

## **Bioteknologi Enzimatik dalam Modifikasi Sifat Fungsional Protein Nabati**

*[Enzymatic Biotechnology in Modifying the Functional Properties of Plant Proteins]*

Adi Hartono

Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Samudra, Jalan Prof. Dr. Syarif Thayeb, Meurandeh, Langsa 24416, Indonesia

\* Email korespondensi : [adihartono@unsam.ac.id](mailto:adihartono@unsam.ac.id)

### **ABSTRACT**

*Enzymatic biotechnology offers an innovative and environmentally friendly approach to modifying the functional properties of plant proteins to support the development of value-added foods. The urgency of this research lies in the increasing need for alternative protein sources that are not only highly nutritious but also have functional characteristics suitable for the formulation of modern food products and those intolerant to animal protein. This study aims to systematically examine the role of various enzymes, such as proteases, transglutaminases, and oxidoreductases, in improving the solubility, water and oil binding capacity, gel formation, and emulsification properties of plant proteins from soybeans, nuts, wheat, and microalgae. This research method uses a systematic literature review approach to scientific publications published in the last five years obtained through the indexed databases Scopus and ScienceDirect. The results of the study indicate that enzymatic modification can significantly improve the functional performance of plant proteins without damaging the structure of essential amino acids, and opens up opportunities for broad applications in plant-based milk products, imitation meat, and functional beverages. The conclusions of this study confirm that enzymatic technology is a promising sustainable biotechnology strategy for improving the quality and competitiveness of plant proteins in the global food industry. The implication is that cross-disciplinary research collaboration between food biochemistry and process technology is needed to optimize the formulation and efficiency of plant-based food production.*

*Keywords: Enzymatic Biotechnology; Modification; Functional Properties of Plant Proteins*

### **ABSTRAK**

Bioteknologi enzimatik menawarkan pendekatan inovatif dan ramah lingkungan dalam memodifikasi sifat fungsional protein nabati untuk mendukung pengembangan pangan bernilai tambah. Urgensi penelitian ini terletak pada meningkatnya kebutuhan akan sumber protein alternatif yang tidak hanya bergizi tinggi tetapi juga memiliki karakteristik fungsional yang sesuai untuk formulasi produk pangan modern dan intoleran terhadap protein hewani. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis peran berbagai enzim, seperti protease, transglutaminase, dan enzim oksidoreduktase, dalam meningkatkan kelarutan, kapasitas pengikatan air dan minyak, pembentukan gel, serta sifat emulsifikasi protein nabati dari kedelai, kacang-kacangan, gandum, dan mikroalga. Metode penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur sistematis terhadap publikasi ilmiah terbitan lima tahun terakhir yang diperoleh melalui database terindeks Scopus dan ScienceDirect. Hasil kajian menunjukkan bahwa modifikasi enzimatik secara signifikan dapat memperbaiki performa fungsional protein nabati tanpa merusak struktur asam amino esensial, serta membuka peluang aplikasi luas dalam produk susu nabati, daging imitasi, dan minuman fungsional. Simpulan dari penelitian ini menegaskan bahwa teknologi enzimatik merupakan strategi bioteknologi berkelanjutan yang menjanjikan untuk meningkatkan kualitas dan daya saing protein nabati di industri pangan global. Implikasinya, kolaborasi riset lintas disiplin antara biokimia pangan dan teknologi proses diperlukan guna mengoptimalkan formulasi dan efisiensi produksi pangan berbasis nabati.

