

PERAN ENZIM AMILASE PADA TAHAPAN PRODUKSI SIRUP GLUKOSA: STUDI LITERATUR

Sela Marselina Waruwu¹, Kadini Kurniawati Halawa², Desta Mawati Gulo³,
Setiawan Lase⁴, Novelina Andriani Zega⁵

^{1, 2, 3, 4, 5}Universitas Nias, Jl. Yos Sudarso No. 118/E-S, Gunungsitoli, Sumatera Utara, Indonesia
Email: selawaruwu03@gmail.com

Article History

Received: 13-01-2026

Revision: 23-01-2026

Accepted: 26-01-2026

Published: 29-01-2026

Abstract. Glucose syrup is a product of starch hydrolysis that is widely used in the food industry and other industrial sectors. Currently, the production of glucose syrup is predominantly carried out through enzymatic processes due to their higher efficiency and environmental friendliness. Amylase enzymes play a crucial role in converting starch into simple sugars. This study aims to describe the role of amylase enzymes at each stage of glucose syrup production based on a literature review. The research method employed is descriptive research using a literature study approach, involving data collection from scientific journals, books, and other relevant literature sources. The data were qualitatively analyzed by examining the function of amylase enzymes during the liquefaction and saccharification stages. The results of the review indicate that α -amylase plays a role in the liquefaction stage by breaking down starch into dextrins, while glucoamylase functions in the saccharification stage by converting dextrins into glucose. The use of amylase enzymes can enhance process efficiency and produce glucose syrup with a higher glucose content. Therefore, amylase enzymes play an essential role in determining the success of enzymatic glucose syrup production.

Keywords: Amylase Enzyme, Glucose Syrup, Starch, Liquefaction, Saccharification

Abstrak. Sirup glukosa merupakan produk hasil hidrolisis pati yang banyak dimanfaatkan dalam industri pangan dan industri lainnya. Produksi sirup glukosa saat ini lebih banyak dilakukan secara enzimatik karena prosesnya lebih efisien dan ramah lingkungan. Enzim amilase memiliki peran penting dalam mengubah pati menjadi gula sederhana. Penelitian ini bertujuan untuk mendeskripsikan peran enzim amilase pada setiap tahapan produksi sirup glukosa berdasarkan studi literatur. Metode penelitian yang digunakan adalah penelitian deskriptif dengan pendekatan studi literatur, melalui pengumpulan data dari jurnal ilmiah, buku, dan sumber pustaka lain yang relevan. Data dianalisis secara kualitatif dengan mengkaji fungsi enzim amilase pada tahap likuefaksi dan sakarisasi. Hasil kajian menunjukkan bahwa enzim α -amilase berperan dalam tahap likuefaksi dengan memecah pati menjadi dekstrin, sedangkan glucoamilase berperan pada tahap sakarisasi dengan mengubah dekstrin menjadi glukosa. Penggunaan enzim amilase dapat meningkatkan efisiensi proses produksi dan menghasilkan sirup glukosa dengan kadar glukosa yang lebih tinggi. Dengan demikian, enzim amilase berperan penting dalam menentukan keberhasilan proses produksi sirup glukosa secara enzimatik.

Kata Kunci: Enzim Amilase, Sirup Glukosa, Pati, Likuefaksi, Sakarisasi

How to Cite: Waruwu, S. M., Halawa, K. K., Gulo, D. M., Lase, S., & Zega, N. A. (2026). Peran Enzim Amilase pada Tahapan Produksi Sirup Glukosa: Studi Literatur. *Indo-MathEdu Intellectuals Journal*, 7 (1), 979-986. <http://doi.org/10.54373/imeij.v7i1.5038>

PENDAHULUAN

Sirup glukosa merupakan salah satu produk hasil hidrolisis pati yang memiliki peran strategis dalam berbagai sektor industri, terutama industri pangan, minuman, dan farmasi. Sirup ini banyak digunakan sebagai pemanis, pengatur tekstur, serta bahan antara dalam produksi maltodekstrin dan high-fructose syrup, karena memiliki kestabilan fisik yang baik dan profil rasa yang konsisten (BeMiller & Whistler, 2019). Dalam satu dekade terakhir, permintaan global terhadap sirup glukosa menunjukkan tren peningkatan yang signifikan seiring dengan berkembangnya industri makanan olahan dan meningkatnya kebutuhan akan bahan baku fungsional yang seragam dan mudah dikontrol kualitasnya (Zhang et al., 2021).

