

การศึกษาชนิดของคาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ เนื้อสัมผัส และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของขนมปังแซนวิช

Study of Various Carbohydrates and Sweeteners on Physicochemical Properties, Texture and Sensory Acceptance of Sandwich Bread

ธีระพล เสนพันธุ¹, โชชน ศรีเกตุ², จันทรีจิรา วันชนะ¹, จุฑาวุฒิ อุชุปัจ³, สุภาวีนี พันธุ์สวัสดิ์¹,
เหมสุดา พรหมประเสริฐ¹ และ ณัฐพงษ์ มุงเมือง^{1*}

Theeraphol Senphan¹, Chodsana Sriket², Janjira Wanchana¹, Juthawat Uchupaj³,
Supawinee Phansawas¹, Hemsuda Prompraseat¹ and Natthapong Mungmueang^{1*}

¹สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประเทศไทย

²สาขาวิชานวัตกรรมอาหารและการจัดการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ ประเทศไทย

³บริษัท เพียว เคมีกัลส์ จำกัด ประเทศไทย

¹Program in Food Science and Technology, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, Thailand

²Program in Food Innovation and Management,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Thailand

³Purechemicals Co., Ltd., Thailand

Received: 31 March 2026, Received in revised form: 14 September 2026, Accepted: 19 September 2026

Available online: 16 October 2026

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา: วิถีชีวิตที่เร่งรีบในปัจจุบันส่งผลให้ผู้บริโภคนิยมรับประทานผลิตภัณฑ์เบเกอรี่มากขึ้น โดยเฉพาะขนมปัง ซึ่งมีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบหลักที่มีความสำคัญต่อคุณลักษณะของขนมปัง การบริโภคในปริมาณที่สูงเกินความจำเป็นย่อมเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดกลุ่มโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (NCDs) ตามมา เช่น โรคอ้วน เบาหวาน และโรคหัวใจ จึงเกิดแนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์สูตรลดน้ำตาลโดยใช้สารให้ความหวานทดแทน 2 กลุ่ม คือ กลุ่มคาร์โบไฮเดรต (polydextrose trehalose และ isomaltoligosaccharide) ที่ทนต่อการย่อยและคล้ายเส้นใยอาหาร และกลุ่มสารให้ความหวานพลังงานต่ำ (isomalt erythritol และ isomaltulose) ที่ไม่กระตุ้นน้ำตาลในเลือดอย่างรวดเร็ว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้สารทั้ง 6 ชนิด ทดแทนน้ำตาลซูโครสที่ระดับร้อยละ 25 และ 100 ต่อคุณภาพของขนมปังแซนวิช เพื่อหาชนิดและปริมาณที่เหมาะสมที่สุด

วิธีดำเนินการวิจัย: การเตรียมขนมปังแซนวิชชุดควบคุม (control) เริ่มจากผสมแป้งสาลี 110 กรัม น้ำตาลซูโครส 20 กรัม ยีสต์ 2 กรัม นมผง 4 กรัม และเกลือ 1 กรัม เติมนมพาสเจอร์ไรซ์ 65 มิลลิลิตร และเนยจืด 1/2 ช้อนโต๊ะ นวดด้วยเครื่องนวดแป้งนาน 15 นาที พักแป้งที่ 28 ± 2 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง จากนั้นนวดไล่อากาศ บรรจุลงพิมพ์ (250 กรัม) พักต่อ 45 นาที ก่อนนำไปอบที่ 190 องศาเซลเซียส ทำการอบแบบปิดฝา 30 นาที และทำการเปิดฝาท่ออีก 10 นาที ทิ้งให้เย็น ตัดให้มีขนาดหนา

2.5 เซนติเมตร แล้วบรรจุถุงฟอยล์ สำหรับชุดทดลองใช้วิธีเดียวกัน แต่ทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยสาร 6 ชนิด ได้แก่ polydextrose isomaltulose isomalto-oligosaccharide Isomalt erythritol และ trehalose ในระดับร้อยละ 25 และ 100 โดยมีชุดการทดลองทั้งหมด 13 ชุดการทดลอง จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ไปประเมินลักษณะปรากฏทางกายภาพ ปริมาณความชื้น ค่ากิจกรรมน้ำอิสระ (a_w) และค่าสี (L^* , a^* , b^* และ ΔE^*) ของเนื้อและเปลือกด้วยระบบ CIE รวมถึงทดสอบเนื้อสัมผัส ด้วยเครื่อง texture analyzer เพื่ออ่านค่าความแข็ง ความยืดหยุ่น ความเหนียว และความเคี้ยวยาก สุดท้ายทำการประเมินทางประสาทสัมผัส ด้วยผู้ทดสอบทั่วไป จำนวน 100 คน โดยให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ เพื่อประเมินด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม

ผลการวิจัย: ชนิดและความเข้มข้นของสารทดแทนซูโครสส่งผลต่อคุณภาพขนมปังแช่แข็งแตกต่างกัน ด้านโครงสร้าง control มีเนื้อฟูและรูพรุนสม่ำเสมอ ซึ่ง isomaltulose และ isomalto-oligosaccharide ให้ผลใกล้เคียงที่สุด ขณะที่ erythritol และ trehalose ไม่เห็นความต่างชัดเจน แต่ polydextrose ร้อยละ 100 ทำให้เนื้อแน่นและรูพรุนเล็กกลวง ด้านเคมีกายภาพ การทดแทนร้อยละ 100 เพิ่มการกักเก็บน้ำ ทำให้ค่าร้อยละความชื้นและกิจกรรมน้ำอิสระสูงขึ้น โดย polydextrose ให้ค่าสูงสุด ส่วน isomaltulose ร้อยละ 25 ให้ค่าต่ำสุด ด้านค่าสี พบว่าการใช้ erythritol และ isomaltulose ร้อยละ 25 ทำให้ขนมปังสีที่เข้มขึ้น ด้านคุณลักษณะทางเนื้อสัมผัส พบว่าการทดแทนร้อยละ 100 ทำให้ผลิตภัณฑ์แข็งขึ้น โดย erythritol ร้อยละ 100 ให้ค่าความแข็งสูงสุด แต่การทดแทนที่ร้อยละ 25 ช่วยรักษาความยืดหยุ่นได้ดี ซึ่งหากใช้ในระดับสูงเกินไปจะส่งผลเสียทำให้ขนมปังมีเนื้อสัมผัสเหนียวและเคี้ยวยาก ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบทางประสาทสัมผัส โดย isomalt ร้อยละ 25 มีความโดดเด่นด้านลักษณะปรากฏและกลิ่น ส่วน isomaltulose ร้อยละ 25 ได้คะแนนด้านสีสูงที่สุด ขณะที่ erythritol ร้อยละ 25 ได้รับคะแนนด้านรสชาติ และความชอบโดยรวมสูงสุดจนใกล้เคียงสูตรควบคุม ในทางกลับกัน polydextrose ร้อยละ 100 กลับได้คะแนนต่ำสุดในทุกด้าน

สรุปผลการวิจัย: การใช้สารทดแทนน้ำตาลซูโครสส่งผลต่อคุณภาพขนมปังแช่แข็งแตกต่างกันตามชนิดและความเข้มข้น ด้านโครงสร้าง isomaltulose และ isomalto-oligosaccharide มีลักษณะฟูและรูพรุนที่สม่ำเสมอใกล้เคียงกับ control มากที่สุด ขณะที่ polydextrose ร้อยละ 100 ส่งผลให้เนื้อแน่นและรูพรุนเล็กกลวง ด้านเคมีกายภาพ การทดแทนร้อยละ 100 เพิ่มความชื้นและค่าปริมาณน้ำอิสระโดย polydextrose ให้ค่าสูงสุด และ isomaltulose ร้อยละ 25 ให้ค่าต่ำสุด สำหรับค่าสี erythritol และ isomaltulose ร้อยละ 25 ทำให้มีสีที่เข้มขึ้น แต่ trehalose และ polydextrose ร้อยละ 100 ทำให้ค่าใกล้เคียง control ด้านเนื้อสัมผัส การทดแทนร้อยละ 100 ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น การประเมินทางประสาทสัมผัส พบว่า erythritol ร้อยละ 25 ได้รับคะแนนด้านรสชาติและความชอบโดยรวมสูงสุดจนใกล้เคียง control ดังนั้น erythritol ร้อยละ 25 จึงมีศักยภาพในการทดแทนซูโครสสูงสุด รองลงมาคือ isomalt และ trehalose ร้อยละ 25 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ขนมปังแช่แข็ง; คาร์โบไฮเดรต; สารให้ความหวาน

Abstract

Background and Objectives: Modern fast-paced lifestyles have increased consumer demand for bakery products, particularly bread, in which sugar is a crucial ingredient governing product characteristics. However, excessive

sugar consumption significantly elevates the risk of non-communicable diseases (NCDs), including obesity, diabetes, and cardiovascular diseases. Consequently, reduced-sugar product formulation approaches have emerged utilizing two categories of sugar replacers: digestion-resistant and fiber-like carbohydrates (polydextrose, trehalose, and isomalt-oligosaccharide) and low-calorie sweeteners (isomalt, erythritol, and isomaltulose) that exhibit low glycemic responses. Therefore, this study aimed to investigate the effects of substituting sucrose with these six sweeteners at levels of 25% and 100% on the quality of sandwich bread to determine the optimum sweetener type and substitution level.

Methodology: The control sandwich bread was prepared by mixing wheat flour (110 g), sucrose (20 g), dry yeast (2 g), milk powder (4 g), and salt (1 g). Pasteurized milk (65 mL) and unsalted butter (0.5 tablespoons) were added, followed by kneading in a dough mixer for 15 min. The dough was fermented at 28 ± 2 °C for 1 h, degassed, placed into a baking mold (250 g capacity), and proofed for an additional 45 min. Baking was conducted at 190 °C in a closed mold for 30 min, followed by 10 min with the lid removed. The baked bread was allowed to cool, sliced to a thickness of 2.5 cm, and packaged in aluminum foil pouches. The experimental treatments followed the same procedure, but sucrose was substituted with one of six sweeteners (polydextrose, isomaltulose, isomalt-oligosaccharide, isomalt, erythritol, and trehalose) at substitution levels of 25% and 100%, resulting in 13 experimental treatments in total. The final products were evaluated for physical appearance, moisture content, water activity (a_w), and color profiles (L^* , a^* , b^* and ΔE^* using the CIE system) of both the crumb and crust. Textural properties were analyzed using a texture analyzer to determine hardness, springiness, cohesiveness, and chewiness. Finally, a sensory evaluation was conducted with 100 untrained panelists using a 9-point hedonic scale to assess appearance, color, aroma, taste, and overall acceptability.

Main Results: The types and concentrations of sucrose replacers significantly affected the quality of the sandwich bread in different ways. Regarding structural properties, the control bread exhibited a fluffy crumb with uniform porosity. Isomaltulose and isomalt-oligosaccharide yielded results most comparable to the control. While erythritol and trehalose showed no distinct structural differences, 100% polydextrose resulted in a denser crumb with smaller pores. In terms of physicochemical properties, 100% substitution increased water retention, leading to higher moisture content and water activity. Polydextrose exhibited the highest values, whereas 25% isomaltulose yielded the lowest. Color analysis revealed that 25% erythritol and 25% isomaltulose produced a darker bread color. Textural profile analysis showed that 100% substitution generally increased bread hardness, with 100% erythritol yielding the highest hardness value. Conversely, 25% substitution effectively maintained crumb springiness. However, excessive substitution levels adversely affected the texture, resulting in a cohesive and chewy crumb.