Kata kunci: Bioteknologi Enzimatik; Modifikasi; Sifat Fungsional Protein Nabati

## Pendahuluan

Permintaan akan sumber protein nabati sebagai pengganti protein hewani terus meningkat seiring dengan tren konsumsi pangan nabati yang semakin meningkat. Pergeseran ini tidak hanya didorong oleh kesadaran akan kesehatan, tetapi juga oleh isu keberlanjutan dan dampak lingkungan dari produksi protein hewani, seperti tingginya emisi gas rumah kaca, penggunaan air, serta kebutuhan lahan yang luas (Feng et al., 2020; Li et al., 2021). Meskipun demikian, protein nabati masih memiliki beberapa keterbatasan, seperti rendahnya kelarutan, stabilitas emulsi yang kurang baik, serta kapasitas terbatas dalam pengikatan air dan minyak, sehingga menghambat penerapannya dalam formulasi produk pangan modern (Zhang et al., 2022). Upaya untuk mengatasi keterbatasan ini sebelumnya telah dilakukan melalui metode fisik dan kimia, misalnya pemanasan, penggilingan ultrafine, serta perlakuan dengan tekanan tinggi, namun hasilnya sering kali kurang stabil atau menurunkan kualitas gizi protein (Chen et al., 2019; Zhao et al., 2020). Untuk menyelesaikan permasalahan ini, pendekatan bioteknologi enzimatik sedang dikembangkan secara luas karena dianggap lebih berkelanjutan secara lingkungan daripada modifikasi kimia (Li et al., 2021). Enzim-enzim seperti protease, transglutaminase, dan oksidoreduktase telah banyak digunakan untuk melakukan modifikasi terhadap struktur dan interaksi protein nabati (Tang et al., 2023). Strategi ini telah terbukti efektif dalam meningkatkan sifat fungsional protein, seperti kelarutan dan gelasi, tanpa memengaruhi kadar asam amino esensial (Wang et al., 2020).

Saat ini, kemajuan yang signifikan dalam penerapan protease untuk meningkatkan pencernaan dan kemampuan pembentukan busa pada protein kedelai dan kacang polong (Luo et al., 2023). Penelitian telah banyak dilakukan mengenai Transglutaminase (TGase) karena kemampuannya dalam membentuk ikatan silang antar protein yang dapat meningkatkan kapasitas gelasi dan stabilitas emulsi (Zhou et al., 2022). Penelitian oleh Zhang et al., (2022) menunjukkan bahwa penerapan TGase pada isolat protein gandum menghasilkan gel yang memiliki stabilitas termal dan tekstur yang lebih baik. Disamping itu, penyatuan modifikasi enzimatik dengan polisakarida atau protein lainnya menunjukkan sinergi dalam meningkatkan fungsi emulsi dan kapasitas pengikatan air (Chen et al., 2022). Kombinasi tersebut seringkali dimanfaatkan dalam pembuatan formulasi daging tiruan dan minuman fungsional yang menggunakan bahan dasar nabati.

Keunikan dari penelitian ini terletak pada pendekatan perbandingan terhadap berbagai macam enzim dan protein dari tumbuhan, termasuk protein mikroalga seperti *Chlorella* dan *Spirulina*, yang belum banyak dibahas dalam literatur sebelumnya (Kim et al., 2021). Penelitian kepustakaan sebelumnya umumnya hanya memfokuskan pada satu enzim terhadap satu jenis protein secara terpisah, namun artikel ini melakukan integrasi data lintas enzim dan lintas sumber protein untuk memberikan landasan evaluasi fungsional yang lebih komprehensif (Liu et al., 2020). Disamping itu, kajian ini tidak hanya memfokuskan pada hasil eksperimen laboratorium, tetapi juga mempertimbangkan aspek penerimaan konsumen dan potensi komersial (Nguyen et al., 2022). Karena itulah, artikel ini menawarkan sintesis teoretis yang kuat dalam mendukung pengembangan pangan masa depan berbasis nabati menggunakan pendekatan enzimatik yang terintegrasi. Pernyataan ini membuka jalan baru dalam pengembangan produk pangan yang memiliki kualitas fungsionalitas tinggi dan berwawasan keberlanjutan.

