



น้ำตาลทากาโทสและกรรมวิธีการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ณิรนุช มิละสิงห์^{1*} และ ปราโมทย์ คุวิจิตรจรรู²

¹ฝ่ายกระบวนการผลิตและแปรรูป สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

*ผู้ประพันธ์หลัก อีเมล: ifrnum@ku.ac.th

รับเมื่อ 31 กรกฎาคม 2568 แก้ไขเมื่อ 9 มกราคม 2569 ตอรับเมื่อ 6 มีนาคม 2569

จุดเด่น

- คุณสมบัติเด่นของทากาโทส
- ปฏิกริยาไอโซเมอไรเซชันในสภาวะเบส
- การพัฒนาเทคโนโลยีผลิตทากาโทสที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

บทคัดย่อ

ทากาโทส (D-Tagatose) เป็นน้ำตาลโมโนแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งที่เกิดเป็นน้ำตาลหายากเนื่องจากพบในธรรมชาติในปริมาณที่น้อยมาก มีคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพที่เป็นประโยชน์หลายประการ เป็นน้ำตาลที่มีระดับความหวานใกล้เคียงน้ำตาลทรายแต่ให้ค่าพลังงานต่ำ ไม่ก่อให้เกิดฟันผุ และมีผลกระทบต่อระดับน้ำตาลในเลือดและระดับอินซูลินน้อย ทากาโทสสามารถผลิตได้จากกาแล็คโทสผ่านปฏิกริยาไอโซเมอไรเซชัน ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการศึกษาแนวทางการผลิตทากาโทสที่มุ่งเน้นการใช้เทคนิคและตัวเร่งปฏิกริยาที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีความยั่งยืน ได้แก่ การใช้ของไหลกึ่งวิกฤต เช่น น้ำบัพเฟอร์ หรือสารละลายเอทานอล การใช้กรดอะมิโน เช่น อาร์จินีน รวมถึงการใช้วัสดุจากของเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น เปลือกหอยและเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกริยา ซึ่งแต่ละวิธีให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกริยาและอัตราการผลิตทากาโทสที่แตกต่างกัน ดังนั้นการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลจากงานวิจัยเหล่านี้จะเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนากระบวนการผลิตทากาโทสที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อรองรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรมในอนาคตอันจะนำไปสู่การเป็นแหล่งน้ำตาลเพื่อสุขภาพที่ยั่งยืนต่อไป

คำสำคัญ: ทากาโทส น้ำตาลหายาก ไอโซเมอไรเซชัน การผลิต ตัวเร่งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



Tagatose and its environmentally friendly production process

Neeranuch Milasing^{1*} and Pramote Khuwijitjaru²

¹Department of Food Processing and Preservation, Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University

²Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University

*Corresponding author, e-mail: ifrnum@ku.ac.th

Received 31 July 2025; **Revised**; 9 January 2026; **Accepted** 6 March 2026

Highlight

- Outstanding properties of tagatose
- Alkaline isomerization
- Development of environmentally friendly tagatose production technology

Abstract

D-Tagatose is a rare monosaccharide classified as a rare sugar due to its limited natural occurrence. It exhibits several beneficial chemical and health-related properties, including sweetness comparable to sucrose, low caloric value, non-cariogenicity, and minimal impacts on blood glucose and insulin levels. Tagatose can be produced from galactose through an isomerization reaction. Over the past decade, environmentally friendly approaches for tagatose production have been explored, with an emphasis on green and sustainable techniques and catalysts. These approaches include the use of subcritical fluids (e.g., water, buffer solutions, or aqueous ethanol), amino acids such as arginine, and naturally derived materials, including scallop shells and eggshells. These methods demonstrate varying catalytic efficiencies and tagatose production yields. Therefore, a systematic compilation and analysis of existing studies are essential for identifying promising pathways toward efficient, scalable,



and eco-friendly tagatose production, thereby contributing to the advancement of sustainable health-oriented sugar substitutes.

