, peeled, cut, soaked, boiled, and fermented with 5% (w/w) *Rhizopus oligosporus* starter culture for 36 h. The fermented cassava was then dried at 60°C for 3 days and milled into fermented cassava flour. The flour was used to formulate three composite flour blends: fermented cassava flour with white rice flour and germinated brown rice powder; fermented cassava flour with glutinous rice flour and germinated brown rice powder; and fermented cassava flour with white rice flour, glutinous rice flour, and germinated brown rice powder. These formulations were compared with fermented cassava flour, commercial cassava flour, and commercial all-purpose wheat flour. The developed composite flours had moisture contents of 7.75–9.12%, pH values of 5.31–5.56, and significantly higher ash contents than the commercial flours ($p < 0.05$). The developed flours showed higher DPPH radical scavenging activity than the commercial flours, with IC_{50} values ranging from 272.69 to 293.86 mg/mL and GABA contents of 0.717–0.799 mg/g. Proximate analysis showed that the developed flours contained 4.59–5.68 g/100 g protein and 2.50–3.39 g/100 g crude fiber, with phosphorus, magnesium, calcium, iron, and zinc as mineral components. Microbiological analysis showed total viable counts at the 10^3 CFU/g level, yeast and mold counts of <100/g,

and no detection of *Salmonella* sp., *Staphylococcus aureus*, or *Bacillus cereus* in all formulations. However, the developed flours had lower lightness values than the commercial flours. These findings indicate that fermented cassava flour combined with germinated brown rice powder incorporation is a promising approach for developing functional composite flour with improved bioactive and nutritional properties.

Keywords: Fermented Cassava, Germinated Brown Rice, Composite Flour, Antioxidant Activity, *Rhizopus Oligosporus*

บทนำ

มันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* Crantz) เป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญและเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สามารถแปรรูปเป็นแป้ง ฟลาวัวร์ และผลิตภัณฑ์อาหารได้หลากหลาย แป้งมันสำปะหลังมีจุดเด่นด้านปริมาณสตาร์ชสูง การให้พลังงานสูง ความสามารถในการเกิดเจล และความเหมาะสมต่อการใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหาร อย่างไรก็ตาม แป้งมันสำปะหลังทั่วไปมีข้อจำกัดด้านปริมาณโปรตีน ไขมัน และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบจากธัญพืชหรือวัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ (Nilusha, Jayasinghe, Perera, Perera & Jayasinghe, 2021; Mohidin et al., 2023) การพัฒนาแป้งผสมหรือ composite flour จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการและสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งจากพืชหัว โดยงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการผสมแป้งมันสำปะหลังกับวัตถุดิบจากพืชชนิดอื่นสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีน เส้นใย เถ้า สมบัติการเกิดเฟสส์ และสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งผสมได้ (Katunzi-Kilewela, Rweyemamu, Kaale, Kibazohi & Fortunatus, 2023; Li et al., 2023)

กระบวนการหมักเป็นเทคโนโลยีชีวภาพที่ใช้เพิ่มมูลค่าและปรับปรุงคุณภาพของวัตถุดิบอาหาร โดยอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน กรดอินทรีย์ กลิ่นรส สี และโครงสร้างของวัตถุดิบ รวมทั้งอาจช่วยเพิ่มการปลดปล่อยสารที่ละลายน้ำได้หรือสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพบางชนิด เชื้อราในสกุล *Rhizopus* โดยเฉพาะ *Rhizopus oligosporus* เป็นจุลินทรีย์สำคัญในกระบวนการหมักแบบ solid-state fermentation และการผลิตเทมเป้ โดยเส้นใยของเชื้อราและเอนไซม์ที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักสามารถมีบทบาทต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างวัตถุดิบ การย่อยสลายบางส่วนของพอลิเมอร์ และการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางโภชนาการและสมบัติเชิงหน้าที่ของวัตถุดิบพืช (Canoy, Wiedenbein, Bredie, Meyer, Wösten & Nielsen, 2024; Gautheron et al., 2024; Zhang et al., 2022) ดังนั้น การใช้ *R. oligosporus* ในการหมัก

มันสำปะหลังจึงมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาแป้งมันสำปะหลังให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ทางอาหารมากขึ้น

ข้าวกล้องงอกเป็นวัตถุดิบที่ได้รับความสนใจในด้านอาหารทางเลือก เนื่องจากกระบวนการงอกสามารถกระตุ้นการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในเมล็ดข้าว และทำให้เกิดการสะสมของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยเฉพาะกรดแกมมา-อะมิโนบิวทิริกหรือ GABA รวมถึงสารประกอบฟีนอลิกและองค์ประกอบทางโภชนาการบางชนิด (Jabeen et al., 2024; Sitanggang, Joshua, Munarko, Kusnandar & Budijanto, 2021; Tsou, Hsu, & Chen, 2024) การนำข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวมาใช้ร่วมกับมันสำปะหลังหมักจึงอาจช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และปรับคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งผสมได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาแป้งผสมจากมันสำปะหลังหมักร่วมกับข้าวกล้องงอกและแป้งข้าว และประเมินคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ องค์ประกอบทางโภชนาการ และคุณภาพทางจุลชีววิทยาของแป้งที่พัฒนา

วัตถุประสงค์การวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตแป้งมันสำปะหลังหมักด้วยหัวเชื้อ *R. oligosporus* และพัฒนาเป็นแป้งผสมร่วมกับข้าวกล้องงอกและแป้งข้าว ตลอดจนประเมินและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ องค์ประกอบทางโภชนาการโดยประมาณ ปริมาณแร่ธาตุ และคุณภาพทาง จุลชีววิทยาของแป้งสูตรที่พัฒนากับแป้งทางการค้า

กรอบแนวคิดการวิจัย

การวิจัยนี้มีแนวคิดว่าการหมักมันสำปะหลังด้วยเชื้อ *R. oligosporus* ร่วมกับการผสมข้าวกล้องงอกและแป้งข้าว สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังซึ่งโดยทั่วไปมีข้อจำกัดด้านโปรตีน สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่บางประการได้ โดยกระบวนการวิจัยเริ่มจากการเตรียมมันสำปะหลังสด หมักด้วยหัวเชื้อ *R. oligosporus* อบแห้ง และบดเป็นผงแป้งมันสำปะหลังหมัก จากนั้นนำไปพัฒนาเป็นแป้งผสมร่วมกับผงข้าวขาว ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอกในสูตรต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยว แป้งมันสำปะหลังทางการค้า และแป้งสาลีอเนกประสงค์ทางการค้า

แป้งที่พัฒนาได้ถูกประเมินคุณภาพในด้านคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ องค์ประกอบทางโภชนาการ และคุณภาพทางจุลชีววิทยา เพื่อพิจารณาศักยภาพของแป้งผสมจากมันสำปะหลังหมักร่วมกับข้าวกล้องงอกในการใช้เป็นวัตถุดิบอาหารทางเลือกที่มีคุณค่าทางโภชนาการและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเพิ่มขึ้น สำหรับกรอบแนวคิดการวิจัยแสดงในภาพที่ 1



วิธีการวิจัย

1. วัตถุดิบและหัวเชื้อ

มันสำปะหลังสดที่ใช้ในการทดลองซื้อจากตลาดสดในอำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส จากนั้นนำมาคัดเลือกเฉพาะหัวที่มีสภาพสมบูรณ์ ไม่เน่าเสีย และไม่มีการปนเปื้อนของเชื้อราที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า วัตถุดิบชนิดผง ได้แก่ ผงข้าวหอมมะลิ ผงข้าวกล้องอก ผงข้าวเหนียว แป้งมันสำปะหลังทางการค้า และแป้งสาลีเนกประสงค์ทางการค้า ซื้อจากแหล่งจำหน่ายผลิตภัณฑ์อาหารในอำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส หัวเชื้อที่ใช้ในการหมัก คือ หัวเชื้อ *R. oligosporus* ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์บริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ วัตถุดิบชนิดผงและหัวเชื้อถูกบรรจุในภาชนะปิดสนิทและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำมาใช้

