การเพิ่มปริมาณสารพฤกษเคมีในผักและผลไม้โดยกระบวนการหมักด้วยแบคทีเรียแล็กติก

นภัสสร เพียสุระ

ฝ่ายจุลชีววิทยาประยุกต์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อีเมล : ifrnop@ku.ac.th
รับเมื่อ 25 เมษายน 2567 **แก้ไขเมื่อ** 14 สิงหาคม 2567 **ตอบรับเมื่อ** 26 สิงหาคม 2567

จุดเด่น

- การเพิ่มปริมาณสารพฤกษเคมีในผักและผลไม้โดยกระบวนการหมักด้วยแบคทีเรียแล็กติก
- เอนไซม์จากแบคทีเรียแล็กติกในกระบวนการหมักสามารถเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในผักและผลไม้

บทคัดย่อ

สารพฤกษเคมีเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พืชสร้างขึ้น และมีประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์ อาหารจากพืชที่ผ่านกระบวนการหมักด้วยแบคทีเรียแล็กติก นอกจากจะมีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้น คุณสมบัติทางประสาทสัมผัสที่ดีขึ้น และอายุการเก็บรักษานานขึ้นแล้ว ยังมีปริมาณสารพฤกษเคมีที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์ เช่น สารประกอบฟีนอลิก และสารประกอบฟลาโวนอยด์สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผักและผลไม้ที่ไม่ได้ผ่านการหมัก นอกจากนั้นยังมีฤทธิ์ในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายโครงสร้างของสารพฤกษเคมี ด้วยเอนไซม์ของเชื้อแบคทีเรียแล็กติกที่สร้างขึ้นในระหว่างกระบวนการหมัก ให้สารเหล่านี้อยู่ในรูปที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพมากขึ้น ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมงานวิจัยนี้ สามารถนำไปเป็นแนวทางในการนำเชื้อแบคทีเรียแล็กติกมาประยุกต์ใช้ในการหมักผักและผลไม้ เพื่อผลิตอาหารที่ส่งผลดีต่อสุขภาพ และตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในอนาคต

คำสำคัญ : แบคทีเรียแล็กติก สารพฤกษเคมี การหมัก

Increasing the amount of phytochemicals in fruits and vegetables using the lactic acid bacteria fermentation

Napassorn Peasura

Department of Applied Microbiology, Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University
E-mail : ifrnop@ku.ac.th
Received 25 April 2024; **Revised** 14 August 2024; **Accepted** 26 August 2024

Highlights

- Increasing the amount of phytochemicals using lactic acid bacteria fermentation
- Enzymes of lactic acid bacteria can increase the antioxidant activity of vegetables and fruits

Abstract

Phytochemicals are biologically active compounds produced by plants and beneficial to human health. Food from plants that undergo fermentation with lactic acid bacteria not only increases nutritional value but also improves sensory properties, extends shelf life, and increases the quantity of beneficial phytochemicals for human health, such as phenolic compounds increase flavonoid content, compared to non-fermented vegetables and fruits. Additionally, it exhibits higher antioxidant properties due to the breakdown of chemical structures of phytochemicals by enzymes from lactic acid bacteria during fermentation, making these substances more biologically active. As a result, the research presented in this review can be used as a guideline for using lactic acid bacteria in the fermentation of vegetables and fruits to produce health-promoting foods that meet future consumer demand.

Keywords : lactic acid bacteria, phytochemicals, fermentation

บทนำ

สารพฤกษเคมี คือ สารทุติยภูมิที่พืชสร้างขึ้นในระหว่างกระบวนการเจริญเติบโต มีบทบาทสำคัญในการเจริญเติบโตของพืช และยังสามารถทำหน้าที่เป็นโมเลกุลส่งสัญญาณ ปกป้องพืชจากความเครียดที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต[1] และมีฤทธิ์ทางชีวภาพ แบ่งตามโครงสร้างทางเคมี ได้แก่ กรดฟีนอลิก (phenolic acid) ฟลาโวนอยด์ (flavonoid) เทอร์พีนอยด์ (terpenoid) สเตียรอยด์ (steroid) และอัลคาลอยด์ (alkaloid)[2] และยังมีฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการป้องกันโรค[3] โดยเฉพาะอย่างยิ่งบทบาทสำคัญในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งช่วยเพิ่มความต้านทานตามธรรมชาติของร่างกายต่อความเสียหายจากปฏิกริยาออกซิเดชัน เมื่อมนุษย์บริโภคผักและผลไม้ที่เป็นแหล่งของสารพฤกษเคมี ซึ่งจะถูกย่อยด้วยแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ ผ่านกระบวนการหมัก ผลจากการย่อยจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นกรดแล็กติกและกรดไขมันสายสั้น เช่น สารจำพวกแอซีเทต (acetate) บิวทิเรต (butyrate) และโพรพิโอเนต (propionate) เป็นต้น และยังปลดปล่อยสารต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ และถูกดูดซึมที่ลำไส้ใหญ่ จากองค์ความรู้เรื่องกระบวนการหมักของจุลินทรีย์ จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแปรรูปอาหารเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ช่วยเปลี่ยนแปลงลักษณะ เนื้อสัมผัส รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร ซึ่งเชื้อแบคทีเรียแล็กติก (Lactic Acid Bacteria, LAB) มีบทบาทสำคัญในอาหารหมัก โดยการหมักจะอาศัยกิจกรรมของแบคทีเรียแล็กติกที่สามารถเปลี่ยนสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่เป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่สูงขึ้น[4-7] โดยเฉพาะอย่างยิ่งฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากการเปลี่ยนโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิก (phenolic) ให้อยู่ในรูปที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่สูงขึ้น ด้วยเอนไซม์รีดักเตส (reductase) และไฮโดรเลส (hydrolase) และกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation)[8] เอนไซม์ที่ได้จากเมแทบอลิซึมของแบคทีเรียแล็กติก คือ ไฮโดรเลส (hydrolase) เช่น อะไมเลส (amylases) โปรตีเอส (proteases) ไลเปส (lipases) และไฟเตส (phytases)[9-10] ปัจจุบันผู้คนหันมาใส่ใจสุขภาพกันมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแนวโน้มในการรับประทานอาหารจากพืชเพื่อชะลอหรือยับยั้งการเกิดโรคกำลังเป็นที่นิยมและพูดถึงกันอย่างกว้างขวาง ทำให้อาหารจากพืชที่ผ่านกระบวนการหมักที่มีสารพฤกษเคมีในปริมาณสูง และเชื้อแบคทีเรียที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพมีมูลค่าและกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก

สารพฤกษเคมี

ในกระบวนการทางชีวเคมีของพืชหรือเมแทบอลิซึม แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การสร้างหรือสังเคราะห์สารโมเลกุลใหญ่ (anabolism) จากสารโมเลกุลเล็ก และการสลายสารโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง (catabolism)[11] ซึ่งสารพฤกษเคมีจัดเป็นสารที่ได้จากเมแทบอลิซึมของพืช หรือเรียกอีกอย่างว่า สารทุติยภูมิ (secondary metabolite) มีหลายกลุ่มด้วยกัน เช่น อัลคาลอยด์ (alkaloids) ฟลาโวนอยด์ (flavonoid) และไกลโคไซด์ (glycosides)[12]

เป็นต้น สารเหล่านี้มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีประโยชน์ต่อพืชเอง เช่น ช่วยให้พืชสามารถปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ ช่วยในการป้องกันโรคของพืช เป็นสารป้องกันแมลงที่เป็นศัตรูของพืช นอกจากประโยชน์ต่อตัวพืชเองแล้วสารพฤกษเคมีที่พืชสร้างขึ้นยังมีประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์เมื่อบริโภคพืช เช่น สารประกอบฟีนอลิก มีสมบัติในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน (oxidation) จึงช่วยลดอัตราเสี่ยงของการเกิดโรคที่เกิดจากอนุมูลอิสระในร่างกาย ลดโอกาสในการเกิดมะเร็ง[13] เป็นต้น

สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารพฤกษเคมีที่พืชสร้างขึ้น มีโครงสร้างหลากหลาย สามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มย่อยตามโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน คือ จำนวนคาร์บอน และหมู่เคมีอื่น ๆ ที่เกาะในโครงสร้างหลัก โดยโครงสร้างหลักของสารประกอบฟีนอลิกมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นวงอะโรมาติก และมีหมู่ไฮดรอกซิลมาแทนที่ 1 หมู่หรือมากกว่า และอาจมีหมู่เคมีอื่น ๆ มาเกาะที่ตำแหน่งต่าง ๆ[14] โดยมีการจำแนกสารประกอบฟีนอลิกได้มากกว่า 8,000 ชนิด ดัง Figure 1

