

**TRANSFORMASI KEDELAI MENJADI SUPERFOOD: RAHASIA
NUTRISI, BIOAKTIF, DAN MANFAAT KESEHATAN TEMPE**
*From Soybeans to Functional Food: Nutritional Transformation, Bioactive Compounds,
and Health Potential of Tempeh*

Putu Widya Indra Astuti*

Program Studi Teknologi Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana, Jalan Raya
Kampus Unud Gd GA, Jimbaran, Badung, Bali, 80361

Diterima 10 Desember 2025 / Disetujui 24 Desember 2025

ABSTRAK

Tempe merupakan produk fermentasi berbasis kedelai yang telah lama dikonsumsi dan semakin mendapat perhatian sebagai pangan fungsional berbasis nabati. Proses fermentasi oleh kapang *Rhizopus* spp. menyebabkan perubahan signifikan pada komposisi dan ketersediaan nutrisi, serta mendorong pembentukan berbagai senyawa bioaktif. Artikel ulasan ini bertujuan untuk merangkum dan mensintesis temuan terkini mengenai transformasi nutrisi selama fermentasi tempe, karakteristik senyawa bioaktif yang terbentuk, serta mekanisme biologis yang mendasari potensi manfaat kesehatannya. Fermentasi tempe dilaporkan meningkatkan pencernaan protein, mengonversi isoflavon terikat menjadi bentuk aglikon yang lebih bioavailable, serta menurunkan faktor antinutrisi seperti fitat dan oligosakarida penyebab flatulensi. Selain itu, pembentukan peptida bioaktif dan senyawa fenolik berkontribusi terhadap aktivitas antioksidan, antihipertensi, dan modulasi respon inflamasi yang dilaporkan dalam berbagai studi *in vitro* dan *in vivo*. Meskipun bukti klinis masih terbatas, temuan yang ada menunjukkan bahwa tempe berpotensi berperan sebagai komponen penting dalam pengembangan pangan fungsional berbasis nabati yang berkelanjutan. Ulasan ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah yang komprehensif bagi penelitian lanjutan dan inovasi produk tempe di masa depan.

Kata kunci: Tempe; Kedelai; Pangan fermentasi; Pangan fungsional; Senyawa bioaktif

ABSTRACT

*Tempeh is a soybean-based fermented food that has long been consumed and is increasingly recognized for its potential as a plant-based functional food. Fermentation by *Rhizopus* spp. induces substantial changes in nutritional composition and bioavailability while promoting the formation of diverse bioactive compounds. This review aims to synthesize recent findings on nutritional transformations occurring during tempeh fermentation, the characteristics of bioactive compounds generated, and the biological mechanisms underlying their potential health-related effects. Tempeh fermentation has been reported to improve protein digestibility, convert bound isoflavones into more bioavailable aglycone forms, and reduce antinutritional factors such as phytates and flatulence-causing oligosaccharides. In addition, the formation of bioactive peptides and phenolic compounds contributes to antioxidant activity, angiotensin-converting enzyme inhibition, and modulation of inflammatory responses, as documented in various *in vitro* and *in vivo* studies. Although clinical evidence remains limited, available data suggest that tempeh may represent an important component in the development of sustainable plant-based functional foods. This review provides a comprehensive scientific basis to support future research and innovation in tempeh-based food products.*

Keyword: Tempe; Soybean; Fermented food; Functional food; Bioactive compounds

*Korespondensi penulis:
Email: widya_astuti@unud.ac.id

PENDAHULUAN

Tempe merupakan produk pangan fermentasi tradisional berbasis kedelai yang telah dikonsumsi selama berabad-abad dan menjadi bagian penting dari pola makan masyarakat Indonesia. Produk ini dihasilkan melalui fermentasi kedelai oleh kapang *Rhizopus* spp., terutama *Rhizopus oligosporus* dan *Rhizopus oryzae*, yang membentuk struktur padat khas serta memberikan karakteristik sensorik dan nutrisi yang unik [1,2]. Seiring meningkatnya perhatian global terhadap pangan nabati, pangan fermentasi, dan pola makan berkelanjutan, tempe semakin mendapat pengakuan sebagai sumber protein nabati alternatif dengan potensi fungsional yang tinggi [3].