2. การเตรียมมันสำปะหลังก่อนการหมัก

นำมันสำปะหลังสดมาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก และตัดแยกส่วนที่เสียหรือมีร่องรอยการเน่าเสีย จากนั้นหั่นเป็นชิ้นขนาดประมาณ $1 \times 1 \times 1$ cm ล้างด้วยน้ำสะอาด และแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 วัน เมื่อครบกำหนด ทำการล้างด้วยน้ำสะอาดอีก 4-5 ครั้ง แล้วนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 30 นาที กรองและผึ่งให้สะเด็ดน้ำและเย็นลงที่อุณหภูมิห้อง เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการหมักในขั้นตอนต่อไป

3. การผลิตผงมันสำปะหลังหมัก

มันสำปะหลังที่ผ่านการต้มและผึ่งให้สะเด็ดน้ำถูกนำมาคลุกผสมกับหัวเชื้อ *R. oligosporus* ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จนหัวเชื้อกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นบรรจุตัวอย่างลงในถุงพลาสติกสะอาดที่เจาะรู ขนาด 5x10 นิ้ว ถุงละ 300 g กดให้แบนราบเพื่อไล่อากาศและบ่มที่อุณหภูมิห้อง (30–32 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 36 ชั่วโมง โดยไม่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ หลังครบกำหนดการหมัก ทำการตัดเป็นชิ้นขนาดเล็กและอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง บดด้วยเครื่องบดตัวอย่าง และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 mesh เพื่อให้ได้ผงแป้งที่มีลักษณะสม่ำเสมอ ผงมันสำปะหลังหมักที่ได้ถูกเก็บรักษาในภาชนะปิดสนิทที่อุณหภูมิ 4°C จนกว่าจะนำไปใช้ในการพัฒนาแป้งผสม

4. การพัฒนาสูตรแป้งผสม

ผงมันสำปะหลังหมักถูกนำมาพัฒนาเป็นแป้งผสมร่วมกับผงข้าวขาว ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก ตามอัตราส่วนที่กำหนด โดยใช้ผงมันสำปะหลังหมักเป็นองค์ประกอบหลักของสูตร และใช้แป้งมันสำปะหลังทางการค้าและแป้งสาลีอเนกประสงค์ทางการค้าเป็นชุดเปรียบเทียบ การเตรียมแป้งผสมแบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่

ชุดการทดลองที่ 1 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวขาว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1

ชุดการทดลองที่ 2 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1

ชุดการทดลองที่ 3 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวขาว ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1:1

ชุดการทดลองที่ 4 ใช้ผงมันสำปะหลังหมักเพียงอย่างเดียว

จากนั้นตัวอย่างแป้งทุกชุดถูกผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน บรรจุในภาชนะปิดสนิท และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C จนกว่าจะนำไปวิเคราะห์คุณภาพ

5. การวิเคราะห์

5.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้ง

คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของตัวอย่างแป้งที่วิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความชื้น ค่าน้ำหนักแห้ง ปริมาณเถ้า ค่า pH ค่าสี ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมด โดยปริมาณความชื้นของตัวอย่างแป้งวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน AOAC (2005) ทำการชั่งตัวอย่างประมาณ 2.00 g ลงในภาชนะอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C จนได้น้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น และคำนวณปริมาณความชื้นเป็นร้อยละของน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น ส่วนน้ำหนักแห้งคำนวณจาก 100 ลบด้วยค่าความชื้นของตัวอย่าง ปริมาณเถ้าวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน AOAC (2005) โดยชั่งตัวอย่างประมาณ 2.00 g ลงในถ้วยเผาที่ทราบน้ำหนัก และเผา

ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 4–6 ชั่วโมง หรือจนได้เถ้าที่มีสีเทาอ่อนและน้ำหนักคงที่ จากนั้นคำนวณปริมาณเถ้าเป็นกรัมต่อ 100 g ตัวอย่าง สำหรับค่า pH เตรียมสารแขวนลอยของแป้งโดยผสมตัวอย่าง 10 g กับน้ำกลั่น 100 ml กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที และวัดด้วยเครื่อง pH meter

สำหรับค่าสีของตัวอย่างแป้ง ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสีระบบ CIE L*, a* และ b* โดยสอบเทียบเครื่องด้วยแผ่นมาตรฐานสีขาวก่อนการวัด ตัวอย่างแป้งถูกบรรจุในภาชนะวัดสีให้มีความหนาและผิวหน้าสม่ำเสมอ จากนั้นวัดค่าสีอย่างน้อย 3 ซ้ำต่อหนึ่งตัวอย่าง และรายงานผลเป็นค่า L*, a* และ b* โดยค่า L* แสดงค่าความสว่างจาก 0 ถึง 100 ค่า a* แสดงแกนสีเขียวถึงสีแดง และค่า b* แสดงแกนสีน้ำเงินถึงสีเหลือง (Katunzi-Kilewela et al., 2023; Li et al., 2023)

สำหรับการวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมด ทำการทดลองโดยชั่งตัวอย่างแป้ง 1.00 g เติมน้ำกลั่น 20 ml กวนหรือเขย่าที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และเก็บสารละลายส่วนใสสำหรับการวิเคราะห์ โดยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี 3,5-dinitrosalicylic acid หรือ DNS ซึ่งดัดแปลงจาก Miller (1959) ทำการผสมสารสกัดตัวอย่างกับสารละลาย DNS ในอัตราส่วน 1:1 ให้ความร้อนในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที ปล่อยให้เย็น และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 nm ด้วย microplate reader รุ่น MRX A2000 บริษัท KLAB คำนวณปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากกราฟมาตรฐานกลูโคส ส่วนปริมาณน้ำตาลทั้งหมดวิเคราะห์ด้วยวิธี phenol-sulfuric acid โดยดัดแปลงจาก Dubois et al. (1956) และ Nielsen (2010) โดยผสมสารสกัดตัวอย่างกับสารละลายฟีนอลร้อยละ 5 และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น บ่มให้เกิดสีที่อุณหภูมิห้องและวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 490 nm ด้วย microplate reader รุ่น MRX A2000 บริษัท KLAB คำนวณปริมาณน้ำตาลทั้งหมดจากกราฟมาตรฐานกลูโคส และรายงานผลเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่าง

5.2 การวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่วิเคราะห์ ได้แก่ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH และปริมาณ GABA โดยฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของตัวอย่างแป้งวิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity โดยดัดแปลงจาก Chien et al. (2007) ทำการชั่งตัวอย่างแป้ง 1.00 g เติมน้ำกลั่นความเข้มข้นร้อยละ 80 ปริมาตร 10 ml เขย่าหรือกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในที่มืด จากนั้นนำไปเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็ว 4,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที และเก็บสารสกัดส่วนใสเพื่อนำไปวิเคราะห์ โดยผสมสารสกัดตัวอย่างกับสารละลาย DPPH ในเมทานอลที่ความเข้มข้น 0.1 mM ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร บ่มในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร และรายงานเป็นร้อยละการยับยั้งอนุมูล DPPH ตามสมการ

$$\text{ร้อยละการยับยั้ง DPPH} = [(A_{\text{control}} - A_{\text{sample}}) / A_{\text{control}}] \times 100$$

โดย A_{control} คือค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH ที่ไม่มีตัวอย่าง และ A_{sample} คือค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH ที่ทำปฏิกิริยากับสารสกัดตัวอย่าง ค่า IC_{50} คำนวณจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดตัวอย่างกับร้อยละการยับยั้ง DPPH และรายงานเป็นมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

สำหรับปริมาณกรดแกมมา-อะมิโนบิวทิริก หรือ GABA ทำการวิเคราะห์โดยวิธี colorimetric method โดยดัดแปลงจาก Jiang et al. (2021), Zhang et al. (2014) และ Nguyen et al. (2020) ซึ่งตัวอย่างแบ่ง 2.50 g เติมน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 50 ml จากนั้นสกัดที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้น กรองหรือเหวี่ยงแยกเพื่อเก็บสารสกัดส่วนใส นำสารสกัด 0.50 ml ทำปฏิกิริยากับ boric acid buffer ความเข้มข้น 0.2 mM pH 9.0 ปริมาตร 0.20 ml สารละลาย phenol ความเข้มข้น 6 g ต่อ 100 ml ปริมาตร 1.00 ml และ sodium hypochlorite ที่มี available chlorine ร้อยละ 9 ปริมาตร 0.40 ml จากนั้นให้ความร้อนในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที และทำให้เย็นในอ่างน้ำแข็งเป็นเวลา 20 นาที เติมน้ำกลั่นหรือละลาย 60 ปริมาตร 2.00 ml แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 645 nm ด้วย microplate reader รุ่น MRX A2000 บริษัท KLAB ทำการหาปริมาณ GABA ในตัวอย่างโดยคำนวณจากกราฟมาตรฐานของสารมาตรฐาน GABA และรายงานผลเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่างแบ่ง

