

ANALISIS EFISIENSI FERMENTASI TEMPEH ANTARA METODE TRADISIONAL DAN MODERN

Agustiaman Nazara¹, Putri Berlian Zebua², Suci Hati Lase³, Listen Arahan Zega⁴,
Lilis Febrika Putri Lase⁵, Novelina Andriani Zega⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6}Universitas Nias, Jl. Yos Sudarso No. 118/E-S, Gunungsitoli, Sumatera Utara, Indonesia
Email: suchatilase1@gmail.com

Article History

Received: 15-01-2026

Revision: 25-01-2026

Accepted: 27-01-2026

Published: 29-01-2026

Abstract. This study aims to analyse the comparison of tempeh fermentation efficiency between traditional methods and modern methods based on fermentation parameter control. The research method used was a systematic literature review of 23 accredited national journal articles indexed by SINTA and published between 2013 and 2024. Articles were selected based on inclusion criteria covering discussions on fermentation parameters, tempeh product quality, and fermentation method comparisons. Data were analysed descriptively and comparatively by examining aspects of fermentation time, quality consistency, product yield, and microbial contamination levels. The results of the study show that modern fermentation methods that apply temperature control and the use of standardised starters can shorten fermentation time by 18–24% compared to traditional methods. In addition, modern methods produce better quality consistency, as indicated by lower protein content and texture variation. Product yield also increased by 12–15%, accompanied by lower levels of pathogenic microbial contamination. These findings indicate that the application of modern fermentation methods has the potential to improve the efficiency and quality of tempeh production and can be a relevant alternative for the development of small and medium-scale tempeh industries without eliminating local food characteristics.

Keywords: Method, Tempeh Fermentation, Traditional, Modern

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan efisiensi fermentasi tempeh antara metode tradisional dan metode modern berbasis kontrol parameter fermentasi. Metode penelitian yang digunakan adalah studi literatur sistematis terhadap 23 artikel jurnal nasional terakreditasi yang terindeks SINTA dan diterbitkan pada periode 2013–2024. Artikel dipilih berdasarkan kriteria inklusi yang mencakup pembahasan mengenai parameter fermentasi, kualitas produk tempeh, dan perbandingan metode fermentasi. Data dianalisis secara deskriptif-komparatif dengan menelaah aspek waktu fermentasi, konsistensi kualitas, rendemen produk, dan tingkat kontaminasi mikroba. Hasil kajian menunjukkan bahwa metode fermentasi modern yang menerapkan kontrol suhu dan penggunaan starter terstandar mampu mempersingkat waktu fermentasi sebesar 18–24% dibandingkan metode tradisional. Selain itu, metode modern menghasilkan konsistensi kualitas yang lebih baik, ditunjukkan oleh variasi kadar protein dan tekstur yang lebih rendah. Rendemen produk juga meningkat sebesar 12–15%, disertai dengan tingkat kontaminasi mikroba patogen yang lebih rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa penerapan metode fermentasi modern berpotensi meningkatkan efisiensi dan kualitas produksi tempeh, serta dapat menjadi alternatif yang relevan bagi pengembangan industri tempeh skala UMKM dan menengah tanpa menghilangkan karakteristik pangan lokal.

Kata Kunci: Metode, Fermentasi Tempe, Tradisional, Modern

How to Cite: Nazara, A., Zebua, P. B., Lase, S. H., Zega, L. A., Lase, L. F. P., & Zega, N. A. (2026). Analisis Efisiensi Fermentasi Tempeh Antara Metode Tradisional dan Modern. *Indo-MathEdu Intellectuals Journal*, 7 (1), 1075-1086. <http://doi.org/10.54373/imeij.v7i1.5044>

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki tradisi panjang dalam pengolahan kedelai menjadi tempeh melalui proses fermentasi menggunakan kapang *Rhizopus oligosporus*. Produk fermentasi ini telah menjadi sumber protein nabati utama bagi masyarakat Indonesia dengan konsumsi mencapai 2,5 juta ton kedelai per tahun untuk produksi tempeh (Vivia et al., 2021). Proses fermentasi mengubah struktur kimia kedelai melalui aktivitas enzimatik yang meningkatkan daya cerna protein dan menghasilkan senyawa bioaktif bermanfaat bagi kesehatan. Nilai ekonomi industri tempeh mencapai triliunan rupiah dengan melibatkan ratusan ribu pelaku usaha di tingkat rumah tangga dan UMKM.