Fermentasi merupakan proses bioteknologi yang berperan penting dalam meningkatkan kualitas gizi dan bioaktivitas pangan. Pada tempe, proses fermentasi tidak hanya berfungsi sebagai metode pengawetan, tetapi juga menyebabkan transformasi signifikan pada komponen nutrisi dan senyawa bioaktif. Aktivitas enzimatik mikroorganisme fermentasi mampu mendegradasi makromolekul kompleks, seperti protein dan karbohidrat, menjadi bentuk yang lebih sederhana dan mudah dicerna [4]. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa fermentasi tempe dapat meningkatkan pencernaan protein, menghasilkan peptida bioaktif, serta mengurangi kandungan senyawa antinutrisi seperti asam fitat dan tanin [5,6].

Selain perubahan pada kualitas protein, fermentasi tempe juga memodifikasi profil senyawa fenolik dan isoflavon. Isoflavon dalam kedelai umumnya terdapat dalam bentuk glikosida, yang memiliki bioavailabilitas lebih rendah dibandingkan bentuk aglikonnya. Selama fermentasi, aktivitas β -glukosidase dari mikroorganisme berkontribusi pada konversi isoflavon glikosida menjadi aglikon, seperti genistein dan daidzein, yang memiliki aktivitas biologis lebih tinggi [7,8]. Peningkatan kandungan senyawa fenolik dan isoflavon

aglikon ini berkaitan erat dengan meningkatnya aktivitas antioksidan tempe dibandingkan kedelai yang tidak difermentasi [9].

Tempe juga dikenal sebagai sumber berbagai senyawa bioaktif lain, termasuk peptida bioaktif yang dihasilkan dari hidrolisis protein selama fermentasi dan pencernaan. Peptida-peptida ini dilaporkan memiliki berbagai aktivitas biologis, seperti aktivitas antioksidan, penghambatan enzim pengonversi angiotensin (ACE), serta potensi efek protektif terhadap stres oksidatif pada tingkat seluler [10,11]. Temuan-temuan tersebut mendukung pandangan bahwa tempe tidak hanya berfungsi sebagai sumber zat gizi, tetapi juga sebagai pangan fungsional yang berpotensi memberikan manfaat kesehatan tambahan.

Dalam beberapa dekade terakhir, sejumlah studi *in vitro*, *in vivo*, dan studi observasional telah mengevaluasi potensi kesehatan tempe, termasuk efek antioksidan, peningkatan bioavailabilitas nutrisi, serta kontribusinya terhadap kesehatan metabolik dan pencernaan [3,12]. Namun demikian, hasil-hasil penelitian tersebut masih tersebar dan sering kali difokuskan pada aspek tertentu, seperti kandungan nutrisi, aktivitas antioksidan, atau peran mikroorganisme fermentasi secara terpisah. Sintesis yang komprehensif mengenai keterkaitan antara proses fermentasi, transformasi nutrisi, pembentukan senyawa bioaktif, dan implikasinya terhadap potensi kesehatan tempe masih terbatas.

Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk menyajikan tinjauan naratif mengenai tempe sebagai pangan fermentasi fungsional dengan menyoroti transformasi nutrisi selama fermentasi, profil senyawa bioaktif yang terbentuk, serta potensi manfaat kesehatan yang dilaporkan dalam berbagai studi ilmiah. Dengan pendekatan ini, diharapkan artikel ini dapat memberikan gambaran terpadu mengenai peran tempe sebagai pangan tradisional yang relevan dalam konteks pengembangan pangan fungsional modern dan berkelanjutan.

METODE

Artikel ini disusun sebagai tinjauan naratif yang bertujuan untuk merangkum dan mensintesis bukti ilmiah terkait tempe sebagai pangan fermentasi fungsional, dengan fokus pada transformasi nutrisi, senyawa bioaktif, dan potensi manfaat kesehatan. Pendekatan tinjauan naratif dipilih untuk memungkinkan pembahasan yang komprehensif dan integratif terhadap berbagai jenis studi yang relevan.

