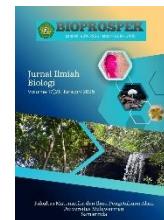




Bioprospek

<https://fmipa.unmul.ac.id/jurnal/index/Bioprospek>



MINI REVIEW: PENGARUH VARIASI GULA DAN WAKTU FERMENTASI DALAM OPTIMALISASI PROSES FERMENTASI KOMBUCHA

Natasha Florenika^{1*}, Annisa Nurul Ilmi¹, Aloysia Sri Pujiyanti¹

1. *Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman, Jl. Barong Tongkok, No. 04 Gn. Kelua, Kec. Samarinda Ulu, Kota Samarinda, Kalimantan Timur, Indonesia – 75123*

INFO ARTIKEL

Disubmit 10 Oktober 2025
Diterima 26 November 2025
Terbit Online 5 Desember 2025

Kata kunci: Antioksidan, fermentasi, gula, kombucha, waktu

ABSTRAK

Fermentasi kombucha melibatkan aktivitas kultur simbiotik bakteri dan ragi (SCOBY) yang dipengaruhi oleh konsentrasi gula dan waktu fermentasi sebagai parameter utama penentu kualitas minuman. Artikel ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi konsentrasi gula dan lama fermentasi terhadap aktivitas antioksidan kombucha berdasarkan studi literatur. Metode yang digunakan adalah studi literatur dengan menelaah artikel penelitian dan review ilmiah yang dipublikasikan dalam sepuluh tahun terakhir melalui basis data *PubMed*, *Scopus*, *ScienceDirect*, dan *Google Scholar*. Analisis dilakukan secara deskriptif dengan membandingkan hasil-hasil penelitian terkait konsentrasi gula, waktu fermentasi, dan aktivitas antioksidan. Hasil kajian menunjukkan bahwa aktivitas antioksidan kombucha meningkat pada fase awal hingga pertengahan fermentasi dan mencapai nilai optimal pada hari ke-6 hingga ke-10, kemudian menurun pada fermentasi yang lebih lama. Konsentrasi gula optimal berada pada kisaran 7–10% (b/v) atau setara dengan 50–70 g/L, yang mendukung pertumbuhan mikroba dan pembentukan senyawa bioaktif secara maksimal. Konsentrasi gula yang terlalu rendah menghambat fermentasi, sedangkan konsentrasi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan stres osmotik pada mikroba. Kesimpulannya, pengendalian konsentrasi gula dan waktu fermentasi yang tepat merupakan faktor kunci dalam optimalisasi produksi kombucha sebagai minuman fungsional dengan aktivitas antioksidan tinggi.

*Email Corresponding Author: florenikanatasha@fmipa.unmul.ac.id

1. PENDAHULUAN

Fermentasi kombucha, minuman yang dibuat dari infusi teh, sangat dipengaruhi oleh konsentrasi gula dan durasi fermentasi, yang secara signifikan mempengaruhi komposisi kimia dan profil sensorik produk akhir. Gula berfungsi sebagai substrat utama dalam proses fermentasi, menggerakkan metabolisme SCOPY (*Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast*) yang mentransformasi teh menjadi kombucha. Selama fermentasi, mikroorganisme termasuk ragi dan bakteri asam asetat memanfaatkan gula sebagai sumber karbon untuk menghasilkan asam organik, gas karbodioksida, dan metabolit sekunder lainnya. Dokumentasi empiris menunjukkan penurunan terukur dalam konsentrasi gula pereduksi total sepanjang periode fermentasi, mencerminkan konsumsi progresif oleh aktivitas mikroba (Jakubczyk *et al.*, 2020). Penelitian mendemonstrasikan korelasi positif antara penambahan gula dan produksi senyawa fenolik, dengan konsentrasi optimal yang diperlukan untuk memaksimalkan aktivitas antioksidan. Secara khusus, Kushargina *et al.* (2024), melaporkan bahwa kandungan fenolik meningkat secara linier dengan konsentrasi gula hingga titik ambang batas 30% sebelum mengalami penurunan, mengindikasikan keseimbangan stoikiometrik yang kritis untuk hasil fermentasi optimal.