Metode fermentasi tradisional yang masih mendominasi produksi tempeh di Indonesia mengandalkan pengetahuan empiris turun-temurun tanpa kontrol ketat terhadap parameter fermentasi. Produsen tradisional menggunakan ragi atau usar yang dikembangkan secara alami dengan komposisi mikroba yang tidak terstandar (Rosnawita et al., 2015). Proses fermentasi berlangsung pada suhu ruang dengan durasi bervariasi tergantung kondisi lingkungan. Pembungkusan menggunakan daun pisang atau plastik berlubang mengandalkan aerasi pasif. Pendekatan ini menghasilkan produk dengan karakteristik organoleptik khas namun menghadapi kendala konsistensi kualitas antar batch produksi.

Variabilitas kualitas tempe tradisional dipengaruhi oleh kondisi fermentasi yang tidak terkontrol, seperti fluktuasi suhu lingkungan yang berdampak pada laju pertumbuhan miselium kapang dan aktivitas enzimatisnya. Hal ini sejalan dengan temuan Kristiadi (2024), yang menjelaskan bahwa fermentasi tempe dipengaruhi oleh faktor lingkungan termasuk suhu dan media pembungkus yang akan menentukan dinamika mikrobiota serta keragaman bakteri dalam tempe tradisional yang berbeda-beda di berbagai daerah di Indonesia. Variasi dalam komposisi mikroorganisme starter alami juga berkontribusi terhadap perbedaan kualitas produk akhir, karena profil komunitas bakteri dan kapang yang berbeda dapat memengaruhi metabolisme fermentasi dan karakteristik organoleptik tempe. Selain itu, cara tradisional menentukan durasi fermentasi secara visual berdasarkan pengalaman produsen sering kali menyebabkan inkonsistensi karakteristik produk akhir, karena tidak ada parameter waktu atau suhu yang baku dalam praktiknya. Kondisi ini menjadi hambatan bagi pengembangan produksi tempe skala lebih besar yang menuntut standar kualitas yang konsisten untuk pasar modern.

Perkembangan teknologi fermentasi membawa pendekatan baru dalam produksi tempeh melalui kontrol parameter proses. Metode modern menggunakan starter murni *Rhizopus oligosporus* dengan konsentrasi spora terstandar yang menjamin konsistensi inokulasi (Sam et al., 2022). Inkubator atau ruang fermentasi dengan pengatur suhu mempertahankan kondisi

optimal untuk pertumbuhan kapang. Sistem aerasi terkontrol menyediakan oksigen sesuai kebutuhan metabolisme aerobik. Monitoring parameter fermentasi secara berkala memungkinkan intervensi untuk mencegah deviasi kualitas. Integrasi teknologi ini bertujuan meningkatkan efisiensi produksi sambil mempertahankan karakteristik produk tempeh.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengeksplorasi aspek-aspek spesifik dalam fermentasi tempeh modern. Wahyudi (2018) meneliti pengaruh pengendalian suhu fermentasi terhadap laju pertumbuhan miselium *Rhizopus* dan kualitas protein tempeh yang dihasilkan, serta menunjukkan bahwa suhu terkontrol berkontribusi pada proses fermentasi yang lebih stabil. Kristianto et al. (2015) membandingkan karakteristik tempeh yang diproduksi menggunakan starter komersial dengan usar tradisional dan menemukan perbedaan pada konsistensi tekstur serta homogenitas produk. Sementara itu, Widyastuti dan Zaki (2017) menganalisis pengaruh lama fermentasi terhadap kadar asam fitat dan daya cerna protein, yang menunjukkan bahwa pengaturan waktu fermentasi berperan penting dalam meningkatkan nilai gizi tempeh. Meskipun demikian, kajian yang membahas perbandingan efisiensi fermentasi secara menyeluruh antara metode tradisional dan modern masih terbatas.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, diperlukan kajian yang secara khusus membandingkan metode fermentasi tempeh tradisional dan modern dengan menempatkan efisiensi proses dan kualitas produk dalam satu kerangka analisis. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi fermentasi tempeh melalui perbandingan kedua metode berdasarkan kajian literatur sistematis. Analisis difokuskan pada perbedaan parameter proses fermentasi, efisiensi waktu, rendemen dan konsistensi kualitas produk, serta aspek keamanan pangan yang berkaitan dengan potensi kontaminasi mikroba. Selain itu, penelitian ini juga menelaah implikasi praktis penerapan metode fermentasi terhadap skalabilitas dan kebutuhan industri tempeh, khususnya pada level UMKM. Dengan demikian, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi landasan ilmiah dalam pengambilan keputusan terkait pengembangan teknologi fermentasi tempeh yang lebih efisien tanpa menghilangkan karakteristik produk yang telah melekat kuat pada preferensi konsumen.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur dengan pendekatan kajian literatur sistematis untuk menganalisis perbandingan efisiensi fermentasi tempeh antara metode tradisional dan metode modern. Studi literatur dipilih karena memungkinkan peneliti untuk mensintesis hasil-hasil penelitian terdahulu secara komprehensif dan berbasis bukti ilmiah yang telah terpublikasi.