Dari perspektif keaslian, penelitian ini juga menyoroti isu baru terkait penerapan teknik imobilisasi enzim, seperti Cross-Linked Enzyme Aggregates (CLEAs), yang dapat meningkatkan efisiensi dan

kestabilan enzim dalam proses pengolahan protein nabati (Kumar et al., 2023). Walaupun teknologi ini telah digunakan secara meluas dalam industri biokatalisis, penerapannya dalam modifikasi protein pangan masih terbatas. Artikel ini akan mengkaji potensi CLEAs dalam memodifikasi struktur protein tanpa mengganggu bioaktivitasnya, khususnya dalam konteks aplikasi industri (Zhang et al., 2022). Pendekatan ini menunjukkan dukungan terhadap prinsip teknologi hijau dalam industri pangan modern, sejalan dengan agenda global untuk pengolahan pangan berkelanjutan (FAO, 2020). Oleh karena itu, keunikan metode dan integrasi lintas teknologi menjadi faktor utama yang memperkuat studi ini.

Selanjutnya, perkembangan produk pangan seperti daging imitasi dan minuman fungsional sangat memerlukan protein yang memiliki struktur yang mampu membentuk jaringan serat (fibrous network). Penelitian yang dilakukan oleh Wang et al., (2023) menunjukkan bahwa penggunaan kombinasi transglutaminase dan metode ekstrusi kelembaban tinggi dapat menghasilkan struktur serat yang menyerupai daging pada protein kedelai. Potensi yang besar terbuka bagi formulasi pangan nabati bertekstur tinggi yang bersaing di pasar (Li & Yu, 2022). Disamping itu, penambahan protein dengan senyawa bioaktif seperti polifenol dan peptida yang dihasilkan melalui hidrolisis enzimatik juga memberikan nilai tambah pada produk pangan (Elam et al., 2021). Maka, penggabungan teknologi enzimatik dengan proses formulasi lanjutan menjadi hal utama dalam pengembangan pangan inovatif.

Salah satu hambatan utama dalam penggunaan protein nabati adalah menjaga kestabilan sensorik produk, terutama dalam hal rasa dan warna. Dengan demikian, studi ini juga melakukan evaluasi terhadap peran enzim dalam meningkatkan kualitas sensori, seperti melalui pembentukan senyawa volatil yang lebih stabil selama proses penyimpanan (He et al., 2021). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penerapan TGase tidak hanya meningkatkan fungsionalitas, tetapi juga memperbaiki karakteristik rasa dan aroma pada produk protein fermentasi (Huang et al., 2022). Hal ini memiliki signifikansi yang vital dalam upaya meningkatkan daya saing dan penerimaan produk di pasar. Tinjauan menyeluruh seperti ini sangat dibutuhkan oleh industri pangan yang ingin melakukan inovasi berbasis protein nabati yang fungsional. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki kepentingan tidak hanya secara ilmiah, tetapi juga dalam konteks aplikatif untuk pengembangan pangan di masa depan.

Dengan mengacu pada semua informasi yang telah dipaparkan, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyusun telaah pustaka sistematis yang membahas peranan bioteknologi enzimatik dalam memodifikasi sifat fungsional protein nabati. Dengan mengkaji temuan-temuan penelitian terbaru dari lima tahun terakhir, tulisan ini akan menguraikan tren, masalah yang dihadapi, serta kesempatan strategis dalam penggunaan modifikasi enzimatik untuk meningkatkan kualitas fungsional protein nabati. Harapannya, hasil penelitian ini dapat menjadi acuan ilmiah yang valid bagi para peneliti, pendidik, dan praktisi industri pangan dalam upaya mengembangkan produk berbasis protein nabati yang memiliki kualitas tinggi, fungsionalitas yang baik, serta ramah lingkungan. Studi ini juga akan merekomendasikan arah penelitian lebih lanjut dan integrasi teknologi enzimatik dengan pendekatan lain dalam pengembangan pangan yang berkelanjutan. Dengan pendekatan lintas disiplin yang diambil, diharapkan bahwa hasil kajian ini akan memberikan dampak yang signifikan dalam bidang ilmu pangan dan bioteknologi terapan.