These findings aligned with the sensory evaluation, where 25% isomalt was outstanding in appearance and aroma, while 25% isomaltulose received the highest score for color. Notably, 25% erythritol obtained the highest scores for taste and overall acceptability, closely matching the control formulation. In contrast, 100% polydextrose received the lowest scores across all sensory attributes.

Conclusions: The application of sucrose replacers affects bread quality differently depending on the sweetener type and substitution level. Structurally, isomaltulose and isomalto-oligosaccharide provided a fluffy texture and uniform porosity most similar to the control, whereas 100% polydextrose resulted in a denser crumb with smaller pores. Physicochemically, 100% substitution increased moisture content and water activity, with polydextrose showing the highest values and 25% isomaltulose showing the lowest. Regarding color, 25% erythritol and 25% isomaltulose yielded darker colors, while 100% trehalose and 100% polydextrose produced color values similar to the control. Texturally, 100% substitution significantly increased crumb hardness. Sensory evaluation indicated that 25% erythritol achieved the highest scores for taste and overall acceptability, closely matching the control. Therefore, 25% erythritol exhibits the highest potential as a sucrose substitute in sandwich bread, followed by 25% isomalt and 25% trehalose, respectively.

Keywords: sandwich bread; carbohydrates; sweeteners

*Corresponding author. E-mail : maxnatthaphong_2541@hotmail.com

Introduction

ในยุคปัจจุบัน การดำเนินชีวิตที่เร่งรีบและมีข้อจำกัดด้านเวลาส่งผลให้รูปแบบการบริโภคอาหารของผู้คนเปลี่ยนแปลงไป โดยเวลาส่วนใหญ่มักถูกใช้ไปกับกิจกรรมหลัก เช่น การศึกษา การทำงาน และการเดินทาง ทำให้ผู้บริโภคมักเลือกอาหารที่มีความสะดวก รวดเร็ว และง่ายต่อการบริโภค เป็นต้น (Yuliana, 2024) ผลิตภัณฑ์ขนมอบจึงได้รับความนิยมมากขึ้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์ขนมปังแซนด์วิช ครั้วซอง และคุกกี้ เนื่องจากสะดวกต่อการบริโภค สามารถหาซื้อได้ง่าย มีราคาถูก และตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่ใช้ชีวิตในสังคมที่มีข้อจำกัดด้านเวลา อย่างไรก็ตาม การเลือกบริโภคอาหารตามความสะดวก โดยไม่คำนึงถึงคุณค่าทางโภชนาการอาจส่งผลให้ร่างกายได้รับสารอาหารไม่ครบถ้วน และเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง เช่น โรคเบาหวาน โรคอ้วน และโรคหัวใจ เป็นต้น โดยปัญหานี้ส่งผลให้เกิดแนวโน้มในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการที่ดีขึ้น โดยยังคงรักษาความสะดวกในการบริโภค (Ding *et al.*, 2023; Guiné & Florença, 2024) ขนมปังแซนด์วิช เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ขนมอบที่ได้รับความนิยมสูง โดยมีส่วนผสมหลัก ได้แก่ แป้งสาลี น้ำ เกลือ ไขมัน และน้ำตาล เป็นต้น ซึ่งแต่ละส่วนผสมมีบทบาทสำคัญต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะน้ำตาลที่ไม่เพียงแต่ให้รสชาติหวานแต่ยังมีผลต่อคุณสมบัติทางโครงสร้าง เนื้อสัมผัส และสีของขนมปัง นอกจากนี้น้ำตาลยังมีบทบาทในการเป็นสารอาหารให้แก่อีสต์ การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด และการรักษา

ความชุ่มชื้นภายในโครงสร้างของขนมปัง น้ำตาลจึงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่ขาดไม่ได้ในการผลิตขนมปัง (Farooq *et al.*, 2023) อย่างไรก็ตาม ขนมปังแซนด์วิชเชิงพาณิชย์ทั่วไปมักมีปริมาณน้ำตาลตกค้าง (residual sugar) หลังกระบวนการหมักของยีสต์เฉลี่ยสูงถึง 3-5 กรัม/แผ่น (น้ำหนัก 25-30 กรัม) เมื่อพิจารณาจากพฤติกรรมการบริโภคปกติที่ 2-4 แผ่น/มื้อ อาจส่งผลให้ผู้บริโภคได้รับปริมาณน้ำตาลแฝงสูงถึง 6-20 กรัม/มื้อ ซึ่งเป็นสัดส่วนที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ปริมาณสารอาหารที่แนะนำให้บริโภคประจำวันสำหรับคนไทย (Thai RDI) (Ministry of Public Health, 1998) และองค์การอนามัยโลก (WHO) ที่แนะนำให้บริโภคน้ำตาล ไม่ควรเกิน 24 กรัม (หรือประมาณ 6 ช้อนชา) ต่อวัน (World Health Organization, 2015) การบริโภคขนมปังแซนด์วิชร่วมกับมื้ออาหาร หรือเครื่องดื่มอื่นในชีวิตประจำวัน จึงเป็นปัจจัยเสี่ยงที่ทำให้ผู้บริโภคได้รับน้ำตาลเกินขีดจำกัดอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และเกิดการสะสมในร่างกาย ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังแซนด์วิชที่ลดหรือทดแทนการใช้น้ำตาลซูโครสจึงมีความจำเป็นอย่างเร่งด่วน เพื่อช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง เช่น โรคอ้วน และโรคเบาหวาน (Alam *et al.*, 2022; Sinaga *et al.*, 2024) การบริโภคน้ำตาลที่มากเกินไปส่งผลต่อโรคอ้วน อีกทั้งยังส่งผลเสียต่อระบบหัวใจและหลอดเลือด โดยการเพิ่มระดับคอเลสเตอรอลชนิดไม่ดี (low density lipoprotein; LDL) เป็นปัจจัยเสี่ยงหลักที่ทำให้เกิดโรคต่าง ๆ ตามมา อีกทั้งยังทำให้ความดันโลหิตสูงขึ้น และเกิดความเสี่ยงต่อโรคหลอดเลือดสมอง ดังนั้น การเลือกบริโภคอาหารที่มีน้ำตาลต่ำ จึงกลายเป็นหนึ่งในแนวทางที่ผู้บริโภคที่ให้ความสนใจมากขึ้น เพื่อป้องกันโรคต่าง ๆ ที่อาจเกิดจากการบริโภคน้ำตาลเกินพอดี จึงส่งผลให้ผู้บริโภคเริ่มให้ความสำคัญกับการดูแลสุขภาพมากขึ้น โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีการทดแทนน้ำตาล หรือสารให้ความหวาน เพื่อเป็นทางเลือกที่ช่วยลดความเสี่ยงต่อโรคต่าง ๆ ที่เกิดจากการบริโภคน้ำตาลเกินความจำเป็น (Ahmad *et al.*, 2020; Dutta *et al.*, 2024) โดยสารทดแทนน้ำตาลที่ได้รับความนิยมแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม หลัก ๆ ได้แก่ 1) กลุ่มของคาร์โบไฮเดรต ได้แก่ โพลีเดกซ์โตรส (polydextrose) เป็นโพลีแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยหน่วยของกลูโคส (glucose) ที่เชื่อมต่อกันในรูปแบบของพันธะทางเคมีที่ไม่สามารถย่อยได้ง่ายในระบบทางเดินอาหาร ซึ่งจะมีโครงสร้างคล้ายกับเส้นใยอาหาร และมีการเชื่อมโยงระหว่างกลูโคสหลายหน่วย ทรีฮาโลส (trehalose) ประกอบด้วยกลูโคสสองโมเลกุลที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,1-glycosidic linkage ไอโซมอลโตโอลิโกแซ็กคาไรด์ (isomalto-oligosaccharide) ประกอบด้วยหน่วยกลูโคสหลาย ๆ หน่วยที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6-glycosidic linkage หรือบางครั้งอาจมีพันธะ α -1,4-glycosidic linkage เป็นโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่มีจำนวนหน่วยกลูโคสต่ำถึงกลาง ซึ่งไม่สามารถย่อยได้ง่ายในกระเพาะอาหาร (Do Carmo *et al.*, 2016; Higashiyama & Richards, 2012; Sorndech *et al.*, 2018) 2) กลุ่มของสารให้ความหวาน ได้แก่ ไอโซมอลต์ (isomalt) เป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ (sugar alcohol) ที่ประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันในรูปแบบของพันธะ α -1,6-glycosidic linkage ซึ่งคล้ายกับโครงสร้างของซูโครส แต่เปลี่ยนตำแหน่งของพันธะ เมื่อเปรียบเทียบกับในอัตราส่วน 1:1 สารนี้มีความหวานประมาณร้อยละ 45-65 ของซูโครสและให้พลังงานเพียง 2 กิโลแคลอรี/กรัม เนื่องจากเป็นสารให้ความหวานที่มีการย่อยช้ากว่าและมีแคลอรีต่ำ อิริทริทอล (erythritol) เป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ ซึ่งมีโครงสร้างที่คล้ายกับกลูโคส แต่มีหมู่ -OH (hydroxyl group) ที่ตำแหน่งที่ 2 ของโครงสร้าง ซึ่งเป็นสารธรรมชาติที่พบในผลไม้หลายชนิด เช่น แอปเปิ้ล และเห็ดบางชนิด มีความหวานประมาณร้อยละ 60-70 ของน้ำตาลซูโครส และให้พลังงานเพียง 0.2 กิโลแคลอรี/กรัม เนื่องจากร่างกายสามารถดูดซึมได้เพียงร้อยละ 90 สามารถขับออกทางปัสสาวะโดยไม่ผ่านการเมแทบอลิซึม และไม่สามารถย่อยได้ใน

ระบบทางเดินอาหารได้เต็มที่ จึงทำให้มีแคลอรีที่ต่ำ ไอโซมอลทูโลส (isomaltulose) มีโครงสร้างเป็นน้ำตาลสองชนิด คือ กลูโคส (glucose) และฟรุคโตส (fructose) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6-glycosidic linkage มีความหวานประมาณร้อยละ 42 ของซูโครสที่ให้พลังงาน 4 กิโลแคลอรี/กรัม เช่นเดียวกับซูโครส แต่มีอัตราการย่อยสลายที่ช้ากว่าซูโครสประมาณ 4-5 เท่า จึงส่งผลให้ระดับน้ำตาลในเลือดและอินซูลินเพิ่มขึ้น ช้าและต่ำกว่า จึงเหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด (Sentko & Willibald-Ettle, 2012; Regnat *et al.*, 2018; Shyam *et al.*, 2018)