Keywords: Tagatose, Rare Sugar, Isomerization, Production, Environmentally Friendly Catalysts

บทนำ

ทากาโทส (D-Tagatose) เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดคีโตเฮกซูลอส (ketohexulose) มีสูตรเคมีคือ $C_6H_{12}O_6$ มีโครงสร้างทางเคมีเป็นไอโซเมอร์กับน้ำตาลกาแล็คโทสและเป็น C-4 อีพิเมอร์กับน้ำตาลฟรุกโทสดังแสดงใน Figure 1 ทากาโทสพบครั้งแรกจากยางที่ออกมาจากต้น *Sterculia setigera* ต่อมามีการตรวจพบในผลิตภัณฑ์จากนม เช่น ซีส โยเกิร์ต นมสเตอริไลซ์ และพบในผลไม้ เช่น แอปเปิ้ล ส้ม และสับปะรด ที่ปริมาณ 1 ถึง 3.5 กรัม/กิโลกรัม^(1,2) เนื่องจากพบได้น้อยมากในธรรมชาติจึงจัดเป็นน้ำตาลหายากชนิดหนึ่ง ทากาโทสให้ความหวานประมาณ 92% ของน้ำตาลซูโครส⁽³⁾ ไม่มี cooling effect หรือ after taste หลังการรับประทาน ให้พลังงานต่ำเพียง 1.5-3 กิโลแคลอรี/กรัม ทากาโทสมีค่าการละลายสูงที่

58% (w/w) จึงเหมาะที่จะใช้เป็นสารให้ความหวานหรือโยอาหาร⁽⁴⁾ มีสมบัติเชิงสุขภาพที่ดี ได้แก่ ค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ ไม่ก่อให้เกิดฟันผุ ส่งผลต่อระดับน้ำตาลในเลือดและระดับอินซูลินน้อย เนื่องจากการดูดซึมได้ไม่ดีในลำไส้เล็กจึงมีทากาโทสบางส่วนถูกถ่ายเทไปยังลำไส้ใหญ่จึงทำให้มีคุณสมบัติเป็นสารพรีไบโอติก สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียก่อโรคในอาหารอีกด้วย อีกทั้งยังมีศักยภาพในการปรับปรุงโปรไฟล์ไขมันในเลือด⁽⁵⁻⁷⁾ ทากาโทสได้รับการยอมรับให้ใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหารทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป เกาหลีใต้ นิวซีแลนด์ ออสเตรเลีย และญี่ปุ่น^(2, 8, 9) ปัจจุบันมีการใช้ทากาโทสทั้งในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น โยเกิร์ต ลูกอม ในผลิตภัณฑ์ยา และเครื่องสำอาง

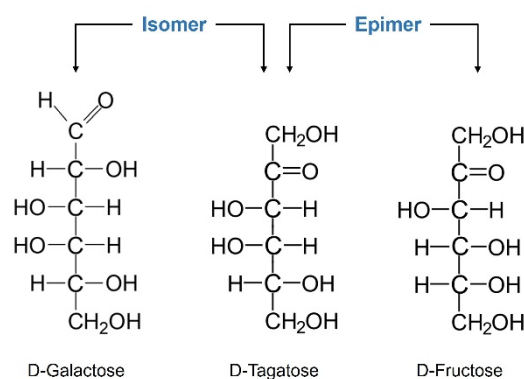


Figure 1 Chemical structures of D-galactose, D-tagatose, and D-fructose

ดัดแปลงจาก Khuwijitjaru และคณะ, 2018⁽¹⁰⁾



กรรมวิธีการผลิตทากาโทส

การผลิตทากาโทสสามารถทำได้ทั้งการใช้วิธีทางเคมีและเอนไซม์ สำหรับวิธีการผลิตโดยใช้เอนไซม์ส่วนใหญ่จะใช้เอนไซม์ L-arabinose isomerase เป็นเอนไซม์หลัก โดยใช้สารตั้งต้นคือกาแล็คโทส ยังมีการศึกษาเอนไซม์จากแหล่งที่มาแตกต่างกันในการผลิตทากาโทส ได้แก่เอนไซม์ tagatose 4-epimerase เอนไซม์ galactitol dehydrogenase และวิธีการใช้เอนไซม์ร่วมกันหลายชนิด เป็นต้น ซึ่งสามารถใช้สารตั้งต้นที่หลากหลาย เช่น ฟรุคโทส กาแล็คติทอล (galactitol) หรือสตาร์ชตามลำดับ การผลิตทากาโทสด้วยเอนไซม์ L-arabinose isomerase ได้ร้อยละการผลิตสูงสุดที่ 30-68% ขึ้นกับแหล่งที่มาของจุลินทรีย์^(6, 10, 11) การผลิตทากาโทสด้วยวิธีเอนไซม์มีข้อดีคือ เนื่องจากเอนไซม์มีความจำเพาะเจาะจง (selectivity) ต่อการผลิตทากาโทสสูงจึงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้น้อยมาก ใช้สภาวะในการผลิตที่ไม่รุนแรง อย่างไรก็ตามวิธีการผลิตนี้มีราคาแพงเนื่องจากเอนไซม์มีความเสถียรต่ออุณหภูมิการผลิตต่ำ เวลาในการผลิตนานตั้งแต่ 3-48 ชั่วโมง การนำเอนไซม์กลับมาใช้ซ้ำได้ยาก รวมไปถึงสารตั้งต้นบางชนิดมีราคาสูง โดยเฉพาะเอนไซม์ L-arabinose isomerase จากจุลินทรีย์ทนความร้อน (thermophiles) และจุลินทรีย์ทนความร้อนสูง (hyperthermophiles)