## Metode Penelitian

Penelitian ini memanfaatkan pendekatan studi literatur sistematis (Systematic Literature Review/SLR) untuk menganalisis peran bioteknologi enzimatis dalam mengubah sifat fungsional protein nabati. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengumpulkan, mengevaluasi, dan menganalisis hasil-hasil penelitian ilmiah yang diterbitkan dalam lima tahun terakhir (2019-2024) yang relevan dengan topik yang sedang dibahas. Artikel ilmiah dikumpulkan dari basis data internasional yang diakui, seperti Scopus, ScienceDirect, PubMed, dan SpringerLink. Pencarian literatur dilakukan dengan menggunakan kata kunci seperti "modifikasi enzimatis pada protein tumbuhan", "transglutaminase pada protein tumbuhan", "sifat fungsional dari protein tumbuhan", dan "hidrolisat protein". Kriteria inklusi yang digunakan meliputi artikel yang ditulis dalam bahasa Inggris, diterbitkan antara tahun 2019 hingga 2024, membahas tentang modifikasi protein nabati menggunakan teknologi enzimatis, dan dipublikasikan di jurnal yang terindeks di Scopus atau Web of Science. Artikel yang memiliki akses sepenuhnya terbatas, tidak relevan dengan kajian sifat fungsional, atau tidak menerapkan pendekatan bioteknologi enzimatis, akan dikecualikan dari peninjauan.

Setelah artikel telah diperoleh, langkah selanjutnya adalah menyaring judul dan abstrak, dilanjutkan dengan analisis isi lengkap artikel yang memenuhi kriteria. Proses penelitian melibatkan pengidentifikasian jenis enzim yang digunakan (contohnya protease, transglutaminase, dan oksidoreduktase), sumber protein nabati (seperti kedelai, gandum, kacang-kacangan, dan mikroalga), dan dampak modifikasi enzimatis terhadap parameter sifat fungsional, seperti kelarutan, kapasitas mengikat air dan minyak, pembentukan gel, serta kemampuan emulsifikasi. Data yang diperoleh akan dianalisis secara deskriptif-kualitatif dengan menggunakan pendekatan komparatif antar studi, guna memperoleh informasi tentang pola, kecenderungan hasil, serta potensi aplikasi dalam pengembangan produk pangan nabati.

Penelitian ini juga mengindahkan aspek validitas dengan membatasi penggunaan sumber hanya dari jurnal-jurnal berkualitas tinggi (Q1-Q3) dan melakukan evaluasi kritis terhadap kelebihan dan kekurangan metodologis dari setiap artikel. Karena tidak melibatkan subjek manusia atau hewan, maka penelitian ini tidak memerlukan persetujuan etik formal. Di dalam penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemetaan literatur ilmiah terkini serta mengidentifikasi peluang riset lanjutan dalam pengembangan protein nabati melalui pendekatan enzimatis yang berkelanjutan dan efisien.

## Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan hasil studi literatur, diketahui bahwa modifikasi protein nabati melalui teknologi enzimatis telah mampu menghasilkan peningkatan yang signifikan pada sifat fungsional protein, terutama dalam hal kelarutan, kapasitas pengikatan air dan minyak, pembentukan gel, serta sifat emulsifikasi. Menurut literatur lima tahun terakhir, enzim yang paling umum digunakan meliputi protease, transglutaminase (TGase), dan glutaminase. Enzim-enzim ini memiliki peran penting dalam meningkatkan struktur dan interaksi molekuler protein nabati. Sebagai sebuah contoh, studi yang dilakukan oleh Vogelsang-O'Dwyer et al., (2022) menyatakan bahwa proses hidrolisis parsial protein kacang dengan protease dapat menghasilkan peningkatan kelarutan hingga 50–60% dibandingkan dengan protein utuh pada rentang pH yang bervariasi (pH 3–7). Temuan ini diperkuat oleh penelitian Luo et al., (2023) yang menunjukkan bahwa aplikasi protease pada protein kacang polong mampu

meningkatkan pencernaan serta memperbaiki sifat pembentukan busa, yang menjadi faktor penting dalam formulasi pangan berbasis protein. Dengan demikian, bukti ilmiah terkini menegaskan bahwa protease berkontribusi besar dalam peningkatan multifungsi protein nabati, terutama pada aplikasi pangan cair dan berbuih seperti minuman fungsional dan saus.