Sumber data dalam penelitian ini berupa artikel jurnal nasional terakreditasi yang diperoleh melalui basis data Google Scholar dan portal SINTA. Artikel yang dikaji dibatasi pada publikasi periode 2013–2024 agar temuan yang dianalisis relevan dengan perkembangan terkini dalam teknologi fermentasi tempeh. Kriteria inklusi meliputi artikel yang membahas parameter fermentasi tempeh, perbandingan metode tradisional dan modern, kualitas produk (seperti waktu fermentasi, rendemen, tekstur, dan kandungan gizi), serta aspek keamanan pangan. Artikel yang tidak relevan dengan topik, tidak melalui proses penelaahan sejawat, atau hanya bersifat deskriptif tanpa data pendukung dikeluarkan dari analisis.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui dokumentasi, yaitu dengan mengidentifikasi, menyeleksi, dan menelaah artikel yang memenuhi kriteria inklusi. Setiap artikel yang terpilih dianalisis untuk mengekstraksi informasi utama terkait tujuan penelitian, metode fermentasi yang digunakan, parameter proses, serta hasil dan temuan utama. Analisis data dilakukan secara kualitatif-deskriptif dengan mengikuti tahapan analisis Miles dan Huberman, yang meliputi reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan. Pada tahap reduksi data, informasi yang relevan dengan tujuan penelitian diseleksi dan dikategorikan. Selanjutnya, data disajikan dalam bentuk uraian naratif dan perbandingan tematik antara metode fermentasi tradisional dan modern. Tahap akhir berupa penarikan kesimpulan dilakukan dengan mensintesis temuan-temuan utama untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai efisiensi fermentasi, kualitas produk, dan implikasi praktis bagi pengembangan industri tempeh di Indonesia.

HASIL

Karakteristik Parameter Proses Fermentasi

Metode tradisional dan modern menunjukkan perbedaan mendasar dalam pengendalian parameter fermentasi. (Sam et al., 2022) mencatat produsen tradisional melakukan fermentasi pada suhu ruang berkisar 25-32°C dengan fluktuasi harian mencapai 5-7°C. Durasi fermentasi bervariasi antara 36-48 jam tergantung kondisi cuaca dan ketebalan lapisan kedelai. Starter yang digunakan berupa usar dengan komposisi mikroba campuran mencakup *Rhizopus oligosporus*, *Rhizopus oryzae*, dan bakteri kontaminan. Konsentrasi spora tidak terukur dengan aplikasi berdasarkan estimasi visual produsen. Sebaliknya, metode modern mengimplementasikan kontrol ketat terhadap kondisi fermentasi. Wahyudi (2018) melaporkan penggunaan inkubator dengan suhu konstan 30-32°C dan kelembaban relatif 80-85%. Starter komersial mengandung *Rhizopus oligosporus* murni dengan konsentrasi spora 10^6 - 10^7 per gram. (Kristianto et al., 2015) menggunakan inokulasi terstandar 0,5-1% dari berat substrat

basah. Sistem aerasi pasif atau aktif menjaga ketersediaan oksigen untuk metabolisme aerobik. Parameter proses dimonitor secara berkala dengan penyesuaian jika terjadi deviasi dari target.

Kontrol pH substrat juga berbeda antar metode. Rosnawita et al. (2015) menemukan pH awal kedelai rebus metode tradisional berkisar 6,2-6,8 tanpa perlakuan khusus. Metode modern melakukan adjustment pH ke rentang optimal 5,0-5,5 menggunakan asam asetat atau laktat untuk menekan pertumbuhan bakteri kontaminan. Hal ini menunjukkan pH optimal meningkatkan laju pertumbuhan miselium *Rhizopus oligosporus* dan aktivitas enzim protease.

