

การใช้ประโยชน์สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ในอุตสาหกรรมอาหาร

Utilization of Resistant Starch in Food Industry

กิงกมล ลีลาจารุวรรณ* วราพร ลักษณะลมาย ฐานวีร์ ลอยแก้ว และ พิชญา โพธิ์นุช

Kingkamol Leelajaruwan* Varaporn Laksanalamai Thanawee Loikaeo and Pitchaya Pothinuch

คณะเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยรังสิต ปทุมธานี 12000 ประเทศไทย

Faculty of Food Technology, Rangsit University, Pathum Thani 12000, Thailand

*E-mail: Kingkamon.r@rsu.ac.th

Received: Oct 18, 2024

Revised: Dec 13, 2024

Accepted: Dec 16, 2024

บทคัดย่อ

บทความทางวิชาการนี้นำเสนอข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ และการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ หมายถึง ส่วนของสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารส่วนต้นของมนุษย์และผ่านเข้าสู่ลำไส้ใหญ่ ปัจจุบันมีการแบ่งกลุ่มของสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ออกเป็น 5 ประเภท ตามลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ และกลไกในการต้านทานการย่อยด้วยเอนไซม์ นอกจากนี้ยังมีการรายงานคำจำกัดความใหม่ของสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์โดยพิจารณาจากผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในลำไส้ด้วย สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์มีประโยชน์หลายประการ เช่น ทำหน้าที่เป็นพรีไบโอติกส์ ซึ่งส่งผลทางชีวภาพที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์ มีส่วนช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือด ช่วยควบคุมน้ำหนักและป้องกันโรคอ้วน รวมถึงช่วยในการดูดซึมเกลือแร่บางชนิด อย่างไรก็ตามสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์แต่ละประเภทมีสมบัติและผลกระทบทางสรีรวิทยาต่อสิ่งมีชีวิตที่เฉพาะตัว สำหรับด้านอุตสาหกรรมอาหาร สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์จัดเป็นส่วนประกอบของอาหารฟังก์ชัน เพื่อเสริมหรือทดแทนแป้งในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความเหมาะสมมากกว่าเส้นใยอาหารทั่วไป นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการห่อหุ้มสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและจุลินทรีย์สุขภาพ เพื่อเพิ่มความเสถียรและช่วยในการนำส่งผ่านระบบทางเดินอาหารในร่างกาย

คำสำคัญ: สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ เส้นใยอาหาร ประโยชน์ต่อสุขภาพ อุตสาหกรรมอาหาร

Abstract

This review article presents basic information on resistant starch and its applications in the food industry. Resistant starch (RS) refers the starch portion that is resistant to enzymatic digestion in the human upper gastrointestinal tract and passes into the large intestine. Currently, there are five types of RS, based on their physical structures and mechanisms of resistance to enzyme hydrolysis. In addition, new definition of RS types has also been reported based on their effects on the gut microbiota. RS has several benefits, such as acting as prebiotics, which have biological effects beneficial to human health, helping to reduce blood sugar levels, helping to control weight and prevent obesity, and aiding in the absorption of certain minerals. However, each RS type has its own characteristics and physiological impacts on organisms. For the food industry, RS is a functional food ingredient that is more suitable to supplement or replace starch in food products than general dietary fiber. Moreover, RS can be used for encapsulating bioactive compounds and health beneficial microorganisms to enhance their stability and to aid their delivery through the digestive system in the body.

Keywords: Resistant starch, Dietary fiber, Health benefits, Food industry

1. บทนำ

ปัจจุบันผู้บริโภคหันมาสนใจและให้ความสำคัญกับอาหารเพื่อสุขภาพมากขึ้น ผลิตภัณฑ์อาหารที่มีเส้นใยอาหารสูง และแคลอรีต่ำจัดอยู่ในกลุ่มของอาหารเพื่อสุขภาพ ที่ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อร่างกายและอาจช่วยลดอัตราเสี่ยงต่อการเกิดโรคต่าง ๆ สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant starch) เป็นส่วนหนึ่งของสตาร์ชที่ไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ และได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในด้านประโยชน์ต่อสุขภาพ (มีบทบาทคล้ายคลึงกับเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้) และสมบัติเชิงหน้าที่ ในบทความทางวิชาการนี้ ได้กล่าวถึงความรู้และงานวิจัยใหม่ ๆ เกี่ยวกับสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ทั้งในด้านของนิยาม การแบ่งประเภท และในด้านประโยชน์ต่อสุขภาพ รวมถึงการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร

2. นิยามและความหมาย

สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์เป็นส่วนหนึ่งของสตาร์ช ถ้าพิจารณาในด้านโภชนาการถึงความสามารถในการถูกย่อยของสตาร์ชด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็กของมนุษย์ สามารถแบ่งสตาร์ชออกเป็น 3 ประเภทคือ (1) สตาร์ชที่ถูกย่อยอย่างรวดเร็วภายในเวลา 20 นาที (Rapidly digestible starch, RDS) (2) สตาร์ชที่ใช้เวลาในการย่อยช้าแต่จะถูกย่อยอย่างสมบูรณ์ในลำไส้เล็กภายในเวลา 120 นาที (Slowly digestible starch, SDS) และ (3) สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant starch, RS) เป็นสตาร์ชที่ไม่ถูกย่อยเป็นกลูโคสในลำไส้เล็กภายในเวลา 120 นาที แต่จะถูกย่อยด้วยแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ส่วนล่าง [1]

งานวิจัยในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา ทั้งการทดลองในมนุษย์และสัตว์ทดลอง (in vivo) รวมถึงการทดลองในหลอดทดลอง (in vitro) ได้แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ต่อสุขภาพ นิยามของสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ในปัจจุบันจึงหมายถึง สตาร์ชและผลิตภัณฑ์จากการสลายสตาร์ช (Product of starch degradation) ที่ไม่ถูกย่อยในลำไส้เล็ก แต่สตาร์ชเหล่านี้จะถูกย่อยและเป็นอาหารของจุลินทรีย์ที่อยู่ในลำไส้ใหญ่ส่วนล่าง เกิดเป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด รวมถึงกรดไขมันสายสั้น (Short chain fatty acids) ที่ส่งผลดีหลายประการต่อกระบวนการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกายมนุษย์ [2], [3]

3. ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นใยอาหารและสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์