Strategi Pencarian Literatur

Penelusuran literatur dilakukan menggunakan beberapa basis data ilmiah utama, termasuk PubMed, Scopus, Web of Science, dan Google Scholar. Pencarian dilakukan dengan kombinasi kata kunci dalam bahasa Inggris, seperti “*tempeh*”, “*fermented soy*”, “*nutritional changes*”, “*bioactive compounds*”, “*isoflavones*”, dan “*health effects*”. Kata kunci tersebut dikombinasikan menggunakan operator Boolean untuk memperoleh artikel yang relevan dengan tujuan tinjauan.

Kriteria inklusi dan eksklusi

Artikel yang disertakan dalam tinjauan ini meliputi:

- artikel penelitian asli (in vitro, in vivo, dan studi observasional),
- artikel tinjauan sebelumnya yang relevan,
- publikasi dalam jurnal ilmiah bereputasi dan prosiding konferensi.

Artikel yang tidak secara langsung membahas tempe atau pangan kedelai fermentasi, serta publikasi non-ilmiah dan laporan populer, dikecualikan dari tinjauan ini. Prioritas diberikan pada artikel berbahasa Inggris yang dipublikasikan dalam dua dekade terakhir untuk memastikan relevansi dan kebaruan informasi.

Ekstraksi dan Sintesis Data

Informasi yang diekstraksi dari artikel terpilih mencakup jenis studi, karakteristik bahan dan proses fermentasi, perubahan komposisi nutrisi, profil senyawa bioaktif,

serta temuan utama terkait potensi kesehatan. Data yang diperoleh kemudian disintesis secara kualitatif untuk mengidentifikasi pola umum, mekanisme yang mendasari, serta kesenjangan pengetahuan yang masih ada.

Keterbatasan Tinjauan

Sebagai tinjauan naratif, artikel ini tidak mengikuti prosedur sistematik secara ketat dan tidak melibatkan analisis kuantitatif seperti meta-analisis. Oleh karena itu, kemungkinan adanya bias seleksi literatur tidak dapat sepenuhnya dihindari. Namun demikian, upaya dilakukan untuk menggunakan sumber yang kredibel dan representatif guna memberikan gambaran ilmiah yang seimbang dan komprehensif mengenai tempe sebagai pangan fermentasi fungsional.

PEMBAHASAN

Transformasi Nutrisi Selama Fermentasi Tempe

Hasil penelitian menunjukkan, fermentasi tempe merupakan proses biokimia kompleks yang secara signifikan mengubah komposisi nutrisi kedelai. Aktivitas metabolik mikroorganisme fermentasi, terutama *Rhizopus* spp. dan mikroba pendamping, menyebabkan degradasi, modifikasi, serta redistribusi komponen makro dan mikronutrien. Perubahan ini berkontribusi pada peningkatan nilai gizi, pencernaan, dan bioavailabilitas nutrisi tempe dibandingkan bahan bakunya yang tidak difermentasi [1,2].

Kualitas dan Kecernaan Protein

Protein merupakan komponen nutrisi utama tempe dan salah satu aspek yang paling dipengaruhi oleh proses fermentasi. Selama fermentasi, enzim proteolitik yang dihasilkan oleh *Rhizopus* spp. menghidrolisis protein kedelai menjadi peptida berukuran lebih kecil dan asam amino bebas [3]. Proses proteolisis ini meningkatkan fraksi protein terlarut serta menurunkan ukuran molekul protein, yang berimplikasi langsung pada peningkatan pencernaan protein.

Berbagai studi melaporkan bahwa tempe memiliki tingkat kecernaan protein yang lebih tinggi dibandingkan kedelai mentah atau kedelai yang hanya mengalami perlakuan termal [4]. Selain itu, fermentasi menghasilkan peptida bioaktif yang tetap tersedia setelah proses pencernaan *in vitro*, menunjukkan bahwa tempe mampu mempertahankan kualitas protein dan bioaktivitasnya setelah dikonsumsi [5]. Temuan ini menegaskan peran fermentasi sebagai proses yang tidak hanya meningkatkan kuantitas protein terlarut, tetapi juga kualitas fungsional protein tempe.

