

การทดแทนแป้งสาลีด้วยสารประกอบเชิงซ้อนสตาร์ชข้าวและกรดไขมัน เพื่อพัฒนาขนมปังลดดัชนีน้ำตาล

ชญญา ศรีเมือง^{1*}, ชนิกานต์ ศรีกัลยา¹ และ นพรัตน์ ปราบสงบ¹

¹ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*chanya.srim@ku.th

บทคัดย่อ

ขนมปังเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่บริโภคอย่างแพร่หลาย แต่มีข้อจำกัดเชิงโภชนาการเนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีค่าดัชนีน้ำตาล (Glycemic index, GI) สูง ส่งผลให้ระดับน้ำตาลในเลือดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังการบริโภค ทำให้เกิดข้อจำกัดการบริโภคสำหรับบุคคลบางกลุ่ม อาทิ ผู้ป่วยเบาหวานหรือผู้ที่ต้องควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาขนมปัง GI ต่ำโดยสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของสตาร์ชและลิพิด (Starch-lipid complex, SLC) จากสตาร์ชข้าวร่วมกับกรดสเตียริก (Stearic acid, SA) หรือกรดโอเลอิก (Oleic acid, OA) ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (ร้อยละ 2 4 และ 6) พบว่า SLC ของกรด SA ให้ค่าระดับการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complexing index, CI) สูงกว่า SLC ของกรด OA ที่ทุกระดับความเข้มข้น โดย SLC ของกรด SA ระดับความเข้มข้นร้อยละ 4 (SLC-SA-4%) ให้ค่า CI สูงที่สุด ขณะที่ SLC ของ SA ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 (SLC-SA-2%) มีปริมาณแป้งทนย่อย (Resistant starch, RS) สูงที่สุด การใช้ SLC-SA-2% แทนที่แป้งสาลีในการผลิตขนมปังที่ระดับการแทนที่ต่าง ๆ (ร้อยละ 2.5 5.0 และ 7.5) ส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปัง โดยทำให้ค่าความหนืด ความยืดหยุ่น ความคงรูป และความเคี้ยวเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความยืดหยุ่นลดลง ขนมปังสูตรที่ใช้ SLC-SA-2% ที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 2.5 ให้ค่าการสูญเสียระหว่างการอบและค่าดัชนีน้ำตาลคาดการณ์ (Estimated glycemic index) ต่ำที่สุดและมีปริมาณ RS สูงที่สุด บ่งชี้ถึงศักยภาพของขนมปังดังกล่าวต่อการลดระดับน้ำตาลในเลือดหลังการบริโภค และ SLC-SA-2% ที่พัฒนาขึ้นอาจเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยในการพัฒนาขนมปังลดดัชนีน้ำตาลได้

คำสำคัญ: ดัชนีน้ำตาล สารประกอบเชิงซ้อนสตาร์ชและลิพิด สตาร์ชข้าว ขนมปังลดดัชนีน้ำตาล

Replacement of wheat flour using starch - fatty acid complex for development of reduced glycemic index bread

Chanya Srimueang^{1*}, Chonnikarn Srikanlaya¹ and Nopparat Prabsangob¹

¹Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University

*chanya.srim@ku.th

Abstract

Bread is a widely consumed food product. However, bread always has nutritional limitation due to its high glycemic index (GI) that leads to a rapid increase in blood glucose levels after consumption, thereby restricting bread consumption in some groups of people, such as patients with diabetes or individuals controlling blood glucose levels. This study focused on creating bread with a lower glycemic index by synthesizing starch-lipid complexes (SLC) from rice starch with either stearic acid (SA) or oleic acid (OA) at different ratios (2, 4, and 6%). The results showed that the SLC of SA showed higher complexing index (CI) than the SLC of OA at all observed concentration levels. The SLC prepared using 4 % SA (SLC-SA-4 %) exhibited the highest CI, whereas the SLC prepared using 2% SA (SLC-SA-2%) showed the highest resistant starch (RS) content. Then, the SLC-SA-2% was used to partially replace wheat flour at varying levels (i.e., 2.5, 5.0, and 7.5%) for bread preparation. Increasing wheat flour substitution level using the SLC-SA-2 % affected the textural properties of the bread: The gumminess, springiness, cohesiveness, and chewiness increased, whereas adhesiveness decreased. The bread formulated with 2.5 % of SLC-SA-2 % showed the lowest baking loss and estimated glycemic index along with the highest RS content. The present findings indicated potential of the developed bread to reduce postprandial blood glucose levels, and the SLC-SA-2% might be a key ingredient for development of bread with reduced GI.

Keywords: Glycemic Index, Starch-Lipid Complex, Rice Starch, Reduced glycemic index bread

1. บทนำ

ขนมปังเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่เป็นอาหารพื้นฐานของมนุษย์โดยเป็นแหล่งสำคัญของคาร์โบไฮเดรต ขนมปังที่จำหน่ายทั่วไปมักมีปริมาณใยอาหารต่ำ ส่งผลทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดและอินซูลินเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วหลังการบริโภคก่อให้เกิดข้อจำกัดการบริโภคขนมปังสำหรับคนบางกลุ่ม เช่น ผู้ป่วยเบาหวานหรือผู้ที่ต้องควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด [1] แนวทางการพัฒนาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ขนมปังที่น่าสนใจ เช่น การลดปริมาณพลังงาน การเพิ่มปริมาณใยอาหาร การลดปริมาณเกลือ น้ำตาล และวัตถุเจือปนสังเคราะห์ การใช้สตาร์ชที่ไม่สามารถย่อยได้ (Resistant starch; RS) แทนที่แป้งสาลีเป็นอีกแนวทางเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ลดค่าดัชนีน้ำตาล ซึ่งช่วยป้องกันและจัดการภาวะดื้อต่ออินซูลิน และโรคเรื้อรังที่เกี่ยวข้องให้กับผู้บริโภคได้ [3] สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสตาร์ชและลิพิด (Starch -lipid