เส้นใยอาหารและสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ จัดอยู่ในกลุ่มของคาร์โบไฮเดรตที่ร่างกายไม่สามารถนำไปใช้ได้ (Unavailable carbohydrate) กล่าวคือเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็กของมนุษย์ แต่บางส่วนหรือทั้งหมดจะถูกย่อยโดยแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ ซึ่งส่งผลดีต่อกระบวนการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกายมนุษย์ได้ คล้ายคลึงกัน สมาคมนักเคมีธัญพืช ประเทศสหรัฐอเมริกา (American Association of Cereal Chemists) และคณะกรรมการอาหารและโภชนาการ สถาบันการแพทย์แห่งชาติ ประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. Food and Nutrition Board, Institute of Medicine, National Academies) จึงได้จัดสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์อยู่ในกลุ่มของเส้นใยอาหาร (Dietary fiber) [1] ในขณะเดียวกันสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ที่เติมลงในอาหารเพื่อวัตถุประสงค์ในด้านสุขภาพจะถูกจัดว่าเป็นเส้นใยอาหารฟังก์ชัน (Functional fiber) ตามคำจำกัดความของสมาคมนักเคมีธัญพืช และสถาบันวิทยาศาสตร์แห่งชาติ (National Academy of Science, NAC) สหรัฐอเมริกา [4]

ในด้านการวิเคราะห์ คำว่า “เส้นใยอาหาร” เป็นคำที่บัญญัติขึ้นมาใช้แทนคำว่า “เส้นใยหยาบ” (Crude fiber) ซึ่งเป็นส่วนประกอบอาหารจากพืชที่ทนต่อการย่อยด้วยกรดและด่าง หลักการวิเคราะห์เส้นใยอาหารเป็นการวัดปริมาณส่วนที่เหลือ (Residue) หลังการย่อยตัวอย่างอาหารด้วยเอนไซม์ที่เลียนแบบจากเอนไซม์ในลำไส้เล็กของมนุษย์ ส่วนวิธีการวิเคราะห์ได้มีการพัฒนาปรับปรุงเรื่อยมา วิธีล่าสุดในการวิเคราะห์เส้นใยอาหารตามคำจำกัดความของ Codex Alimentarius Commission โดย AOAC Method 2009.01 และ AACC International Approved Method 32-45.01 ใช้การย่อยตัวอย่างอาหารด้วยเอนไซม์แอลฟา-แอมิเลส จากตับอ่อน (Pancreatic α -amylase) และเอนไซม์แอมิโลกลูโคซิเดส (Amyloglucosidase) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง วิธีนี้สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์จะถูกรวมอยู่ในส่วนของเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายในน้ำ (Insoluble dietary fiber) [5] อย่างไรก็ตาม ในด้านผลกระทบต่อกระบวนการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกาย สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ทำหน้าที่เหมือนเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ คือ สามารถถูกหมักด้วย

จุลินทรีย์เฉพาะที่เป็นประโยชน์ในลำไส้ซึ่งส่งผลดีต่อสุขภาพของผู้บริโภค [6]

4. ประเภทและแหล่งของสแตร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์

ปัจจุบันสแตร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ครอบคลุมสแตร์ช 5 ประเภท ซึ่งแต่ละประเภทมีโครงสร้างทางกายภาพ และ/หรือกลไกในการต้านทานการย่อยด้วยเอนไซม์แตกต่างกัน ดังแสดงใน Table 1 [7]-[11] อย่างไรก็ตาม Li and Hu [3] ได้แบ่งประเภทของสแตร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ใหม่ โดยอาศัยมุมมองจากผลของสแตร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ที่มีต่อจุลินทรีย์ในลำไส้ และสารเมตาโบไลต์ (Metabolite) ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้น รวมถึงอัตราเร็วในกระบวนการหมักและลักษณะเฉพาะของสแตร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์แต่ละประเภท ดังแสดงใน Table 2 [3]

แหล่งของสแตร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ ได้แก่

(1) ส่วนต่าง ๆ ของพืชที่สะสมแป้ง ได้แก่ เมล็ดธัญพืช (เช่น ข้าว ข้าวสาลี ข้าวโพด เป็นต้น) พืชหัว (เช่น มันฝรั่ง มันสำปะหลัง มันเทศ เป็นต้น) ผลไม้และผลพลอยได้จากผลไม้บางชนิด (เช่น ถั่วลิสง เมล็ดขนุน เมล็ดทุเรียน สาเก)

(2) ผลิตภัณฑ์อาหารที่มีส่วนผสมของแป้งที่มีสแตร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ ทั้งนี้กระบวนการทำอาหารให้สุกมีผลต่อการเพิ่มและลดปริมาณสแตร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ในอาหารได้ โดยมีรายงานว่า การนึ่ง การอบ การใช้หม้อนึ่งอัดไอน้ำ ช่วยเพิ่มปริมาณสแตร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ในอาหาร ขณะที่การทำให้สุกภายใต้ความดันมีผลลดปริมาณสแตร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ และการทำให้อาหารสุกโดยการต้ม การใช้ไมโครเวฟ การอัดพอง (Extrusion) และการทอด มีแนวโน้มสูงในการเพิ่มปริมาณสแตร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ในอาหาร [12]-[15]

(3) ผลิตภัณฑ์สแตร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ทางการค้า ซึ่งมีการใช้เทคโนโลยีเพื่อลดอัตราการถูกย่อยของสแตร์ชจากแป้งดิบด้วยวิธีทางกายภาพ เคมี การใช้เอนไซม์ และการทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับฟีนอล (Complexation with phenol) หรือมีการใช้สองวิธีร่วมกัน ซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณสแตร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ได้ดีกว่า [16]

5. ประโยชน์ของสแตร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ต่อสุขภาพ

สแตร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์มีประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภค ดังนี้

5.1. ทำหน้าที่เป็นพรีไบโอติกส์ (Prebiotics)

การประชุมสมาคมนานาชาติทางวิทยาศาสตร์สำหรับ

โพรไบโอติกส์และพรีไบโอติกส์ (The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics: ISAPP) ครั้งที่ 6 ปี 2008 ได้ให้นิยามของ “พรีไบโอติกส์” ว่าเป็นส่วนผสมอาหารที่ถูกคัดเลือกในการหมักโดยจุลินทรีย์เฉพาะที่อาศัยอยู่ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบและ/หรือกิจกรรมของจุลินทรีย์ดังกล่าว ซึ่งส่งผลดีต่อสุขภาพ [17] ในปัจจุบันสารประกอบที่จัดเป็นพรีไบโอติกส์มีเกณฑ์ในการพิจารณา ดังนี้ [18]

(1) ต้านทานต่อการย่อยด้วยกรด และเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์

(2) สามารถเป็นซับสเตรต (Substrate) ในการหมักของจุลินทรีย์เฉพาะที่เป็นประโยชน์ในลำไส้

(3) ส่งเสริมการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียที่เป็นประโยชน์ และลดจำนวนจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการ

(4) สามารถคงสภาพการทำหน้าที่ได้หลังผ่านกระบวนการแปรรูป ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อน สารเคมี หรือกระบวนการทางกายภาพ