อย่างไรก็ตาม ขนมปังแซนด์วิชไม่ใช่ผลิตภัณฑ์กลุ่มของหวาน บทบาทหลักของน้ำตาลซูโครสในระบบแป้งโด (dough system) จึงมีความสำคัญในด้านเชิงหน้าที่และเชิงเทคโนโลยี (technological functions) มากกว่าเพียงแค่การให้ความหวาน โดยน้ำตาลซูโครสทำหน้าที่เป็นสารปรับโครงสร้างเนื้อสัมผัส (texturizer) สารให้ปริมาตร (bulking agent) ควบคุมอุณหภูมิการเกิดเจลของสตาร์ช (starch gelatinization) ช่วยกักเก็บความชื้น รวมถึงเป็นแหล่งคาร์บอนที่สำคัญสำหรับการหมักของยีสต์เพื่อสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และมีส่วนช่วยในการเกิดสีของเปลือกขนมปังผ่านปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) และคาราเมลไลเซชัน (caramelization) ดังนั้น การลดปริมาณน้ำตาลซูโครสในสูตรขนมปัง จึงมักส่งผลกระทบต่อเชิงลบต่อคุณภาพ เช่น ปริมาตรก้อนขนมปังลดลง เนื้อสัมผัสแข็งกระด้าง รุพรุนไม่สม่ำเสมอ อายุการเก็บรักษาสั้นลง และสีเปลือกขนมปังซีดจาง (Ding and Yang, 2021; Müller *et al.*, 2022; Beleia *et al.*, 1996) การนำสารทดแทนน้ำตาลกลุ่มคาร์โบไฮเดรต และน้ำตาลแอลกอฮอล์มาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ มีส่วนช่วยในการปรับปรุงคุณลักษณะทางเทคโนโลยีบางประการ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ronda *et al.* (2005) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้โพลีเดกซ์โทรส (polydextrose) ในเค้กสปันจ์ พบว่าสามารถทำหน้าที่เป็นสารให้ปริมาตร ช่วยปรับปรุงโครงสร้างเนื้อสัมผัส และกักเก็บความชื้นในผลิตภัณฑ์อบได้ งานวิจัยของ Gerardo-Rodriguez *et al.* (2017) พบว่า การเติมทรีฮาโลส (trehalose) ลงในแป้งโดแซ่แข็ง มีคุณสมบัติโดดเด่นในการช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการหมัก และลักษณะทางวิสโคเอลาสติก (viscoelastic properties) ของแป้งโดให้ดีขึ้น นอกจากนี้ ทรีฮาโลสยังทำหน้าที่เป็นสารป้องกันความเสียหายจากความเย็น (cryoprotectant) ที่ช่วยรักษาสภาพของเซลล์ยีสต์ ดูดซับน้ำ และป้องกันการแพร่กระจายของน้ำ ซึ่งช่วยลดความแห้งของเนื้อขนมปังและสามารถรักษาคุณภาพของขนมปังไว้ได้แม้จะผ่านการเก็บรักษาแป้งโดแซ่แข็งเป็นระยะเวลานาน ขณะที่ งานวิจัยของ Zhang *et al.* (2024) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เดกซ์แทรน (dextran) ที่ผลิตขึ้นระหว่างกระบวนการหมักโด พบว่า สารดังกล่าวช่วยปรับปรุงความสามารถในการอุ้มน้ำ และลักษณะทางรีโอโลยีของแป้งโด เนื่องจากเดกซ์แทรนมีคุณสมบัติชอบน้ำสูง โดยทำหน้าที่คล้ายไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloids) จึงสามารถดึงดูดโมเลกุลของน้ำ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแป้งโดได้เป็นอย่างดี ส่วน Lin *et al.* (2010) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้อิริทริทอล (erythritol) และไอโซมอลต์ (isomalt) ในผลิตภัณฑ์บิสกิต พบว่า สามารถใช้เป็นสารให้ปริมาตรและทนความร้อนได้ดีระหว่างการอบ อย่างไรก็ตาม การใช้สารเหล่านี้ในขนมปังเชิงพาณิชย์ยังคงพบข้อจำกัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ding & Yang (2021) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของการใช้น้ำตาลแอลกอฮอล์ (โพลีฮอล) ทดแทนน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ พบว่า การลดปริมาณน้ำตาลซูโครสโดยใช้น้ำตาลแอลกอฮอล์ทดแทน ส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการหมักของยีสต์ เนื่องจากยีสต์ไม่สามารถนำน้ำตาลแอลกอฮอล์ไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนได้ ทำให้การเจริญ และการขยายตัวของยีสต์ช้าลง ส่งผลให้ความสามารถในการผลิตก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ลดลง และทำให้อัตราการหมักแบ่งโดต่ำลงเมื่อเทียบกับสูตรที่ใช้น้ำตาลปกติ นอกจากนี้ Martinez-Cervera *et al.* (2014) พบว่า สารทดแทนน้ำตาลกลุ่มนี้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้ดีเท่าน้ำตาลซูโครส ทำให้เปลือกขนมปังมีสีที่ซีดจางและมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุมที่มีการใช้น้ำตาลซูโครส ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของคาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานชนิดต่าง ๆ ได้แก่ polydextrose isomalt trehalose isomalto-oligosaccharide erythritol และ isomaltulose ในอัตราส่วนร้อยละ 25 และ 100 ต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ เนื้อสัมผัส และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของขนมปังแซนดวิช

Methodology

1. การเตรียมตัวอย่างขนมปังแซนดวิช

เตรียมตัวอย่างขนมปังแซนดวิชชุดควบคุม (control) โดยนำแป้งสาลีจำนวน 110 กรัม ผสมกับน้ำตาลซูโครส (sucrose) จำนวน 20 กรัม ยีสต์จำนวน 2 กรัม นมผงจำนวน 4 กรัม และเกลือจำนวน 1 กรัม จากนั้นเติมนมพาสเจอร์ไรซ์ปริมาตร 65 มิลลิลิตร และเนยจืดชนิดแข็งจำนวน $\frac{1}{2}$ ช้อนโต๊ะ ทำการผสมวัตถุดิบทั้งหมดด้วยเครื่องผสมอาหารแบบมือถือ (EHM3407, Electrolux, China) เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำแป้งมาพักในภาชนะที่ปิดด้วยพลาสติกห่ออาหาร แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 28 ± 2 องศาเซลเซียส เมื่อครบเวลานำแป้งมานวดเพื่อไล่อากาศออก และคลึงให้เป็นแผ่นโดยใช้ไม้ขนาดแบ่ง แล้วนำแป้งใส่ลงในพิมพ์ขนมปังขนาด $16.5 \times 11 \times 10$ เซนติเมตร ปริมาตร 250 กรัม ทำการทาเนยจืดเตรียมไว้ ทำการปิดพิมพ์ด้วยพลาสติกห่ออาหาร และตั้งทิ้งไว้ 45 นาที ที่อุณหภูมิ 28 ± 2 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเข้าเตาอบ (MX-DO24E, Semon, Taiwan) ทำการวอร์มไฟบน-ล่างไว้แล้ว ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และอบต่ออีก 10 นาที โดยเปิดฝาพิมพ์ขนมปัง เมื่อครบเวลานำขนมปังมาทำให้เย็น ทำการตัดให้มีขนาดความหนา 2.5 เซนติเมตร แล้วนำไปบรรจุลงถุงอะลูมิเนียมฟอยล์เพื่อนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี กายภาพ เนื้อสัมผัส และคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสต่อไป ในส่วนชุดทดลองการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยคาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานชนิดต่าง ๆ จัดเตรียมโดยวิธีเดียวกันกับ control โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาขั้นต้น จึงกำหนดระดับการทดแทนน้ำตาลซูโครสไว้ที่ 2 ระดับ คือ ร้อยละ 25 เพื่อประเมินผลกระทบในระดับที่คาดว่าโครงสร้างแป้งจะยังคงความเสถียร และร้อยละ 100 เพื่อศึกษาขีดจำกัดสูงสุด (extreme boundary) ของการเสียสภาพโครงสร้างเมื่อยีสต์ขาดแหล่งคาร์บอนหลักสำหรับการหมัก โดยใช้การทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยคาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานที่อัตราส่วนร้อยละ 25 และ 100 ทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ ไอโซมอลต์ (isomalt) โพลีเดกซ์โตรส (polydextrose) ไอโซมอลโตโอลิโกแซ็กคาไรด์ (isomalto-oligosaccharide; IMO) ทรีฮาโลส (trehalose) ไอโซมอลทูลูโลส (isomaltulose) และอีริทริทอล (erythritol) ตามลำดับ

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

2.1 ลักษณะปรากฏ

ลักษณะปรากฏทางกายภาพ (physical appearance) ของขนมปังแซนดวิชที่ทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยชนิดและอัตราส่วนของคาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานที่ต่างกันโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล (X-A3, Fujifilm, Japan)

ภายใต้สภาวะควบคุม โดยติดตั้งกล่องบนขาตั้งให้มีระยะห่างจากตัวอย่างขนมปัง 15 เซนติเมตร ถ่ายทำภายในกล่องถ่ายภาพ (light box) ที่ควบคุมสภาพแสง daylight 6500K จากนั้นนำภาพถ่ายที่ได้มาตัดส่วน (crop) บริเวณกึ่งกลางของแผ่นขนมปังให้มีขนาดพื้นที่สัดส่วนคงที่ 3×3 ตารางเซนติเมตร ในทุกตัวอย่าง

2.2 ปริมาณความชื้น

วิเคราะห์ปริมาณร้อยละความชื้น (%moisture content) ของขนมปังแซนวิชที่ใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครส ตามวิธีของ AOAC วิธีการที่ 927.05 (AOAC, 2000)

2.3 กิจกรรมน้ำอิสระ

วิเคราะห์ค่ากิจกรรมน้ำอิสระ (water activity; a_w) ของขนมปังแซนวิชที่ใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยเครื่องวัดค่าปริมาณกิจกรรมของน้ำอิสระ (Series 3 TE, Aqua LAB, U.S.A) โดยใช้ตัวอย่างขนมปังจำนวน 1 กรัม ใส่ลงในเซลล์ของเครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระก่อนวิเคราะห์ค่า a_w ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

2.4 ค่าสี

วิเคราะห์ค่าสี (color values) ของเนื้อ (crumb) และเปลือก (crust) ของขนมปังแซนวิชที่ใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยเครื่องวัดค่าสี (Color Flex EZ, Hunter Lab, U.S.A) ในระบบ CIE ซึ่งทำการวิเคราะห์ค่า L^* value (ค่าความสว่าง) a^* value (ค่าความเป็นสีแดง (+) - สีเขียว (-)) b^* value (ค่าความเป็นสีเหลือง (+) - สีน้ำเงิน (-)) และวิเคราะห์ค่า ΔE^* (ค่าความต่างของสีโดยเทียบจากค่าความสว่าง) โดยการคำนวณจากสมการที่ 1 ดังนี้

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

โดย ΔL^* Δa^* และ Δb^* คือความต่างระหว่างพารามิเตอร์สีของตัวอย่างและพารามิเตอร์สีของ standard ของค่าความเป็นสีขาว โดยค่า L^* เท่ากับ 93.59 ค่า a^* เท่ากับ -0.98 และ ค่า b^* เท่ากับ 0.35 กำหนดให้เป็น background

3. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเนื้อสัมผัส

วิเคราะห์คุณสมบัติทางเนื้อสัมผัส (texture profile analysis) ของขนมปังแซนวิชที่ใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครส ดัดแปลงตามวิธีของ Kan *et al.* (2020) ด้วยเครื่อง texture analyzer ยี่ห้อ Brookfield รุ่น CTX โดยใช้หัววัดแบบ cylindrical probe (TA4/1000) นำตัวอย่างขนมปังรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 6×6 เซนติเมตร หนา 2.5 เซนติเมตร วางตรงกลางฐานรองตัวอย่าง โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้ trigger load 20 g, test speed 2 mm/s, pre-test speed 2 mm/s, post-test speed 2 mm/s และ distance target 8.0 mm (ร้อยละ 40 ความสูงของขนมปัง) โดยทำการอ่านค่า hardness (g) springiness (mm) chewiness (mJ) และค่า cohesiveness

4. การประเมินทางประสาทสัมผัส

การประเมินทางประสาทสัมผัส (sensory evaluation) ของขนมปังแซนวิชที่ใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครส ดัดแปลงตามวิธีของ Devi *et al.* (2024) โดยตัดขนมปังให้มีขนาดประมาณ 3.5×3.5×1 เซนติเมตร (กว้าง×ยาว×สูง) ทำการทดสอบด้านลักษณะที่ปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม โดยให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ

(9-point hedonic scale) ซึ่ง 1 คะแนน คือ ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 คะแนน คือ ชอบมากที่สุด โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 100 คน ที่มีช่วงอายุ 18-50 ปี ทั้งนี้ การประเมินทางประสาทสัมผัสดังกล่าวดำเนินการภายใต้สภาวะที่ปลอดภัยต่อผู้ทดสอบ เนื่องจากขึ้นตัวอย่างขนมปังที่ใช้ทดสอบมีขนาดเล็ก ทำให้ผู้ทดสอบได้รับปริมาณน้ำตาลแอลกอฮอล์สูงสุดเพียงประมาณ 2-3 กรัม/ตัวอย่าง (ในชุดทดลองทดแทนร้อยละ 100) ซึ่งเป็นระดับที่ต่ำกว่าเกณฑ์การเกิดฤทธิ์เป็นยาระบาย (Laxative threshold) อย่างมีนัยสำคัญ และไม่ก่อให้เกิดอาการผิดปกติในระบบทางเดินอาหาร (Storey *et al.*, 2007; Mäkinen, 2016) การทดสอบนี้จึงจัดอยู่ในการประเมินอาหารทั่วไปที่มีความเสี่ยงต่ำและมีความปลอดภัยต่อผู้เข้าร่วมการทดสอบ

5. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทำการทดลองอย่างน้อยตัวอย่างละ 3 ซ้ำ โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design; CRD) ส่วนการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ randomized complete block design (RCBD) แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance; ANOVA) ด้วยวิธีของ Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS 29.0 (statistical package for the social science for windows version 29.0) (SPSS Inc., Chicago, USA)

Results

1. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

1.1 ลักษณะปรากฏ

โครงสร้างภายในของเนื้อขนมปังแซนด์วิชที่มีคุณภาพควรมีช่องอากาศกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นโดยไม่กระจุกรวมกันเป็นกลุ่มใหญ่ หรือเกิดโพรงอากาศขนาดใหญ่เกินไป โดยโพรงอากาศเหล่านี้เกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ยีสต์ปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการหมัก และถูกกักเก็บไว้โดยโครงสร้างของกลูเตน หากการกระจายตัวของช่องอากาศไม่สม่ำเสมอ อาจส่งผลให้เนื้อขนมปังแน่นเกินไป ซึ่งจะส่งผลเสียต่อเนื้อสัมผัส และความน่ารับประทาน ดังนั้น การควบคุมโครงสร้างภายในจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพ และความพึงพอใจของผู้บริโภค (Wilde *et al.*, 2012) โดยลักษณะปรากฏของขนมปังแซนด์วิชที่ใช้คาร์โบไฮเดรต และสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครส แสดงดัง Figure 1 จากผลการทดลอง พบว่า การใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครสในอัตราส่วนร้อยละ 25 และร้อยละ 100 ส่งผลต่อโครงสร้างทางกายภาพของขนมปังแตกต่างกันตามชนิด และอัตราส่วนที่ใช้ ในส่วนของ control มีลักษณะโครงสร้างขนมปังที่สม่ำเสมอ โดยมีโพรงอากาศกระจายทั่วทั้งแผ่นของขนมปัง ในขณะที่การใช้ polydextrose ทดแทนที่ความเข้มข้นร้อยละ 100 ส่งผลให้ขนมปังมีเนื้อสัมผัสที่แน่น และมีโพรงอากาศขนาดเล็กลงอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติการดูดซับน้ำที่สูงคล้ายคลึงกับเส้นใยอาหาร ในทางตรงกันข้าม การใช้ isomaltulose และ isomalto-oligosaccharide ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะโครงสร้างใกล้เคียงกับสูตรควบคุมมากที่สุด ส่วน erythritol และ trehalose พบว่า ไม่ทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก จากผลการศึกษาดังกล่าว ชี้ให้เห็นว่า

isomaltulose มีศักยภาพสูงสุดในการนำมาใช้เป็นสารทดแทนน้ำตาลสำหรับการผลิตขนมปังแซนดวิช รองลงมาคือ isomalto-oligosaccharide erythritol และ trehalose ตามลำดับ ขณะที่การใช้ polydextrose อาจต้องมีการปรับปรุงสูตรเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับ control มากขึ้น



Figure 1 The appearance of sandwich bread comparing the control with samples infused with various carbohydrate and sweetener

1.2 ปริมาณความชื้นและกิจกรรมน้ำอิสระ

ปริมาณความชื้นและกิจกรรมน้ำอิสระของขนมปังแซนดวิชที่ใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครส แสดงดัง Table 1 พบว่า ชุด Control มีกิจกรรมน้ำอิสระเท่ากับ 0.78 ส่วนการใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานในปริมาณร้อยละ 25 และ 100 มีกิจกรรมน้ำอิสระอยู่ในช่วง 0.76-0.83 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของคาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานที่สูงขึ้นส่งผลต่อกิจกรรมน้ำอิสระที่สูงขึ้นตาม ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความชื้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ control และตัวอย่างที่ใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

1.3 ค่าสี

1.3.1 ค่าสีของเนื้อขนมปังแซนดวิช

ค่าสีของเนื้อขนมปังแซนดวิชที่ใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครส แสดงดัง Table 2 จากผลการทดลอง พบว่า ค่าความสว่าง (L^*) ของเนื้อขนมปังแซนดวิชอยู่ในช่วง 79.45-84.25 ค่าความเป็นสีแดง (a^*) ของเนื้อขนมปังแซนดวิชอยู่ในช่วง 0.18-1.39 ขณะที่ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) อยู่ในช่วง 16.93-18.79 และค่าความต่างสี (ΔE^*) อยู่ในช่วง 43.51-49.03 แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยตัวอย่างที่ทดแทนด้วยสารให้ความหวานที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 ส่วนใหญ่มีค่าความสว่างลดลงเมื่อเทียบกับชุด control โดยเฉพาะ isomaltulose ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 ส่งผลให้ค่า L^* ต่ำที่สุด ขณะที่ polydextrose และ trehalose ที่ความเข้มข้นร้อยละ 100 ให้ค่าความสว่างใกล้เคียง control มากที่สุด แสดงศักยภาพในการรักษาค่าสีของผลิตภัณฑ์ดั้งเดิมได้ดี

Table 1 Moisture and water activity of sandwich bread comparing the control with samples infused with various carbohydrate and sweetener

sample	moisture (%wet basis)	water activity; a_w
control	25.23±0.840 ^{bc**}	0.78±0.01 ^c
25% polydextrose	24.08±1.97 ^{bc}	0.80±0.00 ^b
100% polydextrose	29.64±1.36 ^a	0.83±0.00 ^a
25% trehalose	23.83±1.51 ^{bc}	0.78±0.01 ^c
100% trehalose	28.58±1.32 ^a	0.82±0.00 ^a
25% isomalto-oligosaccharide	25.85±1.85 ^b	0.79±0.01 ^{bc}
100% isomalto-oligosaccharide	28.17±0.92 ^a	0.82±0.00 ^a
25% isomalt	19.87±0.03 ^d	0.76±0.01 ^d
100% isomalt	22.43±0.21 ^c	0.80±0.01 ^b
25% erythritol	21.11±1.10 ^c	0.78±0.01 ^c
100% erythritol	25.79±1.12 ^b	0.79±0.00 ^{bc}
25% isomaltulose	24.57±0.51 ^{bc}	0.79±0.01 ^{bc}
100% isomaltulose	26.88±0.86 ^b	0.82±0.00 ^a

* Values are given as means±SD (n=3)

** Different with letters (^{a-e}) in the same column indicate significant differences ($p \leq 0.05$)

Table 2 Crumb color of sandwich bread comparing the control with samples infused with various carbohydrate and sweetener

sample	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
control	83.34±0.14 ^{bc**}	0.40±0.05 ^e	17.65±0.12 ^e	47.91±0.17 ^d
25% polydextrose	80.62±0.09 ^d	1.11±0.05 ^b	18.73±0.01 ^a	44.72±0.11 ^g
100% polydextrose	84.24±0.03 ^a	0.90±0.02 ^c	18.50±0.01 ^c	49.03±0.03 ^a
25% trehalose	81.29±0.17 ^c	0.84±0.05 ^c	17.65±0.14 ^e	45.49±0.20 ^f
100% trehalose	84.25±0.09 ^a	0.42±0.05 ^e	17.39±0.01 ^f	49.00±0.11 ^a
25% isomalto-oligosaccharide	81.17±0.20 ^c	1.39±0.04 ^a	18.19±0.02 ^d	45.37±0.24 ^f
100% isomalto-oligosaccharide	82.65±0.15 ^b	0.84±0.02 ^c	18.79±0.04 ^a	47.12±0.19 ^e
25% isomalt	80.40±0.09 ^d	0.83±0.03 ^c	17.60±0.03 ^e	44.43±0.11 ^h
100% isomalt	84.19±0.03 ^a	0.33±0.01 ^f	16.93±0.06 ^h	48.93±0.04 ^a
25% erythritol	79.60±0.08 ^e	0.85±0.01 ^c	18.73±0.02 ^a	43.51±0.09 ^j
100% erythritol	83.53±0.08 ^a	0.54±0.05 ^d	18.22±0.08 ^d	48.15±0.10 ^c
25% isomaltulose	79.45±0.32 ^e	1.09±0.05 ^b	18.63±0.14 ^b	44.04±2.10 ⁱ
100% isomaltulose	83.90±0.06 ^a	0.18±0.02 ^g	17.08±0.06 ^g	48.57±0.07 ^b

* Values are given as means ± SD (n=3)

** Different with letters (^{a-j}) in the same column indicate significant differences ($p \leq 0.05$)

1.3.2 ค่าสีของเปลือกขนมปังแซนวิช

ค่าสีของเปลือกขนมปังแซนวิชที่ใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครส แสดงดัง Table 3 จากผลการทดลอง พบว่า ค่าความสว่าง (L^*) ของเปลือกขนมปังแซนวิชอยู่ในช่วง 57.98-75.09 ค่าความเป็นสีแดง (a^*) ของเนื้อขนมปังแซนวิชอยู่ในช่วง 5.91-12.68 ขณะที่ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) อยู่ในช่วง 22.58-31.46 และค่าความต่างสี (ΔE^*) อยู่ในช่วง 23.40-39.08 แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยตัวอย่างส่วนใหญ่มีค่าความสว่างลดลง สะท้อนถึงสีที่เข้มขึ้นจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) โดยเฉพาะ trehalose ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 ส่งผลให้ค่า L^* ต่ำที่สุด ขณะที่ polydextrose และ trehalose ที่ความเข้มข้นร้อยละ 100 ให้ค่าความสว่างและ ΔE^* ใกล้เคียง control มากที่สุด แสดงศักยภาพในการรักษาค่าสีของผลิตภัณฑ์ดั้งเดิมได้ดี