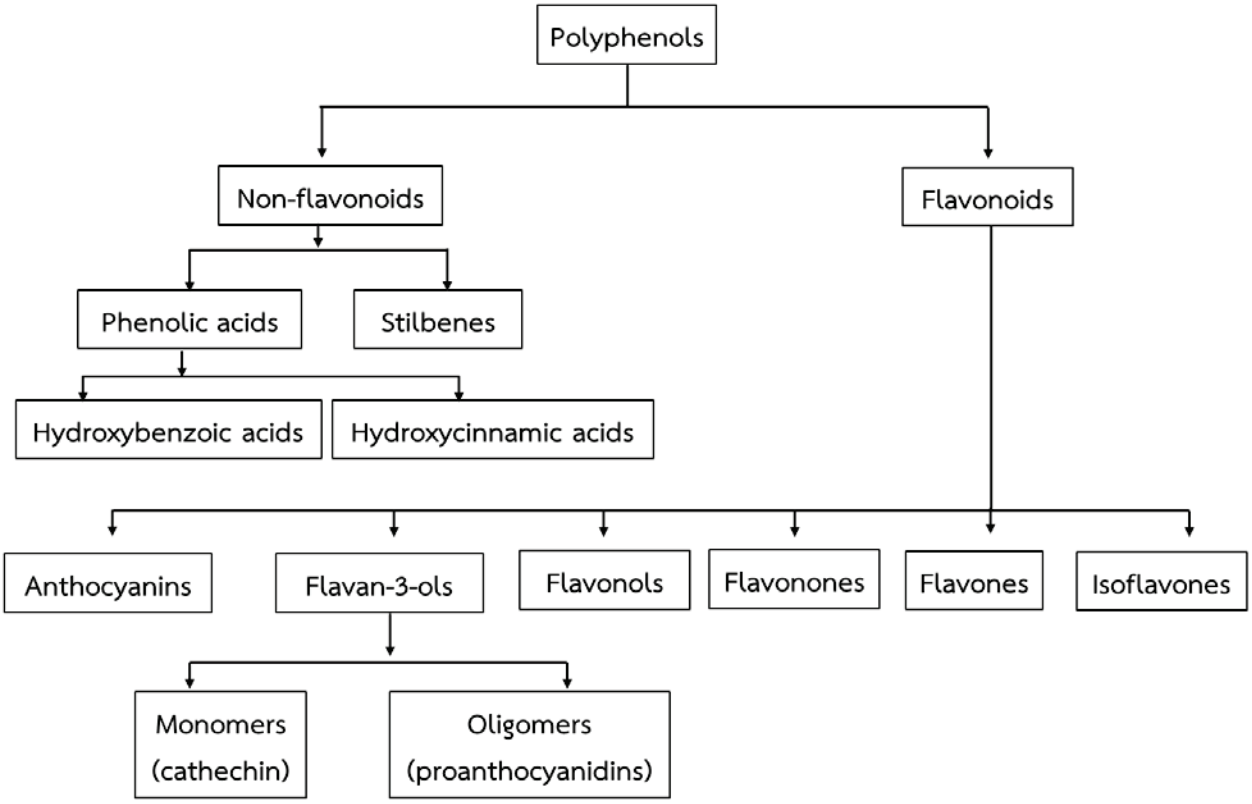

Figure 1 Schematic of phenolic compounds classification

สารประกอบฟีนอลที่สำคัญในพืชที่กินได้ ได้แก่ ฟลาโวนอยด์ (C_6–C_3–C_6) กรดฟีนอลิก (C_6–C_3 หรือ C_6–C_1) และแทนนิน[15-16] ซึ่งกรดฟีนอลิกมีปริมาณ 1 ใน 3 ของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด[17] แบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยได้ 2 กลุ่ม คือ กรดไฮดรอกซีเบนโซอิก (hydroxybenzoic acids, C_1-C_6) และกรดไฮดรอกซีซินนามิก (hydroxyl-cinnamic acids, C_3-C_6) โดยธรรมชาติกรดฟีนอลิกจะอยู่ในรูปที่เชื่อมกับสารประกอบอื่นภายในเซลล์ของพืชมากกว่าอยู่ในรูปอิสระ เช่น เชื่อมด้วยพันธะเอสเทอร์ (ester) และอีเทอร์ (ether) กับอะราบิโนไซแลน (arabinoxylan) และโพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) อื่น ๆ ที่ผนังเซลล์ของพืช[18] หรือเชื่อมต่อด้วยพันธะโควาเลนท์ (covalent) กับโมโนแซ็กคาไรด์ (monosaccharide) หรือแอลกอฮอล์ (alcohol)[19-20] เป็นต้น โดยกรดไฮดรอกซีซินนามิก (hydroxycinnamic acids) จะพบมากในพืชจำพวกธัญพืช เช่น ข้าวไรย์และข้าวบาร์เลย์[21]

สารประกอบฟลาโวนอยด์มีจำนวนประมาณ 6,000 ชนิด[22] อยู่ในกลุ่มของสารประกอบฟีนอลิก โครงสร้างพื้นฐานของสารประกอบฟลาโวนอยด์เป็นฟีนอลเบนโซไพโรน (phenylbenzopyrones) ประกอบด้วยคาร์บอน 15 ตัว (C_6 - C_3 - C_6) จัดเรียงเป็น 3 วงแหวน เรียกเป็นวงแหวน A, B, และ C โดย วงแหวน A และ B เป็นวงเบนซีน (benzene ring) ส่วนวงแหวน C เป็นวงแหวนเฮทเทอโรไซคลิก (heterocyclic pyran ring) ซึ่งอยู่ตรงกลางของโครงสร้างสารประกอบฟลา-โวนอยด์ แบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ ได้อีกหลายกลุ่มตามหมู่ฟังก์ชันที่แทนที่ในโครงสร้างหลัก เช่น ฟลาโวนอล (flavonol) ฟลาโวโนน (flavanone) และแอนโทไซยานิดิน (anthocyanidin) เป็นต้น ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไกลโคไซด์ที่พบได้ทั่วไปในสมุนไพรและเครื่องเทศอีกหลายชนิด[23] หน้าที่ของสารประกอบฟลาโวนอยด์ในพืช คือ ทำหน้าที่เป็นสารให้สีในพืชเพื่อลดความเข้มข้นของรังสีอัลตราไวโอเลตที่พืชได้รับ และช่วยตรึงไนโตรเจน โดยสารประกอบฟลาโวนอยด์ที่พบในพืชส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่มีโมเลกุลของน้ำตาลเข้ามาเกาะในรูปของบีตา-ไกลโคไซด์ (β-glycoside) เช่นเดียวกับสารประกอบฟีนอลิก

จากงานวิจัยทั้งในห้องปฏิบัติการและในสัตว์ พบว่า สารประกอบฟีนอลิกมีบทบาทสำคัญต่อสุขภาพของมนุษย์[24] โดยเชื้อแบคทีเรียภายในลำไส้สามารถสลายสารประกอบฟีนอลิกผ่านกระบวนการหมักและปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย[25] ดังนั้นการบริโภคผักและผลไม้จึงส่งผลดีต่อสุขภาพ และส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียที่มีประโยชน์ต่อลำไส้[26] นอกจากนั้นหลักฐานการศึกษาทางระบาดวิทยาพบว่า การบริโภคอาหารที่มีสารประกอบฟีนอลิกและมีเส้นใยในปริมาณสูง มีฤทธิ์ต้านการอักเสบและต้านเบาหวาน ควบคู่ไปกับการลดปัจจัยเสี่ยงของโรคหัวใจและหลอดเลือด และความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็ง[19,27- 28]