สแตร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์จะถูกหมักด้วยจุลินทรีย์เฉพาะที่เป็นประโยชน์ในลำไส้หรือโพรไบโอติกส์ (Probiotics) ได้แก่ *Bifidobacterium* spp. และ *Lactobacillus* spp. ได้สารเมตาโบไลต์ เช่น กรดไขมันสายสั้นที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบน้อยกว่า 6 อะตอม ที่สำคัญคือ กรดอะซิติก (Acetic acid) ซึ่งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ 2 อะตอม กรดบิวทิริก (Butyric acid) ซึ่งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ 3 อะตอม และกรดโพรพิโอนิก (Propionic acid) ซึ่งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ 6 อะตอม กรดไขมันสายสั้นทั้ง 3 ชนิดนี้เป็นกรดไขมันที่มีอยู่มากในร่างกาย และเป็นกลุ่มของสารประกอบประจุลบที่มีจำนวนมากประมาณร้อยละ 90-95 ของกรดไขมันสายสั้นที่มีอยู่ในลำไส้ใหญ่ส่วนกลาง [19], [20] ทั้งโพรไบโอติกส์และกรดไขมันสายสั้นมีผลทางชีวภาพที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์ดังนี้

(1) ยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคในระบบทางเดินอาหาร โดยกลไกการต่อต้านจุลินทรีย์ก่อโรค มาจากการที่โพรไบโอติกส์สามารถแข่งขันกับจุลินทรีย์ก่อโรคในการใช้สารอาหาร และในการเกาะติดบนเยื่อเมือกในลำไส้ และ/หรือความสามารถของโพรไบโอติกส์ในการผลิตสารต้านจุลินทรีย์ (Antimicrobial substances) นอกจากนี้ กลไกการต่อต้านจุลินทรีย์ก่อโรคมายังมาจากการที่กรดไขมันสายสั้นที่ถูกผลิตขึ้นช่วยลดค่า pH ในลำไส้ ซึ่งเสริมการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค [21], [22]

Table 1 Types of sources resistant starch

Types	Description	Mechanisms for slowing starch digestion	Sources of RS	Ref.
RS 1	Starch that is physically entrapped within the plant cells or food/ polymer matrix	Physically inaccessible starch protection by either the cell wall or food matrix; therefore, it is not accessible to digestive enzymes.	(1) Some milled seeds, tubers, and grains (2) Whole grains, pulses/ legumes intact plant cells, as well as achieved by encapsulation of starch granules	[7]
RS 2	Granular starch with high amylose content and crystallinity	Uncooked starch having non-gelatinized granules. These have B- or C- polymorph crystallinity which makes these granules resistant to enzymatic hydrolysis.	Raw potatoes and green bananas	[8]
RS 3	The inherent crystallinity of starch upon retrogradation which can be prepared by physical treatment, including high hydrostatic pressure, ultrasound, extrusion, autoclaving, microwave cooking, and heat-moisture treatment	Retrogradation promotes an increased chance for the association of amylose into double helix and allows for further molecular alignment into crystalline structure, which affects the enzymatic resistance due to high level of molecular order.	Retrograded starch from different botanical origins developed by the processing methods/conditions	[9]
RS 4	Chemically modified starch generated by several different methods including the addition of ester crosslinks between starch molecules, the addition of chemical constituent groups, or by acid hydrolysis and heat treatment	The chemical methods use to modify starch alter the chemical and physical properties of the starch which reduce its digestibility by preventing enzymatic accessibility and/or degradation.	Commercial modified starch	[10]
RS 5	Amylose-lipid complex (ALC), in which the amylose helix is wrapped around the lipid ligand	The formation of an amylose helix around a hydrophobic chain of lipid and their non-covalent inclusion complex increase digestion resistance by making the complex less available to digestive enzyme	Naturally, present lipids in high amylose-containing raw plant-based foods or added lipids which can form the ALC during gelatinization or other processing steps	[11]

Table 2 Possible new definitions of RS types from the gut microbiota perspectives

Gut microbiota perspectives	New RS types	Characteristics	Possible application for human health	Possible examples (corresponding categories in traditional RS types) References
Fermentation rate and location	Rapidly fermentable RS	Rapidly fermented once RS enters large intestine	Increase the microbial metabolites from the proximal to distal colon by increasing the amount of slowly fermentable RS	Retrograded potato starch (RS3)
	Slowly fermentable RS	Slowly fermented throughout the large intestine	-	Hi-Maize® (RS2), Novelose® (RS3), phosphorylated cross-linked high amylose maize starch (RS4) and cross-linked alginate matrix entrapped waxy corn starch (RS1)
	Unfermentable RS	Not fermented in the large intestine	-	Consumption of > 60 g retrograded resistant maltodextrins (RS3), cross-linked alginate matrix entrapped waxy corn starch (RS1) Potato starch (RS2) and Hi-Maize 260 corn starch (RS3)
Fermentation end products	Butyrate promotion RS	Primarily form butyrate in the colon	A targeted promotion of specific SCFA by the delivery of designed RS	Potato starch (RS2) and Hi-Maize 260 corn starch (RS3)
	Propionate promotion RS	Primarily form propionate in the colon	-	Native pea starch (RS2), retrograded pullulanase-debranched pea starch (RS3), retrograded acid-hydrolyzed pea starch (RS3)
	Acetate promotion RS	Primarily form acetate in the colon	-	Sorghum grain tissue (RS1), maize kernel tissue (RS1), potato tuber tissue (RS1), chickpea endosperm tissue (RS1), intact and damaged cells from pinto bean seeds (RS1), native potato starch with and without prior amylase treatment (RS2), HI-Maize 260 (RS2), retrograded high-amylose maize starch (RS3), high-amylose maize starch - palmitic acid complex (RS5)

Table 2 (continued)

Gut microbiota perspectives	New RS types	Characteristics	Possible application for human health	Possible examples (corresponding categories in traditional RS types) References
Gut microbiota specificity	High specificity RS	Can only be utilized by a small number of bacteria	A predictable and consistent host response might be reached by consuming the high specificity RS	-
	Low specificity RS	Can be utilized by a large number of bacteria	-	Potato starch (RS2), Hi-Maize 260 resistant corn starch (RS2)
Bacterial shift	Bacteroidetes promotion RS	Promote the abundance of Bacteroidetes	Promote a targeted alteration of gut microbiota profile	Crackers prepared by including Fibersym® RW (a chemically modified phosphorylated cross-linked wheat starch, RS4), undigested rice cake containing the highly resistant starch rice (possibly RS3)
	Firmicutes promotion RS	Promote the abundance of Firmicutes	-	Cross-linked alginate matrix entrapped waxy corn starch (RS1), high-amylose maize starch (RS2), propionylated high-amylose maize starch (possibly RS4)
	Actinobacteria promotion RS	Promote the abundance of Actinobacteria	-	Native potato starch (RS2), crackers prepared by including Fibersym® RW (a chemically modified phosphorylated cross-linked wheat starch, RS4)