complex; SLC) เป็นประเภทหนึ่งของ RS ที่มีความต้านทานต่อกระบวนการไฮโดรไลซิสโดยเอนไซม์ ทำให้อยู่สลายได้ลดลงในระบบทางเดินอาหาร ช่วยลดค่าดัชนีน้ำตาล และลดความผันผวนของระดับน้ำตาลในเลือดหลังรับประทานอาหารได้ [4] จากงานวิจัยของ Pugh et al. (2023) พบว่าการบริโภคอาหารที่มี RS เป็นส่วนประกอบสามารถช่วยลดระดับน้ำตาลและระดับอินซูลินในเลือดหลังมื้ออาหารได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2 และกลุ่มผู้ที่มีภาวะก่อนเบาหวาน (Prediabetes) เนื่องจาก RS ช่วยชะลอการย่อยและการดูดซึมกลูโคส ส่งผลให้ตับอ่อนไม่ต้องทำงานหนักในการหลั่งอินซูลิน และช่วยลดความผันผวนของน้ำตาลในเลือดได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ลดค่าดัชนีน้ำตาล โดยการสังเคราะห์สาร SLC แล้วนำไปใช้แทนที่แป้งสาลีในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังลดดัชนีน้ำตาล

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมสาร SLC

การเตรียม SLC เริ่มจากเตรียมสารละลายสตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 5 (w/w) กวนผสมที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เพื่อให้เกิดเจลาติไนเซชัน จากนั้นลดอุณหภูมิลงเหลือ 75 องศาเซลเซียส แล้วจึงเติมกรดสเตียริก (Stearic acid; SA) หรือกรดโอเลอิก (Oleic acid; OA) ที่ละลายในเอทานอลที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2, 4 และ 6 (w/w ของสตาร์ช) กวนผสมต่อเนื่อง 30 นาที ลดอุณหภูมิลงที่ 30 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างมาปั่นเหวี่ยง (2205×g, 15 นาที) แยกตะกอนมาล้างด้วยน้ำร้อน 1 ครั้ง และเอทานอล 2 ครั้ง (ครั้งละ 20 มิลลิลิตร) จากนั้นนำตะกอนไปปั่นเหวี่ยงซ้ำอีก 1 รอบ ก่อนนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (รุ่น FD56, ยี่ห้อ Binder, ประเทศเยอรมนี) ที่ 45 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง บดตัวอย่างให้เป็นผงด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้า (รุ่น HR2221 ProBlend series, ยี่ห้อ Philips, ประเทศจีน) จนละเอียด เก็บรักษา SLC ที่ได้ในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ที่อุณหภูมิห้อง [6] เพื่อตรวจวัดสมบัติต่อไป

2.1.1 ดัชนีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complexing Index; CI): เตรียมสารละลายไอโอดีนมาตรฐาน โดยละลาย KI (2 กรัม) และ I_2 (1.3 กรัม) ในน้ำกลั่น (50 มิลลิลิตร) จากนั้นปล่อยสารละลายไว้ข้ามคืนและปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตร นำตัวอย่าง SLC 1 กรัม ผสมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและปั่นเหวี่ยง (1500×g, 10 นาที) นำสารละลายส่วนใส (250 ไมโครลิตร) ผสมกับสารละลายไอโอดีนมาตรฐาน (1 มิลลิลิตร) และน้ำกลั่น (7.5 มิลลิลิตร) วัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer) (รุ่น UV-1900, ยี่ห้อ Shimadzu, ประเทศญี่ปุ่น) ที่ความยาวคลื่น 690 นาโนเมตร เพื่อคำนวณค่า CI ตามสมการที่ (1) โดยที่ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างควบคุมคือค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ไม่มี SLC [7]

$$CI (\%) = \frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุม} - \text{ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง}}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุม}} \times 100 \quad (1)$$

2.1.2 การทดสอบการย่อยของ SLC ในระบบจำลองทางเดินอาหารมนุษย์: ทดสอบการย่อยของ SLC ในระบบจำลองทางเดินอาหารมนุษย์ โดยนำตัวอย่าง SLC และสตาร์ชข้าว (100 มิลลิกรัม) ละลายในสารละลายบัฟเฟอร์อะซิเตด (9 มิลลิลิตร, 0.2 M, pH 6.0) ที่ประกอบด้วย $CaCl_2$ (200 mM) และ $MgCl_2$ (0.5 mM) จากนั้นผสมด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (18 U/mL) และแอลฟาอะไมเลส (10 U/mL) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ก่อนนำตัวอย่างไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 180 นาที สุ่มตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ (0, 10, 20, 30, 60, 120, 150, และ 180 นาที) เติมเอทานอล (ร้อยละ 95) (1 มิลลิลิตร) เพื่อหยุดปฏิกิริยา ก่อนนำไปปั่นเหวี่ยง (3000 × g, 15 นาที) [6] และวัดปริมาณกลูโคสในสารละลายส่วนใสด้วยวิธี Dinitrosalicylic acid method (DNS) นำสารละลายส่วนใส (1 มิลลิลิตร) ผสมกับสารละลาย DNS (2 มิลลิลิตร) บ่มในน้ำเดือด 5 นาที ทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง และปรับส่วนผสมด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรสุดท้าย 10 มิลลิลิตร ก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร [8] วิเคราะห์สัดส่วนของสตาร์ชที่ย่อยได้เร็ว (Rapidly

digestible starch; RDS), สตาร์ชที่ย่อยได้ช้า (Slowly digestible starch; SDS) และสตาร์ชทนการย่อย (Resistant starch; RS) ตามสมการที่ (3), (4), และ (5) ตามลำดับ จากนั้นคัดเลือก SLC ที่มีค่า RS สูงที่สุดเพื่อแทนที่แป้งสาลีในการพัฒนาขนมปังลดดัชนีน้ำตาลในลำดับต่อไป

$$RDS (\%) = (G_{20} - G_0) \frac{0.9}{TS} \times 100 \quad (3)$$

$$SDS (\%) = (G_{120} - G_{20}) \frac{0.9}{TS} \times 100 \quad (4)$$

$$RS (\%) = 100 - RDS - RS \quad (5)$$

โดยที่ G คือ ความเข้มข้นของกลูโคส (กรัมต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง) ที่ย่อยละลายออกมา และ TS คือ ปริมาณแป้งทั้งหมด (กรัมต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง) โดยหาปริมาณแป้งทั้งหมดด้วยวิธีมาตรฐาน AOAC 996.11