จำเป็นต้องใช้ไอออนโลหะเป็นโคแฟกเตอร์ เช่น แมงกานีส (Mn^{2+}) โคบอลต์ (Co^{2+}) ซึ่งการใช้โคบอลต์นั้นไม่อนุญาตให้ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร¹²

สำหรับวิธีการผลิตทากาโทสด้วยวิธีทางเคมีนั้นได้มีการจดสิทธิบัตรกระบวนการผลิตตั้งแต่ปี ค.ศ. 1992 โดยใช้แล็คโทสเป็นสารตั้งต้น ทำการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์แล็คเตสเพื่อให้ได้กาแล็คโทสและกลูโคส จากนั้นแยกกาแล็คโทสออกมาเพื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับแคลเซียมคลอไรด์ ที่ pH 12.5 โดยใช้เวลากวนผสม 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน calcium hydroxide - tagatose ขึ้น จากนั้นทำให้เป็นกลางโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อแยกทากาโทส แล้วเข้าสู่ขั้นตอนการทำบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการกำจัดเกลือแร่ (demineralization) การแยกส่วนด้วยโครมาโทกราฟี และกระบวนการตกผลึกเป็นขั้นตอนสุดท้าย วิธีนี้ทำให้ได้ร้อยละการผลิตทากาโทสสูงถึง 72%⁽¹³⁾ แต่วิธีเคมีทำให้เกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้ในปริมาณมาก และเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาแบบสุ่มทำให้ปฏิกิริยามีความจำเพาะเจาะจงต่ำ ส่งผลให้กระบวนการทำบริสุทธิ์มีขั้นตอนที่ซับซ้อน⁽¹⁴⁾ กรรมวิธีการผลิตทากาโทสสามารถสรุปได้ดังแสดงใน Figure 2