Literatur penelitian secara konsisten mendokumentasikan bahwa mempertahankan durasi fermentasi dalam rentang 7–10 hari mengoptimalkan akumulasi senyawa bioaktif dalam kombucha, dengan implikasi signifikan terhadap potensi fungsional minuman tersebut (Nurikasari *et al.*, 2017; Vohra *et al.*, 2019). Vohra *et al.* (2019), mengidentifikasi bahwa aktivitas antioksidan mencapai puncaknya pada hari ke-7 fermentasi dengan nilai inhibisi DPPH sebesar 93,79% dan mengalami penurunan signifikan pada durasi fermentasi yang lebih panjang. Temuan ini dikonfirmasi oleh Neffe-Skocińska *et al.* (2017), yang mengobservasi aktivitas antioksidan maksimal pada hari ke-6 hingga ke-7 fermentasi. Dalam konteks yang berbeda, ditemukan juga bahwa asam glukuronat, senyawa bioaktif dengan potensi kesehatan signifikan, mencapai konsentrasi tertingginya pada hari ke-10 pada suhu 25°C, mengidentifikasi kondisi ini sebagai optimal untuk produksi kombucha berkualitas tinggi. Sebaliknya, Amarasinghe *et al.* (2018), menunjukkan bahwa perpanjangan durasi fermentasi hingga 8 minggu menghasilkan penurunan statistik signifikan dalam aktivitas antioksidan keseluruhan. Bortolomedi *et al.* (2022), mengkonfirmasi pola universal ini, melaporkan bahwa meskipun waktu fermentasi awal meningkatkan sintesis senyawa bioaktif, bukti empiris secara konsisten menunjukkan fenomena puncak diikuti oleh penurunan, menekankan signifikansi optimalisasi durasi fermentasi yang spesifik untuk memaksimalkan manfaat kesehatan.

Konsentrasi gula dan waktu fermentasi berinteraksi secara sinergis, menciptakan dinamika kompleks yang mengatur komposisi sensorik dan potensi fungsional kombucha. Peningkatan konsentrasi gula hingga ambang batas tertentu menghasilkan produksi yang lebih tinggi dari senyawa fenolik kunci yang berkontribusi pada aktivitas antioksidan, meskipun konsentrasi yang melampaui titik optimal dapat menghasilkan penurunan efisiensi fermentasi (Kushargina *et al.*, 2024). Modifikasi terhadap durasi fermentasi secara parallel mempengaruhi tingkat aktivitas mikroba, yang selanjutnya menentukan komposisi biokimia final dan indikator kualitas sensorik kombucha (Villarreal-Soto *et al.*, 2018).

Gula yang ditambahkan dalam bentuk sukrosa, berfungsi sebagai sumber karbon primer dalam proses fermentasi kombucha. Konsentrasi gula yang lebih tinggi berpotensi meningkatkan produksi biomassa mikroba dan akumulasi metabolit sekunder. Namun, kadar gula yang berlebihan dapat menginduksi ketidakseimbangan pH dan menghambat efisiensi fermentasi secara keseluruhan. Penelitian empiris mengungkapkan bahwa durasi fermentasi dalam rentang 6–10 hari secara konsisten menghasilkan profil organoleptik yang optimal, menghasilkan keseimbangan yang *desirable* antara indikator rasa buah yang segar dengan pengembangan perkara organik dan karakteristik asam yang menjadi lebih dominan pada fermentasi yang diperpanjang (Elfirta *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2022).

Oleh karena itu, untuk dapat memperoleh komposisi kimia dan karakteristik sensorik optimal dalam kombucha memerlukan kontrol yang sesuai dan optimalisasi sistematis terhadap dua parameter fermentasi kritis: konsentrasi gula dan waktu fermentasi. Sinergi antara kedua parameter ini menentukan tingkat aktivitas mikroba, aktivitas antioksidan, dan profil metabolit organik yang secara kolektif menentukan kualitas dan nilai fungsional produk akhir. Manajemen parameter fermentasi yang cermat menjadi fondasi esensial untuk produksi kombucha berkualitas tinggi yang memenuhi standar baik dari perspektif fungsional maupun organoleptik.

2. MATERI DAN METODE

Penulisan artikel ini menggunakan metode studi literatur, yaitu dengan mengumpulkan, menelaah, dan menganalisis berbagai hasil penelitian yang relevan mengenai kombucha, khususnya yang membahas variasi gula dan waktu fermentasi. Pendekatan ini dipilih agar dapat memperoleh gambaran yang komprehensif tentang bagaimana kedua faktor tersebut memengaruhi proses dan hasil fermentasi kombucha. Pencarian literatur dilakukan melalui beberapa basis data ilmiah utama seperti *PubMed*, *Scopus*, *ScienceDirect*, dan *Google Scholar*. Kata kunci yang digunakan antara lain: "kombucha", "fermentasi kombucha", "variasi gula", "konsentrasi gula", "waktu fermentasi", dan "optimalisasi fermentasi". Literatur yang diambil adalah artikel penelitian, *review*, dan laporan ilmiah yang diterbitkan dalam 10 tahun terakhir, baik dalam bahasa Indonesia maupun Inggris.