การหมักด้วยเชื้อแบคทีเรียแล็กติก

กระบวนการหมักเป็นเทคนิคการถนอมอาหารและการผลิตอาหารที่เก่าแก่ที่สุด และเป็นกระบวนการหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์อาหารหมัก เช่น ขนมปัง ชีส ซีอิ๊ว ไวน์ เบียร์ น้ำส้มสายชู เป็นต้น โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการหมักจะต้องมีความปลอดภัย ไม่ผลิตสารเมแทบอไลต์ที่เป็นพิษ และไม่มีผลกระทบต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์[29] โดยกิจกรรมของแบคทีเรียแล็กติกในกระบวนการหมักจะผลิตกรดแล็กติก ส่งผลให้อาหารมีค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้น สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียชนิดอื่นที่ก่อให้เกิดการเน่าเสีย หรือก่อโรคในอาหารที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค เช่น ยีสต์และเชื้อรา[30] แบคทีเรียแล็กติกถูกนำมาใช้เพื่อผลิตอาหารหมักหลายชนิด เช่น ในผลิตภัณฑ์นม เพื่อผลิตโยเกิร์ต ชีส เนย และครีมเปรี้ยว เป็นต้น[31] ซึ่งแบคทีเรียแล็กติกที่ใช้ในการหมัก ได้แก่ จีนัส *Lactococcus, Streptococcus, Lactobacillus, Leuconostoc, Pediococcus, Weissella* และ *Bifidobacterium* แบคทีเรียที่ผลิตกรดแล็กติกเป็นแบคทีเรียแกรมบวก ไม่สร้างสปอร์ และไม่สร้างเอนไซม์คะตาเลส (catalase) สามารถหมักน้ำตาลกลูโคส (glucose) น้ำตาลแล็กโทส (lactose) ให้เกิดกรดแล็กติก (lactic acid) และกรดอินทรีย์อื่น ได้แก่ กรดแอซีติก (acetic acid) และกรดโพรพิโอนิก (propionic acid) และสารอื่น เช่น ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) และไดอะซิติล (diacetyl)[32] ซึ่งทำให้เกิดกลิ่นและรสของอาหารหมัก นอกจากนั้นแบคทีเรียแล็กติกยังสามารถสร้างแบคเทอริโอซิน (bacteriocin) เพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ชนิดอื่นเติบโตได้ในสภาวะที่มีออกซิเจนไปจนถึงไม่ต้องการออกซิเจนในการเจริญ

การหมักอาหารถือเป็นส่วนหนึ่งของวัฒนธรรมมนุษย์ที่มีมานาน ในกระบวนการหมักจะอาศัยกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถผลิตกรดแล็กติก (*Lactobacillaceae*) ในการเปลี่ยนหรือย่อยสลายสารอาหารเพื่อเพิ่มหรือคงคุณภาพของอาหารและมีความปลอดภัย นอกจากนั้นอาหารหมักบางชนิดที่มีเชื้อจุลินทรีย์ที่มีชีวิตยังมีประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์[33-35] ดังงานวิจัยหลายเรื่องที่รายงานเกี่ยวกับการเปลี่ยนหรือสลายสารประกอบฟีนอลิกในพืชด้วยแบคทีเรียในลำไส้ที่ส่งผลดีต่อสุขภาพของมนุษย์[31,23] *Lactobacillaceae* เป็นกลุ่มของแบคทีเรียแล็กติกที่สามารถผลิตเอนไซม์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกในพืชให้มีฤทธิ์ทางชีวภาพมากขึ้น เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ รีดักเตส (reductase) เอสเทอเรส (esterase) และดีคาร์บอกซีเลส (decarboxylase) โดยเอนไซม์ที่เกิดจากเมแทบอลิซึมของเชื้อในระหว่างกระบวนการหมักขึ้นอยู่กับสารตั้งต้น หรือวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการหมักและสายพันธุ์ของเชื้อ เช่น เอนไซม์เฟอรูลิกแอซิดเอสเทอเรส (ferulic acid esterase) ที่เชื้อ *L. acidophilus* สร้างขึ้นในระหว่างกระบวนการหมักที่ใช้ชานอ้อยเป็นสารตั้งต้น (substrate) และเอนไซม์คลอโรจีนิกแอซิดเอสเทอเรส (chlorogenic acid esterase) เมื่อใช้เชื้อสายพันธุ์ *L.plantarum L.sakei*, *L.gasseri* และ *Limosilactobacillus* ใน

กระบวนการหมักที่ใช้ผักเคล ทานตะวัน และบรอกโคลีเป็นสารตั้งต้น[36-38] จากงานวิจัยข้างต้นพบว่า เอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญต่อการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกให้มีฤทธิ์ทางชีวภาพมากขึ้น คือ เอนไซม์กลุ่มไกลโคซิเดส (glycosidase) และเอสเทอเรส (esterase) ในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกรดซินาปิก (sinapic acid) โดยเอนไซม์ไฮดรอกซีซินนามิก รีดักเตส (hydroxyl-cinnamic reductase) ที่มีความจำเพาะต่อโครง-สร้างของกรดซินาปิก (sinapic acid) นอกจากนั้นยังมีเอนไซม์ที่ย่อยสลายพันธะของน้ำตาลที่เกาะอยู่กับโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิก และสารประกอบฟลาโวนอยด์ คือ บีตา-กลูโคซิเดส (ß-glucosidase)