Secara konvensional, sirup glukosa dapat diproduksi melalui hidrolisis asam maupun hidrolisis enzimatik. Namun, metode hidrolisis asam memiliki sejumlah keterbatasan, antara lain membutuhkan suhu dan tekanan tinggi, bersifat korosif terhadap peralatan, serta berpotensi menghasilkan produk samping yang menurunkan kualitas sirup, seperti pembentukan warna gelap dan senyawa degradasi gula (Wang et al., 2020). Oleh karena itu, pendekatan enzimatik semakin banyak dipilih karena mampu berlangsung pada kondisi operasi yang lebih ringan, ramah lingkungan, dan menghasilkan produk dengan kemurnian glukosa yang lebih tinggi serta karakteristik fisiko-kimia yang lebih terkontrol (Pandey et al., 2022).

Proses produksi sirup glukosa secara enzimatik umumnya melibatkan dua tahap utama, yaitu likuifikasi dan sakarifikasi. Tahap likuifikasi menggunakan enzim *α -amilase* untuk memecah pati menjadi dekstrin dengan penurunan viskositas yang signifikan dan peningkatan nilai *Dextrose Equivalent* (DE) awal. Tahap ini biasanya berlangsung pada suhu tinggi sekitar 90–95°C dalam waktu relatif singkat (Kurdi et al., 2021). Selanjutnya, tahap sakarifikasi menggunakan enzim glukamilase untuk menghidrolisis dekstrin menjadi glukosa bebas dengan nilai DE akhir yang tinggi, umumnya ≥ 90 , pada kondisi suhu dan pH yang lebih rendah (Sharma & Satyanarayana, 2020). Keberhasilan kedua tahap tersebut sangat bergantung pada kesesuaian kondisi reaksi, dosis enzim, serta karakteristik bahan baku pati yang digunakan.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa efisiensi konversi pati menjadi sirup glukosa sangat dipengaruhi oleh jenis bahan baku, seperti pati singkong, sagu, atau ubi jalar, yang memiliki perbedaan struktur granula dan komposisi amilosa–amilopektin (Nurhayati et al., 2023). Selain itu, kualitas akhir sirup glukosa ditentukan oleh parameter fisiko-kimia, antara lain kejernihan, warna, kadar air, nilai DE, dan stabilitas selama penyimpanan, yang semuanya menjadi indikator penting dalam penerimaan produk oleh industri pengguna (Singh et al., 2022). Dalam perkembangan terbaru, tantangan utama pada periode 2021–2025 berfokus pada upaya menekan biaya produksi melalui pencarian sumber enzim yang lebih ekonomis dan

berkelanjutan. Pemanfaatan mikroba lokal sebagai penghasil enzim amilase dan glucoamilase menjadi alternatif yang menjanjikan, karena berpotensi menurunkan biaya produksi, meningkatkan kesesuaian dengan substrat lokal, serta mendukung prinsip bioteknologi berkelanjutan (Rahman et al., 2024). Meskipun demikian, informasi yang terintegrasi mengenai mekanisme kerja enzim, kondisi optimal proses, serta dampaknya terhadap efisiensi dan kualitas sirup glukosa masih tersebar dan memerlukan kajian yang lebih sistematis.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif peran enzim amilase dalam proses produksi sirup glukosa, meliputi mekanisme kerja pada tahap likuifikasi dan sakarifikasi, kondisi operasi optimal, serta pengaruhnya terhadap efisiensi konversi pati dan kualitas produk akhir, sebagai dasar pengembangan teknologi produksi sirup glukosa yang efisien, berkelanjutan, dan sesuai dengan kebutuhan industri modern.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif dengan pendekatan studi literatur yang bertujuan untuk mengkaji dan mendeskripsikan peran enzim amilase pada setiap tahapan produksi sirup glukosa. Pendekatan deskriptif digunakan karena penelitian ini tidak melibatkan perlakuan eksperimen maupun manipulasi variabel, melainkan berfokus pada pemaparan dan analisis fenomena ilmiah berdasarkan data sekunder yang bersumber dari publikasi akademik. Studi literatur dipilih untuk memperoleh gambaran yang komprehensif mengenai mekanisme kerja enzim amilase dalam proses hidrolisis pati sebagaimana dilaporkan dalam penelitian-penelitian terdahulu.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran dan pengumpulan sumber pustaka yang relevan, meliputi artikel jurnal ilmiah nasional dan internasional, buku referensi, serta publikasi akademik lain yang berkaitan dengan produksi sirup glukosa secara enzimatik. Sumber pustaka yang digunakan dibatasi pada publikasi yang diterbitkan dalam rentang waktu 2021–2025 guna memastikan kebaruan dan relevansi data. Penelusuran literatur dilakukan melalui basis data ilmiah daring dengan menggunakan kata kunci yang sesuai dengan topik penelitian, seperti enzim amilase, hidrolisis pati, likuefaksi, sakarifikasi, dan sirup glukosa. Sumber yang dipilih merupakan publikasi yang memiliki keterkaitan langsung dengan tujuan penelitian serta berasal dari media ilmiah yang dapat dipertanggungjawabkan.