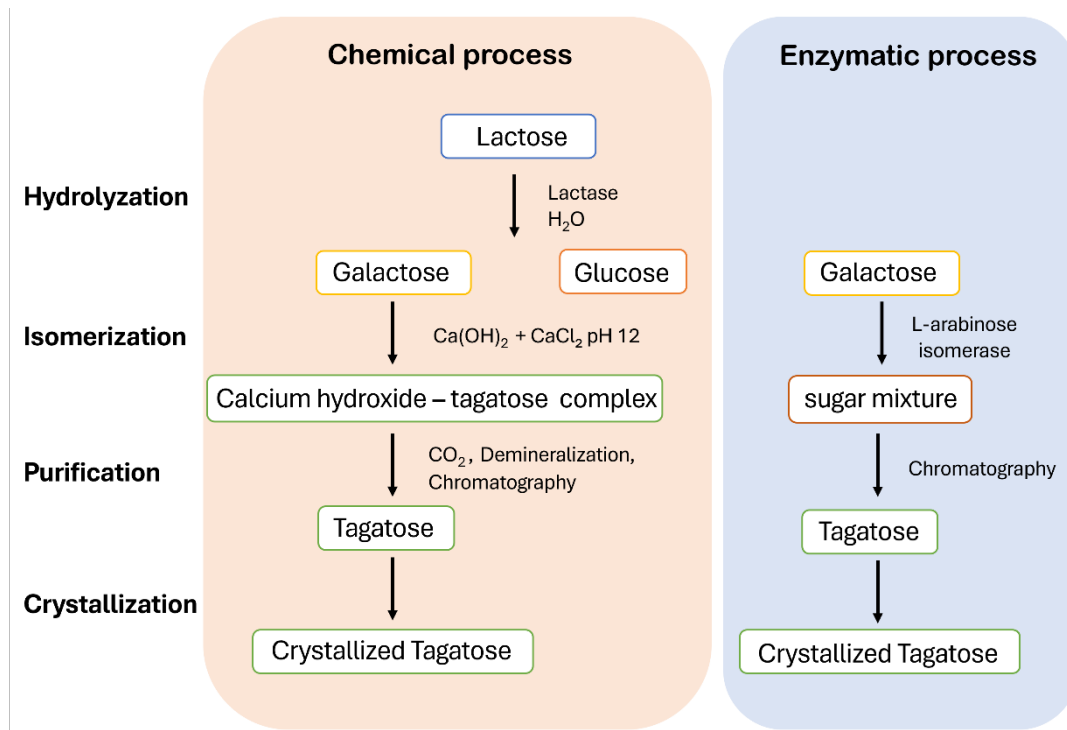


Figure 2 Summary Schematic representation of tagatose production processes

ดัดแปลงจาก O'Brien-Nabors, 2016⁽¹⁵⁾

กลไกการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันในสภาวะเบส

(Alkaline isomerization)

ในสภาวะเบสกาแล็คโทสเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นทากาโทสผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงตามผู้ค้นพบคือ Lobry de Bruyn-Alberda van Ekenstein (LBAE) transformation ปฏิกิริยาเริ่มต้นจากกาแล็คโทส (น้ำตาลอัลโดส) สูญเสียประจุบวก (deprotonate) ให้กับไฮดรอกไซด์ในสารละลายที่มีความเป็นเบส เกิดเป็นสารตัวกลาง 1,2-enediolate ซึ่งเป็น

ตัวกลางที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน สารตัวกลางนี้จะรับไฮโดรเจนและเปลี่ยนโครงสร้างเป็นทากาโทส (น้ำตาลคีโตส) หรือทาลอส (น้ำตาลอัลโดส) ที่เป็นอิมเมอร์ของกาแล็คโทส ขณะเดียวกันซอร์โบส (น้ำตาลคีโตส) ซึ่งเป็นอิมเมอร์ของทากาโทสก็สามารถเกิดขึ้นได้ผ่านสารตัวกลาง 2,3-enediolate ทั้งทาลอสและซอร์โบสล้วนจัดเป็นน้ำตาลหายากเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันในสภาวะเบสนี้จะเกิดทากาโทสเป็นผลิตภัณฑ์หลัก แผนผังการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงใน Figure 3

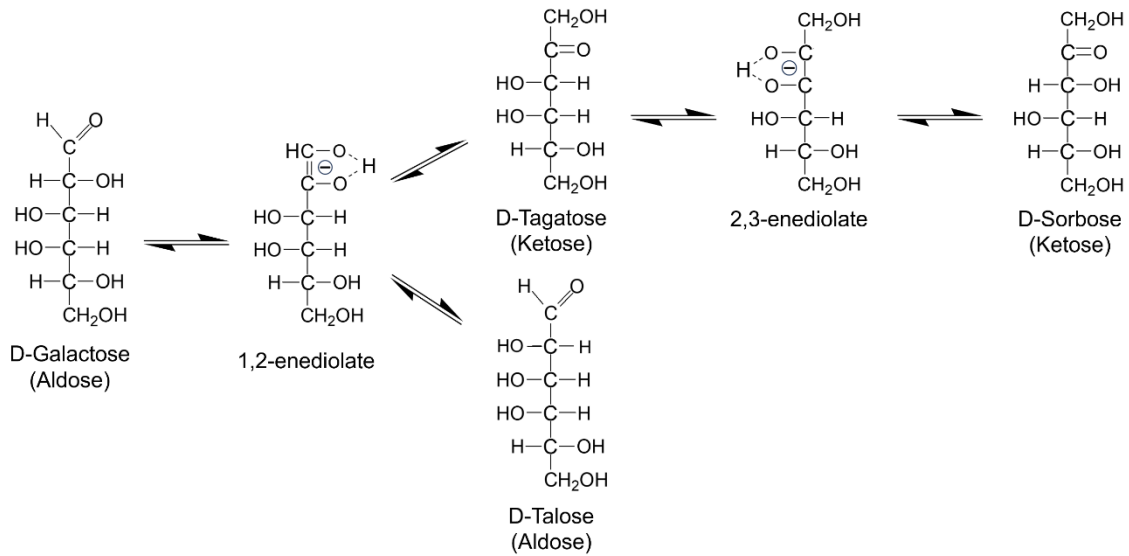


Figure 3 Base-catalyzed isomerization of galactose to tagatose via an enediolate intermediate