5.3 การวิเคราะห์สมบัติเชิงหน้าที่ของแบ่ง

สมบัติเชิงหน้าที่ของตัวอย่างแบ่งที่วิเคราะห์ ได้แก่ กำลังการพองตัว ความสามารถในการละลาย และความสามารถในการดูดซับน้ำ โดยกำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายวิเคราะห์โดยดัดแปลงจากวิธีของ Leach et al. (1959) และ Schoch (1964) ซึ่งตัวอย่างแบ่ง 0.50 g ลงในหลอดเซนต์ริฟวีก เติมน้ำกลั่น 20 ml ผสมให้กระจายตัว และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 30, 60, 70, 80 และ 90°C เป็นเวลา 30 นาที ระหว่างการให้ความร้อนเขย่าหรือกลับหลอดเป็นระยะเพื่อให้ตัวอย่างกระจายตัวสม่ำเสมอ จากนั้นทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ส่วนใสถูกนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C จนได้น้ำหนักคงที่ เพื่อใช้คำนวณร้อยละความสามารถในการละลาย ส่วนตะกอนที่ได้หลังการเหวี่ยงแยกถูกชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณกำลังการพองตัวของแบ่ง ความสามารถในการละลายคำนวณจากน้ำหนักของของแข็งที่ละลายอยู่ในส่วนใสเทียบกับน้ำหนักแห้งของตัวอย่างเริ่มต้น ส่วนกำลังการพองตัวคำนวณจากน้ำหนักตะกอนเปียกหลังการให้ความร้อนและเหวี่ยงแยกเทียบกับ น้ำหนักแห้งของตัวอย่างที่ไม่ละลาย

ความสามารถในการดูดซับน้ำวิเคราะห์โดยดัดแปลงจาก Anderson and Guraya (2006) โดยซึ่งตัวอย่างแบ่ง 1.00 g เติมน้ำกลั่น 10 ml ผสมให้เข้ากัน และบ่มที่อุณหภูมิที่กำหนดเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเหวี่ยงแยกที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที เทส่วนใสออก และชั่งน้ำหนักตะกอนที่อุ้มน้ำไว้ ผลการทดลองรายงานเป็นร้อยละของน้ำหนักน้ำที่ตัวอย่างสามารถดูดซับไว้ได้เมื่อเทียบกับน้ำหนักตัวอย่างแห้งเริ่มต้น

5.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางโภชนาการโดยประมาณและแร่ธาตุ

ตัวอย่างแป้งสูตรที่พัฒนาถูกส่งวิเคราะห์องค์ประกอบทางโภชนาการโดยประมาณและแร่ธาตุ ณ ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรเพื่อการส่งออก คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยใช้วิธีมาตรฐานของห้องปฏิบัติการตามแนวทาง AOAC รายการวิเคราะห์ประกอบด้วยโปรตีนทั้งหมด ไขมัน ความชื้น เถ้า คาร์โบไฮเดรต เส้นใยหยาบ พลังงานทั้งหมด แคลเซียม เหล็ก แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส และสังกะสี ปริมาณโปรตีนทั้งหมดวิเคราะห์ด้วยวิธี Kjeldahl โดยใช้ค่า protein conversion factor เท่ากับ 6.25 ไขมันวิเคราะห์ด้วยวิธี Soxhlet extraction ความชื้นวิเคราะห์ด้วยวิธี loss on drying ที่อุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส เถ้าวิเคราะห์โดยการเผาที่อุณหภูมิ 550–600 องศาเซลเซียส เส้นใยหยาบวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใย ANKOM200 คาร์โบไฮเดรตและพลังงานทั้งหมดคำนวณตามวิธีมาตรฐานของห้องปฏิบัติการ ส่วนแร่ธาตุวิเคราะห์ด้วยวิธี in-house method TE-CH-134 ซึ่งอ้างอิงจาก AOAC International (2019) และรายงานผลเป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตัวอย่าง

5.5 การวิเคราะห์คุณภาพทางจุลชีววิทยา

คุณภาพทางจุลชีววิทยาของตัวอย่างแป้งสูตรที่พัฒนาวิเคราะห์โดยใช้วิธีมาตรฐานสำหรับอาหารแห้ง ได้แก่ total viable count, yeast and mold count, *Salmonella* sp., *Staphylococcus aureus* และ *Bacillus cereus* โดยเตรียมตัวอย่างด้วยการชั่งตัวอย่าง 25 กรัม ผสมกับสารละลายเชื้อจากปลอดเชื้อ และทำการเจือจางแบบลำดับขั้น Total viable count รายงานเป็น CFU/g ส่วน yeast and mold count รายงานเป็น CFU/g สำหรับ *Salmonella* sp., *S. aureus* และ *B. cereus* วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของห้องปฏิบัติการ และรายงานผลเป็นพบหรือไม่พบ หรือจำนวนจุลินทรีย์ต่อกรัมตามลักษณะของการทดสอบ สำหรับการประเมินคุณภาพทางจุลชีววิทยาของแป้งสูตรที่พัฒนาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานด้านจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 416 พ.ศ. 2563 โดยใช้เกณฑ์ของผลิตภัณฑ์กลุ่มแป้งที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้แก่ แป้งข้าวกล้อง เป็นเกณฑ์อ้างอิงสำหรับ *Salmonella* spp., *Staphylococcus aureus* และ *Bacillus cereus* (Ministry of Public Health, 2020) ร่วมกับเกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยาทั่วไปของอาหารแห้งและแป้งประกอบอาหารสำหรับจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์รา (Department of Medical Sciences, 2017)

5.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดลองดำเนินการจำนวน 3 ซ้ำ ผลการทดลองแสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วย one-way analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับนัยสำคัญ $p < 0.05$ โดยใช้โปรแกรม SPSS version 26.0

ผลการทดลอง

คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้ง

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งสูตรที่พัฒนาเปรียบเทียบกับผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยว แป้งมันสำปะหลังทางการค้า และแป้งสาลีอเนกประสงค์ทางการค้า พบว่าแป้งสูตรที่พัฒนา ได้แก่ ชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 7.86 ± 0.59 , 9.12 ± 0.64 และ $7.75 \pm 0.11\%$ ตามลำดับ (ตารางที่ 1) ในขณะที่ผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยวมีความชื้น $7.40 \pm 0.95\%$ สำหรับแป้งมันสำปะหลังทางการค้าและแป้งสาลีอเนกประสงค์ทางการค้ามีความชื้น 9.84 ± 0.14 และ $11.32 \pm 0.20\%$ ตามลำดับ โดยแป้งสาลีอเนกประสงค์ทางการค้ามีความชื้นสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักแห้งของแป้งสูตรที่พัฒนา พบว่า อยู่ในช่วง $90.88-92.25\%$ โดยชุดการทดลองที่ 1 และ 3 มีค่าน้ำหนักแห้งสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังทางการค้าและแป้งสาลีอเนกประสงค์ทางการค้า สำหรับปริมาณเถ้า พบว่าแป้งสูตรที่พัฒนาและผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยวมีค่าอยู่ในช่วง $0.70-0.78$ g/100 g ซึ่งสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังทางการค้าและแป้งสาลีอเนกประสงค์ทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่ค่า pH ของแป้งสูตรที่พัฒนาและผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยวอยู่ในช่วง $5.15-5.56$ ซึ่งต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลังทางการค้าและแป้งสาลีอเนกประสงค์ทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดของแป้งในสูตรที่พัฒนา ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าแป้งสูตรที่พัฒนาทั้ง 3 สูตร มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์อยู่ในช่วง $11.04-13.49$ mg/g และมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดอยู่ในช่วง $15.50-19.05$ mg/g โดยชุดการทดลองที่ 3 มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดสูงที่สุดในกลุ่มแป้งสูตรที่พัฒนา อย่างไรก็ตาม พบว่า ผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยวและแป้งสาลีอเนกประสงค์ทางการค้ามีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดสูงกว่าแป้งสูตรที่พัฒนา ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังทางการค้ามีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ต่ำที่สุด เท่ากับ 2.44 ± 0.05 mg/g

จากการทดลองทำการวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIE L^* , a^* และ b^* พบว่าแป้งสูตรที่พัฒนาและผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยวมีค่า L^* อยู่ในช่วง $31.63-34.92$ (ตารางที่ 1) ซึ่งต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลังทางการค้าและแป้งสาลีอเนกประสงค์ทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยแป้งสาลีอเนกประสงค์ทางการค้ามีค่า L^* สูงที่สุด เท่ากับ 66.12 ± 1.00 รองลงมาคือแป้งมันสำปะหลังทางการค้า เท่ากับ 61.33 ± 1.22 สำหรับค่า a^* ของแป้งสูตรที่พัฒนาอยู่ในช่วง $3.68-4.14$ แสดงแนวโน้มของสีแดงเล็กน้อย ในขณะที่แป้งทางการค้ามีค่า a^* ใกล้ศูนย์ ส่วนค่า b^* ของแป้งสูตรที่พัฒนาและผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยวอยู่ในช่วง $20.46-24.28$ ซึ่งสูงกว่าแป้งทางการค้า แสดงให้เห็นว่าแป้งที่มีส่วนประกอบของมันสำปะหลังหมักและข้าวกล้องงอกมีแนวโน้มเป็นสีเหลืองถึงเหลืองน้ำตาลมากกว่าแป้งทางการค้า

สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้ง

จากการประเมินฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH ของแป้งทั้งหมด พบว่าแป้งสูตรที่พัฒนาให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าแป้งทางการค้า (ภาพที่ 2 และตารางที่ 2) โดยเมื่อพิจารณาค่า IC_{50} ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของตัวอย่างที่ทำให้ค่า DPPH ลดลงร้อยละ 50 พบว่าชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีค่า IC_{50} เท่ากับ 272.69 ± 8.01 , 293.86 ± 12.12 และ 275.13 ± 15.06 mg/mL ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยว แป้งมันสำปะหลังทางการค้า และแป้งสาธิตเนกประสงค์ทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยแป้งมันสำปะหลังทางการค้าและแป้งสาธิตเนกประสงค์ทางการค้ามีค่า IC_{50} สูงถึง 722.10 ± 11.01 และ 809.26 ± 20.01 mg/mL ตามลำดับ และเมื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณ GABA ของแป้งสูตรที่พัฒนา พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 0.717–0.799 mg/g โดยชุดการทดลองที่ 3 มีปริมาณ GABA สูงที่สุด เท่ากับ 0.799 ± 0.03 mg/g รองลงมาคือชุดการทดลองที่ 2 และ 1 ซึ่งมีค่า 0.754 ± 0.04 และ 0.717 ± 0.01 mg/g ตามลำดับ ขณะที่ผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยว แป้งมันสำปะหลังทางการค้า และแป้งสาธิตเนกประสงค์ทางการค้ามีปริมาณ GABA ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.091–0.094 mg/g

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งผสมจากมันสำปะหลังหมักร่วมกับข้าวกล้องงอกและแป้งข้าว

ค่าวิเคราะห์	ชุดการทดลองที่ 2		ชุดการทดลองที่ 3		ชุดการทดลองที่ 4		แป้งมันสำปะหลังทาง	แป้งสาลีเอนกประสงค์ทาง
	ชุดการทดลองที่ 1						การค้า	การค้า
ความชื้น (%)	7.86 ± 0.59 ^c	9.12 ± 0.64 ^b	7.75 ± 0.11 ^c	7.40 ± 0.95 ^c	9.84 ± 0.14 ^b	11.32 ± 0.20 ^a		
น้ำหนักรีด (%)	92.14 ± 0.59 ^a	90.88 ± 0.64 ^b	92.25 ± 0.11 ^a	92.60 ± 0.95 ^a	90.16 ± 0.14 ^b	88.68 ± 0.20 ^c		
เถ้า (g/100 g)	0.70 ± 0.02 ^a	0.78 ± 0.13 ^a	0.74 ± 0.13 ^a	0.70 ± 0.12 ^a	0.32 ± 0.04 ^b	0.38 ± 0.02 ^b		
pH	5.31 ± 0.02 ^b	5.34 ± 0.02 ^b	5.56 ± 0.09 ^b	5.15 ± 0.09 ^b	6.83 ± 0.03 ^a	6.64 ± 0.04 ^a		
น้ำตาลรีดิวซ์ (mg/g)	11.04 ± 0.50 ^c	12.58 ± 0.46 ^c	13.49 ± 0.25 ^c	21.79 ± 2.21 ^b	2.44 ± 0.05 ^d	29.88 ± 1.75 ^a		
น้ำตาลทั้งหมด (mg/g)	15.50 ± 0.94 ^c	16.16 ± 0.79 ^c	19.05 ± 0.96 ^b	33.07 ± 3.88 ^a	12.77 ± 0.20 ^d	34.16 ± 1.28 ^a		
L*	31.63 ± 0.72 ^b	32.67 ± 0.53 ^b	34.92 ± 0.79 ^b	32.87 ± 1.04 ^b	61.33 ± 1.22 ^a	66.12 ± 1.00 ^a		
a*	3.68 ± 0.38 ^a	4.08 ± 0.07 ^a	4.14 ± 0.12 ^a	3.19 ± 0.01 ^a	-0.06 ± 0.05 ^b	-0.02 ± 0.00 ^b		
b*	20.46 ± 0.56 ^a	21.28 ± 0.25 ^a	22.38 ± 0.24 ^a	24.28 ± 0.24 ^a	10.31 ± 0.26 ^b	9.52 ± 0.01 ^b		

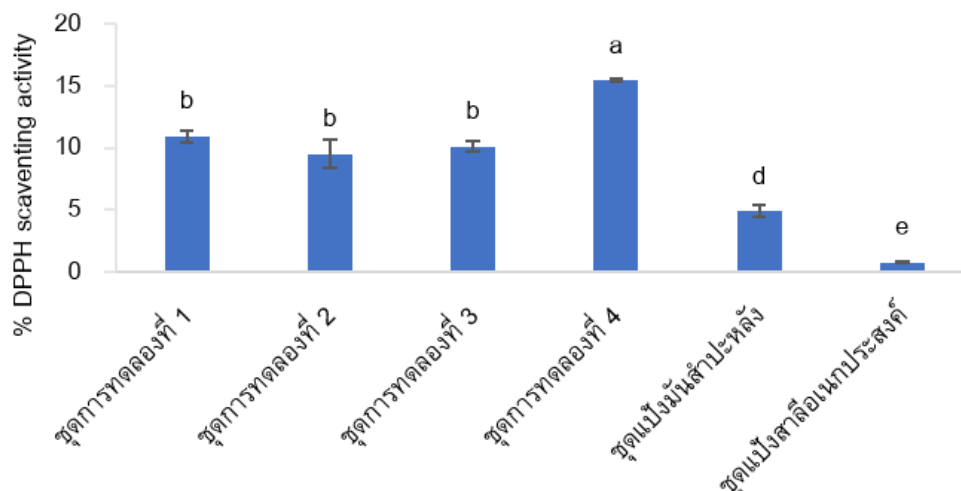
หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน; ตัวอักษรต่างกันในแต่ละแถวแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$

ชุดการทดลองที่ 1 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวขาว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1

ชุดการทดลองที่ 2 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1

ชุดการทดลองที่ 3 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวขาว ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1:1

ชุดการทดลองที่ 4 ใช้ผงมันสำปะหลังหมักเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 2 แสดงค่าสารต้านอนุมูลอิสระของตัวอย่างแป้งสูตรต่าง ๆ เปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังทางการค้า แป้งเอนกประสงค์ทางการค้า (ชุดการทดลองที่ 1 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวขาว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1; ชุดการทดลองที่ 2 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1; ชุดการทดลองที่ 3 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวขาว ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1:1; ชุดการทดลองที่ 4 ใช้ผงมันสำปะหลังหมักเพียงอย่างเดียว)