Penurunan Faktor Antinutrisi

Kedelai secara alami mengandung berbagai senyawa antinutrisi, seperti asam fitat, tanin, dan inhibitor enzim pencernaan, yang dapat menghambat penyerapan mineral dan menurunkan ketersediaan protein. Fermentasi tempe telah terbukti efektif dalam menurunkan kandungan senyawa antinutrisi tersebut melalui aktivitas enzimatik mikroorganisme fermentasi [6].

Asam fitat, yang berperan dalam pengikatan mineral seperti kalsium, besi, dan seng, mengalami degradasi selama fermentasi akibat aktivitas fitase. Penurunan kadar asam fitat ini berkontribusi pada peningkatan bioavailabilitas mineral dalam tempe [7]. Selain itu, beberapa penelitian melaporkan bahwa proses fermentasi dapat menghilangkan atau menurunkan tanin dan senyawa antinutrisi lainnya hingga tingkat yang tidak lagi mengganggu pemanfaatan nutrisi [8]. Dengan demikian, fermentasi tempe berperan penting dalam meningkatkan efisiensi pemanfaatan zat gizi oleh tubuh.

Perubahan Makronutrien dan Mikronutrien

Selain protein, fermentasi tempe juga memengaruhi komponen makronutrien lain, seperti karbohidrat dan lemak. Selama fermentasi, sebagian karbohidrat kompleks dihidrolisis menjadi gula sederhana yang dimanfaatkan oleh mikroorganisme sebagai sumber energi [1]. Proses ini dapat menurunkan kandungan karbohidrat total,

sekaligus meningkatkan ketersediaan energi dan kemudahan pencernaan tempe.

Perubahan pada fraksi lemak relatif lebih kecil dibandingkan protein dan karbohidrat, namun fermentasi dapat memodifikasi profil asam lemak dan meningkatkan kestabilan oksidatif produk [9]. Di sisi mikronutrien, tempe dilaporkan mengandung vitamin dan mineral yang lebih mudah diserap dibandingkan kedelai non-fermentasi. Fermentasi berkontribusi pada peningkatan ketersediaan beberapa vitamin B kompleks, termasuk vitamin B12, yang keberadaannya pada pangan nabati fermentasi menjadi perhatian penting dalam konteks nutrisi berbasis tanaman [10].

Secara keseluruhan, transformasi nutrisi yang terjadi selama fermentasi tempe menunjukkan bahwa proses ini tidak hanya mempertahankan nilai gizi kedelai, tetapi juga meningkatkan kualitas nutrisi dan bioavailabilitasnya. Kombinasi peningkatan kecernaan protein, penurunan antinutrisi, serta modifikasi makro dan mikronutrien menjadikan tempe sebagai pangan fermentasi dengan profil nutrisi yang unggul dan relevan sebagai pangan fungsional.

Senyawa Bioaktif dalam Tempe

Tempe dikenal sebagai sumber berbagai senyawa bioaktif yang terbentuk atau dimodifikasi selama proses fermentasi. Senyawa-senyawa ini berperan penting dalam menentukan sifat fungsional tempe dan menjadi dasar ilmiah bagi potensi manfaat kesehatannya. Fermentasi oleh *Rhizopus* spp. dan mikroorganisme pendamping memicu transformasi kimia dan biokimia yang meningkatkan kuantitas maupun bioaktivitas senyawa bioaktif dibandingkan kedelai yang tidak difermentasi [1,2].

Isoflavon dan Senyawa Fenolik

Isoflavon merupakan kelompok fitokimia utama dalam kedelai yang banyak dipelajari karena aktivitas biologisnya. Pada kedelai mentah, isoflavon umumnya terdapat dalam bentuk glikosida, yang memiliki tingkat bioavailabilitas relatif rendah. Selama

fermentasi tempe, aktivitas enzim β -glukosidase dari mikroorganisme fermentasi berperan dalam menghidrolisis ikatan glikosida, sehingga meningkatkan proporsi isoflavon dalam bentuk aglikon seperti genistein dan daidzein [7,8].