Efisiensi Waktu Fermentasi

Durasi fermentasi merupakan faktor kritis dalam produktivitas dan biaya produksi. Analisis komparatif menunjukkan metode modern mempersingkat waktu fermentasi signifikan dibanding pendekatan tradisional. Durrotul & Kurnia (n.d.) melaporkan fermentasi tradisional memerlukan 40-48 jam untuk mencapai pertumbuhan miselium optimal pada suhu ruang 27-30°C. Variabilitas waktu mencapai 8 jam antar batch tergantung fluktuasi suhu lingkungan dan karakteristik starter. Metode modern dengan suhu terkontrol 31-32°C mempercepat pertumbuhan miselium. Wahyudi (2018) mencatat fermentasi selesai dalam 30-36 jam dengan starter terstandar. Sam et al., (2022) melaporkan konsistensi waktu fermentasi dengan standar deviasi hanya 1,5 jam dibanding 4,2 jam pada metode tradisional. Percepatan ini disebabkan suhu optimal memacu aktivitas metabolisme kapang dan sintesis enzim ekstraseluler.

Sam et al., (2022) membandingkan kinetika pertumbuhan miselium pada kedua metode. Fase lag pada metode modern lebih pendek (6-8 jam) dibanding tradisional (10-14 jam) karena viabilitas spora starter lebih tinggi. Fase eksponensial pertumbuhan miselium mencapai puncak lebih cepat dengan laju spesifik pertumbuhan 0,18-0,22 per jam pada metode modern versus 0,12-0,16 per jam pada tradisional. Konsekuensinya, pembentukan jaringan miselium kompak yang mengikat substrat tercapai lebih awal.

Tabel 1. Perbandingan waktu fermentasi metode tradisional dan modern

Parameter	Metode Tradisional	Metode Modern	Selisih (%)
Durasi total fermentasi	40-48 jam	30-36 jam	-18 hingga -24
Fase lag	10-14 jam	6-8 jam	-29 hingga -43
Waktu pembentukan miselium penuh	30-36 jam	22-28 jam	-20 hingga -27
Standar deviasi waktu	4,2 jam	1,5 jam	-64
Laju pertumbuhan spesifik	0,12-0,16/jam	0,18-0,22/jam	+37 hingga +50

Sumber: Sintesis dari Wahyudi (2018), Sam et al.,(2022), Kristiadi (2024) , Sam et al., (2022)

Konsistensi Kualitas Produk

Variabilitas kualitas antar batch merupakan tantangan utama metode tradisional. Kristianto et al., (2015) mengukur koefisien variasi kadar protein tempeh tradisional mencapai 8,4% dibanding 3,2% pada metode modern dalam 20 batch produksi. Perbedaan tekstur dinilai melalui uji penetrometer menunjukkan simpangan baku 12,6 N pada tradisional versus 4,8 N pada modern. Inkonsistensi ini berkaitan dengan variabel proses yang tidak terkontrol. Karakteristik organoleptik juga menunjukkan perbedaan konsistensi. Vivia et al., (2021) melakukan uji sensori terhadap atribut warna, aroma, dan tekstur pada 15 batch tempeh dari masing-masing metode. Metode tradisional menghasilkan skor yang lebih bervariasi dengan rentang 5,2-7,8 (skala 9) untuk kesukaan keseluruhan. Metode modern menunjukkan rentang lebih sempit 6,5-7,6 dengan rerata lebih stabil. Panelis menilai tempeh modern lebih seragam dalam warna putih miselium dan tekstur kompak.

Kadar protein terlarut sebagai indikator hidrolisis proteolitik menunjukkan perbedaan signifikan. Widyastuti dan Zaki (2017) melaporkan kadar protein terlarut tempeh tradisional berkisar 3,8-6,2% dengan rerata 4,9%. Metode modern menghasilkan rentang 5,1-6,0% dengan rerata 5,5%. Aktivitas enzim protease lebih konsisten pada metode modern dengan rerata 2,8 U/g dibanding 2,2 U/g pada tradisional. Konsistensi aktivitas enzimatis berkontribusi pada keseragaman kualitas nutrisi. Rosnawita et al., (2015) menganalisis kadar asam fitat sebagai faktor antinutrisi. Fermentasi tradisional menurunkan asam fitat 45-62% dari kedelai awal, sedangkan modern mencapai reduksi 58-68%. Variabilitas penurunan pada tradisional lebih tinggi terkait perbedaan pH dan aktivitas fitase kapang. Metode modern dengan pH terkontrol mengoptimalkan aktivitas fitase sehingga degradasi asam fitat lebih konsisten.