ตารางที่ 2 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งผสมจากมันสำปะหลังหมักร่วมกับข้าวกล้องงอกและแป้งข้าว

ชุดการทดลอง	ค่า IC ₅₀ (mg/mL)	GABA (mg/g)
ชุดการทดลองที่ 1	272.69±8.01 ^a	0.717±0.01 ^a
ชุดการทดลองที่ 2	293.86±12.12 ^a	0.754±0.04 ^a
ชุดการทดลองที่ 3	275.13±15.06 ^a	0.799±0.03 ^a
ชุดการทดลองที่ 4	334.53±9.41 ^b	0.091±0.01 ^b
ชุดแบ่งมันสำปะหลังทางการค้า	722.10±11.01 ^c	0.094±0.00 ^b
ชุดแบ่งสาลิอนกประสงค์ทางการค้า	809.26±20.01 ^c	0.091±0.01 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ในแต่ละค่าการทดลอง

ชุดการทดลองที่ 1 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวขาว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1

ชุดการทดลองที่ 2 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1

ชุดการทดลองที่ 3 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวขาว ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1:1

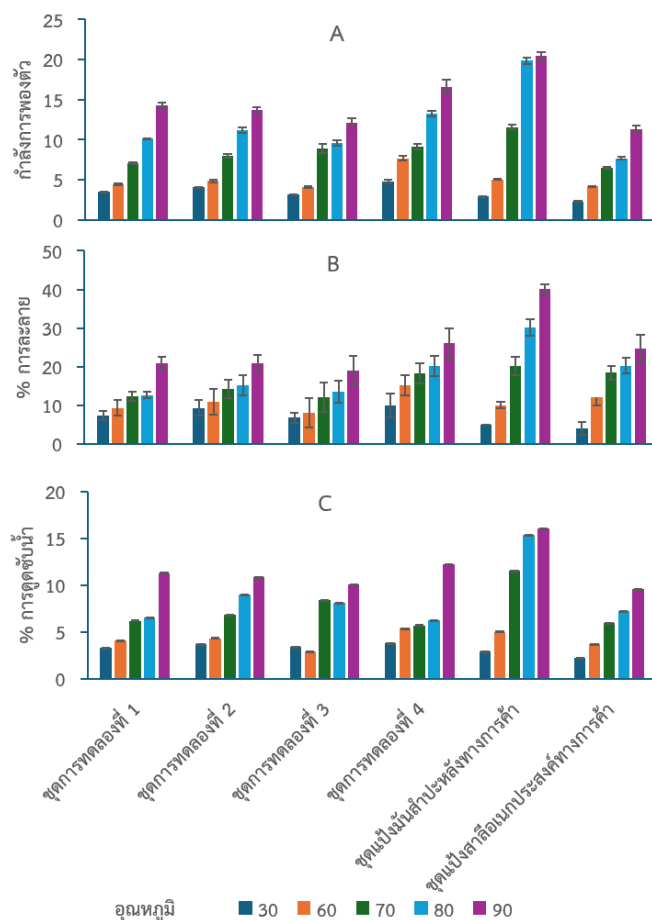
ชุดการทดลองที่ 4 ใช้ผงมันสำปะหลังหมักเพียงอย่างเดียว

สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้ง

เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้ง ได้แก่ กำลังการพองตัว ความสามารถในการละลาย และความสามารถในการดูดซับน้ำ ที่อุณหภูมิ 30, 60, 70, 80 และ 90°C ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่า กำลังการพองตัวของแป้งทุกชุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 80–90°C แสดงให้เห็นว่าความร้อนมีผลต่อการดูดน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้งอย่างชัดเจน โดยแป้งมันสำปะหลัง ทางการค้ามีแนวโน้มให้ค่ากำลังการพองตัวสูงกว่าแป้งสูตรที่พัฒนาและผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยวในช่วง อุณหภูมิสูง ขณะที่แป้งสูตรที่พัฒนาให้ค่ากำลังการพองตัวต่ำกว่า ซึ่งอาจสัมพันธ์กับการเป็นแป้งผสมที่มีองค์ประกอบจากมันสำปะหลังหมัก ผงข้าว และข้าวกล้องงอก เมื่อทำการวิเคราะห์ความสามารถในการละลายของแป้ง พบว่า ความสามารถในการละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นเช่นเดียวกันกับค่ากำลังการพองตัว โดยค่าการละลายเพิ่มขึ้นเด่นชัดในช่วงอุณหภูมิ 70–90°C แสดงถึงการหลุดออกขององค์ประกอบที่ละลายน้ำได้จากเม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อน ส่วนความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งแต่ละชุดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิสูง ซึ่งสะท้อนความสามารถของแป้งในการอุ้มน้ำหลังได้รับความร้อน ทั้งนี้ แป้งสูตรที่พัฒนาแสดงสมบัติเชิงหน้าที่แตกต่างจากแป้งมันสำปะหลังทางการค้าและแป้งสาลีอเนกประสงค์ทางการค้า โดยเฉพาะด้านการพองตัวและการละลาย

องค์ประกอบทางโภชนาการโดยประมาณและแร่ธาตุของแป้งสูตรที่พัฒนา

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางโภชนาการโดยประมาณและแร่ธาตุของแป้งสูตรที่พัฒนาและผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยว พบว่าแป้งสูตรที่พัฒนา ได้แก่ ชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีปริมาณโปรตีนทั้งหมดเท่ากับ 5.68 ± 0.10 , 4.59 ± 0.18 และ 5.59 ± 0.21 g/100 g ตามลำดับ (ตารางที่ 3) ขณะที่ผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยว มีปริมาณโปรตีนทั้งหมด 6.12 ± 0.28 g/100 g ปริมาณไขมันของตัวอย่างอยู่ในช่วง 0.84–1.02 g/100 g และความชื้นอยู่ในช่วง 7.54–7.60 g/100 g พบว่า ปริมาณเถ้าของแป้งสูตรที่พัฒนาและผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยวอยู่ในช่วง 0.76–0.81 g/100 g ส่วนคาร์โบไฮเดรตอยู่ในช่วง 85.18–87.13 g/100 g และเส้นใยหยาบอยู่ในช่วง 2.50–3.39 g/100 g โดยชุดการทดลองที่ 3 มีปริมาณเส้นใยหยาบสูงที่สุด เท่ากับ 3.39 ± 0.12 g/100 g พลังงานทั้งหมดของตัวอย่างอยู่ในช่วง 362.50–375.52 kcal/100 g เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุของแป้งสูตรที่พัฒนา พบว่า ตัวอย่างแป้งสูตรที่พัฒนาและผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยวมีฟอสฟอรัสเป็นแร่ธาตุที่พบในปริมาณสูงที่สุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1130.14–1401.95 mg/kg รองลงมาคือแมกนีเซียม ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 423.05–532.05 mg/kg และแคลเซียม ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 285.23–316.23 mg/kg นอกจากนี้ยังตรวจพบเหล็กในช่วง 6.433–8.487 mg/kg และสังกะสีในช่วง 10.143–13.775 mg/kg โดยชุดการทดลองที่ 2 มีแคลเซียม เหล็ก และสังกะสีสูงที่สุดในกลุ่มตัวอย่างที่วิเคราะห์



ภาพที่ 3 สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งผสมจากมันสำปะหลังหมักร่วมกับข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวที่อุณหภูมิต่าง ๆ (A: กำลังการพองตัว; B: % การละลาย; C: % การดูดซับน้ำ และ ชุดการทดลองที่ 1 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผง ข้าวขาว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1; ชุดการทดลองที่ 2 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผง ข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1; ชุดการทดลองที่ 3 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผง ข้าวขาว ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1:1; ชุดการทดลองที่ 4 ใช้ผงมัน สำปะหลังหมักเพียงอย่างเดียว)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางโภชนาการโดยประมาณและปริมาณแร่ธาตุของแป้งสูตรที่พัฒนา