Source: Adapted from Li and Hu [3]

(2) การเสริมสร้างหน้าที่ปกป้องตนเองของลำไส้ (Intestinal barrier function) และลดการอักเสบ ซึ่งงานวิจัยในปัจจุบันมุ่งเน้นที่บทบาทของกรดไขมันสายสั้น โดยเฉพาะบิวทิเรต (Butyrate) เนื่องจากบิวทิเรตถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับเซลล์เยื่อบุผิวผนังลำไส้ และช่วยเพิ่มการผลิตมูซิน (Mucin) ซึ่งเป็นสารที่ช่วยป้องกันการทำลายเยื่อบุผิวผนังลำไส้ [23]-[25] นอกจากนี้ บิวทิเรตยังมีส่วนช่วยป้องกันการอักเสบของลำไส้โดยมีบทบาทต่อการผลิตสารที่ควบคุมการตอบสนองให้เกิดไซโตไคน์ด้านการอักเสบ (Anti-inflammatory cytokines) [26] และการทดลองในสัตว์ทดลอง พบว่าบิวทิเรตมีส่วนช่วยให้ผลหลังการผ่าตัดดีขึ้น [27] ในด้านการป้องกันการเกิดมะเร็งของลำไส้ใหญ่ บิวทิเรตมีประโยชน์ต่อสุขภาพของลำไส้โดยมีบทบาทควบคุมกระบวนการที่สำคัญของเซลล์เยื่อบุผิวผนังลำไส้ ได้แก่ การควบคุมการเจริญเติบโต (Proliferation) การพัฒนาให้มีความจำเพาะของเซลล์ (Differentiation) และการเข้าสู่สภาวะการตายของเซลล์ (Apoptosis) ให้มีสัดส่วนของเซลล์ในแต่ละกระบวนการอย่างเหมาะสม [28]

ทั้งนี้ มีรายงานว่ากระบวนการหมักสแตร์ทชนย่อยด้วยเอนไซม์ผลิตบิวทิเรตได้มากกว่าเส้นใยอาหารชนิดอื่น ๆ [10] และผลิตได้มากกว่าเป็น 2 เท่า เมื่อเทียบกับอินูลิน (Inulin) และโอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharides) [29] อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของบิวทิเรตที่ได้จากการหมักขึ้นกับชนิดของสแตร์ทชนย่อยด้วยเอนไซม์ [30]

5.2. ทำหน้าที่ลดระดับน้ำตาลในเลือด (Hypoglycemic effect)

โรคเบาหวานเป็นภาวะที่มีระดับน้ำตาลในเลือดสูงเกินกว่าปกติอย่างต่อเนื่องและเรื้อรัง เนื่องมาจากความผิดปกติของตับอ่อน ทำให้เกิดการหลั่งฮอร์โมนอินซูลิน (Insulin) ได้น้อยกว่าปกติ หรือเกิดภาวะดื้อต่ออินซูลิน ทำให้อินซูลินออกฤทธิ์ได้ไม่เต็มที่ โรคเบาหวานที่พบบ่อยที่สุด คือ ชนิดที่ 2 ซึ่งเกิดจากร่างกายมีภาวะดื้ออินซูลิน และมักสัมพันธ์กับโรคอ้วน [31] สแตร์ทชนย่อยด้วยเอนไซม์มีส่วนช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือดเนื่องจากไม่ถูกย่อยโดยทันที นอกจากนี้กรดไขมันสายสั้นที่เกิดจากการหมักสแตร์ทชนย่อยด้วยเอนไซม์ในลำไส้ใหญ่ ยังมีผลต่อการลดการสร้างน้ำตาลที่ตับ (Hepatic gluconeogenesis) และการหลั่งอินซูลินด้วย [32] นอกจากนี้ หน่วยงานความปลอดภัยด้านอาหารแห่งสหภาพยุโรป (European Food and Safety Authority: EFSA) รายงานว่าการใช้สแตร์ทชนย่อยด้วยเอนไซม์ทดแทนสแตร์ทชนที่ย่อยได้ จะช่วยลดระดับ

น้ำตาลในเลือดหลังอาหาร เมื่อทดแทนในปริมาณที่ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 14 ของปริมาณสแตร์ทชนทั้งหมด [33]

5.3. มีบทบาทในการควบคุมน้ำหนักและป้องกันโรคอ้วน

โรคอ้วนเป็นภาวะที่ร่างกายมีการสะสมไขมันมากเกินไปกว่าปกติหรือมากเกินไปกว่าที่ร่างกายจะเผาผลาญ ร่างกายจึงสะสมพลังงานที่เหลือไว้ในรูปของไขมันตามอวัยวะต่าง ๆ ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการเกิดปัญหาสุขภาพอื่น ๆ สแตร์ทชนย่อยด้วยเอนไซม์ให้พลังงานต่ำประมาณ 2 กิโลแคลอรีต่อกรัม จึงมีส่วนช่วยลดพลังงานจากอาหาร [1] และมีรายงานว่าสแตร์ทชนย่อยด้วยเอนไซม์ในอาหารมีผลช่วยลดการบริโภคอาหารแต่ไม่มีผลต่อความอยากอาหารของผู้ที่มีสุขภาพดี [34], [35] เช่นเดียวกับการทดลองในผู้ที่มีภาวะก่อนเป็นเบาหวาน (Prediabetes) โดยให้บริโภคสแตร์ทชนย่อยด้วยเอนไซม์ประเภท 2 ในปริมาณ 45 กรัมต่อวัน พบว่า ไม่มีผลช่วยเพิ่มความอิ่มหรือลดความอยากอาหาร [36] อย่างไรก็ตามสแตร์ทชนย่อยด้วยเอนไซม์มีผลช่วยเพิ่มการเผาผลาญและลดการสะสมไขมัน [37] และมีผลช่วยลดระดับคอเลสเตอรอลในเลือดและลดการเกิดโรคอ้วนในหนูทดลองที่ได้รับอาหารที่มีไขมันสูง [38]