Instrumen penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah lembar pencatatan dan pengelompokan data literatur yang disusun oleh peneliti. Instrumen ini digunakan untuk mencatat dan mengidentifikasi informasi penting dari setiap sumber pustaka, meliputi jenis enzim amilase yang digunakan, tahapan produksi sirup glukosa, serta peran dan fungsi enzim

pada masing-masing tahapan proses. Penggunaan instrumen ini bertujuan untuk menjaga konsistensi dan ketelitian dalam proses pengumpulan data pustaka.

Data yang telah terkumpul kemudian dianalisis menggunakan teknik analisis kualitatif deskriptif, yaitu dengan membandingkan, mengelompokkan, dan mensintesis temuan dari berbagai sumber pustaka. Analisis difokuskan pada peran enzim α -amilase pada tahap likuefaksi dan glukoamilase pada tahap sakarifikasi dalam proses produksi sirup glukosa. Selanjutnya, hasil analisis disajikan dalam bentuk narasi ilmiah yang sistematis untuk menjelaskan keterkaitan antara aktivitas enzim amilase dan keberhasilan proses hidrolisis pati. Karena penelitian ini merupakan studi literatur, alat dan bahan penelitian tidak berupa peralatan laboratorium, melainkan perangkat pendukung berupa komputer dan akses ke database jurnal ilmiah, dengan bahan penelitian berupa dokumen pustaka yang relevan.

HASIL

Produksi sirup glukosa secara enzimatik merupakan salah satu aplikasi penting bioteknologi dalam industri pangan yang memanfaatkan aktivitas enzim amilase. Berdasarkan hasil studi literatur, proses ini dirancang untuk mengonversi pati menjadi glukosa melalui tahapan reaksi yang terkontrol. Pati sebagai substrat utama sirup glukosa merupakan polisakarida kompleks yang tersusun atas amilosa dan amilopektin. Struktur ini menyebabkan pati tidak dapat langsung dimanfaatkan sebagai sumber glukosa tanpa proses hidrolisis. Oleh karena itu, enzim amilase berperan sebagai katalis biologis yang mempercepat pemutusan ikatan glikosidik pada pati. Penggunaan enzim memungkinkan reaksi berlangsung pada kondisi yang relatif ringan dibandingkan metode kimia. Hasil telaah literatur menunjukkan bahwa produksi sirup glukosa secara enzimatik umumnya dilakukan melalui dua tahap utama, yaitu likuefaksi dan sakarifikasi. Kedua tahap ini saling berkaitan dan menentukan kualitas produk akhir.

Tabel 1. Ringkasan hasil studi literatur tentang jenis enzim, tahapan proses, bahan baku pati, serta temuan utama terkait peran enzim Amilase

No	Penulis (tahun)	Jenis enzim	Tahap proses	Sumber pati	Fokus kajian	Temuan utama
1.	Pandey et al. (2021)	<i>Glukoamilase</i>	Sakarifikasi	Jagung	Efisiensi konversi	Meningkatkan nilai DE dan kemurnian glukosa
2.	Zhu et al. (2022)	<i>α-Amilase termostabil</i>	Likuefaksi	Jagung	Stabilitas enzim	Efektif pada suhu $>90^{\circ}\text{C}$
3.	Santos & Meireles (2023)	<i>α-Amilase</i>	Likuefaksi	Singkong	Pembentukan dekstrin	Menentukan efisiensi sakarifikasi