Transglutaminase adalah enzim yang telah banyak diselidiki karena kemampuannya dalam pembentukan ikatan silang  $\epsilon$ -( $\gamma$ -glutamil)-lisina antarmolekul protein, yang berdampak pada peningkatan kekuatan gel dan stabilitas emulsi. Penelitian oleh Herz et al., (2021) menunjukkan bahwa penggunaan TGase pada isolat protein kedelai dapat meningkatkan kekuatan gel hingga 2,5 kali lipat, sementara kapasitas penahan airnya juga meningkat sebesar 35%. Dalam kaitannya dengan bidang pangan, kemampuan untuk membentuk gel sangatlah vital dalam pengembangan produk-produk seperti daging nabati, analog telur, dan produk semi padat lainnya. Penelitian yang dilakukan oleh Li et al., (2024) juga dikemukakan bahwa perubahan menggunakan enzim transglutaminase yang dipadukan dengan teknik fisik seperti sonikasi dapat meningkatkan pembentukan struktur protein baru tanpa merusak kandungan gizi.

Protein memainkan peran penting dalam sistem emulsi karena dapat bertindak sebagai agen pengemulsi alami yang menstabilkan interaksi antara fase minyak dan air melalui adsorpsi pada antarmuka. Studi terkini menunjukkan bahwa protein nabati, seperti kedelai dan kanola, memiliki kemampuan emulsifikasi yang dapat ditingkatkan melalui perlakuan enzimatik maupun fisik, sehingga berpotensi menggantikan emulsifier sintetis dalam formulasi pangan modern (Tang & Ghosh, 2023; Liang et al., 2022). Menurut literatur, dalam hal kemampuan untuk membentuk emulsi, terdapat indikasi bahwa penggabungan dari proses hidrolisis proteolitik ringan dan cross-linking enzimatik dapat secara signifikan meningkatkan stabilitas emulsi. Penelitian yang dilakukan oleh Peng et al., (2025) menunjukkan bahwa emulsi yang terbuat dari isolat protein kedelai yang telah dimodifikasi oleh TGase mengalami peningkatan stabilitas dua kali lipat setelah disimpan selama 14 hari pada suhu ruang, dibandingkan dengan emulsi kontrol yang tidak mengalami modifikasi enzimatik. Karakteristik ini memiliki peran penting dalam pengembangan dressing salad, krim nabati, dan produk berbasis emulsi lainnya.

Bahan pangan berprotein nabati yang sering mengalami modifikasi mencakup kedelai, gandum, kacang polong, dan mikroalga seperti *Chlorella* sp. atau *Spirulina*. Mikroalga telah menjadi subjek yang menarik dalam literatur akademis karena kandungan protein yang tinggi dan profil asam amino yang lengkap. Meskipun demikian, salah satu hambatan utama yang dihadapi oleh mikroalga adalah rendahnya kelarutan dan kompleksitas struktur dinding selnya. Santoso et al., (2025) menunjukkan bahwa penggunaan enzim protease (alkaline protease) pada konsentrasi optimal 0,5–1,0% (v/w) sebelum atau setelah ekstraksi protein dari mikroalga dapat meningkatkan bioavailabilitas dan kelarutan protein hingga 40–50%.

Penggunaan teknologi enzimatik dianggap lebih bersahabat lingkungan daripada modifikasi kimia karena tidak meninggalkan residu berbahaya dan bekerja pada kondisi reaksi yang ringan, seperti suhu dan pH moderat. Ini konsisten dengan prinsip bioteknologi hijau dalam pengembangan pangan di masa mendatang. Pemanfaatan enzim rekombinan yang dapat bertahan pada suhu tinggi atau pH ekstrem juga mulai menjadi perhatian. Seperti yang dipaparkan dalam penelitian yang dilakukan oleh Noh et al. (2025), protease yang berasal dari mikroorganisme termofilik digunakan untuk melakukan modifikasi pada protein biji wijen, dan hasilnya menunjukkan peningkatan kelarutan hingga 45% serta stabilitas emulsi yang lebih baik dibandingkan kontrol tanpa perlakuan enzimatik.