Table 3 Crust color of sandwich bread comparing the control with samples infused with various carbohydrate and sweetener

sample	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
control	60.11±0.38 ^{g**}	12.36±0.20 ^a	30.09±0.22 ^a	25.30±0.31 ^e
25% polydextrose	67.84±0.51 ^c	9.23±0.18 ^b	26.84±0.23 ^c	31.87±0.52 ^b
100% polydextrose	68.44±0.21 ^c	8.93±0.49 ^c	28.83±0.52 ^a	32.62±0.08 ^c
25% trehalose	57.98±0.19 ^e	12.68±0.06 ^a	29.87±0.21 ^a	23.40±0.22 ^f
100% trehalose	75.09±0.19 ^a	5.91±0.15 ^d	25.13±0.47 ^c	39.08±0.16 ^a
25% isomalto-oligosaccharide	64.65±0.34 ^c	10.51±0.14 ^b	28.06±0.46 ^b	28.99±0.27 ^d
100% isomalto-oligosaccharide	69.47±0.27 ^b	8.76±0.09 ^c	31.46±0.20 ^a	33.98±0.32 ^c
25% isomalt	63.87±0.28 ^c	10.13±0.32 ^b	26.53±0.37 ^c	27.94±0.16 ^e
100% isomalt	71.17±0.35 ^b	7.54±0.03 ^c	26.43±0.46 ^c	35.07±0.43 ^b
25% erythritol	64.96±0.31 ^c	10.16±0.31 ^b	27.02±0.57 ^b	29.11±0.29 ^c
100% erythritol	72.69±0.25 ^b	6.29±0.11 ^c	22.58±0.22 ^d	36.26±0.28 ^b
25% isomaltulose	59.69±0.38 ^d	12.19±0.19 ^a	28.92±0.13 ^b	24.73±0.28 ^b
100% isomaltulose	64.01±0.47 ^c	11.52±0.31 ^a	31.30±0.33 ^a	29.00±0.33 ^c

* Values are given as means ± SD ($n=3$)

** Different with letters (^{a-e}) in the same column indicate significant differences ($p \leq 0.05$)

2. คุณสมบัติทางเนื้อสัมผัส

คุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสของขนมปังแซนวิชที่ใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครส แสดงดัง Table 4 จากผลการทดลองพบว่า การใช้สารทดแทนน้ำตาลส่งผลกระทบท่อคุณสมบัติเนื้อสัมผัสของขนมปังในด้านความแข็ง (hardness) ความยืดหยุ่น (springiness) และความเคี้ยวได้ (chewiness) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ยกเว้นค่าการเกาะติด (cohesiveness) ที่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ค่าความแข็ง (hardness) ของขนมปังแซนวิชอยู่ในช่วง 574.37-2,963.56 g โดย control มีค่าเท่ากับ 583.00 g ซึ่งการใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลในปริมาณร้อยละ 100 ส่วนใหญ่ส่งผลทำให้ขนมปังมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ในการเสริมที่ร้อยละ 100

ของ erythritol แสดงค่าความแข็งสูงสุดถึง 2,963.56 g ซึ่งมีค่าความแข็งสูงกว่า control มากถึง 5 เท่า ตามด้วย isomalto-oligosaccharide และ polydextrose ที่ร้อยละ 100 มีค่าเท่ากับ 1,505.00 g และ 1,441.01 g ตามลำดับ ในขณะที่การเสริม erythritol ในอัตราร้อยละ 25 แสดงค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกับ control มากที่สุดที่ 574.37 g สำหรับความยืดหยุ่น (springiness) พบว่าตัวอย่างส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับ control โดยอยู่ในช่วง 6.12-7.21 mm ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าสารทดแทนเหล่านี้ไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการกลับคืนสู่รูปเดิมของขนมปัง อย่างไรก็ตาม การเสริม trehalose ที่ร้อยละ 25 และ isomaltulose ที่ร้อยละ 25 ส่งผลต่อค่า springiness ที่สูงกว่า control เพียงเล็กน้อย ในส่วนของค่าการเกาะติด (cohesiveness) พบว่าทุกตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 0.50-0.78 และไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เมื่อเทียบกับ control ที่ 0.71 แสดงให้เห็นว่าชนิดและปริมาณของสารทดแทนน้ำตาลที่ใช้ในสูตร ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อแรงยึดเหนี่ยวภายในโครงสร้างของเนื้อขนมปัง สำหรับค่าความเคี้ยวได้ (chewiness) พบว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกับค่าความแข็ง (hardness) โดย erythritol ที่ร้อยละ 100 ต้องใช้แรงเคี้ยวสูง (chewiness) ที่สุดถึง 132.30 mJ ซึ่งมากกว่า control ที่ 28.05 mJ ถึง 4.7 เท่า ตามด้วย Isomalto-oligosaccharide ที่ร้อยละ 100 ที่ 62.00 mJ ในขณะที่การเสริมด้วย erythritol และ isomaltulose ที่ร้อยละ 25 มีค่าใกล้เคียงกับ control มากที่สุด 26.95 mJ และ 27.51 mJ ตามลำดับ

Table 4 Texture profile analysis of sandwich bread comparing the control with samples infused with various carbohydrate and sweetener

sample	hardness (g)	springiness (mm)	chewiness (mJ)	cohesiveness ^{ns**}
control	583.00±33.94 ^{h**}	6.95±0.11 ^b	28.05±3.04 ^h	0.71±0.25
25% polydextrose	655.50±152.02 ^e	6.34±0.64 ^g	28.35±8.27 ^h	0.69±0.17
100% polydextrose	1,441.01±29.70 ^b	6.12±0.13 ^h	45.06±1.13 ^e	0.53±0.28
25% trehalose	700.36±16.97 ^f	7.21±0.11 ^a	30.95±2.05 ^{gh}	0.69±1.02
100% trehalose	595.52±95.46 ^g	6.57±0.32 ^e	30.50±2.97 ^{gh}	0.73±1.25
25% isomalto-oligosaccharide	1,204±28.28 ^c	7.03±0.19 ^{ab}	51.90±4.67 ^c	0.78±0.32
100% isomalto-oligosaccharide	1,505±94.75 ^b	6.77±0.06 ^d	62.00±0.71 ^b	0.50±0.41
25% isomalt	637.50±23.33 ^g	6.88±0.09 ^{bc}	30.90±0.42 ^{gh}	0.72±1.11
100% isomalt	1,094.02±28.28 ^d	6.70±0.23 ^e	48.45±2.62 ^d	0.67±0.34
25% erythritol	574.37±19.79 ^g	6.99±0.11 ^{ab}	26.95±1.06 ⁱ	0.69±0.27
100% erythritol	2,963.56±41.72 ^a	6.81±0.20 ^c	132.30±11.17 ^a	0.66±0.19
25% isomaltulose	728.24±15.55 ^f	7.13±0.01 ^{ab}	27.51±3.11 ^h	0.57±0.08
100% isomaltulose	797.28±41.01 ^e	6.73±0.39 ^e	40.35±0.92 ^f	0.72±0.15

* Values are given as means±SD (n=3)

** Different with letters (^{a-e}) in the same column indicate significant differences ($p<0.05$)

*** ns = not significant

3. การประเมินทางประสาทสัมผัส

การประเมินทางประสาทสัมผัสของขนมปังแซนวิชที่ใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครส แสดงดัง Table 5 จากผลการทดลอง พบว่า ด้านลักษณะปรากฏของขนมปังแซนวิชอยู่ในช่วง 5.20-6.83 คะแนน ด้านสีของขนมปังแซนวิชอยู่ในช่วง 5.77-6.93 คะแนน ด้านกลิ่นของขนมปังแซนวิชอยู่ในช่วง 5.47-6.77 คะแนน ด้านรสชาติของขนมปังแซนวิชอยู่ในช่วง 5.13-7.53 คะแนน และด้านความชอบโดยรวมของขนมปังแซนวิชอยู่ในช่วง 5.87-6.80 คะแนน พบว่า สารทดแทนน้ำตาลที่ได้รับคะแนนสูงสุดในแต่ละด้านมีความแตกต่างกัน โดย isomalt ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 ได้คะแนนสูงสุดในด้านลักษณะปรากฏ (6.83 คะแนน) และกลิ่น (6.77 คะแนน) ส่วน isomaltulose ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 ได้คะแนนสูงสุดด้านสี (6.93 คะแนน) ในขณะที่ erythritol ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 ได้คะแนนสูงสุดในด้านรสชาติ (7.50 คะแนน) และความชอบโดยรวม (7.13 คะแนน) ซึ่งใกล้เคียงกับ control โดยไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ส่วนการเพิ่มปริมาณสารทดแทนน้ำตาลที่สูงขึ้นที่ร้อยละ 100 ในแต่ละตัวอย่างกลับส่งผลให้คะแนนความชอบลดลงอย่างชัดเจนในทุกกลุ่ม

Table 5 Sensory evaluation of sandwich bread comparing the control with samples infused with various Carbohydrate and Sweetener

sample	sensory evaluation				
	appearance	color	smell	taste	overall
control	6.70±1.62 ^{a**}	6.77±1.77 ^a	6.73±1.53 ^a	7.53±1.79 ^a	7.21±1.85 ^a
25% polydextrose	6.30±1.86 ^{ab}	6.73±1.28 ^a	5.60±1.99 ^b	6.73±1.70 ^b	6.53±1.63 ^b
100% polydextrose	5.73±1.72 ^b	6.07±1.72 ^{ab}	5.47±1.87 ^c	5.03±2.08 ^d	5.27±1.89 ^c
25% trehalose	6.60±1.98 ^a	6.73±1.68 ^a	6.27±1.91 ^a	6.57±1.79 ^b	6.30±1.82 ^b
100% trehalose	6.20±1.99 ^a	6.60±1.94 ^a	6.13±2.00 ^a	5.13±2.01 ^d	6.27±1.96 ^b
25% isomalto-oligosaccharide	5.20±1.69 ^c	6.27±1.84 ^{ab}	5.77±1.81 ^b	6.43±1.72 ^{bc}	6.27±1.31 ^a
100% isomalto-oligosaccharide	5.90±1.83 ^b	5.77±1.48 ^b	5.73±1.89 ^b	5.63±1.75 ^c	5.40±1.89 ^c
25% isomalt	6.83±1.60 ^a	6.70±1.47 ^a	6.77±1.72 ^a	6.63±1.61 ^b	6.03±1.79 ^{bc}
100% isomalt	6.03±1.99 ^b	6.23±1.98 ^{ab}	5.57±1.55 ^b	6.00±2.08 ^c	5.90±1.88 ^{bc}
25% erythritol	6.50±1.76 ^{ab}	6.53±1.57 ^a	6.40±1.63 ^a	7.50±1.63 ^a	7.13±1.70 ^a
100% erythritol	5.63±1.81 ^b	6.10±2.01 ^{ab}	5.97±2.19 ^a	5.70±2.12 ^{cd}	5.87±1.96 ^c
25% isomaltulose	6.53±2.01 ^a	6.93±1.53 ^a	6.53±1.74 ^a	6.43±1.81 ^{bc}	5.87±1.55 ^c
100% isomaltulose	5.80±1.65 ^a	6.33±1.52 ^a	5.80±1.79 ^{ab}	5.60±1.77 ^c	6.03±1.67 ^{bc}

* Values are given as means±SD (n=100)

** Different with letters (^{a-e}) in the same column indicate significant differences ($p\leq 0.05$)

Discussion

การศึกษาผลของชนิดคาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานต่อสมบัติทางเคมี-กายภาพ เนื้อสัมผัส และการประเมินทางประสาทสัมผัสของขนมปังแซนวิช โดยคุณสมบัติทางเคมี-กายภาพ ได้แก่ คุณสมบัติปรากฏ ปริมาณความชื้น กิจกรรม