5.4. ทำหน้าที่ช่วยการดูดซึมเกลือแร่

การวิจัยในสัตว์ทดลองและมนุษย์แสดงให้เห็นว่าสแตร์ทชนย่อยด้วยเอนไซม์มีบทบาทช่วยเพิ่มการดูดซึมของเกลือแร่หลายชนิดบริเวณลำไส้เล็กส่วนปลาย (Ileum) [39] การทดลองให้อาหารที่มีสแตร์ทชนย่อยด้วยเอนไซม์ร้อยละ 16.4 ในลูกหมู พบว่า สามารถเพิ่มการดูดซึมแคลเซียม และเหล็กได้มากกว่าอาหารปกติ ซึ่งน่าจะมาจากการที่สแตร์ทชนย่อยด้วยเอนไซม์ไม่ถูกย่อยในลำไส้เล็ก จึงเป็นการเพิ่มออสโมลาริตี (Osmolarity) เกิดการชะลอการว่างของกระเพาะอาหาร ส่งผลให้การเคลื่อนผ่านของอาหารในลำไส้เล็กช้าลงและเพิ่มเวลาในการดูดซึมเกลือแร่มากขึ้น [40] การทดลองในหลอดทดลองโดย Aribas et al. [41] พบว่า สแตร์ทชนย่อยด้วยเอนไซม์ประเภท 4 ช่วยเพิ่มการดูดซึมแคลเซียม เหล็ก และสังกะสี ได้ เนื่องจากผลของค่า pH ที่ลดลงจากกรดไขมันสายสั้นที่สร้างขึ้น ทำให้เกลือแร่มีการละลายดีขึ้น นอกจากนี้ งานวิจัยที่ศึกษาผลของการกินสแตร์ทชนย่อยด้วยเอนไซม์จากเมล็ดบัวต่อการสร้างกรดไขมันสายสั้น และการดูดซึมเกลือแร่ในหนูทดลอง พบว่า กระบวนการหมักสแตร์ทชนย่อยด้วยเอนไซม์จากเมล็ดบัวโดยแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ส่วนล่างช่วยเพิ่มปริมาณกรดไขมันสายสั้น ได้แก่ กรดฟอร์มิก (Formic acid)

กรดแอซิติก (Acetic acid) กรดบิวทิริก (Butyric acid) กรดไอโซบิวทิริก (Isobutyric acid) กรดโพรพิโอนิก (Propionic acid) และกรดแลคติก (Lactic acid) ซึ่งการดูดซึมแคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก ในลำไส้เล็กจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ กรดไขมันสายสั้นที่เพิ่มขึ้น [42]

6. ปริมาณที่แนะนำให้บริโภคต่อวัน

องค์การอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) ได้แนะนำการบริโภคเส้นใยอาหาร 38 กรัมต่อวัน สำหรับผู้ใหญ่เพศชาย และ 25 กรัมต่อวันสำหรับผู้ใหญ่ เพศหญิง และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณต่ำสุดที่ควรบริโภค สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์เพื่อให้เกิดประโยชน์ด้านพรีไบโอติกส์ มีงานวิจัยที่พบว่า การบริโภคสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ 6-12 กรัมต่อมื้อ ส่งผลต่อระดับน้ำตาลและอินซูลินในเลือดหลังมื้ออาหาร และการบริโภคสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ 20 กรัมต่อวัน จะช่วยในการส่งเสริมสุขภาพ [43], [44]

7. การใช้ประโยชน์ของสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ในอุตสาหกรรมอาหาร

7.1. บทบาทของสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ในผลิตภัณฑ์อาหาร

สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ได้รับการพิจารณาว่า เป็นส่วนประกอบอาหารฟังก์ชัน (Functional ingredient) เช่นเดียวกับเส้นใยอาหารที่ช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ และมีประโยชน์ต่อสุขภาพ ทั้งนี้ สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ยังสามารถใช้เป็นสารเพิ่มปริมาณ (Bulking agent) เพื่อลดปริมาณ น้ำตาลหรือไขมันในสูตรอาหาร โดยมีผลกระทบเพียงเล็กน้อย ต่อลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และคุณภาพทางประสาทสัมผัส อื่น ๆ ของอาหาร นอกจากนี้ สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ยังมี สมบัติทางเคมีกายภาพที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์อาหาร มากกว่าเส้นใยอาหารทั่วไป ได้แก่ ขนาดอนุภาคเล็ก สีขาว ปราศจากรสชาติ มีความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity) ต่ำ แต่มีความสามารถในการจับน้ำ (Water binding capacity) สูง ซึ่งจะช่วยลดปริมาณน้ำอิสระในอาหาร เป็น การยืดอายุการเก็บรักษาอาหารได้ มีอุณหภูมิการเกิดเจล (Gelatinization temperature) สูง และมีคุณภาพดีใน กระบวนการเอ็กสตรูชัน (Extrusion) สำหรับอาหารที่ทอด ด้วยน้ำมันท่วม (Deep-fat-fried foods) สตาร์ชทนย่อยด้วย เอนไซม์จะช่วยปรับปรุงคุณภาพด้านการบริโภค (Eating quality) โดยช่วยให้อาหารมีความพอง เพิ่มความกรอบ และ

ลดการอุ้มน้ำมัน ต่างจากการใช้เส้นใยอาหารทั่วไปที่ทำให้ เนื้อสัมผัสของอาหารสาก (Gritty texture) และมีกลิ่นรสผิด ไปจากเดิม [6], [43]

7.2. สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ในการวิจัยพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ

ในปี 2024 รายงานการตลาดโลกประเมินขนาดของ ตลาดสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ไว้ที่ 10.03 พันล้านเหรียญ สหรัฐ และการคาดการณ์ในช่วงปี 2024–2029 มีแนวโน้มว่า จะเพิ่มขึ้นถึง 13.49 พันล้านเหรียญสหรัฐในช่วงปีสุดท้าย (ค.ศ. 2029) โดยมีอัตราการเติบโตของพอร์ตเฉลี่ย (Compound Annual Growth Rate, CAGR) ร้อยละ 6.1 ตลอดช่วงของ ระยะเวลาในการคาดการณ์ สำหรับตลาดของสตาร์ชทนย่อย ด้วยเอนไซม์ มีการนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม และเนื้อสัตว์ อาหารแปรรูป ขนมหวาน ขนมอบ อาหารเข้า จากธัญพืช อาหารขบเคี้ยว และผลิตภัณฑ์นม [45]