Bentuk aglikon isoflavon diketahui memiliki aktivitas biologis yang lebih tinggi, termasuk aktivitas antioksidan, antiinflamasi, dan potensi efek protektif terhadap penyakit degeneratif [9]. Selain itu, fermentasi juga dapat meningkatkan kandungan total senyawa fenolik dan kapasitas antioksidan tempe, sebagaimana dilaporkan dalam berbagai studi *in vitro* menggunakan metode pengujian radikal bebas [9]. Peningkatan senyawa fenolik ini menunjukkan bahwa fermentasi tempe tidak hanya mempertahankan fitokimia kedelai, tetapi juga mengoptimalkan aktivitas fungsionalnya.

Peptida Bioaktif

Selain fitokimia, fermentasi tempe menghasilkan berbagai peptida bioaktif yang berasal dari hidrolisis protein kedelai. Aktivitas proteolitik selama fermentasi memecah protein menjadi peptida berukuran kecil yang berpotensi menunjukkan aktivitas biologis spesifik [10]. Peptida bioaktif dalam tempe telah dilaporkan memiliki aktivitas antioksidan, penghambatan enzim pengonversi angiotensin (ACE), serta potensi perlindungan terhadap stres oksidatif pada tingkat seluler [10,11].

Keberadaan peptida bioaktif ini menempatkan tempe sebagai sumber protein fungsional, di mana manfaatnya tidak hanya bergantung pada kandungan asam amino esensial, tetapi juga pada aktivitas biologis peptida yang dihasilkan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa peptida bioaktif tempe tetap stabil dan aktif setelah simulasi pencernaan *in vitro*, yang mengindikasikan potensi ketersediaannya secara biologis setelah konsumsi [5].

Komponen Bioaktif Lainnya

Selain isoflavon dan peptida, tempe juga mengandung senyawa bioaktif lain, seperti

sterol, saponin, dan komponen minor hasil metabolisme mikroba selama fermentasi. Interaksi antara mikroorganisme fermentasi dan matriks pangan kedelai dapat menghasilkan senyawa-senyawa baru atau meningkatkan aktivitas biologis senyawa yang sudah ada [3]. Keanekaragaman senyawa bioaktif ini memperkuat peran tempe sebagai pangan fermentasi fungsional dengan efek sinergis antara nutrisi dan komponen bioaktifnya.

Secara keseluruhan, keberadaan dan peningkatan senyawa bioaktif selama fermentasi menjadikan tempe sebagai pangan yang tidak hanya bernilai gizi tinggi, tetapi juga memiliki potensi biologis yang relevan dalam mendukung kesehatan. Pemahaman mengenai profil senyawa bioaktif tempe menjadi dasar penting untuk mengevaluasi implikasi kesehatannya, yang akan dibahas lebih lanjut pada bagian berikutnya.

Potensi Kesehatan Tempe

Tempe semakin mendapat perhatian sebagai pangan fermentasi fungsional karena kombinasi antara nilai gizi yang tinggi dan keberadaan berbagai senyawa bioaktif. Transformasi nutrisi dan pembentukan senyawa bioaktif selama fermentasi berkontribusi terhadap potensi manfaat kesehatan tempe, yang telah dilaporkan dalam berbagai studi *in vitro*, *in vivo*, dan studi observasional [2,3]. Bagian ini membahas bukti ilmiah terkait potensi kesehatan tempe berdasarkan mekanisme biologis yang telah diidentifikasi.

Aktivitas Antioksidan dan Modulasi Stres Oksidatif

Stres oksidatif merupakan salah satu faktor utama yang berperan dalam perkembangan berbagai penyakit degeneratif. Tempe dilaporkan memiliki aktivitas antioksidan yang lebih tinggi dibandingkan kedelai non-fermentasi, yang terutama dikaitkan dengan peningkatan kandungan isoflavon aglikon, senyawa fenolik, dan peptida bioaktif [9,10]. Beberapa studi *in vitro* menunjukkan bahwa ekstrak tempe mampu menangkap radikal bebas dan

menurunkan tingkat peroksidasi lipid secara signifikan [9].