การเพิ่มปริมาณสารพฤกษเคมีในผักและผลไม้ผ่านกระบวนการหมักด้วยแบคทีเรียแล็กติก

สำหรับการเพิ่มปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและสารประกอบฟลาโวนอยด์ มักเลือกใช้แบคทีเรียในสกุล *Lactiplantibacillus* และ *Lacticaseibacillus* ในระหว่างกระบวนการหมักจะพบว่า ความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลิกจะเพิ่มขึ้น ได้แก่ กรดแกลลิก (gallic acid) กรดไซรินจิก (syringic acid) กรดคาเฟอิก (caffeic acid) และคาเทชิน (catechin) ดังรายงานของ Wu และคณะ[39] ที่หมักน้ำองุ่นด้วยเชื้อ 2 ชนิด คือ *L. plantarum* และ *L. brevis* นาน 12 ชั่วโมง สามารถเพิ่มปริมาณโพรแอนโทไซยานิดิน (proanthocyanidin) บี1 บี2 คาเทชิน และอีพิคาเทชิน (epicatechin) ส่วนการหมักน้ำเอลเดอร์เบอร์รีและเชอร์รี พบปริมาณแอนโทไซยานินและสารประกอบฟลาโวนอยด์สูงขึ้น[40-41] การหมักน้ำแอปเปิลและมัลเบอร์รี ด้วยเชื้อ *L. plantarum* เพิ่มปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ด้วยกิจกรรมของเอนไซม์ฟลาโวนอยด์ไกลโคซิเดส (flavonoid glycosidase) จากเชื้อที่ผลิตขึ้นลดปริมาณไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ (cyanidin-3-O-glucoside) แต่ปริมาณไซยานิดิน (cyanidin) เพิ่มขึ้นด้วยกิจกรรมของเอนไซม์แอนโทไซยานินไกลโคซิเดส (anthocyanin glycosidase)[40] การเปลี่ยนโครงสร้างของกรดไฮดรอกซีซินนามิก (hydroxycinnamic acids) ด้วยกิจกรรมของเอนไซม์กรดไฮดรอกซี-ซินนามิก เอสเทอรเรส (hydroxycinnamic acid esterase) เช่น การเพิ่มปริมาณของกรดคลอโร-จีนิก (chlorogenic acid) ในมะละกอบดที่หมักด้วยเชื้อ *L. plantarum* และ *L. casei* นาน 48 ชั่วโมง และเมื่อเก็บรักษานาน 7 วัน ที่อุณหภูมิ 4°C[41] การหมักเนื้ออะโวคาโดบดด้วยเชื้อ *L. plantarum* AVEF17 ส่งผลให้ปริมาณกรดคาเฟอิก (caffeic acid) เพิ่มขึ้น และปริมาณของกรดโรสมา-รินิก (rosmarinic acid) ลดลง[42] นอกจากนั้นยังพบว่า เชื้อ *L. plantarum* ยังสามารถสังเคราะห์อนุพันธ์ของกรดฟีนอลิกในระหว่างการเกิดกระบวนการหมัก เช่น เอทิลฟีนอล (ethyl phenol) และเอทิลแคทีคอล (ethyl catechol) ในน้ำเชอร์รีและอะโวคาโดบดด้วยเอนไซม์ไวนิลฟีนอลรีดักเตส (vinyl phenol reductase) และกระบวนการกำจัดหมู่คาร์บอกซิลในโครงสร้างของกรดฟีนอลิก[43-44]

การหมักผักด้วยแบคทีเรียแล็กติก เช่น การหมักใบของ *Cudrania tricuspidate* ด้วยเชื้อ *L. plantarum* SDL 1413 สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของ flavonol-7-O-β-glucopyranosides และ kaempferol-3-O-β-glucopyranoside ด้วยเอนไซม์ไกลโคซิลไฮโดรเลส (glycosyl hydrolases) ให้อยู่ในรูปที่ไม่มีโมเลกุลของน้ำตาลมาเกาะ (aglycone) ซึ่งมีฤทธิ์ทางชีวภาพสูงกว่าในรูปที่มีน้ำตาลมาเกาะที่โครงสร้าง นอกจากนั้นงานวิจัยของ Xu และ Ji[45] รายงานว่า เอนไซม์บีตากลูโคโรนิเดส (β-glucuronidase) และบีตากลูโคซิเดส (β-glucosidase) ที่ได้จากการเชื้อ *L. brevis* และ *L. paracasei* ตามลำดับ ในระหว่างกระบวนการหมักพืชเครื่องเทศที่จัดอยู่ในตระกูลเดียวกันกับกะเพรา (*Scutellaria baicalensis*) และสารสกัดจากเคล[46] สามารถเพิ่มปริมาณไบคาลิน วาโกนิน (baicalein wogonin) และเคมเฟอรอล (kaempferol) ที่เป็นสารประกอบฟาโวนอยด์