Rendemen dan Efisiensi Bahan

Rendemen produk merupakan indikator efisiensi konversi substrat menjadi produk jadi. Kristiadi (2024) menghitung rendemen tempeh tradisional berkisar 2,1-2,4 kg produk per kilogram kedelai kering dengan rerata 2,25 kg. Metode modern menghasilkan rendemen 2,4-2,7 kg dengan rerata 2,55 kg. Peningkatan rendemen 12-15% pada metode modern disebabkan kontrol kelembaban yang lebih baik mencegah kehilangan air berlebih selama fermentasi. Sam et al., (2022) mengidentifikasi faktor yang mempengaruhi rendemen. Metode tradisional mengalami kehilangan substrat akibat pertumbuhan kapang berlebih pada permukaan terbuka dan konsumsi glukosa untuk respirasi tidak efisien. Metode modern dengan aerasi terkontrol meminimalkan respirasi berlebih sambil mempertahankan metabolisme aerobik optimal. Kadar

air produk akhir metode modern lebih stabil pada 60-63% dibanding tradisional 58-67%, menunjukkan kontrol kelembaban lebih baik.

Losses akibat batch gagal juga berbeda signifikan. Sam et al., (2022) mencatat tingkat kegagalan produksi tradisional mencapai 5-8% dari total batch karena kontaminasi atau pertumbuhan miselium tidak sempurna. Metode modern dengan kontrol mikrobiologis ketat menurunkan tingkat kegagalan menjadi 1-2%. Pengurangan batch gagal meningkatkan efisiensi penggunaan bahan baku dan mengurangi pemborosan. Kristianto et al., (2015) mengevaluasi konversi protein selama fermentasi. Metode tradisional mempertahankan 88-92% protein awal kedelai dalam produk akhir. Metode modern mencapai retensi protein 92-95% karena kontrol kondisi fermentasi mencegah proteolisis berlebih. Peningkatan efisiensi konversi protein berkontribusi pada nilai nutrisi lebih tinggi per unit bahan baku.

Aspek Keamanan Pangan dan Kontaminasi

Kontaminasi mikroba patogen atau pembusuk menjadi risiko keamanan pangan yang perlu dikontrol. Rosnawita et al (2015) menganalisis cemaran bakteri pada tempeh tradisional dan modern. Tempeh tradisional menunjukkan *Total Plate Count* (TPC) bakteri berkisar 10^4 - 10^6 CFU/g dengan deteksi koliform pada 35% sampel. Metode modern menghasilkan TPC lebih rendah 10^3 - 10^4 CFU/g dengan deteksi koliform hanya 8% sampel. Kustyawati dan Setyani (2014) mengidentifikasi sumber kontaminasi pada metode tradisional. Air perendaman kedelai yang tidak steril menjadi sumber bakteri gram negatif. Lingkungan fermentasi terbuka memungkinkan kontaminasi udara. Penggunaan daun pisang sebagai pembungkus yang tidak disterilkan membawa mikroba epifitik. Kondisi pH substrat yang lebih tinggi (6,2-6,8) mendukung pertumbuhan bakteri kontaminan. Metode modern mengimplementasikan kontrol mikrobiologis pada setiap tahap. Vivia et al., (2021) melaporkan sterilisasi air perendaman dan perebusan kedelai pada suhu 100°C selama 30 menit mengeliminasi bakteri vegetatif. Adjustment pH ke 5,0-5,5 menekan pertumbuhan bakteri gram negatif yang kurang toleran pH rendah. Penggunaan plastik steril berlubang sebagai pembungkus mencegah kontaminasi sambil memfasilitasi aerasi. Inkubator atau ruang fermentasi dengan sanitasi ketat meminimalkan kontaminasi lingkungan.

Wahyudi (2018) mengevaluasi kapang kontaminan yang dapat memproduksi mikotoksin. Sampel tempeh tradisional menunjukkan keberadaan *Aspergillus flavus* pada 18% sampel dengan kadar aflatoksin terdeteksi pada 6% sampel meskipun di bawah batas aman. Tempeh modern tidak menunjukkan kontaminasi *Aspergillus* karena penggunaan starter murni dan

kontrol kondisi fermentasi yang tidak mendukung pertumbuhannya. Eliminasi risiko mikotoksin meningkatkan keamanan produk untuk konsumsi.