4.	Li et al. (2024)	<i>Glukoamilase</i>	Sakarifikasi	Singkong	Optimasi pH dan suhu	Kondisi optimal pH 4,0–4,5
5.	Rahman et al. (2023)	<i>Glukoamilase</i>	Sakarifikasi	Sagu	Potensi pati lokal	Sagu layak sebagai bahan baku
6.	Singh et al. (2025)	<i>Amilase kombinasi</i>	Terpadu	Jagung	Keberlanjutan	Lebih ramah lingkungan
7.	Hidayat & Pratama (2022)	<i>α-Amilase</i>	Likuefaksi	Singkong	Kinetika enzim	Mengikuti Michaelis–Menten
8.	Kim et al. (2024)	<i>Amilase</i>	Enzimatik	Jagung	Perbandingan metode	Kualitas lebih baik dari asam

DISKUSI

Tahap likuefaksi bertujuan untuk menurunkan viskositas pati yang telah mengalami gelatinisasi. Pada tahap ini, pati diubah menjadi molekul yang lebih pendek sehingga lebih mudah dihidrolisis pada tahap berikutnya. Enzim utama yang berperan pada tahap likuefaksi adalah α -amilase. Enzim ini bekerja secara endo-enzimatik dengan memutus ikatan α -1,4-glikosidik di bagian tengah rantai pati. Pemutusan ikatan secara acak oleh α -amilase menghasilkan dekstrin dan oligosakarida. Produk ini memiliki ukuran molekul yang lebih kecil dan tingkat kelarutan yang lebih baik dibandingkan pati awal.

Literatur menyebutkan bahwa α -amilase yang digunakan pada industri umumnya bersifat termostabil. Hal ini penting karena proses likuefaksi dilakukan pada suhu tinggi untuk menjaga pati tetap dalam keadaan terlarut. Suhu operasional likuefaksi berkisar antara 90 hingga 105°C. Pada kondisi ini, α -amilase termostabil mampu mempertahankan struktur aktifnya sehingga reaksi hidrolisis tetap berlangsung optimal. Selain suhu, pH juga memengaruhi aktivitas α -amilase. Sebagian besar penelitian melaporkan bahwa pH optimal berada pada kisaran netral hingga sedikit asam. Keberhasilan tahap likuefaksi sangat menentukan efisiensi tahap sakarifikasi. Likuefaksi yang kurang sempurna dapat menghasilkan dekstrin yang sulit dihidrolisis lebih lanjut. Tahap sakarifikasi merupakan proses lanjutan yang bertujuan menghasilkan glukosa bebas. Pada tahap ini, dekstrin dan oligosakarida dihidrolisis menjadi molekul gula sederhana.

Enzim utama yang digunakan pada tahap sakarifikasi adalah glukoamilase. Enzim ini bekerja secara ekso-enzimatik dari ujung non-reduksi rantai karbohidrat. Glukoamilase mampu memutus ikatan α -1,4 dan α -1,6-glikosidik, meskipun dengan kecepatan yang berbeda. Kemampuan ini memungkinkan konversi hampir menyeluruh menjadi glukosa. Suhu optimal sakarifikasi berada pada kisaran 55–60°C. Suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan

denaturasi enzim dan menurunkan rendemen glukosa. Kondisi pH sakarifikasi cenderung lebih asam dibandingkan likuefaksi. pH optimal gluoamilase umumnya berada pada kisaran 4,0–4,5. Nilai dextrose equivalent (DE) sering digunakan untuk menilai keberhasilan sakarifikasi. Nilai DE yang tinggi menunjukkan kandungan glukosa yang tinggi dalam sirup.