ประโยชน์ของอาหารที่หมักด้วยแบคทีเรียแล็กติกต่อสุขภาพมนุษย์

อนุมูลอิสระ (free radicals) เป็นสารที่เกิดจากเมแทบอลิซึมของเซลล์ตามธรรมชาติ และสามารถถูกสร้างขึ้นมาอย่างต่อเนื่องจากภายนอก ได้แก่ การสัมผัสกับรังสี มลพิษทางอากาศ ภาวะออกซิเจนเป็นพิษ การสูบบุหรี่ และดื่มแอลกอฮอล์ เป็นต้น อนุมูลอิสระประกอบด้วยอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวหรือมากกว่าในบริเวณชั้นนอกสุดของเซลล์ มีความไม่เสถียร และไวต่อการทำปฏิกริยากับสารอื่น ทำให้เกิดการออกซิเดชันของสารประเภทไขมัน โปรตีน และดีเอ็นเอ ซึ่งร่างกายสามารถจัดการและกำจัดอนุมูลอิสระเหล่านี้ได้ตามธรรมชาติ แต่หากร่างกายไม่สามารถกำจัดอนุมูลอิสระเหล่านี้ให้หมดไป จะเกิดการสะสมอนุมูลอิสระในร่างกาย นำไปสู่การเกิดภาวะเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) ส่งผลต่อกระบวนการเสื่อมของเซลล์ และยังเกี่ยวข้องกับการเกิดโรคต่าง ๆ เช่น มะเร็ง โรคตับแข็ง และการอักเสบของอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกาย โดยสารที่สามารถจับกับอนุมูลอิสระเพื่อหยุดปฏิกิริยาเกิดอนุมูลอิสระนั้นเรียกว่า สารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งสารเหล่านี้มีทั้งเอนไซม์ เช่น เอนไซม์คะตาเลส เพอร์ออกซิเดส (catalase peroxidase) เป็นต้น และสารที่ไม่ใช่เอนไซม์ เช่น วิตามินอี วิตามินซี ฟลาโวนอยด์ และฟีนอลิก เป็นต้น โดยฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มจากกระบวการหมักด้วยแบคทีเรียแล็กติก เชื่อมโยงกับความสามารถในการเปลี่ยนสารประกอบฟีนอลิกให้อยู่ในรูปที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพด้วยเอนไซม์ที่เชื้อสร้างขึ้น เช่น รีดักเตสไฮโดรเลส (reductase hydrolase) และผ่านกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (decaboxylation) ของกรดฟีนอลิก ในระหว่างกระบวนการหมัก ซึ่งเมื่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกอยู่ในรูปที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพมากขึ้น จึงส่งผลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนั้นยังลดปริมาณสารต้านการดูดซึมแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น กรดไฟติก (phytic acid) และแทนนิน (tannin) ที่ยับยั้งการดูดซึมธาตุเหล็ก โปรตีน และน้ำตาลเชิงเดี่ยว[47-48] และยังเพิ่มความสามารถในการดูดซึมวิตามินเข้าสู่ร่างกาย ดังงานวิจัยที่ศึกษาปริมาณ

วิตามินซีที่เพิ่มขึ้นในน้ำบีตรูตที่ผ่านกระบวนการหมักตามธรรมชาติสูงกว่าน้ำบีตรูตที่ไม่ได้ผ่านการหมัก และปริมาณลดลงในระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากเอนไซม์แอสคอร์บิก ออกซิเดส (ascorbic oxidase) ที่ทำให้เกิดปฏิกริยาออกซิเดชันของวิตามินซี การหมักน้ำบลูเบอร์รีด้วยเชื้อ *L. plantarum* มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงขึ้น เมื่อทดสอบด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) และยับยั้งการเกิดอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (superoxide anion) และยังช่วยลดการเกิดภาวะเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) ในเซลล์ลำไส้ใหญ่ (Caco-2 cell)[49-50] นอกจากนั้นยังมีการศึกษาการหมักน้ำวูฟเบอรีจากเชื้อแบคทีเรียแล็กติกต่างสายพันธุ์กัน จำนวน 6 ชนิด หลังจากการหมักพบว่า ปริมาณกรดฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และวิตามินเพิ่มขึ้น พร้อมกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทดสอบฤทธิ์ด้วยวิธี DPPH ABTS และ FRAP[51-52] การเพิ่มปริมาณของสาร centaurin-3-O-rutin และ quercetin ในน้ำมัลเบอรรีที่ผ่านการหมักด้วยเชื้อ *L. plantarum* ที่อุณหภูมิ 37°C นาน 36 ชั่วโมง ส่งผลให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นตามไปด้วย[53]

บทสรุป

เนื่องจากปัจจุบัน ผู้คนให้ความสำคัญกับปัญหาสุขภาพของตนเองมากขึ้นเรื่อย ๆ อาหารหมักจากพืช เช่น ผักและผลไม้จึงมีบทบาทสำคัญในตลาดอาหารเพื่อสุขภาพในอนาคต และมีแนวโน้มสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน การหมักผักและผลไม้ด้วยเชื้อแบคทีเรียแล็กติกสามารถเพิ่มปริมาณสารพฤกษ-เคมีที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลาย และมีประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยชะลอและป้องกันการเกิดโรคต่าง ๆ ได้ นอกจากนั้นยังช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ ปรับปรุงคุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหาร และยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามกระบวนการหมักด้วยเชื้อแบคทีเรียยังต้องมีการทดสอบความปลอดภัยให้เป็นไปตามมาตรฐาน เพื่อให้ได้สารพฤกษเคมีหรือสารอื่น ๆ ที่มีผลดีต่อสุขภาพ เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพที่ปลอดภัยและมีผลต่อการชะลอการเกิดโรค เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคและความต้องการของตลาด

เอกสารอ้างอิง

1. Noman M, Shahid M, Ahmed T, Niazi MBK, Hussain S, Song F, Manzoor I. Use of biogenic copper nanoparticles synthesized from a native *Escherichia* sp. as photocatalysts for azo dye degradation and treatment of textile effluents. Environ Pollut. 2020;257:113514.
2. Yang XJ, Dang B, Fan MT. Free and bound phenolic compound content and antioxidant activity of different cultivated blue highland barley varieties from the Qinghai-Tibet Plateau. Molecules. 2018;23(4):879.
3. Roberts JL, Moreau R. Functional properties of spinach (*Spinacia oleracea* L.) phytochemicals and bioactives. Food Funct. 2016;7(8):3337-53.
4. Wang Y, Zhang C, Liu F, Jin Z, Xia X. Ecological succession and functional characteristics of lactic acid bacteria in traditional fermented foods. Crit Rev Food Sci Nutr. 2023;63(22):5841-55.