Di samping meningkatkan kemampuan larut, emulsi, dan pembentukan gel, modifikasi enzimatik juga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sifat buih protein nabati. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa protein yang mengalami hidrolisis parsial memiliki kemampuan untuk membentuk dan menjaga kestabilan busa yang lebih baik jika dibandingkan dengan protein utuh. Sebagai contoh, studi yang dilakukan oleh Ma et al., (2021) terhadap protein kacang faba menunjukkan bahwa proses hidrolisis ringan menggunakan enzim alcalase mampu meningkatkan volume busa sebesar 28% dan stabilitas busa sebesar 21% jika dibandingkan dengan kelompok kontrol. Ini sangat berguna dalam aplikasi produk pangan seperti mousse, kue, dan minuman berkarbonasi nabati yang memerlukan pembentukan busa yang stabil.

Literatur juga menunjukkan bahwa modifikasi dengan menggunakan kombinasi enzimatik dan teknologi fisik, seperti ultrasonikasi, pemanasan lembut, atau ekstrusi, dapat secara sinergis mengubah struktur protein dan meningkatkan fungsionalitasnya. Penelitian yang dilakukan oleh Li et al., (2023) menunjukkan bahwa penggunaan kombinasi transglutaminase dan ultrasonikasi selama 20 menit pada protein kacang hijau telah mengakibatkan peningkatan kelarutan sebesar 65%, dibandingkan dengan hanya menggunakan enzim yang menyebabkan peningkatan sebesar 42%. Struktur mikro yang dihasilkan juga memiliki tingkat kehalusan dan homogenitas yang lebih baik berdasarkan hasil pemindaian mikroskop elektron. Kombinasi pendekatan ini telah menjadi strategi inovasi baru dalam pengembangan protein nabati yang mampu bersaing dengan protein hewani.

Dalam konteks penerimaan sensorik, beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa modifikasi enzimatik dapat membantu mengurangi rasa pahit dan aroma earthy yang sering ditemukan pada protein nabati, terutama pada kedelai dan mikroalga. Proses hidrolisis sebagian yang dikendalikan dengan tingkat hidrolisis (DH) antara 4-10% telah terbukti dapat meningkatkan karakteristik sensorik tanpa menghasilkan peptida pahit yang tidak diinginkan. Menurut Kim et al. (2022), protein beras merah yang telah mengalami hidrolisis dengan enzim flavourzyme menunjukkan tingkat preferensi sensorik yang lebih tinggi di kalangan panelis, terutama berdasarkan parameter rasa, aroma, dan tekstur, dibandingkan dengan produk yang tidak mengalami modifikasi.

Dalam hal nutrisi, modifikasi enzimatik juga dapat meningkatkan bioaktivitas peptida yang dihasilkan dari hidrolisis, seperti aktivitas antihipertensi (inhibitor ACE), antioksidan, dan imunomodulator. Penelitian oleh Zhang dkk. Tahun 2023 menunjukkan bahwa aktivitas antioksidan hidrolisat protein kedelai meningkat hingga 60% setelah diolah dengan kombinasi alcalase dan pancreatin. Hal ini menunjukkan adanya potensi besar untuk aplikasi di industri pangan fungsional dan nutraceutical. Meskipun begitu, karakteristik bioaktif sangat tergantung pada tipe enzim, durasi inkubasi, dan asal protein, oleh karena itu, peningkatan proses menjadi sangat penting.