การใช้ประโยชน์ของสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ สามารถช่วยเพิ่มความหนืดและความคงตัวในผลิตภัณฑ์ เครื่องดื่ม ช่วยเพิ่มความเป็นเนื้อครีมของไอศกรีม และมีส่วน ปรับปรุงรสชาติให้ผลิตภัณฑ์นม [46] การเติมสตาร์ชทนย่อย ด้วยเอนไซม์จากมันสำปะหลังร้อยละ 1 ในผลิตภัณฑ์โยเกิร์ต (Yoghurt) ช่วยเพิ่มความหนืดและลดการหดตัว (Syneresis) ของผลิตภัณฑ์ในช่วงการเก็บรักษา 21 วัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางประสาท สัมผัส [47] การเติมสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ประเภท 2 และ 3 มีผลช่วยเสริมการเกิดโครงสร้างเจลของโยเกิร์ต ที่แตกต่างกัน สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ประเภท 2 ช่วยให้ โครงสร้างเจลอุ้มน้ำเวย์ (Serum) ได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม สตาร์ช ทนย่อยด้วยเอนไซม์ประเภท 3 มีประสิทธิภาพในการปรับปรุง คุณภาพของโยเกิร์ตได้ดีกว่า โดยช่วยปรับปรุงความหนืด ควบคุมความเป็นกรด และช่วยปกป้องจุลินทรีย์สุขภาพได้ดี [48] สำหรับผลิตภัณฑ์ไส้กรอก การเติมสตาร์ชทนย่อยด้วย เอนไซม์จะช่วยลดปริมาณไขมันในสูตร การเติมสตาร์ชทนย่อย ด้วยเอนไซม์ประเภท 3 ร้อยละ 4 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) จะช่วย ลดปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์โดยไม่มีผลต่อคุณภาพทาง ประสาทสัมผัส และลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เมื่อ ตรวจวัดด้วยเครื่องมือ (Texture profile analysis) [49]

งานวิจัยในช่วงปี 2019-2021 มีการใช้ประโยชน์ของ สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ เพื่อทดแทนแป้งในสูตรอาหารต่าง ๆ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ทำจากแป้งสาลี ได้แก่ บิสกิต (Biscuit) บะหมี่ ขนมปัง และพาสต้า (Pasta) ซึ่งประเภทของสตาร์ชทน

ย่อยด้วยเอนไซม์ที่ต่างกัน จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต่างกัน ผลิตภัณฑ์คุกกี (Cookie) และบิสกิตที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ ส่วนใหญ่มีค่าความแข็ง (Hardness) และค่าการแตกหัก (Fracturability) ลดลงเนื่องจากมีปริมาณโปรตีนลดลง อย่างไรก็ตาม เนื้อสัมผัสที่นุ่ม และกรอบของผลิตภัณฑ์เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคเช่นเดียว กับผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ปริมาณสูง (ร้อยละ 40) มีผลให้ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ลดลง เนื่องจากปริมาณกลูเตน (Gluten) ในแป้งสาลิลดลง แต่ยังเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคสำหรับผลิตภัณฑ์ขนมปัง การใช้สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ประเภท 4 เสริมในขนมปังสุขภาพที่ต้องการใยอาหารสูง จะช่วยให้เนื้อสัมผัสและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังดีกว่าการใช้รำข้าว โดยช่วยเพิ่มค่าความแน่นเนื้อ (Firmness) ปริมาตรของขนมปัง (Loaf volume) และความสว่างของสีขนมปัง นอกจากนี้ ยังช่วยยืดอายุการเก็บรักษาขนมปังได้ เนื่องจากโครงสร้างที่มีการเชื่อมข้ามสูง (Highly cross-linked structure) ของสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ประเภท 4 ที่ช่วยลดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสตาร์ชเป็นการช่วยลดอัตราการคืนตัว (Retrogradation) และชะลอการแข็งตัวของขนมปัง (Bread staling) ทั้งนี้มีข้อเสนอแนะว่าขนมปังที่เสริมสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ประเภท 4 มากกว่าร้อยละ 20 สามารถจัดอยู่ในกลุ่มอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำหรือปานกลางได้ [16]

รายงานสรุปของ Arp et al. [50] พบว่า ผลิตภัณฑ์ขนมปังสามารถใช้สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ทดแทนได้สูงถึงร้อยละ 20 โดยยังคงรักษาคุณภาพที่ดีและช่วยเพิ่มความขาวให้กับขนมปัง การใช้สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ประเภท 2 และ 3 สามารถทดแทนปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์เค้ก (Cake) และมัฟฟิน (Muffin) ได้ และทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะปรากฏและคุณภาพที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่และพาสต้าสามารถใช้สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ทุกประเภททดแทนแป้งสาลีได้โดยยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และมีผลต่อความขาวของเส้น ช่วยเพิ่มการดูดซับน้ำ และลดร้อยละการสูญเสียเนื่องจากการหุงต้ม สำหรับผลิตภัณฑ์คุกกี สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ที่เหมาะสมคือประเภท 5 ซึ่งสามารถทดแทนแป้งสาลีได้ถึงร้อยละ 75 โดยยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดี มีผลต่อความขาวของผลิตภัณฑ์ และสามารถใช้ทดแทนไขมันในสูตรได้

7.3. การห่อหุ้มสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพด้วยสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์

สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์นอกจากจะใช้เป็นส่วนประกอบอาหารฟังก์ชันเพื่อเสริมและ/หรือทดแทนแป้งที่ถูกย่อยเร็ว (RDS) และ แป้งที่ถูกย่อยช้า (SDS) ในผลิตภัณฑ์อาหารแล้ว ยังสามารถนำมาใช้ในการห่อหุ้มสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compounds) เพื่อเพิ่มความเสถียรและการนำส่งสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพผ่านระบบทางเดินอาหารของร่างกายด้วย [32] งานวิจัยของ Shrestha et al. [51] ได้ทดลองใช้สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ประเภท 3 จากแป้งกล้วยดิบที่ถูกดัดแปรด้วยวิธีทางเคมีและกายภาพ นำมาจับกับโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง (Polysaccharide-protein conjugate) เพื่อนำมาห่อหุ้มแอสตาแซนทิน (Astaxanthin) ในระบบอิมัลชัน (Emulsion) ชนิดน้ำมันในน้ำซึ่งทำให้มีความเสถียรมากกว่าการใช้โปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองเพียงอย่างเดียว การห่อหุ้มไนซิน (Nisin) ซึ่งเป็นสารกันเสียด้วยส่วนผสมของแอลจิเนต (Alginate) ร้อยละ 1 และสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ร้อยละ 0.5 พบว่ามีประสิทธิภาพการห่อหุ้มสูงสุด ช่วยในการปกป้องและปลดปล่อยไนซินอย่างช้า ๆ ในช่วงการเก็บรักษา 2 เดือน และนำไปใช้อย่างได้ผลในผลิตภัณฑ์เนยแข็ง [52]

7.4. การห่อหุ้มจุลินทรีย์สุขภาพด้วยสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์