ค่าวิเคราะห์	ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 2	ชุดการทดลองที่ 3	ชุดการทดลองที่ 4
Protein (g/100g)	5.68 ± 0.10 ^b	4.59 ± 0.18 ^c	5.59 ± 0.21 ^b	6.12 ± 0.28 ^a
Fat (g/100g)	0.84 ± 0.14 ^b	1.00 ± 0.00 ^a	1.01 ± 0.00 ^a	1.02 ± 0.01 ^a
Moisture (g/100g)	7.54 ± 0.06	7.54 ± 0.05	7.54 ± 0.08	7.60 ± 0.11
Ash (g/100g)	0.76 ± 0.01	0.79 ± 0.01	0.79 ± 0.01	0.81 ± 0.09
Crude fiber (g/100g)	2.50 ± 0.09 ^b	3.29 ± 0.11 ^a	3.39 ± 0.12 ^a	3.19 ± 0.05 ^a
Carbohydrates (g/100g)	85.18	86.08	87.13	86.03
Total energy (Kcal/100g)	370.99	371.70	375.52	362.50
Calcium (mg/kg)	290.49	316.23	313.33	285.23
Iron (mg/kg)	7.504	8.487	8.223	6.433
Magnesium (mg/kg)	528.81	530.00	532.05	423.05
Phosphorus (mg/kg)	1401.95	1351.10	1361.18	1130.14
Zinc (mg/kg)	12.414	13.775	12.834	10.143

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแต่ละแถวแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ในแต่ละค่าการทดลอง

ชุดการทดลองที่ 1 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวขาว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1

ชุดการทดลองที่ 2 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1

ชุดการทดลองที่ 3 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวขาว ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1:1

ชุดการทดลองที่ 4 ใช้ผงมันสำปะหลังหมักเพียงอย่างเดียว

คุณภาพทางจุลชีววิทยาของแป้งสูตรที่พัฒนา

จากการวิเคราะห์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของแป้งสูตรที่พัฒนาและผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยว พบว่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดของชุดการทดลองที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าเท่ากับ $8.01 \pm 0.12 \times 10^3$, $7.81 \pm 0.18 \times 10^3$, $7.22 \pm 0.22 \times 10^3$ และ $8.91 \pm 0.02 \times 10^3$ CFU/g ตามลำดับ (ตารางที่ 4) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคือน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.0×10^4 CFU/g (Department of Medical Sciences, 2017) ขณะที่จำนวนยีสต์และราของ

ทุกชุดการทดลองมีค่าน้อยกว่า 100 CFU/g เมื่อทำการตรวจหาจุลินทรีย์ก่อโรค พบว่า ไม่พบเชื้อ *Salmonella* sp., *Staphylococcus aureus* และ *Bacillus cereus* ในตัวอย่างทุกชุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์กลุ่มแป้งและอาหารแห้ง พบว่าตัวอย่างแป้งสูตรที่พัฒนาและผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยวอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด (Ministry of Public Health, 2020) แสดงให้เห็นว่ากระบวนการหมัก อบแห้ง บด และเก็บรักษาภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ให้ผลิตภัณฑ์แป้งที่มีคุณภาพทางจุลชีววิทยาเหมาะสมในระดับเบื้องต้น

ตารางที่ 4 คุณภาพทางจุลชีววิทยาของแป้งสูตรที่พัฒนาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

ชุดตัวอย่าง	Total viable count (CFU/g)*	Yeast/mold count (CFU/g)	<i>Salmonella</i> sp. (/25g)**	<i>S. aureus</i> (CFU/g)**	<i>B. cereus</i> (CFU/g)**	หมายเหตุ
ชุดการทดลองที่ 1	$8.01 \pm 0.12 \times 10^3$	<100	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
ชุดการทดลองที่ 2	$7.81 \pm 0.18 \times 10^3$	<100	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
ชุดการทดลองที่ 3	$7.22 \pm 0.22 \times 10^3$	<100	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
ชุดการทดลองที่ 4	$8.91 \pm 0.02 \times 10^3$	<100	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

หมายเหตุ: *ใช้เกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยาทั่วไปของอาหารแห้ง/แป้งประกอบอาหาร (Department of Medical Sciences, 2017); **ใช้เกณฑ์จุลินทรีย์ก่อโรคของผลิตภัณฑ์กลุ่มแป้งที่มีลักษณะใกล้เคียงกันตาม Ministry of Public Health (2020)

ชุดการทดลองที่ 1 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวขาว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1

ชุดการทดลองที่ 2 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1

ชุดการทดลองที่ 3 ผสมผงมันสำปะหลังหมัก ผงข้าวขาว ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5:1:1:1

ชุดการทดลองที่ 4 ใช้ผงมันสำปะหลังหมักเพียงอย่างเดียว

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการหมักมันสำปะหลังด้วยหัวเชื้อ *R. oligosporus* ร่วมกับการผสมข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังได้หลายมิติ ทั้งด้านเคมี กายภาพ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ สมบัติเชิงหน้าที่ องค์ประกอบทางโภชนาการ และคุณภาพทางจุลชีววิทยา โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับกรอบแนวคิดของการวิจัยที่ต้องการใช้กระบวนการหมักและการทำแป้งผสมเพื่อเพิ่มศักยภาพของมันสำปะหลังซึ่งโดยทั่วไปมีข้อจำกัดด้านโปรตีนและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก แต่มีปริมาณโปรตีน ไขมัน และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบจากธัญพืชบางชนิด (Nilusha et al., 2021; Mohidin et al., 2023) ดังนั้น การนำข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวมาใช้ร่วมกับมันสำปะหลังหมักจึงเป็นแนวทางที่ช่วยเสริมองค์ประกอบบางส่วนที่มันสำปะหลังมีอยู่น้อย และทำให้แป้งผสมที่ได้มีคุณสมบัติแตกต่างจากแป้งมันสำปะหลังทางการค้า

เมื่อพิจารณาค่าความชื้นของแป้งสูตรที่พัฒนา พบว่า อยู่ในระดับต่ำและใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์แป้งแห้งทั่วไป แสดงว่ากระบวนการอบแห้งที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถลดความชื้นของตัวอย่างให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาเบื้องต้นได้ อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของค่าความชื้นระหว่างตัวอย่างอาจสัมพันธ์กับองค์ประกอบของแป้งผสม เช่น ชนิดของแป้งข้าว ปริมาณเส้นใย และโครงสร้างของเม็ดแป้ง ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการยึดจับน้ำของแป้งแต่ละสูตร การที่แป้งสูตรที่พัฒนาและผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยวนี้อาจมีค่า pH ต่ำกว่าแป้งทางการค้า อาจเนื่องมาจากการแช่และการหมัก ซึ่งอาจทำให้เกิดกรดอินทรีย์หรือสารเมแทบอไลต์ที่มีความเป็นกรดในระหว่างกระบวนการหมัก (Canoy et al., 2024; Gautheron et al., 2024) และเมื่อพิจารณาค่าสี พบว่า แป้งสูตรที่พัฒนาและผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยวนี้อาจมีค่าความสว่างต่ำกว่าแป้งทางการค้า และมีค่า b^* สูงกว่า แสดงถึงแนวโน้มของสีเหลืองถึงเหลืองน้ำตาล อาจเกิดจากสีตามธรรมชาติของวัตถุดิบ ได้แก่ ข้าวกล้องงอกและผลิตภัณฑ์จากการหมัก รวมทั้งผลของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน ซึ่งอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากปฏิกิริยาสีน้ำตาลหรือการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบบางชนิดในวัตถุดิบ สอดคล้องกับรายงานของ Li et al. (2023) ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนสัดส่วนของแป้งมันสำปะหลังในแป้งผสมมีผลต่อสีและคุณสมบัติทางกายภาพของแป้งและโด

สำหรับปริมาณเถ้า พบว่า ในแป้งสูตรที่พัฒนามีค่าสูงกว่าแป้งทางการค้า อาจเนื่องมาจากการเติมข้าวกล้องงอกและแป้งข้าว ซึ่งเป็นแหล่งของสารอินทรีย์และแร่ธาตุบางชนิด โดยเฉพาะฟอสฟอรัส แมกนีเซียม แคลเซียม เหล็ก และสังกะสี สอดคล้องกับรายงานของ Katunzi-Kilewela et al. (2023) ซึ่งพบว่าการทำแป้งผสมจากมันสำปะหลังร่วมกับวัตถุดิบพืชอื่นสามารถเพิ่มปริมาณโปรตีน เส้นใย ไขมัน และเถ้าได้เมื่อเทียบกับแป้งมันสำปะหลังเดี่ยว นอกจากนี้ การที่แป้งสูตรที่พัฒนามีปริมาณเส้นใยหยาบและโปรตีนทั้งหมดในระดับสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังทั่วไป อาจเกิดจากการใช้วัตถุดิบร่วมกับกระบวนการหมักโดยเชื้อราในสกุล *Rhizopus* ซึ่งสามารถ

เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบโปรตีน การย่อยสลายโครงสร้างพอลิเมอร์บางส่วน และเพิ่มองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพทางโภชนาการของวัตถุดิบได้ (Canoy et al., 2024; Zhang et al., 2022)

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมด พบว่าแป้งสูตรที่พัฒนามีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังทางการค้า แต่ต่ำกว่าผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยว แสดงให้เห็นว่ากระบวนการหมักมันสำปะหลังด้วย *R. oligosporus* อาจมีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนบางส่วนไปเป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็กหรือสารประกอบที่ละลายน้ำได้มากขึ้น โดยเฉพาะในระหว่างการแช่ การต้ม และการหมัก ซึ่งอาจทำให้โครงสร้างของสตาร์ชและพอลิแซ็กคาไรด์บางส่วนเกิดการคลายตัวหรือถูกย่อยบางส่วนด้วยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ กระบวนการหมักแบบ solid-state fermentation โดยใช้ราในสกุล *Rhizopus* มีรายงานว่าสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างวัตถุดิบพืชและปลดปล่อยเอนไซม์หลายชนิด เช่น α -amylase, cellulase, lipase และ protease ซึ่งเกี่ยวข้องกับการย่อยองค์ประกอบโมเลกุลใหญ่ในวัตถุดิบอาหารให้มีขนาดเล็กลง (Miskiewicz et al., 2003; Miskiewicz et al., 2004; Zhang et al., 2022) ดังนั้น การที่ผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยวมีค่าน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังทางการค้า จึงอาจเกิดจากผลของกระบวนการหมักที่ช่วยเพิ่มปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้หรือสารที่มีสมบัติรีดิวซ์ในตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม เมื่อนำผงมันสำปะหลังหมักไปพัฒนาเป็นแป้งผสมร่วมกับผงข้าวขาว ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดของแป้งสูตรที่พัฒนาลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผงมันสำปะหลังหมักเดี่ยว อาจเกิดจากผลของการเจือจางองค์ประกอบของผงมันสำปะหลังหมักด้วยวัตถุดิบจากข้าว รวมทั้งความแตกต่างขององค์ประกอบคาร์โบไฮเดรต โปรตีน เส้นใย และสารที่ไม่ใช่สตาร์ชในแป้งผสมแต่ละสูตร การเติมวัตถุดิบพืชชนิดอื่นลงในแป้งมันสำปะหลังสามารถเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งได้อย่างมีนัยสำคัญ (Katunzi-Kilewela et al., 2023; Li et al., 2023) ในการศึกษาขั้น ชูดการทดลองที่ 3 มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดสูงที่สุดในกลุ่มแป้งสูตรที่พัฒนา อาจเนื่องมาจากสูตรดังกล่าวมีองค์ประกอบรวมจากผงข้าวขาว ผงข้าวเหนียว และผงข้าวกล้องงอก ซึ่งอาจเพิ่มสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้หรือองค์ประกอบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาในการวิเคราะห์น้ำตาลได้มากกว่าสูตรอื่น

จากการวิเคราะห์ค่าสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ พบว่าแป้งสูตรที่พัฒนามีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าแป้งทางการค้าอย่างชัดเจน โดยมีค่า IC_{50} ที่ต่ำกว่า อาจเกิดจากหลายปัจจัยร่วมกัน เช่น การมีข้าวกล้องงอกเป็นส่วนประกอบ การมีสารประกอบฟีนอลิกหรือสารต้านอนุมูลอิสระบางชนิดในวัตถุดิบจากข้าว และการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบระหว่างกระบวนการหมัก อันเนื่องมาจากกระบวนการงอกของข้าวสามารถเพิ่ม GABA สารประกอบฟีนอลิก และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของข้าวได้ (Sitanggang et al., 2021; Tsou et al., 2024)

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งที่พัฒนา ได้แก่ กำลังการพองตัว ความสามารถในการละลาย และความสามารถในการดูดซับน้ำ พบว่า ค่าที่ได้มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยค่าที่สูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิสูง

เกิดจากการดูดน้ำ การพองตัว และการหลุดออกขององค์ประกอบที่ละลายน้ำได้จากเม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อน เมื่อเม็ดแป้งที่โครงสร้างภายในถูกทำให้คลายตัวส่งผลให้น้ำสามารถแทรกเข้าสู่โครงสร้างของเม็ดแป้งได้มากขึ้น และเกิดการพองตัวหรือการละลายขององค์ประกอบบางส่วน (Leach et al., 1959) อย่างไรก็ตาม แป้งสูตรที่พัฒนาเป็นแป้งผสมที่มีองค์ประกอบจากมันสำปะหลังหมัก แป้งข้าว และข้าวกล้องงอก จึงอาจมีปริมาณโปรตีน เส้นใย และองค์ประกอบที่ไม่ใช่สตาร์ชเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจรบกวนการพองตัวของเม็ดแป้งหรือเปลี่ยนความสามารถในการดูดซับน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังทางการค้า (Katunzi-Kilewela et al., 2023; Li et al., 2023)

จากการวิเคราะห์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของแป้งสูตรที่พัฒนา พบว่า อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดยจำนวน จุลินทรีย์ทั้งหมดอยู่ในระดับต่ำ ยีสต์และราอยู่ในระดับต่ำ และไม่พบจุลินทรีย์ก่อโรคที่ทดสอบ ได้แก่ *Salmonella* sp., *Staphylococcus aureus* และ *Bacillus cereus* เนื่องจากกระบวนการต้ม หมัก อบแห้ง และเก็บรักษาสามารถควบคุมคุณภาพทางจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์แป้งได้ แม้ว่ากระบวนการหมักจะเกี่ยวข้องกับ การเจริญของจุลินทรีย์ แต่การอบแห้งจนความชื้นต่ำและการเก็บรักษาในภาชนะปิดสนิทจะช่วยลดความเสี่ยงต่อการ เจริญของจุลินทรีย์ไม่พึงประสงค์ เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ด้านจุลินทรีย์ก่อโรคของผลิตภัณฑ์กลุ่มแป้งที่มี ลักษณะใกล้เคียงกันตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 416 พ.ศ. 2563 และเกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยา ของอาหารแห้ง พบว่าแป้งที่พัฒนาได้มีคุณภาพทางจุลชีววิทยาเหมาะสมตามเกณฑ์อ้างอิงที่เกี่ยวข้อง (Department of Medical Sciences, 2017; Ministry of Public Health, 2020)

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าผงแป้งมันสำปะหลังหมักด้วยหัวเชื้อ *R. oligosporus* สามารถนำมาพัฒนา เป็นแป้งผสมร่วมกับข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวได้ โดยแป้งสูตรที่พัฒนาแสดงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพแตกต่าง จากแป้งทางการค้า มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH และมีปริมาณ GABA สูงกว่าแป้งทางการค้า นอกจากนี้ แป้งสูตรที่พัฒนายังมีโปรตีน เส้นใยหยาบ และแร่ธาตุบางชนิดเป็นองค์ประกอบ และมีคุณภาพทางจุลชีววิทยาอยู่ ในเกณฑ์มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น แป้งผสมจากมันสำปะหลังหมักร่วมกับข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวจึงมี ศักยภาพในการใช้เป็นวัตถุดิบอาหารทางเลือกที่มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการประยุกต์ใช้แป้งสูตรที่พัฒนาในผลิตภัณฑ์อาหารจริง เช่น ผลิตภัณฑ์ขนมอบ คุกกี้ หรือ ผลิตภัณฑ์แป้งทางเลือก เพื่อประเมินความเหมาะสมด้านโครงสร้าง เนื้อสัมผัส สี และคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลัง

การแปรรูป

2. ควรศึกษาแนวทางปรับปรุงกระบวนการอบแห้งหรือการผลิตผงแป้ง เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงสีและเพิ่มค่าความสว่างของแป้ง โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีอ่อนหรือสีขาว
3. ควรประเมินการยอมรับของผู้บริโภคและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ใช้แป้งสูตรที่พัฒนา ภายใต้กระบวนการรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ เพื่อยืนยันศักยภาพในการนำไปใช้ในเชิงผลิตภัณฑ์อาหารต่อไป
4. ควรเพิ่มเติมในส่วนของการทดสอบอายุการเก็บรักษา