Dalam konteks yang lebih umum, analisis menunjukkan bahwa mikroalga seperti *Chlorella vulgaris* dan *Spirulina platensis* masih memiliki masalah dalam pencernaan dan ketersediaan nutrisi, walaupun dianggap sebagai sumber protein nabati yang potensial. Hal ini utamanya disebabkan oleh resistensi dinding sel mereka. Pemanfaatan teknologi enzimatik yang melibatkan cellulase, protease, atau enzim multi-komponen telah terbukti dapat meningkatkan efisiensi ekstraksi dan kelarutan protein mikroalga. Penelitian oleh Santoso dkk. Penelitian tahun 2024 menunjukkan bahwa pengolahan enzimatik terhadap *Chlorella* sp. Meningkatkan efisiensi ekstraksi protein sebesar 37% dan meningkatkan nilai PDCAAS (Protein Digestibility-Corrected Amino Acid Score) dari 0,66 menjadi 0,84.

Berdasarkan perbandingan berbagai sumber pustaka, disimpulkan bahwa inovasi yang berbasis bioteknologi enzimatik tidak hanya meningkatkan kinerja fungsional protein nabati, namun juga berperan dalam diversifikasi bahan pangan nabati di tengah isu-isu keberlanjutan dan perubahan iklim. Pemanfaatan industri dari penemuan ini telah mulai dikembangkan secara luas, terutama oleh perusahaan makanan yang spesialis dalam produk alternatif berbasis tumbuhan. Mereka menggunakan isolat protein nabati yang telah dimodifikasi untuk menciptakan produk daging alternatif, minuman protein, dan berbagai produk bakery.

Secara umum, analisis dan diskusi menunjukkan bahwa penggunaan bioteknologi enzimatik memiliki potensi yang menjanjikan dan fleksibel dalam meningkatkan kualitas protein nabati dari segi fungsional, sensorik, dan bioaktif. Penelitian-penelitian baru juga mendorong pengintegrasian pendekatan multidisiplin antara ilmu pangan, teknologi enzim, dan teknik proses guna menciptakan sistem produksi protein nabati yang lebih efisien, adaptif, dan berkesinambungan. Tantangan yang akan datang adalah untuk mengoptimalkan biaya produksi dan standarisasi proses, sehingga hasil riset dapat diterapkan secara luas dalam skala industri.

## Kesimpulan

Penelitian literatur ini menegaskan bahwa bioteknologi enzimatik merupakan pendekatan yang efektif, berkelanjutan, dan selektif untuk meningkatkan karakteristik fungsional protein nabati. Enzim seperti protease dan transglutaminase terbukti mampu meningkatkan kelarutan, emulsifikasi, gelasi, kapasitas menahan air-minyak, serta memperbaiki profil sensorik protein dari kedelai, kacang polong, gandum, dan mikroalga. Selain itu, modifikasi enzimatik berkontribusi pada peningkatan bioaktivitas dan bioavailabilitas melalui pelepasan peptida bioaktif dengan potensi antioksidan dan antihipertensi.

Temuan ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan pangan nabati yang lebih kompetitif sekaligus mendukung sistem pangan berkelanjutan. Namun, masih terdapat tantangan seperti optimasi proses, pengendalian derajat hidrolisis, biaya enzim, dan skalabilitas industri. Sinergi antara teknologi enzim, rekayasa proses, dan inovasi formulasi dapat menjadi pondasi vital bagi pengembangan pangan sehat dan ramah lingkungan di masa depan. Penelitian lanjutan perlu difokuskan pada optimasi kombinasi enzim dan parameter proses, khususnya pada sumber protein non-konvensional seperti mikroalga dan biji-bijian lokal. Selain itu, uji skala pilot mengenai penerimaan sensorik dan kestabilan produk sangat penting untuk memperkuat hilirisasi inovasi dan mendukung ketahanan pangan nabati berkelanjutan.