ดัดแปลงจาก Drabo และ Delidovich, 2018⁽¹⁴⁾

กรรมวิธีการผลิตโดยใช้ตัวเร่งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

กระบวนการเคมีสีเขียว (green chemistry) และเคมีที่ยั่งยืน (sustainable chemistry) หมายถึง กระบวนการและสารเคมีที่ปลอดภัยและไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม⁽¹⁶⁾ เพื่อการผลิตที่ประหยัดทั้งต้นทุนและเวลา การผลิตใน

ระดับอุตสาหกรรมมักมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งอาจจะก่อให้เกิดมลพิษขึ้น จึงเกิดแนวคิดการใช้ตัวเร่งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมขึ้น โดยสำหรับการผลิตทาโกโทสสามารถสรุปกรรมวิธีเทคนิคและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมดังแสดงใน Table 1

Table 1. Tagatose sugar production process using environmentally friendly catalysts

| Techniques | Catalysts | Reaction conditions, (Galactose concentration, temperature, reaction time) | Maximal tagatose yield (%) | References |
|------------------------|---|--|----------------------------------|------------|
| Subcritical fluid | Ethanol solution 80% (v/v) | 0.5%, 180 °C, 500 s | 24 | (17) |
| | Phosphate buffer 10 mM pH 7.0 | 5%, 160 °C, 300 s | 14 | (18) |
| | Phosphate buffer 10 mM pH 7.0 | 5%, 140 °C, 300 s | 13.1 | (19) |
| | Phosphate buffer 10 mM pH 7.0 + ethanol 60% (w/w) | 5%, 140 °C, 300 s | 16 | (20) |
| Subcritical buffers | Phosphate buffer 0.5M pH 7.5 | 10%, 110 °C, 45 min | 16 | (14) |
| | Carbonate buffer 0.5M pH 11.0 | 5%, 60 °C, 60 min | 15.2 | (21) |
| Amino acid | Arginine 0.15 mol/mol- gal | 5%, 120 °C, 4 min | 17.3 | (23) |
| | Arginine 0.01 mol/L | 0.2 M, 110 °C, 30 min | 16 | (24) |
| Egg shell | 10% Egg shell | 5%, 120 °C, 120 min | 15.7 | (25) |
| Scallop shell | 1% Scallop shell powder | 0.2 M, 700 W*, 105 s | 18 | (26) |

Note: *Power (watts)

เทคนิคของไหลกึ่งวิกฤต

ของไหลกึ่งวิกฤต (subcritical fluid) หมายถึง น้ำหรือตัวทำละลายที่อยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิและความดันสูงกว่าจุดเดือดแต่ไม่ถึงจุดวิกฤตของสารนั้น ๆ ในปี ค.ศ. 2015 Gao และคณะ⁽¹⁷⁾ ศึกษาการผลิตทากาโทสโดยใช้สารละลายเอทานอลกึ่งวิกฤต (subcritical aqueous ethanol) แบบต่อเนื่อง พบว่าได้ผลผลิต (yield) ทากาโทสสูงสุดถึง 24% โดยใช้เอทานอล 80% (v/v) ที่อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา 500 วินาที และพบว่ากำลังการผลิต (productivity) เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกาแล็คโทสเริ่มต้นและสูงสุดที่ 80 กรัม/ลิตร/ชม. เมื่อใช้ความเข้มข้นกาแล็คโทสเริ่มต้น 8.5% (w/v) ในเอทานอล 60% (v/v) อุณหภูมิ 180 °C และเวลาที่ทำปฏิกิริยา 500 วินาที