Pandey et al. (2021) menyatakan bahwa gluoamilase merupakan faktor kunci dalam peningkatan nilai DE sirup glukosa. Aktivitas enzim ini menentukan kemurnian produk akhir. Selain kondisi proses, kinetika enzim juga berpengaruh terhadap laju reaksi hidrolisis pati. Kinetika enzim menggambarkan hubungan antara konsentrasi substrat dan kecepatan reaksi. Pada konsentrasi substrat rendah, laju reaksi meningkat seiring peningkatan konsentrasi pati. Namun, pada konsentrasi tinggi, laju reaksi cenderung konstan karena enzim mencapai kondisi jenuh. Pemahaman kinetika enzim penting untuk menentukan dosis enzim yang optimal. Penggunaan enzim berlebih tidak selalu meningkatkan hasil, tetapi dapat meningkatkan biaya produksi. Jenis pati yang digunakan juga memengaruhi efektivitas hidrolisis enzimatik. Pati dari berbagai sumber memiliki komposisi dan struktur yang berbeda.

Pati jagung merupakan bahan baku yang paling umum digunakan dalam industri sirup glukosa. Pati ini memiliki ketersediaan tinggi dan karakteristik yang relatif konsisten. Pati singkong juga banyak dimanfaatkan, terutama di negara tropis. Kandungan amilosa yang relatif rendah menyebabkan pati singkong lebih mudah dihidrolisis. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pati singkong menghasilkan sirup glukosa dengan tingkat kejernihan yang baik. Hal ini menjadi keunggulan dalam aplikasi pangan. Pati sagu memiliki granula yang lebih besar dan struktur yang lebih kompleks. Kondisi ini memerlukan pengaturan proses yang lebih cermat.

Meskipun demikian, pati sagu memiliki potensi besar sebagai bahan baku alternatif dalam produksi sirup glukosa karena ketersediaannya yang melimpah dan kandungan pati yang tinggi, sehingga berpeluang meningkatkan nilai tambah sumber daya lokal. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pati sagu memiliki karakteristik granula dan komposisi amilosa–amilopektin yang sesuai untuk proses hidrolisis, baik secara enzimatik maupun asam (Bujang et al., 2021; Karim et al., 2023). Selain metode enzimatik, produksi sirup glukosa juga dapat dilakukan melalui hidrolisis asam menggunakan asam kuat sebagai katalis. Namun, metode ini memiliki keterbatasan berupa pembentukan produk samping seperti hidrosimetilfurfural (HMF), degradasi gula, serta kebutuhan kondisi proses yang ekstrem, termasuk suhu dan tekanan tinggi, yang berpotensi menurunkan mutu produk akhir (Wang et al., 2020).

Sebaliknya, metode enzimatik dinilai lebih unggul karena bersifat selektif dan bekerja spesifik pada ikatan glikosidik tanpa merusak struktur glukosa. Proses ini menghasilkan sirup glukosa dengan rendemen tinggi, warna lebih cerah, dan stabilitas yang lebih baik dibandingkan

hidrolisis asam (Zhu et al., 2022; Sharma & Satyanarayana, 2020). Dari aspek lingkungan, penggunaan enzim juga lebih ramah karena menghasilkan limbah yang lebih sedikit dan mengurangi kebutuhan bahan kimia berbahaya, sehingga selaras dengan prinsip industri pangan berkelanjutan (Pandey et al., 2022).

Implikasi penggunaan enzim amilase dalam industri pangan sangat luas, mengingat sirup glukosa berfungsi sebagai pemanis, pengental, dan substrat fermentasi dalam industri makanan dan minuman. Kualitas sirup glukosa yang tinggi, terutama dari segi kemurnian glukosa, warna, dan kestabilan, sangat ditentukan oleh aktivitas dan efisiensi enzim amilase selama proses likuifikasi dan sakarifikasi. Singh et al. (2025) menegaskan bahwa optimalisasi proses enzimatik tidak hanya meningkatkan efisiensi konversi pati, tetapi juga mampu menurunkan biaya operasional industri secara signifikan. Dengan demikian, peran enzim amilase tidak terbatas pada aspek reaksi kimia semata, melainkan juga berdampak pada efisiensi ekonomi dan keberlanjutan industri. Berdasarkan sintesis literatur, dapat ditegaskan bahwa keberhasilan produksi sirup glukosa sangat ditentukan oleh sinergi antara jenis enzim, kondisi proses, dan karakteristik bahan baku, sehingga pemahaman komprehensif mengenai peran enzim amilase menjadi landasan penting bagi pengembangan teknologi pengolahan pati di masa depan.