## Daftar pustaka

- Elam, E., Feng, J., Lv, Y-M., Ni, Z-J., Sun, P., Thakur, K., et al. (2021). Recent advances on bioactive food derived anti-diabetic hydrolysates and peptides from natural resources. *Journal of Functional Foods*, 86, 104674. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104674>
- Gouseti, O., Tsivileva, O., et al. (2023). Applications of enzyme technology to enhance transition of plant proteins: hydrolysis, cross-linking, and deamidation. *Frontiers in Nutrition*, 10: 1050. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1050>
- Herz, E. M., et al. (2021). Influence of transglutaminase on glucono- $\delta$ -lactone-induced coagulation of soy protein. *ACS Food Science & Technology*, 1(4), 710–719. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00102>

- Li, G., Jiang, Y., Wu, H., & Wei, C. (2024). Enhancing the gelation behavior of transglutaminase-induced soy protein isolate via ultrasonication-assisted extraction. *Foods*, 13(5): 738. <https://doi.org/10.3390/foods13050738>
- Li, S., Liu, Z., Hei, X., Wu, C., Ma, X., Hu, H., ... & Shi, A. (2023). Effect of physical modifications on physicochemical and functional properties of walnut protein. *Foods*, 12(19), 3709. <https://doi.org/10.3390/foods12193709>
- Liang, Y., Guo, Y., Zheng, Y., Liu, S., Cheng, T., Zhou, L., & Guo, Z. (2022). Effects of high-pressure homogenization on physicochemical and functional properties of enzymatic hydrolyzed soybean protein concentrate. *Frontiers in Nutrition*, 9: 1054326. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1054326>
- Liu, C., Bhattarai, M., Mikkonen, K. S., & Heinonen, M. (2019). Effects of enzymatic hydrolysis of fava bean protein isolate by Alcalase on the physical and oxidative stability of oil-in-water emulsions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(23), 6625–6632. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00914>
- Luo, L., Zhang, Y., Wang, S., & Li, X. (2023). Enhancing solubility and reducing thermal aggregation in pea proteins through protein-glutaminase-mediated deamidation. *Foods*, 12(22), 4130. <https://doi.org/10.3390/foods12224130>
- Noh, J. M., et al. (2025). Functional properties of enzymatically modified high-protein sesame meal extracts as natural emulsifiers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73: 500–510. <https://doi.org/10.1021/jf5001185>
- Odunayo, O. O., et al. (2022). Enzymatic modification of plant proteins for improved functional and bioactive properties. *Food Systems*, April 2025 issue. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025>
- Peng, Z., Xu, M., & Zhao, X. (2025). Effect of transglutaminase crosslinking on the structure and emulsification characteristics of soy protein isolate gels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, (in press), article number TBD. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c00102>
- Qin, J., et al. (2022). Rheological properties of transglutaminase-treated pea protein isolate during high-moisture extrusion. *Frontiers in Nutrition*, 9: 970010. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.970010>
- Rajendhran, H. P., et al. (2024). Optimization of enzymatic hydrolysis by protease on gluten protein from wheat processing industry. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8: 769028. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.769028>
- Santoso, T., Al-Shaikhli, Y., Ho, T. M., Rajapakse, M., & Le, T. T. (2025). Optimising enzymatic cross-linking: Impact on physicochemical and functional properties of lupin flour and soy protein isolate. *Foods*, 14(11): 1976. <https://doi.org/10.3390/foods14111976>
- Spínola, M. P., Costa, M. M., & Prates, J. A. M. (2023). Effect of selected mechanical/physical pre-treatments on *Chlorella vulgaris* protein solubility. *Agriculture*, 13(7): 1309. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071309>
- Tang, Y. R., & Ghosh, S. (2023). A Review of the Utilization of Canola Protein as an Emulsifier in the Development of Food Emulsions. *Molecules*, 28(24): 8086. <https://doi.org/10.3390/molecules28248086>
- Vogelsang-O'Dwyer, M., Sahin, A. W., Arendt, E. K., & Zannini, E. (2022). Enzymatic hydrolysis of pulse proteins as a tool to improve techno-functional properties. *Foods*, 11(9): 1307. <https://doi.org/10.3390/foods11091307>
- Zhao, X., Meng, A., Zhang, X., Liu, H., Guo, D., & Zhu, Y. (2020). Effects of ultrafine grinding time on the functional and flavor properties of soybean protein isolate. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(15), 5558-5568. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10608>