Selain itu, studi berbasis sel menunjukkan bahwa ekstrak tempe dapat memberikan efek protektif terhadap sel yang mengalami stres oksidatif, dengan cara menurunkan akumulasi spesies oksigen reaktif dan meningkatkan mekanisme pertahanan antioksidan endogen [11]. Temuan ini mendukung peran tempe sebagai sumber senyawa antioksidan alami yang berpotensi berkontribusi dalam pencegahan kerusakan sel akibat stres oksidatif.

Manfaat Kardiometabolik Potensial

Beberapa komponen bioaktif dalam tempe, khususnya isoflavon dan peptida bioaktif, telah dikaitkan dengan potensi manfaat kardiometabolik. Peptida hasil fermentasi tempe dilaporkan memiliki aktivitas penghambatan enzim pengonversi angiotensin (ACE), yang berperan dalam regulasi tekanan darah [10]. Aktivitas ini menunjukkan potensi tempe sebagai bagian dari pola makan yang mendukung kesehatan kardiovaskular.

Isoflavon aglikon, seperti genistein dan daidzein, juga dikaitkan dengan efek positif terhadap metabolisme lipid dan sensitivitas insulin. Meskipun sebagian besar bukti berasal dari studi eksperimental dan observasional, konsumsi pangan berbasis kedelai fermentasi, termasuk tempe, sering dikaitkan dengan profil lipid yang lebih baik dan risiko penyakit kardiovaskular yang lebih rendah [3]. Namun demikian, diperlukan lebih banyak studi klinis terkontrol untuk mengonfirmasi hubungan kausal tersebut.

Kesehatan Pencernaan dan Ketersediaan Hayati Nutrien

Fermentasi tempe berkontribusi pada peningkatan pencernaan protein dan penurunan senyawa antinutrisi, yang secara langsung berdampak pada kesehatan pencernaan dan pemanfaatan nutrien. Peningkatan pencernaan protein dan bioavailabilitas mineral menjadikan tempe lebih mudah dicerna dibandingkan kedelai mentah atau produk kedelai non-fermentasi

[4,7]. Hal ini sangat relevan bagi kelompok populasi dengan kebutuhan nutrisi tinggi atau kapasitas pencernaan terbatas.

Selain itu, konsumsi pangan fermentasi secara umum dikaitkan dengan modulasi mikrobiota usus. Meskipun tempe tidak selalu diklasifikasikan sebagai pangan probiotik, komponen hasil fermentasi dan metabolit mikroba yang terkandung di dalamnya berpotensi memberikan efek prebiotik dan mendukung keseimbangan mikrobiota usus [2]. Efek ini dapat berkontribusi pada kesehatan pencernaan secara keseluruhan.

Peran Tempe dalam Pola Makan Nabati dan Berkelanjutan

Dalam konteks pola makan berbasis nabati dan keberlanjutan pangan, tempe memiliki posisi strategis sebagai sumber protein nabati yang terjangkau, bernilai gizi tinggi, dan ramah lingkungan. Kandungan protein berkualitas tinggi, vitamin, mineral, serta senyawa bioaktif menjadikan tempe sebagai alternatif yang relevan untuk memenuhi kebutuhan nutrisi dalam diet berbasis tanaman [2,12].

Selain manfaat kesehatan individu, konsumsi tempe juga berpotensi mendukung sistem pangan berkelanjutan melalui pemanfaatan sumber daya lokal dan proses produksi yang relatif efisien. Oleh karena itu, potensi kesehatan tempe tidak hanya perlu dipandang dari sudut pandang biomedis, tetapi juga dalam konteks nutrisi masyarakat dan keberlanjutan global.

Sudut Pandang dan Tantangan Masa Depan

Seiring meningkatnya minat terhadap pangan fermentasi dan pangan fungsional berbasis nabati, tempe memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut baik dalam konteks ilmiah maupun aplikatif. Namun demikian, pengembangan tempe sebagai pangan fungsional modern juga dihadapkan pada berbagai tantangan yang perlu diperhatikan secara komprehensif.

Standardisasi Fermentasi dan Kualitas Produk

Salah satu tantangan utama dalam pengembangan tempe adalah variasi proses fermentasi yang digunakan, baik pada skala rumah tangga maupun industri. Perbedaan jenis bahan baku, starter mikroba, kondisi fermentasi, dan proses pasca-fermentasi dapat menyebabkan variasi signifikan pada komposisi nutrisi dan kandungan senyawa bioaktif tempe [1,2]. Oleh karena itu, standarisasi proses fermentasi menjadi aspek penting untuk menjamin konsistensi kualitas dan efektivitas fungsional produk.