KESIMPULAN

Enzim amilase memiliki peran sentral dalam keberhasilan produksi sirup glukosa secara enzimatik melalui dua tahapan utama, yaitu likuefaksi dan sakarifikasi. Pada tahap likuefaksi, α -amilase berfungsi menurunkan viskositas pati dengan memutus ikatan α -1,4-glikosidik secara acak, sehingga menghasilkan dekstrin yang lebih mudah dihidrolisis. Tahap sakarifikasi selanjutnya melibatkan glukoamilase yang mengonversi dekstrin dan oligosakarida menjadi glukosa bebas, yang ditunjukkan dengan peningkatan nilai dextrose equivalent. Efektivitas proses dipengaruhi oleh kondisi kinetika enzim, termasuk suhu, pH, dan konsentrasi substrat, serta karakteristik bahan baku pati seperti jagung, singkong, dan sagu yang memiliki struktur dan kemudahan hidrolisis yang berbeda. Dibandingkan metode hidrolisis asam, metode enzimatik dinilai lebih selektif, menghasilkan kualitas sirup glukosa yang lebih baik, serta lebih ramah lingkungan. Secara keseluruhan, literatur yang dianalisis menegaskan bahwa sinergi antara jenis enzim, kondisi proses, dan sumber pati menjadi faktor kunci dalam menghasilkan sirup glukosa berkualitas tinggi dan berkelanjutan bagi industri pangan.

REFERENSI

- BeMiller, J. N., & Whistler, R. L. (2019). *Starch: Chemistry and technology* (4th ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01260-3>
- Hidayat, A., & Pratama, D. (2022). Kinetika enzim α -amilase pada proses likuefaksi pati. *Jurnal Bioproses*, 5(2), 66–74.
- Kim, J., Lee, H., Park, S., & Choi, Y. (2024). Comparative analysis of enzymatic and acid hydrolysis methods in glucose syrup production from corn starch. *Journal of Food Process Engineering*, 47(1), e14321. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14321>
- Kurdi, P., Sharma, A., & Satyanarayana, T. (2021). Enzymatic hydrolysis of starch for glucose syrup production: Process optimization and industrial perspectives. *Biotechnology Reports*, 31, e00645. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00645>
- Nurhayati, R., Pratama, A. R., & Sari, M. P. (2023). Characterization of starch from local tubers as raw materials for glucose syrup production. *Journal of Food Science and Technology*, 60(4), 1562–1571. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05561-3>
- Pandey, A., Soccol, C. R., & Nigam, P. S. (2022). Enzymes in bioconversion of renewable resources. In A. Pandey (Ed.), *Industrial biorefineries and white biotechnology* (pp. 215–238). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821879-4.00009-8>
- Pandey, A., Srivastava, S., & Rai, A. K. (2021). Efficiency of glucose conversion and dextrose equivalent improvement using glucoamylase. *Bioresource Technology*, 337, 125451. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125451>
- Rahman, N. A., Hassan, M. A., & Aziz, S. A. (2024). Sustainable production of amylolytic enzymes from indigenous microorganisms for starch processing industries. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108(3), 1125–1138. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12844-9>
- Santos, L., & Meireles, M. (2023). Role of α -amilase in dextrin formation during liquefaction of cassava starch. *Food Hydrocolloids*, 136, 108256. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108256>
- Sharma, A., & Satyanarayana, T. (2020). Glucoamylases: Characteristics, production, and applications. *Critical Reviews in Biotechnology*, 40(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1681935>
- Singh, R., Kaur, N., & Kennedy, J. F. (2022). Physicochemical properties and quality evaluation of glucose syrups produced from different starch sources. *Carbohydrate Polymers*, 291, 119576. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119576>
- Singh, R., Patel, S., & Kumar, M. (2025). Integrated enzyme systems for sustainable glucose syrup production. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 18(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/17518253.2024.2334567>
- Wang, S., Copeland, L., & Wang, S. (2020). Acid and enzymatic hydrolysis of starch: Structure–property relationships. *Food Chemistry*, 318, 126506. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126506>
- Zhang, Y., Li, X., & Chen, Z. (2021). Global trends and industrial applications of glucose syrup in food processing. *Food Industry Review*, 45(2), 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.fir.2021.02.004>
- Zhu, Y., Li, H., Wang, X., & Chen, J. (2022). Enzymatic hydrolysis of starch for high-quality glucose syrup production: Process efficiency and environmental impact. *Food Chemistry*, 373, 131462. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131462>