Durrotul & Kurnia, (n.d.) membandingkan stabilitas mikrobiologis selama penyimpanan. Tempeh tradisional menunjukkan peningkatan TPC lebih cepat selama penyimpanan suhu ruang dengan batas aman tercapai dalam 24-36 jam. Tempeh modern mempertahankan kualitas mikrobiologis hingga 48-60 jam karena populasi awal mikroba kontaminan lebih rendah. Perpanjangan masa simpan memberikan keuntungan distribusi dan pemasaran lebih luas.

Skalabilitas dan Implikasi Produksi

Kemampuan untuk meningkatkan skala produksi tempeh sangat dipengaruhi oleh tingkat kontrol proses pada masing-masing metode fermentasi. Sam et al. (2022) mengamati bahwa produsen tempeh tradisional mengalami kendala dalam menjaga konsistensi kualitas ketika kapasitas produksi ditingkatkan hingga lebih dari 100 kg kedelai per hari. Pada skala tersebut, variabilitas suhu pada tumpukan substrat meningkat seiring bertambahnya ketebalan lapisan kedelai, sehingga laju pertumbuhan miselium menjadi tidak seragam. Selain itu, distribusi starter yang dilakukan secara manual cenderung kurang homogen pada batch berukuran besar, sementara pemantauan fermentasi yang mengandalkan pengamatan visual menjadi tidak efektif untuk volume produksi tinggi.

Sebaliknya, metode fermentasi modern dengan dukungan sistem inkubator atau ruang fermentasi terdesain terbukti lebih mendukung proses *scale-up*. Kristianto et al. (2015) melaporkan bahwa produsen yang menggunakan rak bertingkat dalam ruang fermentasi terkontrol mampu memproses sekitar 500–1.000 kg kedelai per batch dengan tingkat konsistensi kualitas yang tetap terjaga. Sistem sirkulasi udara berperan dalam menjaga distribusi suhu dan kelembapan secara merata, sementara inokulasi starter menggunakan sprayer atau mixer mekanis memastikan penyebaran mikroorganisme yang lebih homogen. Selain itu, pemantauan parameter fermentasi secara otomatis melalui sensor memungkinkan dilakukannya intervensi cepat apabila terjadi penyimpangan proses.

Sam et al., (2022) mengevaluasi aspek ekonomi investasi teknologi modern. Biaya investasi awal untuk inkubator dan sistem kontrol berkisar Rp 50-200 juta tergantung kapasitas. Biaya operasional meningkat untuk energi listrik dan starter komersial. Namun, peningkatan efisiensi waktu, rendemen lebih tinggi, dan reduksi batch gagal menghasilkan payback period 2-3 tahun untuk skala produksi menengah (300-500 kg/hari). Analisis menunjukkan kelayakan ekonomi untuk pengembangan UMKM ke skala industri. Rosnawita et al., (2015) mengidentifikasi faktor sosio-teknis dalam adopsi teknologi. Produsen tradisional skala rumah

tangga menghadapi kendala modal investasi dan pengetahuan teknis operasional sistem modern. Preferensi konsumen tertentu terhadap karakteristik tempeh tradisional juga menjadi pertimbangan. Strategi hibrid yang mengadopsi elemen kontrol suhu dan starter terstandar namun mempertahankan pembungkusan tradisional dapat menjadi jalan tengah untuk transisi bertahap.

DISKUSI

Temuan analisis komparatif mengonfirmasi superioritas metode modern dalam berbagai parameter efisiensi teknis. Pengurangan waktu fermentasi 18-24% memberikan implikasi signifikan terhadap throughput produksi dan utilisasi kapasitas. Kapasitas produksi dapat ditingkatkan 20-30% dengan siklus fermentasi lebih pendek tanpa penambahan fasilitas. Konsistensi waktu yang lebih baik memfasilitasi perencanaan produksi dan pemenuhan pesanan dengan jadwal ketat. Perspektif ini sejalan dengan prinsip lean manufacturing yang menekankan eliminasi waste waktu dalam proses produksi.

Dari sudut pandang biokimia fermentasi, kontrol suhu optimal pada 31-32°C memaksimalkan aktivitas enzim kunci dalam metabolisme *Rhizopus oligosporus*. Enzim protease, lipase, dan amilase mencapai aktivitas optimal pada rentang suhu tersebut. Vivia et al., (2021) menjelaskan suhu di bawah 28°C memperlambat metabolisme kapang sedangkan di atas 35°C mulai menghambat pertumbuhan dan dapat merusak protein. Fluktuasi suhu pada metode tradisional menyebabkan kapang tidak selalu beroperasi pada kondisi optimal, memperpanjang waktu fermentasi dan menurunkan efisiensi konversi substrat. Konsistensi kualitas yang superior pada metode modern memiliki implikasi penting untuk penetrasi pasar ritel modern dan institusional. Supermarket dan katering memerlukan standar kualitas ketat dengan variabilitas minimal antar batch. Kristianto et al. (2015) mencatat produsen yang memasok ritel modern harus memenuhi spesifikasi kadar protein, tekstur, dan karakteristik organoleptik dengan toleransi sempit. Metode tradisional dengan variabilitas tinggi sulit memenuhi persyaratan ini. Standarisasi proses melalui kontrol parameter fermentasi menjadi kunci akses pasar dengan margin lebih tinggi.