ต่อมาในปี ค.ศ. 2020 Onishi และคณะ⁽¹⁸⁾ ได้ศึกษาการเกิดไอโซเมอไรเซชันในน้ำกึ่งวิกฤตแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 300 วินาที พบว่าได้ผลผลิตทากาโทสน้อยมากเพียง 0.6% อย่างไรก็ตามสามารถเพิ่มผลผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญเป็น 14% โดยการใช้สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (10 mM) pH 7.0⁽¹⁸⁾ นอกจากนี้เมื่อปรับลดอุณหภูมิทำปฏิกิริยาลงเป็น 140 °C พบว่าผลผลิตทากาโทสลดลงเพียงเล็กน้อยคือ 13.1%⁽¹⁹⁾

อีกทั้งยังมีการศึกษาผลของการใช้เอทานอลร่วมกับฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (10 mM) pH 7.0 ในสภาวะของไหลกึ่งวิกฤต พบว่าที่เอทานอลความเข้มข้น 60% (w/w) ทำให้เพิ่มผลผลิตทากาโทสเพิ่มขึ้นเป็น 16% เมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 300 วินาที⁽²⁰⁾ ซึ่งให้ค่าเท่ากับงานวิจัยของ Drabo และ Delidovich (16%) ที่ใช้สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.5 M, pH 7.5 ที่อุณหภูมิ 110 °C เวลา 45 นาที⁽¹⁴⁾ และใกล้เคียงกับการใช้สารละลายคาร์บอนเนตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.5 M, pH 10.4 ที่อุณหภูมิ 60 °C เวลา 60 นาที ซึ่งให้ผลผลิต 15.2%⁽²¹⁾

กรดอะมิโนอาร์จินีน

ในปี ค.ศ. 2016 Yang และคณะ⁽²²⁾ ได้นำเสนอการใช้กรดอะมิโนกลุ่มที่เป็นเบส (basic amino acid) ซึ่งได้แก่ ไลซีน (pKa = 10.5) ฮีสทีดีน (pKa = 6.0) และอาร์จินีน (pKa = 12.5) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันกลูโคสเป็นฟรุกโทส พบว่าอาร์จินีนมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยสามารถให้ผลผลิตฟรุกโทสได้สูงถึง 31% และมีความจำเพาะเจาะจงสูงถึง 76%

ต่อมาในปี ค.ศ. 2023 Milasing และคณะ⁽²³⁾ ได้ริเริ่มการผลิตทากาโทสจากกาแล็คโทสโดยใช้อาร์จินีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าทากาโทสมี

ปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิ, ระยะเวลา, และ ความเข้มข้นของอาร์จินีน พบதாகาโทสสูงสุดที่ 17.3% ที่สภาวะอุณหภูมิ 120 °C ความเข้มข้น อาร์จินีน 0.15 โมล/โมลกาแล็คโทสและเวลา 20 นาที อีกทั้งมีกำลังการผลิตต่อชั่วโมงที่ 278 กรัม/ ลิตร/ชม. ที่สภาวะกาแล็คโทสเริ่มต้น 20% อุณหภูมิ 120 °C ความเข้มข้นอาร์จินีน 0.1 โมล/ โมลกาแล็คโทสเป็นเวลา 4 นาที ซึ่งสูงกว่าการใช้ เอทานอลกึ่งวิกฤตตั้งที่กล่าวมาข้างต้น⁽¹⁷⁾ และยัง สูงกว่าวิธีทางเคมีที่มีกำลังการผลิต 48 กรัม/ลิตร/ ชม. ขณะที่วิธีเอนไซม์มีกำลังการผลิตที่ 15.3 กรัม/ ลิตร/ชม. สำหรับการทำปฏิกิริยา 20 ชม. และ 6.66 กรัม/ลิตร/ชม. สำหรับการทำปฏิกิริยา 48 ชม.^(17, 23)

Kobayashi และคณะ⁽²⁴⁾ ได้ศึกษาการใช้ ตัวเร่งอาร์จินีนความเข้มข้น 0.01 โมล/ลิตร ร่วมกับการใช้เทคนิคน้ำกึ่งวิกฤตแบบกะ พบว่า สามารถผลิตதாகาโทสได้ใกล้เคียงกันที่ 16% ใน สภาวะอุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 30 นาที

อย่างไรก็ตามการใช้อาร์จินีนเป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยามีข้อด้อยคือ เมื่อให้ความร้อนกาแล็คโทส ที่เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ร่วมกับกรดอะมิโนทำให้ไม่ สามารถหลีกเลี่ยงปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้ ส่งผลให้ สารละลายหลังการทำปฏิกิริยาเป็นสีเหลือง-