2.2 การศึกษาอัตราส่วนการแทนที่แป้งสาลีด้วย SLC ในผลิตภัณฑ์ขนมปังลดดัชนีน้ำตาล

นำ SLC ที่ได้จากข้อ 2.1.2 มาแทนที่แป้งสาลีที่ระดับการแทนที่ต่าง ๆ ได้แก่ ร้อยละ 0 (SLC-CT) ร้อยละ 2.5 (SLC-2.5) ร้อยละ 5.0 (SLC-5.0) และร้อยละ 7.5 (SLC-7.5) ตามลำดับ สูตรขนมปังที่ศึกษาแสดงดังในตารางที่ 1 ผสมส่วนผสมแห้งด้วย SLC แป้งสาลี น้ำตาลทราย เกลือ และยีสต์ โดยใช้เครื่องผสมแป้ง (ยี่ห้อ KitchenAid, รุ่น K5-A, ประเทศสหรัฐอเมริกา) ด้วยความเร็วต่ำนาน 3 นาที ก่อนผสมเข้ากับของเหลวด้วยความเร็วสูงสุด นาน 7 นาที พักโดว์ไว้ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 45 นาที ก่อนนำโดว์มาวัดโอเอกาออก พักโดว์ไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อีก 10 นาที แล้วนำเข้าอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส นาน 35 นาที ด้วยเตาอบไฟฟ้า (รุ่น CK06-120, ยี่ห้อ Ectric Convection Oven, ประเทศจีน) และตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 1 ส่วนผสมการผลิตขนมปังต่อน้ำหนักแป้ง 100 กรัม ในระดับต่าง ๆ

ส่วนผสม	SLC-CT	SLC-2.5	SLC-5.0	SLC-7.5
แป้งสาลี (กรัม)	100	97.5	95.0	92.5
SLC (กรัม)	0	2.5	5.0	7.5
น้ำตาลทราย (กรัม)	6	6	6	6
เนยจืด (กรัม)	6	6	6	6
เกลือ (กรัม)	1.5	1.5	1.5	1.5
น้ำ (กรัม)	30	30	30	30
นมสด (กรัม)	21	21	21	21
ยีสต์ (กรัม)	6	6	6	6

2.2.1 การทดสอบการย่อยในระบบจำลองทางเดินอาหารมนุษย์: ทดสอบสภาวะการย่อยของตัวอย่างขนมปังในระบบจำลองทางเดินอาหารมนุษย์ โดยวิธีการวิเคราะห์ปริมาณ RDS SDS และ RS ตามวิธีดังกล่าวข้างต้น จากนั้นคำนวณร้อยละการไฮโดรไลซ์ของแป้งที่ 60 นาที (H_{60}) และ 120 นาที (H_{120}) แล้วนำไปคำนวณหาค่าดัชนีน้ำตาลประมาณการ (Estimated glycemic index; eGI) ตามสมการที่ (9-11) [9]

$$\% \text{ Hydrolyzed normalization (t)} = \left(\frac{G_t}{TS} \right) \times 100 \quad (9)$$

โดยที่ G คือ ปริมาณความเข้มข้นของกลูโคส (กรัมต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง) ที่ปล่อยออกมา ณ เวลาที่ 60 และ 120 นาที TS คือ ปริมาณแป้งทั้งหมด (กรัมต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง) ของตัวอย่างทดสอบ

$$\% \text{ Hydrolyzed normalization (90)} = H_{60} + 0.5 \times (H_{90} - H_{60}) \quad (10)$$

โดยที่ H_{60} และ H_{120} คือ ร้อยละการไฮโดรไลซ์ของแป้งที่ 60 (H_{60}) นาที และ 120 (H_{120}) นาที

$$eGI = 39.21 + 0.803 (H_{90}) \quad (11)$$

โดย $eGI < 55$ จัดอยู่ในระดับต่ำ eGI 56–69 จัดอยู่ในระดับปานกลาง และ $eGI \geq 70$ จัดอยู่ในระดับสูง

- วิเคราะห์การสูญเสียระหว่างการอบ (Baking loss) ตามวิธีของ Tamilselvan et al. [9] ตามสมการที่ (12)

$$\text{Baking loss (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักโดว์ก่อนอบ} - \text{น้ำหนักขนมปังหลังอบ})}{\text{น้ำหนักโดว์ก่อนอบ} \times 100} \quad (12)$$

- วิเคราะห์ความหนาแน่นตามวิธีของ Tamilselvan et al. [10] โดยการแทนที่ด้วยเมล็ดงา แล้วคำนวณความหนาแน่นจากน้ำหนักและปริมาตรของตัวอย่างขนมปัง

- ทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังด้วย Texture analyzer (ยี่ห้อ TA-XT Plus, รุ่น Stable Micro Systems Ltd., ประเทศสหรัฐอเมริกา) นำขนมปังหลังอบ 2 ชิ้น ทิ่มเป็นชิ้นที่ความหนา 1.5 เซนติเมตร มาวัดด้วยหัววัดทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มิลลิเมตร และ 50 kg load cell โดยควบคุม Pre-test speed, Test speed, และ Posttest speed: 2.0 mm/s, Trigger force: 5.0 g, Compression distance: 40%, และ Rest time between cycles: 5.0 วินาที บันทึกค่าความแข็ง (hardness, N) ความยึดติด (adhesiveness, N/sec) ค่าความเคี้ยวยาก (chewiness, Nmm) ความคงรูปภายใน (cohesiveness) ความยืดหยุ่น (springiness, mm) และความเหนียวหนืด (gumminess, N) [11]

- วัดค่าสีของเนื้อขนมปัง ใช้เครื่องวัดสี (รุ่น Ultrascan pro, ยี่ห้อ Konica Minolta, ประเทศสหรัฐอเมริกา) ภายใต้ระบบ CIE $L^*a^*b^*$ คำนวณหาค่าความแตกต่างของสี (ΔE) เทียบกับตัวอย่างขนมปังสูตร SLC-CT ตามสมการที่ (13) [12]