5. Mantzourani I, Terpou A, Alexopoulos A, Chondrou P, Galanis A, Bekatorou, A, et al., Application of a novel potential probiotic *Lactobacillus paracasei* strain isolated from kefir grains in the production of feta-type cheese. Microorganisms. 2018;6(4):121.
6. Agnieszka Z, Barbara S, Marcin B. Role of lactic acid bacteria in food preservation and safety. Foods. 2022;11:1283.
7. Quan Q, Liu W, Guo J, Ye M, Zhang J. Effect of six lactic acid bacteria strains on physicochemical characteristics, antioxidant activities and sensory properties of fermented orange juices. Foods. 2022;11:1920.
8. Szutowska J. Functional properties of lactic acid bacteria in fermented fruit and vegetable juices: A systematic literature review. Eur Food Res Technol. 2020;246:357-72.
9. Sharma R, Garg P, Kumar P, Bhatia SK, Kulshrestha S. Microbial fermentation and its role in quality improvement of fermented foods. Fermentation. 2020;6:106.
10. Melini F, Melini V, Luziatelli F, Ficca AG, Ruzzi M. Health-promoting components in fermented foods: An up-to-date systematic review. Nutrients. 2019;11:1189.
11. Atkin OK, Millar AH, Gardeström P, Day DA. Photosynthesis, carbohydrate metabolism and respiration in leaves of higher plants. Photosynthesis: physiology and metabolism 2000;153-75.
12. Crozier A, Clifford MN, Ashihara H. Plant secondary metabolites. Occurrence, Structure and Role in the Human Diet, Blackwell-Publishers. 2006.
13. Xiao J. Phytochemicals in food and nutrition. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2016;56:S1-S3.
14. Babenko LM, Smirnov OE, Romanenko KO, Trunova OK, Kosakivska IV. Phenolic compounds in plants: Biogenesis and functions. Ukr. Biochem. J. 2019;91(3):5-18.
15. Del Rio D, Rodriguez-Mateos A, Spencer JPE, Tognolini M, Borges G, Crozier A, Dietary (poly) phenolics in human health: structures, bioavailability, and evidence of protective effects against chronic diseases. Antioxid Redox Signal. 2013;18:1818-92.
16. Tsimogiannis D, Oreopoulou V. Classification of phenolic compounds in plants. In: Watson, R.R. (Ed.), Polyphenols in Plants. Elsevier, 2019. pp. 263-84.
17. Haminiuk CW, Maciel GM, Plata‐Oviedo MS, Peralta RM. Phenolic compounds in fruits–an overview. Int J Food Sci Technol. 2012;47(10):2023-44.
18. Vitaglione P, Napolitano A, Fogliano V. Cereal dietary fibre: a natural functional ingredient to deliver phenolic compounds into the gut. Trends Food Sci Technol. 2008;19:451-63.
19. Acosta-Estrada BA, Gutiˊerrez-Uribe JA, Serna-Saldívar SO. Bound phenolics in foods, a review. Food Chem. 2014;152:46-55.
20. Shahidi F, Yeo JD. Bioactivities of phenolics by focusing on suppression of chronic diseases: a review. Int J Mol Sci. 2018;19:1573.
21. Martínez-Sˊanchez A, Gil-Izquierdo A, Gil MI, Ferreres F. A comparative study of flavonoid compounds, vitamin C, and antioxidant properties of baby leaf Brassicaceae species. J Agric Food Chem. 2008;56:2330-40.
22. Vuolo MM, Lima VS, Junior MRM. (2019). Phenolic compounds: Structure, classification, and antioxidant power. In Bioactive compounds (pp. 33-50). Woodhead Publishing.
23. de la Rosa LA, Moreno-Escamilla JO, Rodrigo-García J, Alvarez-Parrilla E. (2019). Phenolic compounds. In Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables (pp. 253-271). Woodhead publishing.
24. Leonard W, Zhang P, Ying D, Fang Z. Hydroxycinnamic acids on gut microbiota and health. Compr. Rev. Food Sci Food Saf. 2021;20:710-37.
25. Loo YT, Howell K, Chan M, Zhang P, Ng K. Modulation of the human gut microbiota by phenolics and phenolic fiber-rich foods. Compr Rev Food Sci Food Saf. 2020;19:1268-98.