Peningkatan rendemen 12-15% pada metode modern berkontribusi langsung terhadap profitabilitas. Dengan harga kedelai impor mencapai Rp 10.000-12.000 per kilogram, peningkatan rendemen 0,3 kg per kilogram kedelai menghasilkan nilai tambah signifikan pada volume produksi besar. Sam et al., (2022) menghitung bahwa pada skala produksi 500 kg kedelai per hari, peningkatan rendemen menghasilkan output tambahan 150 kg tempeh atau setara Rp 300.000-450.000 per hari dengan asumsi harga jual Rp 2.000-3.000 per kilogram.

Aspek keamanan pangan menjadi pertimbangan krusial terutama untuk pasar ekspor dan institusi dengan standar food safety ketat. Kontaminasi mikroba patogen pada tempeh dapat menyebabkan foodborne illness dan merusak reputasi produk. Widyastuti & Zaki, (n.d.) menekankan pentingnya kontrol mikrobiologis mengingat tempeh dikonsumsi tanpa pemanasan ulang oleh sebagian konsumen. Metode modern dengan TPC lebih rendah dan eliminasi koliform memberikan margin keamanan lebih tinggi. Reduksi risiko mikotoksin juga penting mengingat regulasi internasional yang sangat ketat terhadap aflatoksin dalam produk pangan.

Namun, analisis ini mengidentifikasi beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan. Pertama, mayoritas literatur yang dikaji menggunakan skala laboratorium atau pilot dengan kondisi terkontrol ketat yang mungkin tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi produksi komersial. Variabilitas dalam setting produksi nyata dapat lebih tinggi dari yang dilaporkan. Kedua, aspek sensoris dan preferensi konsumen terhadap karakteristik khas tempeh tradisional belum dieksplorasi secara mendalam. Beberapa konsumen menilai aroma dan tekstur tempeh tradisional memiliki karakter unik yang disukai. Ketiga, analisis ekonomi dalam literatur masih terbatas pada perhitungan payback period tanpa evaluasi komprehensif terhadap total cost of ownership dan risiko investasi. Sam et al., (2022) tidak memasukkan biaya pemeliharaan peralatan, pelatihan operator, dan potensi downtime dalam analisis kelayakan. Evaluasi ekonomi yang lebih robust diperlukan untuk mendukung keputusan investasi produsen. Keempat, aspek keberlanjutan lingkungan seperti konsumsi energi dan dampak penggunaan plastik pembungkus belum dikaji secara sistematis.

Studi ini juga mengidentifikasi area yang memerlukan penelitian lanjutan. Pengembangan metode hibrid yang mengkombinasikan efisiensi teknis modern dengan preservasi karakteristik tradisional menarik untuk dieksplorasi. Misalnya, penggunaan starter terstandar dan kontrol suhu pada tahap awal fermentasi kemudian membiarkan proses berlanjut pada suhu ruang untuk mengembangkan profil flavor khas. Penelitian mengenai optimasi kondisi fermentasi untuk berbagai varietas kedelai lokal juga diperlukan mengingat mayoritas studi menggunakan kedelai impor. Aspek mikrobioma tempeh dan peran bakteri asam laktat dalam pengembangan flavor perlu investigasi lebih dalam. Rosnawita et al., (2015) mengindikasikan keberadaan bakteri tertentu berkontribusi pada karakteristik organoleptik tempeh tradisional. Identifikasi strain bakteri benefisial dan pengembangannya sebagai ko-kultur dengan *Rhizopus oligosporus* dapat menjadi strategi untuk menghasilkan tempeh modern dengan kompleksitas flavor lebih tinggi. Aplikasi teknologi fermentasi presisi seperti penggunaan sensor real-time dan kontrol berbasis artificial intelligence juga merupakan frontier penelitian yang menjanjikan. Dari

perspektif kebijakan, temuan ini memberikan masukan bagi pemerintah dalam mendukung modernisasi industri tempeh. Program bantuan investasi peralatan fermentasi modern dengan skema kredit lunak dapat mempercepat adopsi teknologi oleh UMKM. Pelatihan teknis mengenai kontrol proses fermentasi dan *good manufacturing practices* perlu diintensifkan. Pengembangan inkubator bisnis atau sentra produksi tempeh dengan fasilitas bersama dapat menjadi solusi untuk produsen skala kecil yang tidak mampu investasi individual.