Pengembangan starter terstandar dengan karakteristik enzimatik dan keamanan mikrobiologis yang terjamin dapat menjadi langkah strategis untuk meningkatkan reproducibility hasil fermentasi. Selain itu, pendekatan berbasis bioteknologi dan kontrol proses yang lebih presisi berpotensi mengoptimalkan pembentukan senyawa bioaktif tertentu tanpa mengorbankan mutu sensorik tempe.

Bukti Ilmiah dan Validasi Klinis

Meskipun berbagai studi *in vitro* dan *in vivo* telah menunjukkan potensi manfaat kesehatan tempe, bukti klinis pada manusia masih relatif terbatas. Sebagian besar klaim fungsional tempe masih didasarkan pada mekanisme biologis dan hasil studi eksperimental, sehingga diperlukan penelitian klinis terkontrol untuk mengonfirmasi efektivitas dan dosis konsumsi yang optimal [3].

Ke depan, studi intervensi berbasis populasi dan uji klinis acak terkontrol sangat dibutuhkan untuk memperkuat dasar ilmiah tempe sebagai pangan fungsional. Pendekatan multidisipliner yang mengintegrasikan ilmu pangan, nutrisi, dan ilmu kesehatan akan berperan penting dalam menjembatani kesenjangan antara hasil laboratorium dan aplikasi kesehatan masyarakat.

Inovasi Bahan Baku dan Pengolahan

Selain kedelai, penggunaan bahan baku alternatif atau kombinasi bahan lokal

berpotensi memperluas diversifikasi produk tempe. Penelitian mengenai tempe berbasis kacang-kacangan non-kedelai, sereal, atau penambahan bahan bioaktif tambahan telah menunjukkan potensi peningkatan nilai gizi dan penerimaan konsumen [8]. Inovasi ini membuka peluang untuk mengembangkan tempe dengan profil nutrisi yang disesuaikan dengan kebutuhan spesifik, seperti pangan untuk kelompok rentan atau diet khusus.

Di sisi lain, pengembangan teknologi pengolahan pasca-fermentasi, termasuk metode pemasakan dan pengawetan, juga memegang peranan penting dalam mempertahankan kandungan senyawa bioaktif tempe. Studi lebih lanjut diperlukan untuk memahami dampak berbagai metode pengolahan terhadap stabilitas nutrisi dan aktivitas biologis tempe.

Penerimaan Global dan Pertimbangan Keberlanjutan

Meskipun tempe berasal dari Indonesia, potensinya sebagai pangan global semakin meningkat seiring tren konsumsi pangan nabati dan berkelanjutan. Namun, penerimaan global tempe masih menghadapi tantangan terkait preferensi sensorik, persepsi konsumen, dan adaptasi budaya pangan [2]. Upaya edukasi konsumen dan inovasi produk berbasis tempe yang sesuai dengan selera pasar global menjadi kunci untuk memperluas adopsinya.

Dari perspektif keberlanjutan, tempe memiliki keunggulan sebagai produk pangan dengan jejak lingkungan relatif rendah dan efisiensi penggunaan sumber daya yang tinggi. Integrasi tempe dalam sistem pangan berkelanjutan berpotensi mendukung ketahanan pangan dan nutrisi global, khususnya dalam konteks transisi menuju pola makan berbasis tanaman.

KESIMPULAN

Tempe merupakan pangan fermentasi tradisional yang memiliki relevansi tinggi dalam konteks nutrisi modern dan pengembangan pangan fungsional berbasis nabati. Proses fermentasi yang melibatkan

Rhizopus spp. tidak hanya mempertahankan nilai gizi kedelai, tetapi juga menginduksi transformasi nutrisi yang signifikan, termasuk peningkatan pencernaan protein, penurunan senyawa antinutrisi, serta peningkatan bioavailabilitas vitamin dan mineral. Transformasi ini menempatkan tempe sebagai sumber protein nabati berkualitas tinggi yang mudah dicerna dan efisien secara nutrisi.