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนสถานที่และเครื่องมือในการดำเนินการทดลอง ขอขอบคุณศูนย์บริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์หั่วเชื้อ *R. oligosporus* และขอขอบคุณศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรเพื่อการส่งออก คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้บริการวิเคราะห์องค์ประกอบทางโภชนาการโดยประมาณและแร่ธาตุของตัวอย่างแป้งในการศึกษาครั้งนี้

รายการอ้างอิง (References)

- Anderson, A. K., & Guraya, H. S. (2006). Effects of Microwave Heat-Moisture Treatment on Properties of Waxy and Non-Waxy Rice Starches. *Food Chemistry*, 97(2), 318–323. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.04.025>
- AOAC International. (2005). *Official methods of analysis of AOAC International* (18th ed.). AOAC International.
- AOAC International. (2019). Official Method 984.27: Calcium, copper, iron, magnesium, manganese, phosphorus, potassium, sodium, and zinc in infant formula. In G. W. Latimer Jr. (Ed.), *Official methods of analysis of AOAC International* (21st ed.). AOAC International.
- Canoy, T. S., Wiedenbein, E. S., Bredie, W. L. P., Meyer, A. S., Wösten, H. A. B., & Nielsen, D. S. (2024). Solid-State Fermented Plant Foods as New Protein Sources. *Annual Review of Food Science and Technology*, 15, 189–210. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-060721-013526>

- Chien, P.-J., Sheu, F., Huang, W.-T., & Su, M.-S. (2007). Effect of Molecular Weight of Chitosans on Their Antioxidative Activities in Apple Juice. *Food Chemistry*, 102(4), 1192–1198. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.07.007>
- Department of Medical Sciences. (2017). *Microbiological quality criteria for foods and food contact containers* (3rd ed.). Ministry of Public Health. (in Thai)
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Gautheron, O., Nyhan, L., Torreiro, M. G., Tlais, A. Z. A., Cappello, C., Gobetti, M., ..., & Sahin, A. W. (2024). Exploring the Impact of Solid-state Fermentation on Fava Bean Flour: A comparative Study of *Aspergillus oryzae* and *Rhizopus oligosporus*. *Foods*, 13(18), 1-27. <https://doi.org/10.3390/foods13182922>
- Jabeen, R., Jan, N., Naseer, B., Sarangi, P. K., Sridhar, K., Dikkala, P. K., ..., & Inbaraj, B. S. (2024). Development of Germinated-Brown-Rice-Based Novel Functional Beverage Enriched with γ -Aminobutyric Acid: Nutritional and Bio-Functional Characterization. *Foods*, 13(8), 1-14. <https://doi.org/10.3390/foods13081282>
- Jiang, X., Xu, Q., Zhang, A., Liu, Y., Zhao, L., Gu, L., ..., & Zhang, D. (2021). Optimization of γ -Aminobutyric Acid (GABA) Accumulation in Germinating Adzuki Beans (*Vigna angularis*) by Vacuum Treatment and Monosodium Glutamate, and the Molecular Mechanisms. *Frontiers in Nutrition*, 8, 1-12. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.693862>
- Katunzi-Kilewela, A., Rweyemamu, L. M. P., Kaale, L. D., Kibazohi, O., & Fortunatus, R. M. (2023). Proximate Composition, Pasting and Functional Properties of Composite Flour Blends from Cassava and Chia Seeds Flour. *Food Science and Technology International*, 29(3), 217–227. <https://doi.org/10.1177/10820132211069471>
- Leach, H. W., McCowen, L. D., & Schoch, T. J. (1959). Structure of the Starch Granule. I. Swelling and Solubility Patterns of Various Starches. *Cereal Chemistry*, 36, 534–544.
- Li, M., Zhang, Y., You, X., Wang, Y., Zhou, K., Wei, P., & Wei, L. (2023). Assessment of Functional Properties of Wheat–Cassava Composite Flour. *Foods*, 12(19), 1-15. <https://doi.org/10.3390/foods12193585>

- Martins, S. I. F. S., Jongen, W. M. F., & van Boekel, M. A. J. S. (2000). A Review of Maillard Reaction in Food and Implications to Kinetic Modelling. *Trends in Food Science & Technology*, 11(9–10), 364–373. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(01\)00022-X](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(01)00022-X)
- Miller, G. L. (1959). Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. *Analytical Chemistry*, 31(3), 426–428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>
- Ministry of Public Health. (2020). Notification of the Ministry of Public Health (No. 416) B.E. 2563 (2020) issued by virtue of the Food Act B.E. 2522: Prescribing the quality or standard, principles, conditions and methods of analysis for pathogenic microorganisms in foods. *Government Gazette*, 137(Special Part 237 Ngor), 9 October 2020. (in Thai)
- Miszkiewicz, H., Bizukojc, M., Rozwandowicz, A., & Bielecki, S. (2003). Physiological Properties and Enzymatic Activities of *Rhizopus oligosporus* in Solid State Fermentations. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 68(2), 313–316.
- Miszkiewicz, H., Rozwandowicz, A., & Bielecki, S. (2004). Physiological and Enzymatic Activities of *Rhizopus oligosporus* in Swing Solid-State Reactor. *Chemical Papers*, 58(6), 407–412.
- Mohidin, S. R. N. S. P., Moshawih, S., Hermansyah, A., Asmuni, M. I., Shafqat, N., & Ming, L. C. (2023). Cassava (*Manihot esculenta* Crantz): A Systematic Review for the Pharmacological Activities, Traditional Uses, Nutritional Values, and Phytochemistry. *Journal of Evidence-Based Integrative Medicine*, 28, 1-26. <https://doi.org/10.1177/2515690X231206227>
- Nguyen, B. C. Q., Shahinozzaman, M., Tien, N. T. K., Thach, T. N., & Tawata, S. (2020). Effect of Sucrose on Antioxidant Activities and Other Health-Related Micronutrients in Gamma-Aminobutyric Acid (GABA)-Enriched Sprouting Southern Vietnam Brown Rice. *Journal of Cereal Science*, 93, 102985. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102985>
- Nielsen, S. S. (2010). Phenol-Sulfuric Acid Method for Total Carbohydrates. In S. S. Nielsen (Ed.), *Food analysis laboratory manual* (2nd ed.). Springer.
- Nilusha, R. A. T., Jayasinghe, J. M. J. K., Perera, O. D. A. N., Perera, P. I. P., & Jayasinghe, C. V. L. (2021). Proximate Composition, Physicochemical, Functional, and Antioxidant Properties of Flours from Selected Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) Varieties. *International Journal of Food Science*, 2021, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2021/6064545>
- Schoch, T. J. (1964). Swelling Power and Solubility of Granular Starches. In R. L. Whistler (Ed.), *Methods in carbohydrate chemistry: Vol. 4. Starch* (pp. 106–108). Academic Press.

- Sitanggang, A. B., Joshua, M., Munarko, H., Kusnandar, F., & Budijanto, S. (2021). Increased γ -Aminobutyric Acid Content of Germinated Brown Rice Produced in Membrane Reactor. *Food Technology and Biotechnology*, 59(3), 295–305. <https://doi.org/10.17113/ftb.59.03.21.6846>
- Tsou, S.-F., Hsu, H.-Y., & Chen, S.-D. (2024). Effects of Different Pretreatments on the GABA Content and Antioxidant Activity of Germinated Brown Rice. *Applied Sciences*, 14(13), 1-13. <https://doi.org/10.3390/app14135771>
- Zhang, Q., Xiang, J., Zhang, L., Zhu, X., Evers, J. B., van der Werf, W., & Duan, L. (2014). Optimizing Soaking and Germination Conditions to Improve Gamma-Aminobutyric Acid Content in Japonica and Indica Germinated Brown rice. *Journal of Functional Foods*, 10, 283–291. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.06.009>
- Zhang, Y., Wei, R., Azi, F., Jiao, L., Wang, H., He, T., ..., & Lu, B. (2022). Solid-State Fermentation with *Rhizopus oligosporus* RT-3 Enhanced the Nutritional Properties of Soybeans. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.972860>