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (13)$$

- ประเมินคุณภาพทางประสาทด้วยวิธี 9-Point hedonic scale นำตัวอย่างขนมปังที่มีปริมาณค่า eGI ต่ำสุดไปประเมินความชอบในคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติโดยรวม และความแน่นเนื้อ ความนุ่ม และความชอบโดยรวม ประเมินโดยผู้ทดสอบทั่วไปที่ไม่ผ่านการฝึกฝนและเป็นผู้ที่รับประทานขนมปัง จำนวน 30 คน

2.3 การทดลองทางสถิติ

เตรียมตัวอย่าง SLC 2 ซ้ำ และขนมปังจำนวน 3 ซ้ำ นำไปวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ จำนวน 3 ซ้ำ รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ค่าคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของขนมปังลดดัชนีน้ำตาลวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) และการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสวางแผนการทดลองแบบบล็อกสมบูรณ์เชิงสุ่ม (Randomized Complete Block Design; RCBD) วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูล (Analysis of variance, ANOVA) หากพบนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS (Version 29, IBM, USA)

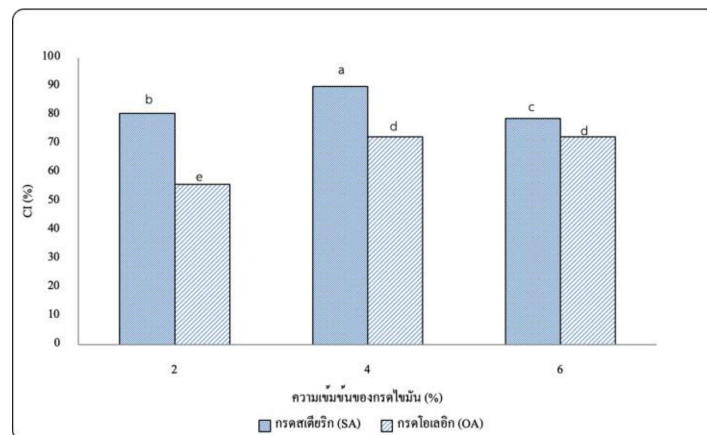
3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 การสังเคราะห์ SLC

ภาพที่ 1 แสดงค่า CI ของตัวอย่าง SLC ที่สังเคราะห์ขึ้นจากกรด SA และ OA ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดไขมันเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า CI มีแนวโน้มสูงขึ้น และค่า CI สูงที่สุดพบได้กับความเข้มข้นของกรดไขมันร้อยละ 4 ทั้ง SLC ของกรด SA และ OA แสดงค่า CI ที่เพิ่มขึ้นเพียงบางช่วง (2 และ 4%) ก่อนที่ CI จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดไขมันสูงขึ้น (6%) การลดลงของค่า CI นี้เนื่องจากการรวมตัวกันเอง (self-association) ของกรดไขมัน และอุปสรรค

เชิงโครงสร้างจากขนาดหรือรูปร่างของโมเลกุล (steric hindrance) ของกรดไขมันที่ส่งผลให้ไม่สามารถจัดเรียงตัวเพื่อเข้าจับกับอะไมโลสได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนร่วมกับอะไมโลสลดลง [13] อะไมโลสสามารถรวมตัวกับโมเลกุลของกรดไขมันได้ ณ ตำแหน่งภายในช่องว่างของโครงสร้างเฮลิคซ์ (helix) ของอะไมโลสซึ่งจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างเฉพาะที่สัมพันธ์กับการเกิดผลึกแบบวี (V-type crystalline structure) แต่เมื่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในโมเลกุลอะไมโลสอิ่มตัวแล้ว CI จึงไม่เพิ่มสูงขึ้นอีก

หากเปรียบเทียบชนิดของกรดไขมันพบว่า SLC ของ SA มีค่า CI สูงกว่า SLC ของ OA ที่ทุกระดับความเข้มข้นของกรดไขมันที่เข้าทำปฏิกิริยา สอดคล้องตามรายงานของ Nie et al [14] ที่ทำการศึกษากรดไขมันขนาดโมเลกุลจำนวน 18 อะตอมคาร์บอน จำนวน 5 ชนิด ที่มีจำนวนพันธะคู่และรูปแบบโครงสร้างแตกต่างกัน ได้แก่ SA, OA กรดอีเลอิก (Elaidic acid; EA) กรดไลโนเลอิก (Linoleic acid; LA) และกรดแอลฟา-ไลโนเลนิก (α -linolenic acid; ALA) ในการเกิด SLC ร่วมกับสตาร์ชข้าวบาร์เลย์ จากรายงานการศึกษา พบค่า CI สูงสุดในกรณีของ SLC จาก SA เมื่อเปรียบเทียบกับกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยกรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งมีลักษณะไอโซเมอร์แบบ *cis* ส่งผลให้โมเลกุลไม่สามารถจัดเรียงตัวแทรกเข้าไปในโครงสร้างเฮลิคซ์ของสตาร์ชได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ SLC ที่ได้มีระดับการเกิดสารประกอบที่ต่ำกว่ากรดไขมันอิ่มตัวนั่นเอง



ภาพที่ 1 Complexing Index (CI) ของ Starch-lipid complex (SLC) ที่สังเคราะห์โดยใช้ Stearic acid (SA) และ Oleic acid (OA) ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

ตารางที่ 2 แสดงผลการย่อยของ SLC ในระบบจำลองทางเดินอาหารมนุษย์ พบว่า SLC ของทุกตัวอย่าง มีค่า RDS ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม (สตาร์ชข้าว) และมีค่า RS สูงกว่าตัวอย่างควบคุม บ่งชี้ให้เห็นว่า SLC ที่สังเคราะห์ขึ้นอาจช่วยลดอัตราการย่อยได้ โดย SLC ของ SA ความเข้มข้นร้อยละ 2 (SLC-SA-2%) ให้ค่า RS สูงสุด (ร้อยละ 88.87) เมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ และ SLC ของ OA ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 (SLC-OA-2%) ให้ค่า RS สูงเป็นลำดับที่สอง (ร้อยละ 79.61) และ SLC ของกรดโอเลอิกความเข้มข้นร้อยละ 4 (SLC-OA-4%) ให้ค่า RS ต่ำที่สุด (ร้อยละ 43.98) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ SA และ OA เกินร้อยละ 2 พบว่าค่าร้อยละ RS ของ SLC ที่สังเคราะห์ได้ลดลง ในขณะที่ RDS เพิ่มขึ้น ปริมาณกรดไขมันที่สูงเกินไปส่งผลให้มีกรดไขมันอิสระส่วนเกินที่อาจแยกส่วนมาสะสมบริเวณด้านนอก (physical embedding) ของอะไมโลสจึงอาจส่งผลขัดขวางการจัดเรียงตัวของโครงสร้างเฮลิคซ์ทำให้อะไมโลสโครงสร้างโมเลกุลหลวมและหนาแน่นน้อยลง เอนไซม์ย่อยสตาร์ชจึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยาและย่อยโมเลกุลของสตาร์ชได้มากขึ้น [15]