Setelah literatur terkumpul, dilakukan seleksi berdasarkan relevansi dengan topik, kelengkapan data, serta kualitas sumber. Hanya artikel yang membahas secara spesifik pengaruh variasi gula dan/atau waktu fermentasi terhadap karakteristik kimia, bioaktif, dan sensoris kombucha yang dimasukkan dalam analisis. Dari setiap artikel yang terpilih, data yang diambil meliputi: (1) konsentrasi gula yang digunakan; (2) lama waktu fermentasi; (3) parameter yang diamati (misal: kandungan senyawa bioaktif, aktivitas antioksidan, pH, rasa, dan aroma); dan (4) hasil utama dan kesimpulan penelitian.

Data-data tersebut kemudian disusun dalam tabel sederhana untuk memudahkan perbandingan antar penelitian. Analisis dilakukan secara deskriptif dan tematik, dengan menyoroti pola, perbedaan, dan kesamaan hasil antar studi. Untuk memastikan keandalan hasil, setiap artikel yang digunakan dievaluasi kualitasnya secara sederhana, misalnya dengan melihat metode penelitian, jumlah sampel, dan kejelasan pelaporan hasil. Artikel yang dinilai kurang valid atau tidak relevan dikeluarkan dari analisis. Hasil analisis dari berbagai literatur kemudian disintesis untuk merangkum pengaruh variasi gula dan waktu fermentasi terhadap proses dan hasil fermentasi kombucha. Sintesis ini menjadi dasar dalam menarik kesimpulan dan memberikan rekomendasi terkait parameter optimal dalam fermentasi kombucha.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh Konsentrasi Gula Terhadap Aktivitas Antioksidan Pada Kombucha

Penelitian mengenai pengaruh konsentrasi gula terhadap aktivitas antioksidan kombucha telah dilakukan oleh berbagai peneliti dengan hasil yang bervariasi. **Tabel 1** menyajikan ringkasan sistematis dari 20 studi penelitian yang menganalisis hubungan antara konsentrasi gula dan tingkat aktivitas antioksidan yang dihasilkan. Data yang disajikan menunjukkan bahwa meskipun terdapat variasi dalam konsentrasi gula yang diuji, mayoritas penelitian mengidentifikasi rentang optimal yang konsisten untuk memaksimalkan produksi senyawa bioaktif dalam kombucha.

Tabel 1. Konsentrasi gula optimal untuk aktivitas antioksidan maksimal

Peneliti & Tahun	Konsentrasi Gula	Jenis Gula	Hasil/Nilai Aktivitas Antioksidan	Temuan Utama
Zubaidah <i>et al.</i> , 2018	7,58%	Gula konvensional	Aktivitas antioksidan terbaik	Konsentrasi gula optimal menghasilkan senyawa bioaktif lebih tinggi, termasuk flavonoid dan polifenol.
Fu <i>et al.</i> , 2014	5-10% (w/v)	Gula	Senyawa aktif lebih tinggi	Konsentrasi gula berperan sebagai sumber karbon penting untuk pertumbuhan kultur mikroba. Gula rendah menghambat, gula tinggi menyebabkan osmosis.
Malbasa <i>et al.</i> , 2011	5-10% (w/v)	Gula	Fermentasi optimal	Rentang 5-10% meningkatkan fermentasi optimal dan menghasilkan senyawa aktif lebih tinggi.
Zhang <i>et al.</i> , 2020	5-10% (w/v)	Gula	Senyawa aktif optimal	Konsentrasi dalam rentang ini mendukung pertumbuhan