Selain peningkatan kualitas nutrisi, fermentasi tempe juga berperan penting dalam pembentukan dan peningkatan berbagai senyawa bioaktif, seperti isoflavon aglikon, senyawa fenolik, dan peptida bioaktif. Keberadaan senyawa-senyawa ini berkontribusi pada aktivitas biologis tempe, termasuk aktivitas antioksidan, potensi manfaat kardiometabolik, serta dukungan terhadap kesehatan pencernaan dan pemanfaatan nutrisi. Meskipun sebagian besar bukti masih berasal dari studi *in vitro*, *in vivo*, dan observasional, temuan-temuan tersebut secara konsisten menunjukkan bahwa tempe memiliki potensi sebagai pangan fungsional yang mendukung kesehatan.

Dalam konteks pola makan berbasis tanaman dan keberlanjutan pangan, tempe menawarkan keunggulan sebagai produk yang terjangkau, ramah lingkungan, dan bernilai gizi tinggi. Namun demikian, pengembangan tempe sebagai pangan fungsional modern masih memerlukan upaya lanjutan, terutama dalam hal standarisasi proses fermentasi, penguatan bukti klinis, dan inovasi produk untuk meningkatkan penerimaan global.

Secara keseluruhan, tempe merepresentasikan contoh nyata bagaimana pangan tradisional dapat berkontribusi terhadap solusi nutrisi dan kesehatan masa depan. Sintesis ilmiah dalam artikel ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi penelitian lanjutan dan pengembangan tempe sebagai pangan fermentasi fungsional yang relevan secara ilmiah, nutrisi, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Afifah, D. N., et al. (2019). Nutrition content, protein quality, and antioxidant activity of various tempeh gembus preparations. *Journal of Food and Nutrition Research*, 7(8), 605–613.
- Ahnan-Winarno, A. D., Cordeiro, L., Winarno, F. G., Gibbons, J. G., & Xiao, H. (2021). Tempeh: A semicentennial review on its health benefits, fermentation, safety, processing, sustainability, and affordability. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(2), 1717–1767.
- Ahmad, A., Ramasamy, K., Majeed, A., & Mani, V. (2015). Enhancement of β -secretase inhibition and antioxidant activities of tempeh through enrichment of bioactive aglycones. *Pharmaceutical Biology*, 53(5), 758–765.
- Astuti, T., Sitompul, M., & Faadhilanisyah, A. (2023). Tempeh consumption patterns in Indonesian family and contribution nutritional adequacy. *AcTion: Aceh Nutrition Journal*, 8(2), 85–95.
- Barus, T., et al. (2019). Tempeh antioxidant activity using DPPH method: Effects of fermentation, processing, and microorganisms. *Journal of Food Biochemistry*.
- Cao, Z. H., Green-Johnson, J., Buckley, N., & Lin, Q. (2019). Bioactivity of soy-based fermented foods: A review. *Biotechnology Advances*, 37(1), 223–238.
- K. S. (2022). Production, quality and acceptance of tempeh prepared using *Dolichos lablab* (Indian bean) legume. *Madras Agricultural Journal*, 109, 1–7.
- Nout, M. J. R., & Kiers, J. L. (2005). Tempe fermentation, innovation and functionality: Update into the third millennium. *Journal of Applied Microbiology*, 98(4), 789–805.
- Rizzo, G. (2024). Soy-based tempeh as a functional food: Evidence for human health and future perspective. *Frontiers in Bioscience*, 29, 1–15.

- Surya, R., & Tedjakusuma, F. (2025). Effects of different cooking methods on the antioxidant activity and isoflavone profile of tempeh extract. *IOP Conference Series: Earth and Environment*.
- Surya, R., et al. (2024). Supplementation of red alga (*Porphyra*) improves nutritional profile, protein digestibility and sensory acceptance of tempeh. *IOP Conference Series: Earth and Environment*.
- Surya, R., & Romulo, A. (2020). Tempeh extract protects HepG2 cells against oxidative stress-induced cell death. *Journal of Physics: Conference Series*.