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบสภาวะการย่อยในระบบจำลองทางเดินอาหารมนุษย์ของ SLC จาก SA และ OA ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

กรดไขมัน	ความเข้มข้นของกรดไขมัน	RDS%	SDS%	RS%
ตัวอย่างควบคุม (สตาร์ชข้าว)	-	30.09 ± 0.04 ^a	26.96 ± 0.00 ^g	42.95 ± 0.04 ^f
SA	2%	3.69 ± 0.06 ^f	7.45 ± 0.09 ^f	88.87 ± 0.05 ^a
	4%	5.45 ± 0.42 ^e	18.59 ± 0.64 ^d	75.96 ± 0.97 ^c
	6%	7.69 ± 0.04 ^d	33.80 ± 0.02 ^c	58.51 ± 0.05 ^d
OA	2%	7.82 ± 0.40 ^d	12.57 ± 0.66 ^e	79.61 ± 0.30 ^b
	4%	9.92 ± 0.10 ^c	46.10 ± 0.22 ^a	43.98 ± 0.23 ^f
	6%	14.52 ± 0.95 ^b	35.45 ± 0.95 ^b	50.03 ± 1.65 ^e

หมายเหตุ ^{a-g} ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า SLC-SA-2% มีปริมาณ RS สูงที่สุดเมื่อเทียบ SLC อื่น ๆ บ่งชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าว เนื่องจาก RS มีบทบาทสำคัญในการลดความสามารถในการย่อยแป้ง ปริมาณ RS ที่สูงขึ้นหมายถึงมีปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยอย่างรวดเร็วในลำไส้เล็กน้อยลง ซึ่งช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือดหลังการบริโภคได้ ดังนั้นจึง SLC-SA-2% เพื่อนำไปใช้แทนที่แป้งสาลีในการพัฒนาขนมปังลดดัชนีน้ำตาลในลำไส้ต่อไป

3.2 การใช้ SLC แทนที่แป้งสาลีเพื่อผลิตขนมปังลดดัชนีน้ำตาล

นำ SLC-SA-2% มาใช้ทดแทนแป้งสาลีที่ระดับการแทนที่ต่าง ๆ (ร้อยละ 2.5 5.0 และ 7.5) เพื่อผลิตขนมปัง ตารางที่ 3 แสดงลักษณะเนื้อสัมผัสของตัวอย่างขนมปัง พบค่าความแข็ง (N) ค่าความเคี้ยวยาก (N·mm) ค่าความเหนียวหนืด (N) และค่าความยืดหยุ่น (mm) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ SLC-SA-2% แทนที่แป้งสาลีในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การแทนที่ที่ไม่มีผลต่อค่าความคงรูปภายใน โดยสูตรขนมปังที่แทนที่แป้งสาลีร้อยละ 7.5 (SLC-7.5) มีค่าความแข็งมากที่สุด (1532.11 N) เมื่อเทียบกับขนมปังสูตรอื่น ๆ และขนมปังสูตรควบคุม (Bread-CT) มีค่าความแข็งน้อยสุด การแทนที่แป้งสาลีด้วย SLC ทำให้โครงสร้างสตาร์ชเรียงตัวเป็นผลึกสูงขึ้น จึงส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่หนาแน่นและเนื้อสัมผัสที่แข็งขึ้นในผลิตภัณฑ์ขนมอบ [15] ค่าความเคี้ยวยากที่เพิ่มขึ้นนั้นอาจเป็นผลจากโครงสร้างผลึกแบบ V-type ของ SLC ที่ส่งเสริมการสร้างชั้นผลึก (crystalline lamellae) ที่มีความเป็นระเบียบสูงนำไปสู่การเกิดโครงข่ายเจลที่แข็งแรง ทำให้โครงสร้างขนมปังมีความเหนียวและทนแรงเคี้ยวมากขึ้น เมื่อค่าความแข็งและค่าความคงรูปภายในเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความเคี้ยวยากเพิ่มขึ้น [16]

ค่าความยืดติด (N·s) สูตรขนมปังที่แทนที่แป้งสาลีร้อยละ 2.5 (SLC-2.5) และสูตรขนมปังที่แทนที่แป้งสาลีร้อยละ 5.0 (SLC-5.0) มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความเป็นผลึกของ SLC ทำให้ส่วนที่ไม่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบ (amorphous) ลดลง ค่าความยืดติดจึงลดลง [16,17] SLC 7.5 มีแนวโน้มค่าความยืดติดเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลเนื่องจากเกิดการรวมกลุ่มที่ไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างเกินจุดอิ่มตัว ทำให้ส่วนที่ไม่เป็นผลึกเพิ่มขึ้นและโครงสร้างแบบรวมกลุ่มนี้อาจเพิ่มความเหนียวหรือการยืดติด

ตารางที่ 3 ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมปังแทนที่แป้งสาลีด้วย SLC-SA-2%

ขนมปัง	Bread-CT	SLC-2.5	SLC-5.0	SLC-7.5
ความแข็ง (N)	1017.19± 1.99 ^d	1034.45± 1.48 ^c	1243.30± 1.81 ^b	1532.11± 2.30 ^a
ความยืดหยุ่น (N-s)	-1.18± 0.60 ^c	-0.58± 0.45 ^{ab}	-0.28± 0.29 ^a	-0.80± 0.56 ^{bc}
ความเคี้ยวยาก (N-mm)	707.67± 1.12 ^d	737.55± 1.36 ^c	836.25± 1.55 ^b	1071.66± 0.97 ^a
ความคงรูปภายใน ^{ns}	0.72± 0.05	0.72± 0.04	0.74± 0.04	0.75± 0.02
ความยืดหยุ่น (mm)	0.88± 0.03 ^b	0.88± 0.03 ^b	0.90± 0.02 ^b	0.93± 0.02 ^a
ความเหนียวหนืด (N)	775.20± 3.00 ^d	839.62± 1.79 ^c	955.45± 1.43 ^b	1113.71± 1.97 ^a