มีรายงานว่าสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์สามารถใช้ในการห่อหุ้มและป้องกันจุลินทรีย์สุขภาพในระหว่างกระบวนการแปรรูป การเก็บรักษา และเมื่อผ่านเข้าสู่ระบบทางเดินอาหารโดยมีรายงานว่า การห่อหุ้มจุลินทรีย์สุขภาพด้วยสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) ได้ประสิทธิภาพการห่อหุ้มสูงและเพิ่มอัตราการอยู่รอดของเซลล์จุลินทรีย์ภายในไมโครแคปซูล (Microcapsule) ภายใต้สภาวะที่เลียนแบบน้ำย่อยในกระเพาะอาหาร และลำไส้เล็ก [53] ส่วนงานวิจัยของ Muhammad et al. [54] พบว่า การใช้สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์จากข้าวโพดและมันฝรั่ง ร่วมกับ ดี-แมนโนส (D-mannose) มอลโทเดกซ์ทริน (Maltodextrin) และเวย์โปรตีนเข้มข้น ในการห่อหุ้มจุลินทรีย์สุขภาพผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) มีประสิทธิภาพการห่อหุ้มดีกว่าสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์จากข้าว การใช้สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ร่วมกับไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloids) มีรายงานว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการห่อหุ้มจุลินทรีย์สุขภาพได้ดีขึ้น ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า จุลินทรีย์

สุขภาพในเม็ดบีดส์แอลจิเนต (Alginate bead) ที่มีส่วนผสมของสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ช่วยเพิ่มอัตราการย่อยของเซลล์ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม โดยไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส [55] และจุลินทรีย์สุขภาพที่ถูกห่อหุ้มในเม็ดบีดส์แอลจิเนตที่เคลือบด้วยแซนแทนกัม (Xanthan gum) จะมียอัตราการย่อยของเซลล์ภายใต้สภาวะที่เลียนแบบน้ำย่อยในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็กได้สูงขึ้น [56]

8. บทสรุป

ปัจจุบันสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในด้านประโยชน์ต่อสุขภาพ จึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาถึงรายละเอียดด้านโครงสร้าง การพัฒนากระบวนการผลิต และผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อจุลินทรีย์ในลำไส้ รวมถึงกระบวนการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกายของสิ่งมีชีวิตทั้งในสัตว์ทดลองและในมนุษย์ ควบคู่ไปกับการวิจัยพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารที่ใช้สตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์จากธรรมชาติและทางการค้าเป็นส่วนประกอบอาหารฟังก์ชัน ทั้งนี้การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสตาร์ชทนย่อยด้วยเอนไซม์ในด้านต่าง ๆ ยังคงมีอยู่อย่างต่อเนื่อง เพื่อความเข้าใจที่ถูกต้องและการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อสุขภาพของผู้บริโภค

9. References

- [1] Raigond, P., Ezekiel, R. and Raigond, B. 2015. Resistant starch in food: A review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 95: 1968-1978.
- [2] Topping, D.L. and Clifton, P.M. 2001. Short-chain fatty acids and human colonic function: Role of resistant starch and nonstarch polysaccharides. **Physiological Reviews**. 81(3): 1031-1064.
- [3] Li, C. and Hu, Y. 2023. New definition of resistant starch types from the gut microbiota perspectives - A review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 63(23): 6412-6422.
- [4] Sajilata, M.G., Singhal, R.S. and Kulkarni, P.R. 2006. Resistant starch - A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. 5(1): 1-17.
- [5] International Association for Cereal Science and Technology. 2017. **Measurement of Total Dietary Fibre in Cereals, Ingredients and Food Products Using the Rapid Integrated TDF Procedure (RINTDF)**. <https://j3.icc.or.at/icc-standards/standards-overview/185-standard-method>. Accessed 11 January 2024.
- [6] Sofi, S.A., Ayoub, A. and Jan, A. 2017. Resistant starch as functional ingredients: A review. **International Journal of Food Science and Nutrition**. 2(6): 195-199.
- [7] Kraithong, S. and et al. 2022. Type 1 resistant starch: Nutritional properties and industry applications. **Food Hydrocolloid**. 125: 107369.
- [8] Noor, N. and et al. 2021. Resistant starch type 2 from lotus stem: Ultrasonic effect on physical and nutraceutical properties. **Ultrasonics Sonochemistry**. 76: 105655.
- [9] Ma, Z., Hu, X. and Boye, J.I. 2020. Research advances on the formation mechanism of resistant starch type III: A review. **Critical Review in Food Science and Nutrition**. 60(2): 276-297.
- [10] Coulon, D.B. and et al. 2019. Novel resistant starch type 4 products of different starch origins, production methods, and amounts are not equally fermented when fed to Sprague-Dawley rats. **Molecular Nutrition & Food Research**. 64(2): e1900901.
- [11] Li, L. and et al. 2021. Production and applications of amylose-lipid complexes as resistant starch: Recent approaches. **Starch**. 73: 2000249.

- [12] Remya, R. and Jyothi, A.N. 2015. A comparative study on the resistant starch content from different botanical sources in relation to their physicochemical properties. **Journal of Root Crops**. 41(1): 37-47.
- [13] Eroglu, E.I. and Buyuktuncer, Z. 2017. The effect of various cooking methods on resistant starch content of foods. **Nutrition and Food Science**. 47(4): 522-533.
- [14] Ho, L.H. and Wong, S.Y. 2019. Resistant starch from exotic fruit and its functional properties: A review of recent research. In: Emeje, M. (ed.) **Chemical Properties of Starch**. London: IntechOpen.
- [15] Tayade, R. and et al. 2019. Insight into the prospects for the improvement of seed starch in legume - A review. **Frontiers in Plant Science**. 10: 1213.
- [16] Zhang, Z. and Bao, J. 2023. Recent advances in modification approaches, health benefits, and food applications of resistant starch. **Starch**. 75(9-10): 2100141.
- [17] Davani-Davari, D. and et al. 2019. Prebiotics: Definition, types, sources, mechanisms, and clinical applications. **Foods**. 8: 92.
- [18] Włodarczyk, M. and Szykliczewyńska, K. 2021. Efficiency of resistant starch and dextrins as prebiotics: A review of the existing evidence and clinical trials. **Nutrients**. 13: 3808.
- [19] Rios-Covian, D. and et al. 2016. Intestinal short chain fatty acids and their link with diet and human health. **Frontiers in Microbiology**. 7: 185.
- [20] Portincasa, P. and et al. 2022. Gut microbiota and short chain fatty acids: Implications in glucose homeostasis. **International Journal of Molecular Sciences**. 23: 1105.
- [21] Igbafe, J. and et al. 2020. Probiotic and antimicrobial effect of *Lactiplantibacillus plantarum*, *Saccharomyces cerevisiae*, and *Bifidobacterium longum* against common foodborne pathogens in poultry. **Agriculture**. 10: 368.
- [22] Anjum, M. and et al. 2022. Current perspectives on gastrointestinal models to assess probiotic-pathogen interactions. **Frontiers in Microbiology**. 13: 831455.
- [23] Wachtershauser, A. and Stein, J. 2000. Rationale for the luminal provision of butyrate in intestinal diseases. **European Journal of Nutrition**. 39: 164-171.
- [24] Bach Knudsen, K.E. and et al. 2018. Impact of diet-modulated butyrate production on intestinal barrier function and inflammation. **Nutrients**. 10(10): 1499.
- [25] Fu, X. and et al. 2019. Nondigestible carbohydrates, butyrate, and butyrate-producing bacteria. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 59(Suppl. 1): S130-S152.
- [26] Salvi, P.S. and Cowles, R.A. 2021. Butyrate and the intestinal epithelium: Modulation of proliferation and inflammation in homeostasis and disease. **Cells**. 10: 1775.
- [27] Hajar, R., Richard, C.S. and Santos, M.M. 2021. The role of butyrate in surgical and oncological outcomes in colorectal cancer. **American Journal of Physiology Gastrointestinal and Liver Physiology**. 320(4): G601-G608.
- [28] Cione, E. and et al. 2021. Resistant starches and non-communicable disease: A focus on Mediterranean diet. **Foods**. 10: 2062.
- [29] Tsitko, I. and et al. 2019. A small in vitro fermentation model for screening the gut microbiota effects of different fiber preparations. **International Journal of Molecular Science**. 20: 1925.
- [30] Teichmann, J. and Cockburn, D.W. 2021. In vitro fermentation reveals changes in butyrate production on resistant starch source and microbiome composition. **Frontiers in Microbiology**. 12: 640253.