26. De Filippis F, Pellegrini N, Vannini L, Jeffery IB, La Storia A, Laghi L, et al., High-level adherence to a Mediterranean diet beneficially impacts the gut microbiota and associated metabolome. Gut. 2016;65:1812-21.
27. Ardona F, Andr´es-Lacueva C, Tulipani S, Tinahones FJ, Queipo-Ortu˜no MI, Benefits of polyphenols on gut microbiota and implications in human health. J Nutr Biochem. 2013;24:1415-22.
28. Vitaglione P, Mennella I, Ferracane R, Rivellese AA, Giacco R, Ercolini D, et al., Whole-grain wheat consumption reduces inflammation in a randomized controlled trial on overweight and obese subjects with unhealthy dietary and lifestyle behaviors: role of polyphenols bound to cereal dietary fiber. Am J Clin. 2015;101(2):251-61.
29. Muhialdin BJ, Saari N, Hussin ASM. Review on the biological detoxification of mycotoxins using lactic acid bacteria to enhance the sustainability of foods supply. Molecules. 2020;25:2655.
30. Ayivi RD, Gyawali R, Krastanov A, Aljaloud SO, Worku M, Tahergorabi R, et al., Lactic acid bacteria: Food safety and human health applications. Dairy. 2020;1:202-32.
31. Castellano P, Ibarreche MP, Massani MB, Fontana C, Vignolo GM. Strategies for pathogen biocontrol ising lactic acid bacteria and their metabolites: A focus on meat ecosystems and industrial environments. Microorganisms. 2017;5:38.
32. G¨anzle MG. Food fermentations for improved digestibility of plant foods – an essential ex situ digestion step in agricultural societies? Curr. Opin Food Sci. 2020;32:124-32.
33. Marco ML, Heeney D, Binda S, Cifelli CJ, Cotter PD, Foligné B, et al., Health benefits of fermented foods: microbiota and beyond. Curr Opin Biotechnol. 2017;44:94-102.
34. Wastyk HC, Fragiadakis GK, Perelman D, Dahan D, Merrill BD, Feiqiao BY, et al., Gut-microbiota-targeted diets modulate human immune status. Cell. 2021;184(16):4137-53.
35. Chia LW, Hornung BVH, Aalvink S, Schaap PJ, de Vos WM, Knol J, et al., Deciphering the trophic interaction between *Akkermansia muciniphila* and the butyrogenic gut commensal *Anaerostipes caccae* using a metatranscriptomic approach. Int J Gen Mol Microbiol. 2018;111:859-73.
36. Filannino P, Bai Y, Di Cagno R, Gobbetti M, G¨anzle MG. Metabolism of phenolic compounds by *Lactobacillus* spp. during fermentation of cherry juice and broccoli puree. Food Microbiol. 2015;46:272–79
37. Fritsch C, Heinrich V, Vogel RF, Toelstede S. Phenolic acid degradation potential and growth behavior of lactic acid bacteria in sunflower substrates. Food Microbiol. 2016;57:178-86.
38. Szutowska J, Gwiazdowska D, Rybicka I, Pawlak-Lema´nska K, Biega´nska-Marecik R, Gliszczy´nska-´Swigło A. Controlled fermentation of curly kale juice with the use of autochthonous starter cultures. Food Res Int. 2021;149:110674
39. Wu B, Liu J, Yang W, Zhang Q, Yang Z, Liu H, Lv Z, et al., Nutritional and flavor properties of grape juice as affected by fermentation with lactic acid bacteria. Int J Food Prop. 2021;24:906-22.
40. Ricci A, Cirlini M, Calani L, Bernin V, Neviani E, Del Rio D et al., In vitro metabolism of elderberry juice polyphenols by lactic acid bacteria. Food Chem. 2019;276:692-9.
41. Ricci A, Cirlini M, Maoloni A, Del Rio D, Calani L, Bernini V, et al., Use of dairy and plant-derived lactobacilli as starters for cherry juice fermentation. Nutrients. 2019;11:213.
42. Tang S, Cheng Y, Wu T, Hu F, Pan S, Xu X. Effect of *Lactobacillus plantarum* fermented mulberry pomace on antioxidant properties and fecal microbial community. Lebensm Wiss Technol. 2021;147:111651.
43. Mashitoa FM, Akinola SA, Manhevi VE, Garcia C, Remize F, Slabbert RM, et al., Influence of fermentation of pasteurised papaya puree with different lactic acid bacterial strains on quality and bioaccessibility of phenolic compounds during in vitro digestion. Foods. 2021;10:962.

44. Filannino P, Tlais AZA, Morozova K, Cavoski I, Scampicchio M, Gobbetti M, et al., Lactic acid fermentation enriches the profile of biogenic fatty acid derivatives of avocado fruit (*Persea americana* Mill.). Food Chem. 2020;317:126384.
45. Xu C, Ji G-E. Bioconversion of flavones during fermentation in milk containing *Scutellaria baicalensis* extract by *Lactobacillus brevis*. J Microbiol Biotechnol. 2013;23:1422-7.
46. Shimojo Y, Ozawa Y, Toda T, Igami K, Shimizu T. Probiotic *Lactobacillus paracasei* A221 improves the functionality and bioavailability of kaempferolglucoside in kale by its glucosidase activity. Sci Rep. 2018;8:9239.
47. Admassie M. A review on food fermentation and the biotechnology of lactic acid bacteria. World J Food Sci Technol. 2018;2:19–24.
48. Ligenza A, Jakubczyk KP, Kochman J, Janda K. Potencjał prozdrowotny i skład mikrobiologiczny fermentowanego napoju tepache. Med Ogólna Nauk Zdrowiu. 2021;27:272-6.
49. Li S, Tao Y, Li D, Wen G, Zhou J, Manickam S, et al., Fermentation of blueberry juices using autochthonous lactic acid bacteria isolated from fruit environment: Fermentation characteristics and evolution of phenolic profiles. Chemosphere. 2021;276.
50. Yu Q, Wang W, Liu X, Shen W, Ruixia Gu, Tang C. The Antioxidant Activity and Protection of probiotic bacteria in the In vitro gastrointestinal digestion of a blueberry juice and whey protein fermentation system. Fermentation. 2023;9(4):335
51. Wang Z, Lao J, Kang X, Xie Z, He W, Liu X, et al., Insights into the metabolic profiling of *Polygonati rhizoma* fermented by *Lactiplantibacillus plantarum* under aerobic and anaerobic conditions using a UHPLC-QE-MS/MS system. Front Nutr. 2023;26(10):1093761.
52. Aleman RS, Avila D, Avila A, Losso JN, Picha D, Xu Z, et al., Chemical characterization and impact of nipple Fruit (*Solanum mammosum*) on the characteristics of *Lactobacillus acidophilus* LA K. Fermentation. 2023;9:715.
53. Kwaw E, Ma Y, Tchabo W, Apaliya MT, Wu M, Sackey AS, et al., Effect of lactobacillus strains on phenolic profile, color attributes and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice. Food Chem. 2018;1(250):148-54.