หมายเหตุ ^{ns} ค่าเฉลี่ยในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

^{a-d} ค่าเฉลี่ยในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

ตารางที่ 4 แสดงความหนาแน่นและร้อยละการสูญเสียหลังการอบของขนมปัง พบว่าค่าความหนาแน่นของขนมปังมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการทดแทนแป้งสาลีด้วย SLC-SA-2% อาจเนื่องมาจาก SLC ส่งผลรบกวนการจัดเรียงของโครงสร้างของแป้งหลังการผสม ทำให้เนื้อขนมปังขยายตัวได้ดีขึ้น และเมื่อโครงสร้างของแป้งถูกเปลี่ยน การยึดโครงสร้างของแก๊สในระหว่างการอบเพิ่มขึ้น ปริมาตรขนมปังจึงมากขึ้นและมีความหนาแน่นลดลง

ในด้านการสูญเสียหลังการอบ พบว่าตัวอย่างขนมปังมีค่าสูญเสียระหว่างการอบที่ลดลงเมื่อเทียบกับ Bread-CT สันนิษฐานจาก SLC ที่ใช้ทดแทนแป้งสาลีนั้นเป็นสารเชิงซ้อนที่มีความสามารถในการลดการบวมของสตาร์ช และสร้างโครงสร้างที่เก็บน้ำได้ดีขึ้น ดังนั้นค่าการสูญเสียหลังการอบที่ลดลงสอดคล้องกับหลักการของการเพิ่มความสามารถในการจับน้ำหรือกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างของระบบอาหาร ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Tao et al. [18] ที่รายงานว่าสารที่สร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำช่วยลดการระเหยของน้ำระหว่างการอบ ทำให้การสูญเสียระหว่างการอบไม่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 ความหนาแน่นและร้อยละการสูญเสียหลังการอบของขนมปังแทนที่แป้งสาลีด้วย SLC-SA-2%

สูตรขนมปัง	ความหนาแน่น (kg/m ³)	การสูญเสียหลังการอบ (ร้อยละ)
Bread-CT	0.84 ± 0.07 ^a	13.12 ± 0.23 ^a
SLC-2.5	0.74 ± 0.03 ^b	12.01 ± 0.10 ^c
SLC-5.0	0.68 ± 0.02 ^{bc}	12.52 ± 0.05 ^b
SLC-7.5	0.65 ± 0.04 ^c	12.66 ± 0.07 ^b

หมายเหตุ ^{a-c} ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

ตารางที่ 5 แสดงค่าสีของตัวอย่างขนมปัง พบว่าค่า L* ที่แสดงถึงความสว่างของตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงตามระดับแทนที่แป้งสาลีด้วย SLC-SA-2% ที่เพิ่มขึ้น การเติม SLC ส่งผลให้เนื้อขนมปังมีสีเข้มขึ้นเล็กน้อย สอดคล้องกับรายงานของ Ronie et al. [19] ที่พบว่า การเติมวัตถุดิบหรือส่วนผสมที่แตกต่างจากแป้งสาลี เช่น เส้นใยอาหารหรือแป้งชนิดอื่นทำให้ค่าความสว่างของขนมปังลดลง ส่วนค่า a* และ b* มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยโดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับการทดแทนแป้งสาลีด้วย SLC-SA-2% อย่างไรก็ตามค่า ΔE ของทุกตัวอย่างขนมปังที่เติม SLC-SA-2% มีค่าต่ำกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของสีโดยรวมอยู่ในระดับที่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยสายตา บ่งชี้ว่าการใช้ SLC-SA-2% ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านสีของขนมปัง

ตารางที่ 5 ค่าสี่ของขนมปังแทนที่แป้งสาลีด้วย SLC-SA-2%

ปัจจัยด้านสี	สูตรขนมปัง			
	Bread-CT	SLC-2.5	SLC-5.0	SLC-7.5
L*	79.30 ± 0.95 ^a	78.36 ± 0.03 ^{ab}	78.15 ± 0.22 ^b	77.57 ± 0.26 ^b
a*	-0.33 ± 0.02 ^{ab}	-0.45 ± 0.03 ^b	-0.42 ± 0.18 ^b	-0.16 ± 0.11 ^a
b*	23.06 ± 0.25 ^a	22.47 ± 0.26 ^b	22.89 ± 0.34 ^{ab}	23.11 ± 0.20 ^a
ΔE	-	0.63 ± 0.27 ^b	0.33 ± 0.25 ^{ab}	0.46 ± 0.31 ^{ab}