สีน้ำตาลได้ง่าย จึงอาจส่งผลให้ต้องเพิ่มขั้นตอน กำจัดสีในกระบวนการทำให้บริสุทธิ์

เปลือกไข่/เปลือกหอย

ในปี ค.ศ. 2024 Futamata และคณะ⁽²⁵⁾ ได้ทดลองใช้ผงเปลือกไข่เป็นตัวเร่งวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalyst) ในปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันกาแล็คโทส ซึ่งมีจุดเด่นคือสามารถแยก ออกได้ง่ายเนื่องจากไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับ สารละลาย พบว่ามีประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาสำหรับการผลิตதாகาโทส เนื่องจากใน เปลือกไข่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียม คาร์บอเนตที่มีคุณสมบัติเป็นเบส และสามารถทำ ให้กรดที่เกิดขึ้นในระบบเป็นกลางจึงส่งเสริมการ เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้ โดยที่สภาวะ อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 120 นาที ได้ผลผลิต ทากาโทส 15.7% อีกทั้งยังมีความจำเพาะเจาะจงสูง ถึง 65-80% และสามารถนำตัวเร่งกลับมาใช้ซ้ำได้

นอกจากนี้ในปีค.ศ. 2024 Watanabe และ คณะ⁽²⁶⁾ ได้ศึกษาความสามารถในการใช้ผงเปลือก หอย (scallop shell powder) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ พบว่าให้ผลผลิต ทากาโทส 18% ซึ่งใช้เวลาให้ความร้อนสั้นมาก เพียง 105 วินาที วิธีนี้จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ

ในการผลิตทากาโทสที่รวดเร็วมากยิ่งขึ้น แม้ว่าในปัจจุบันจะยังไม่พบการนำตัวเร่งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมไปใช้ในการผลิตทากาโทสในระดับอุตสาหกรรม แต่งานวิจัยเหล่านี้สามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานและชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ เป็นทางเลือกให้กับผู้ประกอบการที่สนใจแนวคิดการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อให้การผลิตทากาโทสที่เป็นน้ำตาลที่ดีต่อสุขภาพมาจากกระบวนการที่ดีต่อโลก

บทสรุป

กระบวนการและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีประสิทธิภาพที่ดีในการผลิต

ทากาโทส ได้รับการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลายในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดกระบวนการผลิตที่ยั่งยืน เป็นแนวทางที่สามารถพัฒนาไปสู่การใช้ตัวเร่งที่นำของเหลือทิ้งมาใช้และยังมีจุดเด่นคือสามารถแยกออกและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ อีกทั้งกระบวนการเหล่านี้ยังสามารถใช้ได้กับการผลิตน้ำตาลหลายชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตามต้องมีการศึกษากระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเหล่านี้ในระดับการผลิตที่ใหญ่ขึ้นไปจนถึงระดับอุตสาหกรรม และยังคงต้องคำนึงถึงด้านต้นทุน พลังงาน และขั้นตอนการทำ ให้บริสุทธิ์ทากาโทสต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Skytte UP. Tagatose. In: Helen M, editor. Sweeteners and Sugar Alternatives in Food Technology: Wiley-Blackwell; 2006. p. 262-94.
2. Vera C, Illanes A. Chapter 3 - Lactose-derived nondigestible oligosaccharides and other high added-value products. In: Illanes A, Guerrero C, Vera C, Wilson L, Conejeros R, Scott F, editors. Lactose-Derived Prebiotics. San Diego: Academic Press; 2016. p. 87-110.
3. Levin GV, Zehner LR, Saunders JP, Beadle JR. Sugar substitutes: their energy values, bulk characteristics, and potential health benefits. *Am J Clin Nutr.* 1995;62(5):1161S-8S.
4. Oh DK. Tagatose: properties, applications, and biotechnological processes. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2007;76(1):1-8.
5. Bautista DA, Pegg RB, Shand PJ. Effect of L-glucose and D-tagatose on bacterial growth in media and a cooked cured ham product. *J Food Prot.* 2000;63(1):71-7.
6. Roy S, Chikkerur J, Roy SC, Dhali A, Kolte AP, Sridhar M, et al. Tagatose as a potential nutraceutical: Production, properties, biological roles, and applications. *J Food Sci.* 2018;83(11):2699-709.
7. Ortiz AdC, Fideles SOM, Reis CHB, Pagani BT, Bueno LMM, Moscatel MBM, et al. D-Tagatose: A rare sugar with functional properties and antimicrobial potential against oral species. *Nutrients.* 2024;16(12):1943.
8. Guerrero-Wyss M, Durán Agüero S, Angarita Dávila L. D-Tagatose is a promising sweetener to control glycaemia: A new functional food. *Biomed Res Int.* 2018;2018:8718053.
9. Zhang H, Mao X, Lu Z, Gao C, Chen Z, Liu J. Advances in biological production of D-tagatose: A comprehensive overview. *Fermentation.* 2025;11(2):46.