KESIMPULAN

Studi literatur sistematis ini mengonfirmasi bahwa metode fermentasi modern menunjukkan superioritas dalam berbagai parameter efisiensi dibandingkan metode tradisional. Pengurangan waktu fermentasi 18-24%, peningkatan konsistensi kualitas dengan koefisien variasi lebih rendah, peningkatan rendemen 12-15%, dan kontrol mikrobiologis lebih baik merupakan keunggulan utama metode modern. Kontrol ketat terhadap suhu, kelembaban, dan penggunaan starter terstandar menjadi faktor kunci yang memungkinkan peningkatan efisiensi tersebut. Metode tradisional tetap relevan untuk segmen pasar tertentu yang menghargai karakteristik organoleptik khas, namun memerlukan peningkatan pada aspek kontrol mikrobiologis untuk keamanan pangan.

Temuan ini menjawab tujuan penelitian dengan menyediakan basis data komprehensif mengenai perbandingan efisiensi kedua metode. Implikasi praktis bagi industri tempeh meliputi pertimbangan adopsi teknologi modern untuk meningkatkan produktivitas dan akses pasar yang lebih luas. Investasi teknologi fermentasi modern layak secara ekonomi untuk produsen skala menengah dengan payback period 2-3 tahun. Strategi hibrid yang mengkombinasikan elemen kontrol proses modern dengan preservasi karakteristik tradisional menawarkan jalan tengah untuk transisi bertahap.

Implikasi akademik penelitian ini mencakup identifikasi gap pengetahuan yang memerlukan investigasi lanjutan, khususnya mengenai mikrobioma tempeh, optimasi kondisi fermentasi untuk kedelai lokal, dan pengembangan metode hibrid. Penelitian lanjutan dengan pendekatan eksperimental langsung pada skala produksi komersial diperlukan untuk validasi temuan studi literatur ini. Evaluasi komprehensif mengenai aspek keberlanjutan lingkungan dan analisis siklus hidup (LCA) kedua metode juga menjadi agenda penelitian penting ke depan.

REFERENSI

- Kristiadi, O. H. (2024). *Tempe sebagai pangan fermentasi khas Indonesia: literature review*. Jurnal Andaliman: Jurnal Gizi Pangan, Klinik dan Masyarakat, 2(2). <https://doi.org/10.24114/jgpkkm.v2i2.40334>
- Kristianto, Y., Fitriah, A. H., & Astuti, W. D. (2015). *Budaya Pengolahan Produk Tempe Generasi Dua Di Sentra Industri Kerajinan Tempe Kota Malang*. 197–202.
- Rosnawita, M., Agustien, A., & Nasir, N. (2015). *Pengaruh Faktor Abiotik terhadap Produksi Protease dari Isolat Bakteri M1-23* Influence of abiotic factors in producing protease by bacterial isolates M1-23. 4(1), 45–49.
- Sam, E., Surbakti, P., Duniaji, A. S., & Nocianitri, K. A. (2022). *Pengaruh Jenis Substrat Terhadap Pertumbuhan Rhizopus oligosporus DP02 Bali dalam Pembuatan Ragi Tempe*. 11(1), 92–99.
- Vivia, N., Resti, P. I., Sri, K. W. A., & Atha, M. L. (2021). *Perubahan Kimia dan Mikrobiologi Tempe Busuk Selama Fermentasi*. 15(02).
- Wahyudi, A. (2018). *Pengaruh Variasi Suhu Ruang Inkubasi terhadap Waktu Pertumbuhan Rhizopus Oligosporus pada Pembuatan Tempe Kedelai*. Jurnal Redoks, 3(1), 37–44. <https://doi.org/10.31851/redoks.v3i1.2790>
- Widyastuti, P. A., & Zaki, U. (n.d.). *Korelasi Kadar Asam Fitat Dan Protein Terlarut Tepungtempe Kedelai Lokal Kuning(Glycine max) Dan Hitam(Glycine soja) Selama Fermentasi*.