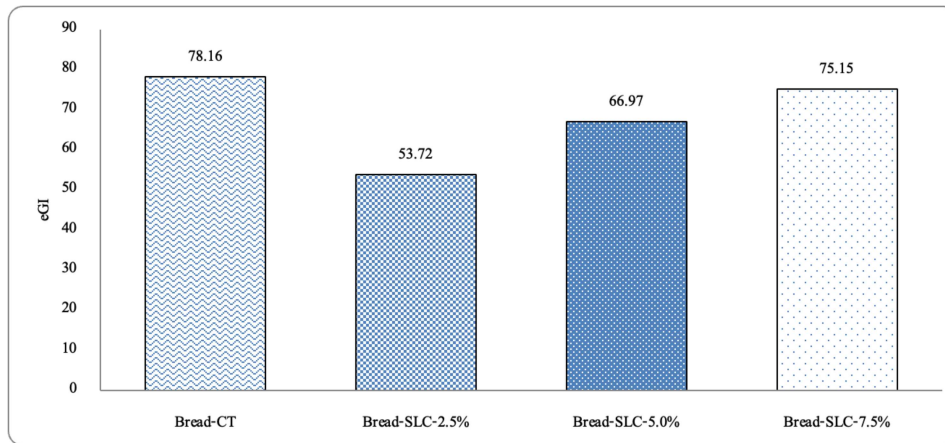
หมายเหตุ ^{a-b} ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 6 แสดงผลการทดสอบการย่อยสลายของขนมปังในระบบจำลองทางเดินอาหารมนุษย์ และภาพที่ 2 แสดงค่า eGI ของตัวอย่างขนมปัง พบว่าค่า RDS ของ Bread-CT (ร้อยละ 6.16) และ SLC-7.5 (ร้อยละ 6.63) ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ค่า RS ของ SLC-7.5 สูงกว่า Bread-CT สอดคล้องกับค่า eGI ของ SLC-7.5 (75.15) ที่ต่ำกว่าสูตรควบคุม Bread-CT (ร้อยละ 78.16) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ SLC-2.5 และ SLC-5.0 แสดงค่า eGI ต่ำกว่า Bread-CT อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระดับการแทนที่แป้งสาลีด้วย SLC-SA-2% ส่งผลให้ค่า RS ลดต่ำลงและค่า eGI สูงขึ้นตามลำดับ โดย SLC-2.5 มีค่า RS (ร้อยละ 88.87) สูงที่สุดและค่า eGI (53.72) ต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่า SLC ของ SA มีความสามารถในการย่อยแป้งมีลักษณะเป็น nonlinear effect แนวโน้มเช่นนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yun et al. [20] ที่พบว่าการเติมสตาร์ชทดแทนการย่อยหรือสารที่มีโครงสร้าง RS5 หรือ SLC ในระดับที่มากขึ้นอาจไม่ช่วยลดดัชนีน้ำตาล ทั้งนี้สันนิษฐานว่าการใช้ SLC-SA-2% ในปริมาณที่สูงขึ้นอาจส่งผลรบกวนเสถียรภาพของโครงสร้างสตาร์ชของขนมปัง ทำให้เอนไซม์ย่อยสตาร์ชทำงานได้ดีขึ้น ส่งผลให้ระดับการย่อยสตาร์ชได้สูงขึ้นนั่นเอง ดังนั้นการใช้ SLC-SA-2% ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังลดดัชนีน้ำตาลจึงต้องคำนึงถึงความเข้มข้นที่เหมาะสมด้วย

ตารางที่ 6 ปริมาณของสตาร์ชที่ย่อยได้ของขนมปังแทนที่แป้งสาลีด้วย SLC-SA-2% ในระบบจำลองทางเดินอาหารมนุษย์

สูตรขนมปัง	RDS%	SDS%	RS%
Bread-CT	6.16 ± 0.16 ^a	34.63 ± 0.06 ^a	59.22 ± 0.21 ^d
SLC-2.5%	4.15 ± 1.60 ^b	6.98 ± 0.16 ^c	88.87 ± 1.76 ^a
SLC-5.0%	3.73 ± 0.56 ^b	21.93 ± 0.50 ^b	74.34 ± 0.07 ^b
SLC-7.5%	6.63 ± 0.13 ^a	22.38 ± 0.07 ^b	71.00 ± 0.20 ^c

หมายเหตุ ^{a-d} ค่าเฉลี่ยในแนวดิ่งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 2 eGI ของขนมปังที่ระดับการแทนที่แป้งสาลีด้วย SLC-SA-2% ต่างกัน

จากการทดลองข้างต้น เห็นได้ว่าระดับการแทนที่แป้งสาลีด้วย SLC-SA-2% ที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 2.5 เนื่องจากให้ตัวอย่างขนมปังที่มีค่า eGI ต่ำที่สุด และอยู่ในช่วงระดับ GI ต่ำสุด และมีปริมาณ RS สูงสุด จึงเลือกตัวอย่างขนมปังนี้ไปทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสต่อไป

ตารางที่ 7 แสดงผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสที่มีต่อขนมปังสูตร SCL-2.5 พบว่า ค่าคะแนนความชอบโดยรวม (7.2) อยู่ในระดับชอบปานกลาง เช่นเดียวกับระดับความชอบด้านรสชาติโดยรวม (7.6) ด้านสี (7.3) และด้านลักษณะปรากฏ (7.2) ในด้านเนื้อสัมผัสพบว่าคะแนนความชอบด้านความแน่น (6.9) และความนุ่ม (6.7) ของขนมปังมีระดับความชอบปานกลาง นอกจากนี้ผู้ทดสอบบางส่วนให้ความคิดเห็นเพิ่มเติมด้านเนื้อสัมผัสขนมปังว่ามีความแน่นและเหนียวเล็กน้อย ด้านความนุ่มยังน้อยกว่าขนมปังเชิงพาณิชย์ ผลการยอมรับของผู้บริโภคพบว่าร้อยละ 99 ของผู้ทดสอบยอมรับผลิตภัณฑ์ขนมปังลดดัชนีน้ำตาล

ตารางที่ 7 การทดสอบทางประสาทสัมผัสที่มีต่อผลิตภัณฑ์ขนมปังแทนที่แป้งสาลีด้วย SLC-SA-2%

คุณลักษณะ	ระดับความชอบ
ลักษณะปรากฏ	7.2 ± 1.0
สี	7.3 ± 1.2
กลิ่นรสโดยรวม	7.6 ± 1.9
ความแน่นของเนื้อในขนมปัง	6.9 ± 1.7
ความนุ่ม	6.7 ± 1.5
ความชอบโดยรวม	7.2 ± 1.3

4. สรุป

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังเพื่อสุขภาพที่มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลงจาก SLC ที่ใช้ SA และ OA พบว่า SLC-SA-4% ให้ค่า CI สูงที่สุด ขณะที่ SLC-SA-2% ให้ปริมาณ RS สูงที่สุด เมื่อนำ SLC-SA-2% ใช้ในการพัฒนาขนมปังโดยการแทนที่แป้งสาลีที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 2.5 5.0 และ 7.5 พบว่าขนมปังสูตร SLC-2.5 มีค่า eGI ต่ำที่สุดและมีค่า RS สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าการแทนที่แป้งสาลีด้วย SLC-SA-2% ที่ระดับไม่เกินร้อยละ 2.5 อาจส่งผลช่วยพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังลดดัชนีน้ำตาลที่พัฒนาขึ้นนี้มีคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสในระดับความชอบปานกลาง และมีการยอมรับที่ร้อยละ 99 บ่งชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำ SLC-SA-2% ไปใช้เพื่อพัฒนาขนมปังลดดัชนีน้ำตาลต่อไป ในการศึกษาต่อไปควรทำการศึกษาถึง