Ayed & Hamdi, 2015	5-10% (w/v)	Gula	Produksi bioaktif tinggi	mikroba dan produksi antioksidan. Konsentrasi optimal dalam rentang ini menghasilkan aktivitas antioksidan yang lebih baik.
Robles-Apodaca <i>et al.</i> , 2024	5-10% (w/v)	Gula	Fermentasi efisien	Rentang konsentrasi ini terbukti menghasilkan senyawa aktif yang tinggi tanpa mengganggu fermentasi.
Villarreal-Soto <i>et al.</i> , 2018	5-10% (w/v)	Gula	Senyawa aktif optimal	Konsentrasi dalam rentang ini mendukung aktivitas antioksidan yang signifikan.
Aji <i>et al.</i> , 2023	15%	Gula	Aktivitas antioksidan lebih baik	Konsentrasi 15% dapat merangsang produksi senyawa bioaktif tinggi dan aktivitas antioksidan lebih baik tanpa mengganggu fermentasi.
Jakubczyk <i>et al.</i> , 2020	7-10% sukrosa	Sukrosa	Antioksidan efektif	Konsentrasi 7-10% sukrosa optimal karena menyediakan energi untuk mikroba sekaligus memungkinkan produksi antioksidan efektif.
Sintyadewi & Fitriani, 2024	10%	Gula	Antioksidan optimal	Konsentrasi 10% cukup optimal untuk mendukung produksi senyawa antioksidan bernali selama fermentasi.
Sintyadewi <i>et al.</i> , 2021	3:3 (ratio)	Gula & bahan baku	89,74% (hari ke-8 fermentasi)	Rasio gula dan bahan baku 3:3 menghasilkan aktivitas antioksidan maksimum pada hari kedelapan fermentasi.
Phan Van <i>et al.</i> , 2023	100 g/L sukrosa	Sukrosa pada substrat cascara	Proliferasi bakteri & antioksidan meningkat	Konsentrasi 100 g/L meningkatkan proliferasi bakteri serta aktivitas antioksidan, menunjukkan level optimal untuk aktivitas metabolismik mikroba.
Kushargina <i>et al.</i> , 2024	30% (puncak)	Gula	Fenol 72,06-83,20 ppm; Menurun pada 40%	Kandungan fenol mencapai puncak pada 30%, signifikan meningkatkan aktivitas antioksidan. Penurunan terjadi pada konsentrasi >40%.
Kuzu <i>et al.</i> , 2023	35, 50, 70 g/L	Sukrosa	70 g/L terbaik	Konsentrasi awal sukrosa 70 g/L memberikan hasil terbaik dalam hal aktivitas antioksidan dan komposisi kimia kombucha.
Zubaidah <i>et al.</i> , 2019	50 g/L	Gula	Keseimbangan rasa & asam optimal	Konsentrasi 50 g/L adalah standar tradisional yang memberikan keseimbangan baik antara rasa dan kadar asam, serta meningkatkan aktivitas antioksidan.
Suciati <i>et al.</i> , 2024	10% coconut sugar	Coconut sugar	DPPH 86,79%	Konsentrasi 10% coconut sugar menghasilkan aktivitas antioksidan DPPH tertinggi sebesar 86,79%.
Zhou <i>et al.</i> , 2022	8-10% (w/v)	Gula	Antioksidan tertinggi	Konsentrasi optimal 8-10% menunjukkan aktivitas antioksidan tertinggi dalam penelitian.
Alves <i>et al.</i> , 2025	8-10% (w/v)	Gula	Aktivitas antioksidan optimal	Rentang 8-10% memaksimalkan aktivitas antioksidan dan produksi senyawa bioaktif.

Özyurt, 2020	8-10% (w/v)	Gula	Antioksidan tertinggi	Konsentrasi menghasilkan	8-10%	terbukti aktivitas antioksidan tertinggi.
--------------	-------------	------	-----------------------	--------------------------	-------	---

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa variasi konsentrasi gula dapat mempengaruhi aktivitas antioksidan, kandungan fenolik, serta karakteristik fisikokimia kombucha (Kuzu *et al.*, 2023; Saimaiti *et al.*, 2022). Penelitian oleh Zubaidah *et al.* (2018), menunjukkan bahwa penggunaan gula dengan konsentrasi yang berbeda akan mempengaruhi hasil akhir dari kombucha, terutama dalam hal aktivitas antioksidan yang dihasilkan selama proses fermentasi. Konsentrasi gula optimal untuk fermentasi kombucha dengan aktivitas antioksidan terbaik adalah sekitar 7,58% total sugar. Kombucha dengan konsentrasi gula yang optimal dapat menghasilkan senyawa bioaktif yang lebih tinggi, termasuk flavonoid dan polifenol, yang dikenal memiliki aktivitas antioksidan. Dalam penelitian oleh Amarasinghe *et al.* (2018); Ayed & Hamdi, (2015); Fu *et al.* (2014); Malbaša *et al.* (2008); Robles-Apodaca *et al.* (2024); Villarreal-Soto *et al.* (2018); Zhang *et al.* (2020), menyatakan bahwa konsentrasi gula berperan sebagai sumber karbon yang penting bagi pertumbuhan kultur mikroba dalam kombucha. Gula yang rendah dapat menghambat pertumbuhan bakteri, sedangkan konsentrasi yang sangat tinggi dapat menyebabkan osmosis yang mengganggu metabolisme mikroba. Penemuan ini menunjukkan bahwa konsentrasi gula berpengaruh langsung terhadap mikroflora yang terlibat dalam proses fermentasi serta aktivitas bioaktif yang dihasilkan.