น้ำอึสระ และค่าสี เป็นต้น ซึ่งลักษณะปรากฏของขนมปังแชนดิวที่ใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครส (น้ำตาลทรายขาว) แสดงดัง Figure 1 จากผลการทดลอง พบว่า การใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครส ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางกายภาพของขนมปังในระดับที่ต่างกันไปตามชนิด และอัตราส่วนที่ใช้ โดย control มีลักษณะปรากฏของโครงสร้างที่สม่ำเสมอด้วยโพรงอากาศที่กระจายตัวทั่วเนื้อขนมปัง ในขณะที่ตัวอย่างที่เติม polydextrose ที่ร้อยละ 25 และ 100 มีลักษณะโครงสร้างที่หนาแน่นกว่า โดยเฉพาะการทดแทนที่ร้อยละ 100 มีเนื้อสัมผัสที่แน่นและโพรงอากาศมีขนาดเล็กลงอย่างชัดเจน ซึ่งอาจเกิดจากคุณสมบัติของ polydextrose ที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงและทำหน้าที่เหมือนเส้นใยอาหาร (Veena *et al.*, 2016) อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างที่เติม isomaltulose และ isomalto-oligosaccharide ในทุกความเข้มข้น มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับ control มากที่สุด นอกจากนี้ การใช้ erythritol ในความเข้มข้นต่าง ๆ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของขนมปัง เมื่อเปรียบเทียบกับ control จึงสามารถสรุปได้ว่า isomaltulose มีศักยภาพสูงสุด ในการเป็นสารทดแทนน้ำตาลสำหรับการผลิตขนมปังแชนดิว เนื่องจากให้ผลลักษณะทางกายภาพที่ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ใช้น้ำตาลซูโครสมากที่สุด ตามด้วย isomalto-oligosaccharide erythritol และ trehalose ตามลำดับ ขณะที่ polydextrose อาจต้องมีการปรับปรุงสูตร หรือกระบวนการผลิตเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับต้นแบบ ซึ่งการเติมคาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานในอัตราส่วนร้อยละ 100 ทำให้อัตราการขึ้นฟูของขนมปังแชนดิวลดลง เนื่องจากยีสต์ไม่สามารถใช้น้ำตาลจากคาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานเหล่านั้นในการหมักได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ลดลง (Müller *et al.*, 2021) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อัตราการขึ้นฟูของขนมปังแชนดิวต่ำกว่าการใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนในอัตราส่วนร้อยละ 25 อีกทั้งการลดปริมาณ หรือไม่เติมน้ำตาลซูโครสเลยส่งผลให้ความหนืด และน้ำหนักเนื้อขนมปังลดลง เนื่องจากมีปริมาณของแข็งต่ำ การกักเก็บอากาศไม่ดี และโครงสร้างภายในไม่สมบูรณ์ (Vatankhah *et al.*, 2017) งานวิจัยของ Martinez-Cervera *et al.* (2012) ศึกษาการทดแทนน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์มัฟฟินสเปนด้วย erythritol ที่อัตราส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 พบว่า การใช้ erythritol ร้อยละ 50 ช่วยคงโครงสร้างฟองอากาศได้คล้ายกับขนมปัง control (เติมน้ำตาลซูโครส)

การศึกษาคูณสมบัติทางเคมีในด้านปริมาณความชื้น พบว่า ขนมปังแชนดิว control มีปริมาณความชื้นที่ร้อยละ 25.23 ส่วนการใช้ isomalt ที่อัตราส่วนร้อยละ 25 มีปริมาณความชื้นต่ำที่สุดที่ร้อยละ 19.87 การใช้ polydextrose ในอัตราส่วนร้อยละ 100 ให้ปริมาณความชื้นสูงที่สุดที่ร้อยละ 29.64 โดยจะเห็นว่าการเพิ่มปริมาณคาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานที่ร้อยละ 100 ส่งผลให้ปริมาณความชื้นสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการเติมในอัตราส่วนร้อยละ 25 เนื่องจาก polydextrose isomaltulose และ erythritol มีคุณสมบัติในการกักเก็บน้ำ (hygroscopicity) สูงกว่าน้ำตาลซูโครส ส่งผลให้ช่วยลดการสูญเสีย น้ำในระหว่างการอบ จึงทำให้ขนมปังยังคงความชุ่มชื้นได้ดี (Ding & Yang, 2021; Harinipriya *et al.*, 2021) สำหรับค่ากิจกรรมน้ำอึสระ (a_w) พบว่า control มีค่า a_w เท่ากับ 0.78 โดยการใช้ isomalt ในอัตราส่วนร้อยละ 25 มีค่า a_w ต่ำที่สุดที่ 0.76 ส่วนการใช้ polydextrose ในอัตราส่วนร้อยละ 100 มีค่า a_w สูงที่สุดที่ 0.83 ซึ่งปริมาณน้ำอึสระสอดคล้องกับปริมาณความชื้น โดยการเพิ่มปริมาณคาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานในอัตราส่วนร้อยละ 100 ส่งผลให้ค่ากิจกรรมน้ำอึสระสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการเติมในอัตราส่วนร้อยละ 25 โดย Rifna *et al.* (2022) กล่าวว่ากิจกรรมน้ำอึสระที่ต่ำกว่า 0.8 มีบทบาทสำคัญ

ในการช่วยยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี อีกทั้งยังสามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ขนมปังได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ค่าสีของเนื้อขนมปังแซนดวิชที่ใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครสแสดงดัง Table 2 ผลการทดลอง พบว่า control มีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a^*) ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) และค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE^*) เท่ากับ 83.34 0.40 17.65 และ 47.91 ตามลำดับ โดยการใช้ erythritol และ isomaltulose ที่อัตราส่วนร้อยละ 25 มีค่า L^* ต่ำที่สุดที่ 79.60 และ 79.45 ตามลำดับ ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าเนื้อขนมปังมีสีเข้มขึ้นเมื่อเทียบกับ control ในทางตรงกันข้าม Polydextrose และ trehalose ที่อัตราส่วนร้อยละ 100 แสดงค่า L^* ใกล้เคียงกับ control ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าสารทดแทนเหล่านี้ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) ในระหว่างกระบวนการอบ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zuurro (2021) พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนของ trehalose ที่สูงขึ้นในผลิตภัณฑ์เค้ก ส่งผลทำให้ค่าความสว่างสูงมากขึ้นตาม เช่นเดียวกับ Lee *et al.* (2008) ทำการทดแทน isomaltooligosaccharide ในผลิตภัณฑ์เค้กปอนด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 ส่งผลทำให้ค่าความสว่างของสีเนื้อและสีเปลือกของขนมปังลดลงตาม สำหรับค่าความเป็นสีแดง (a^*) พบว่า การใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานส่วนใหญ่ส่งผลให้ค่า a^* เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ control โดยเฉพาะ isomalto-oligosaccharide ที่อัตราส่วนร้อยละ 25 แสดงค่า a^* สูงที่สุดที่ 1.39 ซึ่งบ่งชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของความเข้มสีแดงจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ ได้แก่ปฏิกิริยาเมลลาร์ด ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างกลุ่มคาร์บอนิลของน้ำตาลรีดิวซ์ และกลุ่มอะมิโนจากโปรตีนในระหว่างกระบวนการอบ เนื่องจากอุณหภูมิภายในเนื้อขนมปังจะไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส จึงเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดเป็นหลัก เมื่อเพิ่มปริมาณของคาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวาน พบว่า ค่า b^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ isomalto-oligosaccharide ที่อัตราส่วนร้อยละ 100 มีค่า b^* สูงที่สุดที่ 18.79 ในส่วนของค่า ΔE^* พบว่า ตัวอย่างส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับ control โดย erythritol ที่อัตราส่วนร้อยละ 25 มีค่า ΔE^* ต่ำที่สุดที่ 43.51 ในขณะที่ polydextrose และ trehalose ที่อัตราส่วนร้อยละ 100 มีค่า ΔE^* สูงที่สุดที่ 49.03 และ 49.00 ตามลำดับ สำหรับค่าสีของเปลือกขนมปังแซนดวิชที่ใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครสแสดงดัง Table 3 จากผลการทดลอง พบว่า ค่า L^* อยู่ในช่วง 57.98-75.09 ค่า a^* อยู่ในช่วง 5.91-12.68 ค่า b^* อยู่ในช่วง 22.58-31.46 และค่า ΔE^* อยู่ในช่วง 23.40-39.08 การใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครสในอัตราส่วนร้อยละ 100 ส่งผลให้ค่า L^* ของเปลือกขนมปังเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่อัตราส่วนร้อยละ 25 การเปลี่ยนแปลงของสีเปลือกขนมปังนี้อธิบายได้จากกลไกการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction) โดยในสูตรที่มีการใช้น้ำตาลซูโครส ยีสต์จะผลิตเอนไซม์อินเวอร์เทส (invertase) มาย่อยซูโครสให้กลายเป็นกลูโคสและฟรุกโตสซึ่งเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugars) ในระหว่างการอบ น้ำตาลรีดิวซ์เหล่านี้ จะทำปฏิกิริยากับกรดอะมิโนจากโปรตีนในแป้งและนมผง เกิดเป็นปฏิกิริยาเมลลาร์ด ซึ่งเป็นกลไกหลัก ในการสร้างสีน้ำตาลที่เปลือกขนมปังเนื่องจากเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชัน (caramelization) อย่างไรก็ตาม เมื่อทดแทนน้ำตาลซูโครสทั้งหมดด้วยน้ำตาลแอลกอฮอล์และคาร์โบไฮเดรตทางเลือก ซึ่งสารเหล่านี้ไม่มีหมู่คาร์บอนิลอิสระที่จำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดและมีความเสถียรต่อความร้อนสูง จึงทำให้กระบวนการเกิดสีน้ำตาลลดลงอย่างมาก ส่งผลให้สูตรที่มีการทดแทน

ร้อยละ 100 แสดงค่าความสว่างที่เพิ่มขึ้นและมีค่าความเข้มของสีแดงและสีเหลืองลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu *et al.* (2025) ศึกษาการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วย polydextrose ในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่อัตราส่วนร้อยละ 0 (ไม่เสริม) 3 5 7 และ 10 โดยมีค่าความสว่างของเปลือกขนมปังเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ polydextrose ที่มากขึ้น เท่ากับ 77.39 78.40 80.15 80.44 และ 80.33 ตามลำดับ

คุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสของขนมปังแซนด์วิชที่ใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครสแสดงใน Table 4 พบว่า การทดแทนซูโครสด้วยสารให้ความหวานชนิดต่าง ๆ ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของขนมปังอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะค่า hardness ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความต้านทานต่อแรงกดทับ โดยการทดแทนน้ำตาลซูโครสที่อัตราส่วนร้อยละ 100 ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับขนมปังที่อัตราส่วนร้อยละ 25 ส่วนตัวอย่างที่ใช้ erythritol อัตราส่วนร้อยละ 100 มีค่าความแข็งสูงสุดที่ 2,963.56 g ในขณะที่ control มีค่าต่ำที่สุดเพียง 583.00 g ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซูโครสมีบทบาทสำคัญในการอุ้มน้ำ และช่วยสร้างเนื้อสัมผัสที่นุ่มของผลิตภัณฑ์ (Wong *et al.*, 2022) เนื่องจากการใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานมักจะส่งผลต่อโครงสร้างกลูเตนในแป้งสาลี ทำให้การขยายตัวของโดไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ปริมาตรขนมปังลดลง และโครงสร้างเนื้อขนมปังแน่นขึ้น (Chandel *et al.*, 2022; Rosell *et al.*, 2010) แม้ในงานวิจัยของ Lee *et al.* (2008) จะรายงานว่าการใช้ Isomaltoligosaccharide (IMO) ช่วยลดค่าความแข็ง (hardness) ในผลิตภัณฑ์เค้กสปันจ์ได้ ทว่าในระบบของขนมปังนั้นให้ผลลัพธ์ที่ตรงกันข้าม โดยพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของ IMO จากร้อยละ 25 เป็น 100 ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 1,204 กรัม เป็น 1,505 กรัม (Table 4) ความแตกต่างนี้เกิดจากลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของอาหาร ที่ไม่เหมือนกัน ในสปันจ์เค้กซึ่งเป็นระบบที่อาศัยการตีจับอากาศของโปรตีนไข่ IMO อาจทำหน้าที่ช่วยกักเก็บความชื้นและลดความแข็งได้ แต่สำหรับขนมปังที่อาศัยโครงสร้างตาข่ายกลูเตนและการหมักของยีสต์ (yeast-leavened bread) ปริมาณโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) ที่ยับยั้งการทำงานของยีสต์ และเกิดการแย่งจับน้ำในระบบ ส่งผลให้โครงสร้างขนมปังมีความแน่นตึงและแข็งขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่วน Sawettanun & Ogawa (2022) ศึกษาการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยน้ำตาล D-allulose ในอัตราส่วนร้อยละ 10 พบว่า การทดแทนด้วยน้ำตาล D-allulose ทำให้ค่า hardness และ gumminess สูงกว่า control ถึง 2.5 และ 3.7 เท่า ตามลำดับ สำหรับค่า Springiness ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการคืนตัวของโครงสร้าง พบว่า มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับค่าความแข็ง กล่าวคือเมื่อตัวอย่างมีความนุ่มสูงขึ้น ความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นตาม โดยการทดแทนน้ำตาลซูโครสที่อัตราส่วนร้อยละ 25 ทำให้ค่าความยืดหยุ่นเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดย trehalose มีค่าสูงสุดที่ 7.21 mm รองลงมาคือ isomaltulose isomaltoligosaccharide และ erythritol ที่ 7.13 7.03 และ 6.99 mm ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการทดแทนน้ำตาลซูโครสในอัตราส่วนที่ต่ำที่ร้อยละ 25 สามารถรักษาคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นของขนมปังได้ในระดับที่ดี ในขณะที่ค่า hardness พบว่า การใช้ erythritol ที่อัตราส่วนร้อยละ 100 ส่งผลให้ค่า hardness สูงที่สุดที่ 2,963.56 g ส่วนการทดแทนที่อัตราส่วนร้อยละ 25 มีค่าเพียง 574.37 g ซึ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับ control ที่ 583.00 g แสดงถึงผลกระทบของระดับการทดแทนที่ต่างกัน โดยในระดับต่ำ erythritol สามารถคงคุณสมบัติใกล้เคียงกับซูโครสได้ แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนการทดแทนสูงขึ้น คุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก จนมีแนวโน้มกระทบต่อการยอมรับของผู้บริโภค สำหรับค่า

chewiness ซึ่งสัมพันธ์กับความแน่นของเนื้อขนมปัง พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความแน่น โดยการใช้ erythritol ที่อัตราส่วนร้อยละ 100 ให้ค่า chewiness ได้สูงที่สุดถึง 132.30 mJ ในขณะที่อัตราส่วนร้อยละ 25 มีค่าต่ำที่สุดเพียง 26.95 mJ สะท้อนถึงผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญของระดับการทดแทนต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัส โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หากค่า chewiness สูงเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพโดยรวมและการยอมรับของผู้บริโภค ในส่วนของค่า cohesiveness ซึ่งแสดงถึงแรงยึดเหนี่ยวภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในทุกชุดการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับ control โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.50 ถึง 0.78 สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่าชนิดและระดับของสารทดแทนน้ำตาลที่ใช้ในการศึกษาไม่มีผลกระทบต่อความสามารถในการเกาะตัวของโครงสร้างตาข่ายกลูเตนในเนื้อขนมปัง จากการศึกษาของ Liu *et al.* (2025) เกี่ยวกับการใช้ polydextrose ทดแทนในผลิตภัณฑ์ขนมปัง พบว่า ในอัตราส่วนร้อยละ 0 (สูตรควบคุมที่ไม่เสริม) ส่งผลให้มีค่า hardness adhesiveness gumminess และ chewiness เท่ากับ 1,171 g, 0.2 mJ, 829 g และ 87.7 mJ ตามลำดับ ในขณะที่การทดแทนในอัตราส่วนร้อยละ 10 ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพิ่มขึ้น โดยมีค่า hardness adhesiveness gumminess และ chewiness เท่ากับ 1,244 g, 4.7 mJ, 1,101 g และ 117.8 mJ ตามลำดับ นอกจากนี้ การศึกษาของ Martinez-Cervera *et al.* (2012) เกี่ยวกับการใช้อิทธิทธิพลทดแทนน้ำตาลซูโครส ในผลิตภัณฑ์มัฟฟิน พบว่าเมื่อทดแทนในอัตราส่วนร้อยละ 25 มีค่า hardness Springiness cohesiveness chewiness และ resilience เท่ากับ 14.46 N, 0.89, 0.57, 7.23 N และ 0.30 ตามลำดับ ในขณะที่การทดแทนสูงสุดที่อัตราส่วนร้อยละ 100 ส่งผลให้ค่าดังกล่าวเปลี่ยนแปลงเป็น 74.88 N, 0.81, 0.39, 23.62 N และ 0.18 ตามลำดับ

การทดสอบทางประสาทสัมผัสของขนมปังแซนด์วิชที่ใช้คาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครส แสดงดัง Table 5 ในด้านลักษณะปรากฏ พบว่าการใช้ isomalt ที่อัตราส่วนร้อยละ 25 ได้คะแนนสูงสุด 6.83 คะแนน ในขณะที่ erythritol ที่อัตราส่วนร้อยละ 100 มีคะแนนต่ำที่สุด 5.63 คะแนน ด้านสี พบว่า การใช้ isomaltulose ที่อัตราส่วนร้อยละ 25 ได้รับคะแนนสูงสุดที่ 6.93 คะแนน ในขณะที่ isomalto-oligosaccharide ที่อัตราส่วนร้อยละ 100 ได้รับคะแนนต่ำที่สุด 5.77 คะแนน ความแตกต่างนี้เกิดจากความสามารถของสารทดแทนแต่ละชนิดในการเข้าร่วมปฏิกิริยามอลาร์ดและการคาราเมลไลเซชันที่ไม่เท่ากัน โดยซูโครสเมื่อผ่านความร้อนสามารถสร้างสารประกอบที่ช่วยเพิ่มสีน้ำตาลทองซึ่งเป็นที่ต้องการ ในขณะที่สารทดแทนบางชนิด เช่น erythritol หรือ polydextrose มีโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่สามารถเข้าร่วมปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้สีที่เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอและอาจไม่น่าพึงประสงค์ (Chandel *et al.*, 2022) ในการประเมินด้านกลิ่น พบว่า isomalt ที่อัตราส่วนร้อยละ 25 และ control ได้คะแนนสูงใกล้เคียงกัน 6.77 และ 6.73 คะแนน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของ Isomalt สามารถรักษารสชาติประกอบของสารหอมระเหยในระหว่างการอบได้ดีกว่าสารทดแทนชนิดอื่น โดยไม่รบกวนการก่อตัวของสารประกอบหอมระเหยที่สำคัญ เช่น แอลดีไฮด์ เอสเทอร์ และสารประกอบไพราซีน (pyrazine) ที่ให้กลิ่นหอมเฉพาะของขนมปัง ตรงกันข้าม polydextrose ที่อัตราส่วนร้อยละ 100 ได้คะแนนต่ำสุด 5.47 คะแนน อันเป็นผลมาจากความสามารถของ polydextrose ในการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงกับส่วนประกอบอื่นในระบบ เช่น การเกิดคอมเพล็กซ์กับโปรตีนผ่านกระบวนการ crosslinking หรือการทำปฏิกิริยากับกรดอินทรีย์ เช่น กรดแลคติกและกรดอะซิติกที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหมัก ซึ่งอาจนำไปสู่การสร้างสารประกอบระเหยใหม่ที่มีกลิ่นไม่พึงประสงค์ หรือการยับยั้งการ

ปลดปล่อยสารหอมระเหยตามธรรมชาติของขมิ้นปึง ส่งผลให้กลิ่นรวมของผลิตภัณฑ์ผิดเพี้ยนไปจากที่ผู้บริโภคคุ้นเคยและยอมรับ การประเมินด้านรสชาติซึ่งถือเป็นปัจจัยที่มีน้ำหนักสูงสุดในการตัดสินใจคุณภาพและการยอมรับของผู้บริโภคด้านรสชาติ ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการยอมรับ พบว่า control และ erythritol ที่อัตราส่วนร้อยละ 25 ได้คะแนนสูงสุดใกล้เคียงกันที่ 7.53 และ 7.50 คะแนน แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลสามารถทดแทนซูโครสได้อย่างมีประสิทธิภาพในระดับต่ำเนื่องจากมีรสหวานที่ใกล้เคียงกันและไม่ก่อให้เกิดรสขมติดลิ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นที่ร้อยละ 100 รสชาติกลับไม่เป็นที่ยอมรับ อาจเนื่องจากความหวานที่ต่ำกว่าซูโครสและการเกิดความรู้สึกที่ยังคงหลงเหลือค้างอยู่ในปาก (aftertaste) ที่ไม่พึงประสงค์ เช่น ความฝาดหรือรสโลหะ ซึ่งเป็นปัญหาที่มักพบในสารทดแทนบางชนิด (Rosell *et al.*, 2010) การประเมินความชอบโดยรวมซึ่งสะท้อนทุกองค์ประกอบ พบว่า control และ erythritol ที่อัตราส่วนร้อยละ 25 ได้คะแนนสูงสุด 7.21 และ 7.13 คะแนน ในขณะที่ polydextrose ที่อัตราส่วนร้อยละ 100 ได้คะแนนต่ำสุด 5.27 คะแนน ดังนั้น erythritol ที่อัตราส่วนร้อยละ 25 สามารถรักษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่ใกล้เคียงกับซูโครสได้มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มอุตสาหกรรมอาหารที่มุ่งเน้นการลดน้ำตาลโดยไม่กระทบต่อรสชาติและความชอบของผู้บริโภค อย่างไรก็ตาม การใช้สารทดแทนในระดับสูงมักส่งผลเสียในหลายด้าน จึงควรเลือกใช้ในระดับที่เหมาะสม หรือประยุกต์ใช้การผสมผสานระหว่างสารทดแทนเพื่อเพิ่มสมดุลทั้งด้านคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสและการยอมรับในตลาด จากการศึกษาของ Arukwe *et al.* (2023) ที่เปรียบเทียบผลของสารให้ความหวานชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิทอล น้ำตาล น้ำผึ้ง และผงอินทผลัม ต่อคุณภาพของขมิ้นปึง พบว่า การเสริมด้วยผงอินทผลัมทำให้ผลิตภัณฑ์ได้รับคะแนนการประเมินทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส รสชาติ กลิ่น และความชอบโดยรวมสูงที่สุด เท่ากับ 8.10, 8.00, 8.10, 8.05 และ 8.50 คะแนน ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Awofadeju *et al.* (2021) ที่พบว่า การใช้ผงอินทผลัมทดแทนน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์ขมิ้นปึงแบบทดแทนทั้งหมด (ร้อยละ 100) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ได้รับการยอมรับด้านลักษณะปรากฏและสีใกล้เคียงกับสูตรควบคุม นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาการใช้สารทดแทนความหวานชนิดอื่น เช่น งานวิจัยของ Alencar *et al.* (2017) ที่พบว่า การทดแทนแป้งสาลีด้วยเมล็ดผักโขมร่วมกับการใช้น้ำหวานทดแทนน้ำตาลซูโครสทำให้ได้รับคะแนนทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงที่สุด เท่ากับ 6.00 6.09 5.36 5.31 และ 5.54 คะแนน ตามลำดับ ในขณะที่ Vatanikhah *et al.* (2017) รายงานว่า การทดแทนด้วยหญ้าหวานที่อัตราส่วนร้อยละ 50 ให้คะแนนด้านสี รสชาติ กลิ่น และความชอบโดยรวมสูงที่สุด เท่ากับ 4.33 4.33 4.00 และ 4.46 คะแนน ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการทดแทนด้วยหญ้าหวานให้สูงขึ้น โดยเฉพาะที่ร้อยละ 100 พบว่า ผลิตภัณฑ์มีค่าความสว่างสูงสุด (62.48) และมีค่าความแข็งลดลงเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม

Conclusions

การทดแทนน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์ขมิ้นปึงแซนดวิชด้วยสารให้ความหวานชนิด erythritol ในอัตราส่วนร้อยละ 25 เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ แม้ว่าสมบัติทางเคมีฟิสิกส์บางประการ เช่น ปริมาณความชื้นและค่าสี จะมีความแตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับสารทดแทนชนิดอื่น ทว่าสูตร erythritol ร้อยละ 25 กลับมีความโดดเด่นสูงสุดในด้านคุณสมบัติทางประสาทสัมผัส โดยได้รับคะแนนความชอบด้านรสชาติ

และการยอมรับโดยรวมใกล้เคียงกับขนมปังแซนวิช control มากที่สุด จึงแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ทางเลือกเพื่อสุขภาพต่อไป

Acknowledgments

งานวิจัยเรื่อง การศึกษาชนิดของคาร์โบไฮเดรตและสารให้ความหวานต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ เนื้อสัมผัส และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของขนมปังแซนวิช สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัท เพียว เคมีกัลส์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัตถุดิบ ตลอดจนคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

References

- Ahmad, A., Isherwood, C., Umpleby, M., & Griffin, B. (2020). Effects of high and low sugar diets on cardiovascular disease risk factors. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, 66(1), 18-24.
- Alam, S. S., Bharti, D., Pradhan, B. K., Sahu, D., Dhal, S., Kim, N. M., & Pal, K. (2022). Analysis of the physical and structure characteristics of reformulated pizza bread. *Foods*, 11(13), 1979-1992.
- Alam, Y. H., Kim, R., & Jang, C. (2022). Metabolism and health impacts of dietary sugars. *Journal of Lipid and Atherosclerosis*, 11(1), 20-38.
- Alencar, N. M. M., Morais, E. C., Steel, C. J., & Bolini, H. M. A. (2017). Sensory characterisation of gluten-free bread with addition of quinoa, amaranth flour and sweeteners as an alternative for coeliac patients. *International Journal of Food Science and Technology*, 52(4), 872-879.
- AOAC. Official methods of analysis of AOAC international. Gaithersburg, MD: AOAC International; 2000.
- Arukwe, D. C., Ezeocha, V. C., & Okolue, S. C. (2023). Comparative analysis of bread samples produced with different sweeteners (Xylitol, Sugar, Honey and Date Powder). *Nigeria Agricultural Journal*, 54(2), 194-201.
- Awofadeju, O. F. J., Awe, A. B., Adewumi, O. J., & Adeyemo, E. A. (2021). Influence of substituting sucrose with date palm fruit flour (DPFF) on the nutritional and organoleptic properties of bread. *Croatian Journal of Food Science and Technology*, 13(1), 1-6.

Beleia, A., Miller, R. A., & Hosney, R. C. (1996). Starch gelatinization in sugar solutions. *Starch-Stärke*, 48(7-8), 259-262.

Chandel, V., Biswas, D., Roy, S., Vaidya, D., Verma, A., & Gupta, A. (2022). Current advancements in pectin: Extraction, properties and multifunctional applications. *Foods*, 11(17), 2683.

Devi, R., Singh, A., Dutta, D., & Sit, N. (2024). Physicochemical properties of barley starch and effect of substitution of wheat flour with barley starch on texture and sensory properties of bread. *eFood*, 5(1), 132-143.

Ding, S., & Yang, J. (2021). The effects of sugar alcohols on rheological properties, functionalities, and texture in baked products-A review. *Trends in food science & technology*, 111, 670-679.

Ding, J., Hu, H., Yang, J., Wu, T., Sun, X., Fang, Y., & Huang, Q. (2023). Mechanistic study of the impact of germinated brown rice flour on gluten network formation, dough properties and bread quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 83(1), 103217.

Do Carmo, M. M. R., Walker, J. C. L., Novello, D., Caselato, V. M., Sgarbieri, V. C., Ouwehand, A. C., & Dos Santos, E. F. (2016). Polydextrose: Physiological function, and effects on health. *Nutrients*, 8(9), 553-566.

Dutta, A. J., Sinha, D., Konwar, S., Pegu, B. K., & Baruah, S. (2024). Sweeteners and Sugar-Their Impact on Human Metabolic Health and Chronic Diseases. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 21(4), 1319-1327.

Farooq, S., Shah, M. A., & Mir, S. A. (2023). Pastry. *Cereal-Based Food Products*, 13(2), 267-272.

Gerardo-Rodríguez, J. E., Ramírez-Wong, B., Ledesma-Osuna, A. I., Medina-Rodríguez, C. L., Ortega-Ramírez, R., & Silvas-García, M. I. (2016). Management of freezing rate and trehalose concentration to improve frozen dough properties and bread quality. *Food Science and Technology (Campinas)*, 37(1), 59-64.

- Guiné, R. P., & Florença, S. G. (2024). Development and characterisation of functional bakery products. *Physchem*, 4(3), 234-257.
- Harinipriya, S., Ghosh, R., Prabakaran, S. R. S., & Sudha, V. (2021). pH switch over a cause for high efficiency all-aqueous $\text{CuSO}_4/[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$ redox flow battery. *International Journal of Energy Research*, 45(13), 19226-19244.
- Higashiyama, T., & Richards, A. B. (2012). Trehalose. *Sweeteners and Sugar Alternatives in Food Technology*, 12(2), 417-431.
- Kan, L., Oliviero, T., Verkerk, R., Fogliano, V., & Capuano, E. (2020). Interaction of bread and berry polyphenols affects starch digestibility and polyphenols bio-accessibility. *Journal of Functional Foods*, 68(1), 103924.
- Lee, C. C., Wang, H. F., & Lin, S. D. (2008). Effect of Isomaltooligosaccharide syrup on quality characteristics of sponge cake. *Cereal Chemistry*, 85(4), 515-521.
- Lin, S. D., Lee, C. C., Mau, J. L., Lin, L. Y., & Chiou, S. Y. (2010). Effect of erythritol on quality characteristics of reduced-calorie Danish cookies. *Journal of Food Quality*, 33(1), 14-26.
- Liu, C., Dai, B., Luo, X., Song, H., & Li, X. (2025). Polydextrose addition improves the chewiness and extended shelf-life of chinese steamed bread through the formation of a sticky, elastic network structure. *Gels*, 11(7), 545.
- Mäkinen, K. K. (2016). Gastrointestinal disturbances associated with the consumption of sugar alcohols with special consideration of xylitol: scientific review and instructions for dentists and other health-care professionals. *International Journal of Dentistry*, 2016(1), 5967907.
- Martínez-Cervera, S., de la Hera, E., Sanz, T., Gómez, M., & Salvador, A. (2012). Effect of using erythritol as a sucrose replacer in making Spanish muffins incorporating xanthan gum. *Food and Bioprocess Technology*, 5(8), 3203-3216.

- Martinez-Cervera, S., Sanz, T., Salvador, A., & Fiszman, S. M. (2014). Rheological, textural and sensorial properties of low-sucrose muffins reformulated with sucralose/polydextrose. *LWT-Food Science and Technology*, 56(1), 164-170.
- Ministry of Public Health. (1998). Notification of the Ministry of Public Health (No. 182) B.E. 2541 Re: Nutrition Labeling. *Royal Thai Government Gazette*, 115(Special Part 24 Ngor). (in Thai)
- Müller, D. C., Nguyen, H., Li, Q., Schönlechner, R., Schwenninger, S. M., Wismer, W., & Gänzle, M. (2021). Enzymatic and microbial conversions to achieve sugar reduction in bread. *Food Research International*, 143, 110296.
- Müller, D. C., Schipali, S., Näf, P., Kinner, M., Miescher Schwenninger, S., & Schönlechner, R. (2022). Potential of a techno-functional sourdough and its application in sugar-reduced soft buns. *Fermentation*, 8(2), 42.
- Regnat, K., Mach, R. L., & Mach-Aigner, A. R. (2018). Erythritol as sweetener-wherefrom and whereto. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(2), 587-595.
- Rifna, E. J., Dwivedi, M., & Chauhan, O. P. (2022). Role of water activity in food preservation. In *Advances in food chemistry: Food Components, Processing and Preservation*. 39-64
- Ronda, F., Gomez, M., Blanco, C. A., & Caballero, P. A. (2005). Effects of polyols and nondigestible oligosaccharides on the quality of sugar-free sponge cakes. *Food Chemistry*, 90(4), 549-555.
- Rosell, C. M., Santos, E., & Collar, C. (2010). Physical characterization of fiber-enriched bread doughs by dual mixing and temperature constraint using the Mixolab. *European Food Research and Technology*, 231(4), 535-544.
- Sawettanun, S., & Ogawa, M. (2022). Influences of rare sugar D-allulose on the fermentation ability of baker's yeast and the physical properties of bread. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(9), 6004-6015.
- Sentko, A., & Willibald-Ettle, I. (2012). Isomalt. *Sweeteners and Sugar Alternatives in Food Technology*, 243-274.
- Shyam, S., Ramadas, A., & Chang, S. K. (2018). Isomaltulose: Recent evidence for health benefits. *Journal of Functional Foods*, 48(1), 173-178.

- Sinaga, J., Sinambela, J. L., Purba, B. C., & Pelawi, S. (2024). Gula dan Kesehatan: Kajian Terhadap Dampak Kesehatan Akibat Konsumsi Gula Berlebih. *Mutiara: Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, 2(1), 54-68.
- Sorndech, W., Nakorn, K. N., Tongta, S., & Blennow, A. (2018). Isomalto-oligosaccharides: Recent insights in production technology and their use for food and medical applications. *LWT-Food Science and Technology*, 95(1), 135-142.
- Storey, D., Lee, A., Bornet, F., & Brouns, F. J. P. H. (2007). Gastrointestinal tolerance of erythritol and xylitol ingested in a liquid. *European Journal of Clinical Nutrition*, 61(3), 349-354.
- Vatankhah, M., Garavand, F., Mohammadi, B., & Elhamirad, A. (2017). Quality attributes of reduced-sugar Iranian traditional sweet bread containing stevioside. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(3), 1233-1239.
- Veena, N., Nath, S., & Arora, S. (2016). Polydextrose as a functional ingredient and its food applications: a review. *Indian Journal of Dairy Science*, 69(3), 239-251.
- Wilde, P. (2012). Foam formation in dough and bread quality. *Breadmaking: Improving quality* (pp. 370-399). Woodhead Publishing.
- Wong, K. Y., Thoo, Y. Y., Tan, C. P., & Siow, L. F. (2022). Moisture absorption behavior and thermal properties of sucrose replacer mixture containing inulin or polydextrose. *Applied Food Research*, 2(1), 100089.
- World Health Organization. (2015). *Guideline: Sugars intake for adults and children*. World Health Organization.
- Yuliana, L. (2024). Comfort food as consumer preference in purchasing decisions. *Widya Cipta: Jurnal Sekretari dan Manajemen*, 8(1), 22-27.
- Zhang, Y., Wang, D., Zhang, Z., Guan, H., Zhang, Y., Xu, D., & Li, D. (2024). Improvement on wheat bread quality by in situ produced dextran-A comprehensive review from the viewpoint of starch and gluten. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(3), e13353.
- Zuorro, A. (2021). Water activity prediction in sugar and polyol systems using theoretical molecular descriptors. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(20), 11044.