10. Khuwijitjaru P, Milasing N, Adachi S. Production of D-tagatose: A review with emphasis on subcritical fluid treatment. *Science, Engineering and Health Studies*. 2018;12(3):159-67.
11. Miao P, Wang Q, Ren K, Zhang Z, Xu T, Xu M, et al. Advances and prospects of D-tagatose production based on a biocatalytic isomerization pathway. *Catalysts*. 2023;13(11).
12. Zhao J, Wang Z, Jin Q, Feng D, Lee J. Isomerization of Galactose to Tagatose: Recent Advances in Non-enzymatic Isomerization. *J Agric Food Chem*. 2023;71(10):4228-34.
13. Beadle JR, Saunders JP, Wajda Jr TJ, inventors. Process for manufacturing tagatose. United States Patent US5078796. 1992.
14. Drabo P, Delidovich I. Catalytic isomerization of galactose into tagatose in the presence of bases and Lewis acids. *Catal Commun*. 2018;107:24-8.
15. O'Brien-Nabors L. *Alternative Sweeteners*: CRC Press; 2016.
16. Kakaei K, Esrafil MD, Ehsani A. Chapter 1 - Introduction to catalysis. In: Kakaei K, Esrafil MD, Ehsani A, editors. *Interface Science and Technology*. 27: Elsevier; 2019. p. 1-21.
17. Gao D-M, Kobayashi T, Adachi S. Production of rare sugars from common sugars in subcritical aqueous ethanol. *Food Chem*. 2015;175:465-70.
18. Onishi Y, Furushiro Y, Hirayama Y, Adachi S, Kobayashi T. Production of tagatose and talose through isomerization of galactose in a buffer solution under subcritical water conditions. *Carbohydr Res*. 2020;493:108031.
19. Onishi Y, Adachi S, Tani F, Kobayashi T. Insight into formation of various rare sugars in compressed hot phosphate buffer. *J Supercrit Fluids*. 2022;186:105621.
20. Onishi Y, Furushiro Y, Adachi S, Kobayashi T. Isomerization and epimerization of galactose to tagatose and talose in a phosphate buffer containing organic solvents under subcritical water conditions. *Ind Eng Chem Res* 2021;60(14):5084-9.
21. Milasing N, Toussaint V, Hametner C, Khuwijitjaru P, Delidovich I. Enhanced catalytic activity of carbonate buffer for isomerization of D-galactose into D-tagatose. *Food Chem*. 2025;476:143398.
22. Yang Q, Sherbahn M, Runge T. Basic amino acids as green catalysts for isomerization of glucose to fructose in water. *ACS Sustain Chem Eng*. 2016;4(6):3526-34.
23. Milasing N, Khuwijitjaru P, Adachi S. Isomerization of galactose to tagatose using arginine as a green catalyst. *Food Chem*. 2023;398:133858.
24. Kobayashi T, Khuwijitjaru P, Adachi S. Isomerization and epimerization of glucose and galactose in arginine solution and phosphate buffer under subcritical fluid conditions. *Biosci Biotechnol Biochem*. 2023;87(7):758-64.
25. Futamata S, Onishi Y, Adachi S, Khuwijitjaru P, Watanabe Y, Tani F, et al. Efficient synthesis of rare sugars from galactose in hot compressed water using eggshells as an environmentally friendly catalyst. *Bioresour Technol*. 2024;399:130642.
26. Watanabe Y, Kobayashi T, Khuwijitjaru P, Adachi S. Isomerization of various aldo-saccharides to the corresponding keto-saccharides under microwave heating using uncalcined scallop shell powder as a catalyst. *Food Sci Technol Res*. 2024;30(3):305-11.