ปริมาณการใช้ SLC-SA-2% เพื่อทดแทนแป้งสาลีในระดับร้อยละ 2.5 ถึง 5 ซึ่งอาจช่วยลดระดับ eGI ในผลิตภัณฑ์ขนมปังให้เหมาะสมมากขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mesci, B., Erbakan, A. N., & Yildiz, K. (2019). Dietary breads and impact on postprandial parameters. In V. R. Preedy & R. R. Watson (Eds.), *Flour and breads and their fortification in health and disease prevention* (2nd ed., pp. 405-414). Academic Press.
- [2] Betoret, E., & Rosell, C. M. (2019). Improved nutritional and dietary quality of breads. In *Breadmaking* (pp. 619-646). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102519-2.00021-6>
- [3] Burton, P. M., Monro, J. A., Alvarez, L., & Gallagher, E. (2011). Glycemic impact and health: New horizons in white bread formulations. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51(10), 965-982. <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.491584>
- [4] Fitriati, A., Utaida, T., Detchewa, P., & Moongngarm, A. (2025). Improving resistant starch formation in cassava starch through v-amylose complexation with fatty acids and phenolic compounds. *Results in Chemistry*, 18, Article 102866. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102866>
- [5] Pugh, J. E., Cai, M., Altieri, N., & Frost, G. (2023). A comparison of the effects of resistant starch types on glycemic response in individuals with type 2 diabetes or prediabetes: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Nutrition*, 10, Article 1118229. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1118229>
- [6] Lee, H. S., Kim, K. H., Park, S. H., Hur, S. W., & Auh, J. H. (2020). Amylose-lipid complex as a fat replacement in the preparation of low-fat white pan bread. *Foods*, 9(2), 194. <https://doi.org/10.3390/foods9020194>
- [7] Aalim, H., Wang, D., & Luo, Z. (2021). Black rice (*Oryza sativa* L.) processing: Evaluation of physicochemical properties, in vitro starch digestibility, and phenolic functions linked to type 2 diabetes. *Food Research International*, 141, Article 109898. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109898>
- [8] Zhang, Y., Yang, Z., Liu, G., Wu, Y., & Ouyang, J. (2020). Inhibitory effect of chestnut (*Castanea mollissima* Blume) inner skin extract on the activity of α -amylase, α -glucosidase, dipeptidyl peptidase IV and *in vitro* digestibility of starches. *Food Chemistry*, 324, Article 126847. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126847>
- [9] Goñi, I., Garcia-Alonso, A., & Saura-Calixto, F. (1997). A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutrition Research*, 17(3), 427-437. [https://doi.org/10.1016/S0271-5317\(97\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0271-5317(97)00010-9)
- [10] Tamilselvan, T., Saravanan, M., & Prabhasankar, P. (2024). Influence of mechanical activation of starch using planetary ball milling on the development of little millet gluten free bread. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 98, Article 103860. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103860>



- [11] Smith, B. M., Bean, S. R., Herald, T. J., & Aramouni, F. M. (2012). Effect of HPMC on the quality of wheat-free bread made from carob germ flour-starch mixtures. *Journal of Food Science*, 77(6), C684-C689. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02739.x>
- [12] Mohd Jusoh, Y. M., Chin, N. L., Yusof, Y. A., & Abdul Rahman, R. (2009). Bread crust thickness measurement using digital imaging and L a b colour system. *Journal of Food Engineering*, 94(3-4), 366-371. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.04.002>
- [13] Di Marco, A. E., Ixtaina, V. Y., & Tomás, M. C. (2023). Effect of ligand concentration and ultrasonic treatment on inclusion complexes of high amylose corn starch with chia seed oil fatty acids. *Food Hydrocolloids*, 136, Article 108222. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108222>
- [14] Nie, M., Li, J., Lin, R., Gong, X., Dang, B., Zhang, W., Yang, X., Wang, L., Wang, F., & Tong, L. T. (2024). The role of C18 fatty acids in improving the digestion and retrogradation properties of highland barley starch. *Food Research International*, 186, Article 114355. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114355>
- [15] Zhai, Y., Zhang, H., Sang, S., Ren, B., Yuan, Y., Xing, J., & Luo, X. (2024). Structural features, physicochemical properties, and in vitro digestibility of the starch-lipid complexes formed between high amylose starch and stearic acid or potassium stearate. *Foods*, 13(6), 859. <https://doi.org/10.3390/foods13060859>
- [16] Kaur, H., Tian, B., Zheng, H., & Kumar, L. (2025). From texture to digestion: Understanding multi-component interactions in designing starch-based low-glycemic index soft foods. *Trends in Food Science & Technology*, 169, Article 105520. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.105520>
- [17] Shen, M., Huang, K., Cao, H., Zhang, Y., Sun, Z., Yu, Z., & Guan, X. (2024). Rheological, thermal, and in vitro starch digestibility properties of oat starch-lipid complexes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 268, Article 131550. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131550>
- [18] Tao, H., Fang, X. H., Chen, P., Yang, B. Q., Feng, R., & Zhang, B. (2024). Casein/butyrylated dextrin nanoparticles and chitosan stabilized bilayer emulsions as fat substitutes in sponge cakes. *Food Chemistry*, 448, Article 139043. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139043>
- [19] Ronie, M. E., Mamat, H., Aziz, A. H. A., & Zainol, M. K. (2023). Proximate compositions, texture, and sensory profiles of gluten-free Bario rice bread supplemented with potato starch. *Foods*, 12(6), 1172. <https://doi.org/10.3390/foods12061172>
- [20] Yun, P., Devahastin, S., & Chiewchan, N. (2021). In vitro glycemic index, physicochemical properties and sensory characteristics of white bread incorporated with resistant starch powder prepared by a novel spray-drying based method. *Journal of Food Engineering*, 294, Article 110438. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110438>