- [31] Leither, D.R. and et al. 2017. Obesity and type 2 diabetes: Two diseases with a need for combined treatment strategies- EASO can lead the way. **Obesity Facts**. 10: 483-492.
- [32] Wang, C. and et al. 2022. Resistant starch and its nanoparticles: Recent advances in their green synthesis and application as functional food ingredients and bioactive delivery systems. **Trend in Food Science and Technology**. 119: 90-100.
- [33] Stephen, A.M. and et al. 2017. Dietary fibre in Europe: current state of knowledge on definitions, sources, recommendations, intakes and relationships to health. **Nutrition Research Reviews**. 30: 149-190.
- [34] Bile-Castillo, J.L., Juarez-Rojop, I.E. and Tovilla-Zarate, C.A. 2017. Acute consumption of resistant starch reduces food intake but has no effect on appetite ratings in healthy subjects. **Nutrient**. 9(7): 696.
- [35] Emilien, C.H., Hsu, W.H. and Hollis, J.H. 2017. Effect of resistant wheat starch on subjective appetite and food intake in healthy adults. **Nutrition**. 43-44: 69-74.
- [36] White, U. and et al. 2020. Resistant starch has no effect on appetite and food intake in individuals with prediabetes. **Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics**. 120(6): 1034-1041.
- [37] Meenu, M. and Xu, B. 2019. A critical review on anti-diabetic and anti-obesity effects of dietary resistant starch. **Critical Review in Food Science and Nutrition**. 59(18): 3019-3031.
- [38] Zhou, Y. and et al. 2019. Regulatory function of buckwheat-resistant starch supplementation on lipid profile and gut microbiota in mice fed with a high-fat diet. **Journal of Food Science**. 84(9): 2674-2681.
- [39] Fuentes-Zaragoza, E. and et al. 2010. Resistant starch as functional ingredient: A review. **Food Research International**. 43: 931-942.
- [40] Morais, M.B. and et al. 1996. Effect of resistant and digestible starch on intestinal absorption of calcium, iron, and zinc in infant pigs. **Pediatric Research**. 39: 872-876.
- [41] Aribas, M., Kahraman, K. and Koksel, H. 2020. In vitro glycemic index, bile acid binding capacity and mineral bioavailability of spaghetti supplemented with resistant starch type 4 and wheat bran. **Journal of Functional Foods**. 65: 103778.
- [42] Zeng, H. and et al. 2017. Lotus seed resistant starch regulates gut microbiota and increases short-chain fatty acids production and mineral absorption in mice. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 65: 9217-9225.
- [43] Homayouni, A. and et al. 2014. Resistant starch in food industry: A changing outlook for consumer and producer. **Starch**. 66(1-2): 102-114.
- [44] Rai, A.K. and et al. 2019. Resistant starch and its health benefits. **Trends in Biosciences**. 12: 905-908.
- [45] Market Data Forecast. 2024. **Resistant Starch Market**. <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/resistant-starch-market>. Accessed 15 August 2024.
- [46] Bede, D. and Zaixiang, L. 2021. Recent developments in resistant starch as a functional food. **Starch**. 73(3-4): 2000139.
- [47] Mwizerwa, H. and et al. 2017. Effect of resistant starch on quality parameters and sensory attributes of yogurt. **Current Research in Nutrition and Food Science**. 5(3): 353-367.
- [48] He, J. and et al. 2019. Effect of two types of resistant starches on the quality of yogurt. **Journal of Dairy Science**. 102: 3956-3964.
- [49] Garcia-Santos, M. and et al. 2019. Effect of the addition of resistant starch in sausage with fat reduction on the physicochemical and sensory properties. **Food Science and Technology**. 39: 491-497.

- [50] Arp, C.G., Correa, M.J. and Ferrero, C. 2021. Resistant starches: A smart alternative for the development of functional breads and other starch-based foods. **Food Hydrocolloids**. 121: 106949.
- [51] Shrestha, S., Sadiq, M.B. and Anal, A.K. 2018. Culled banana resistant starch-soy protein isolate conjugate based emulsion enriched with astaxanthin to enhance its stability. **International Journal of Biological Macromolecules**. 120(Pt A): 449-459.
- [52] Hassan, H. and et al. 2020. Novel design for alginate/resistant starch microcapsules controlling nisin release. **International Journal of Biological Macromolecules**. 153: 1186-1192.
- [53] Rengadu, D., Gerrano, A. and Mellem, J.J. 2021. Microencapsulation of *Lactobacillus casei* and *Bifidobacterium animalis* enriched with resistant starch from Vigna Unguiculata. **Starch**. 73(7-8): 2000247.
- [54] Muhammad, Z. and et al. 2021. Resistant starch-based edible coating composites for spray-dried microencapsulation of *Lactobacillus acidophilus*, comparative assessment of thermal protection, in vivo digestion and physicochemical characteristics. **Coatings**. 11(5): 587.
- [55] Homayouni, A. and et al. 2008. Effect of microencapsulation and resistant starch on the probiotic survival and sensory properties of synbiotic ice cream. **Food Chemistry**. 111(1): 50-55.
- [56] Hoh, P.Y. and et al. 2021. Microencapsulation of *Lactobacillus rhamnosus* GG with resistant starch and xanthan gum. **Walailuk Journal of Science and Technology**. 18(15): 9573.