Berdasarkan studi oleh Aji *et al.* (2023), konsentrasi gula sekitar 15% dapat direkomendasikan sebagai optimal untuk fermentasi kombucha, karena ini telah terbukti dapat merangsang produksi senyawa bioaktif yang tinggi dan aktivitas antioksidan yang lebih baik tanpa mengganggu proses fermentasi itu sendiri. Konsentrasi antara 7% hingga 10% sukrosa cenderung optimal karena dapat menyediakan cukup energi untuk pertumbuhan mikroba, sekaligus memungkinkan produksi senyawa antioksidan yang efektif (Jakubczyk *et al.*, 2020). Konsentrasi gula 10% dalam fermentasi kombucha tampak cukup optimal untuk mendukung produksi senyawa antioksidan yang bernilai selama proses fermentasi seperti yang ditunjukkan oleh (Sintyadewi & Fitriani, 2024).

Berdasarkan studi oleh Sintyadewi *et al.* (2021), konsentrasi gula optimal untuk fermentasi kombucha yang menghasilkan aktivitas antioksidan terbaik adalah rasio 3:3 (gula dan bahan baku) dengan aktivitas antioksidan maksimum pada hari kedelapan fermentasi, mencapai 89.74%. Phan Van *et al.* (2023), melaporkan bahwa konsentrasi 100 g/L sukrosa pada substrat *cascara* dapat meningkatkan proliferasi bakteri serta aktivitas antioksidan, yang menunjukkan bahwa ada level tertentu dari gula yang mendukung aktivitas metabolismik mikroba dan hasil fermentasi yang optimal. Selain itu, juga ditemukan bahwa penambahan gula memiliki dampak signifikan pada kandungan fenolik dan aktivitas antioksidan. Tercatat bahwa kandungan fenol mencapai puncaknya pada konsentrasi gula 30% secara signifikan meningkatkan aktivitas antioksidan kombucha, dengan nilai aktivitas antara 72.06 hingga 83.20 ppm, dan penurunan pada konsentrasi gula lebih tinggi (40%). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ada konsentrasi gula di mana aktivitas antioksidan dan produksi senyawa bioaktif mencapai maksimum sebelum mulai menurun. Berdasarkan referensi yang ada, konsentrasi gula optimal bagi fermentasi kombucha tampaknya berputar di sekitar 50 g/L hingga 70 g/L. Kuzu *et al.* (2023), menguji kombinasi gula dengan tiga konsentrasi awal sukrosa, yaitu 35 g/L, 50 g/L, dan 70 g/L. Hasilnya menunjukkan bahwa konsentrasi awal sukrosa 70 g/L dalam proses fermentasi memberikan hasil terbaik dalam hal aktivitas antioksidan yang dihasilkan dan komposisi kimia kombucha. Meski demikian, penelitian lain oleh Zubaidah *et al.* (2019), menunjukkan bahwa konsentrasi 50 g/L dikenal sebagai standar tradisional yang telah lama digunakan dan terbukti memberikan keseimbangan yang baik antara rasa dan kadar asam, serta meningkatkan kegiatan antioksidan.

Adapun Suciati *et al.* (2024), yang menggunakan jenis *coconut sugar* sebagai sumber karbon dalam fermentasi kombucha. Konsentrasi gula yang optimal untuk fermentasi kombucha dengan aktivitas antioksidan terbaik adalah menggunakan 10% *coconut sugar* yang menghasilkan aktivitas antioksidan DPPH tertinggi sebesar 86,79%. Beberapa studi lain melaporkan bahwa konsentrasi gula optimal untuk fermentasi kombucha yang menunjukkan aktivitas antioksidan tertinggi adalah antara 8-10% (w/v) (Alves *et al.*, 2025; Özyurt, 2020; Zhou *et al.*, 2022).

Konsentrasi gula yang optimal sangat penting untuk memaksimalkan aktivitas antioksidan dan produksi senyawa bioaktif pada kombucha. Berdasarkan studi yang telah diverifikasi, rentang 7-10%

(w/v) atau 50–70 g/L adalah yang paling direkomendasikan untuk fermentasi kombucha yang efisien dan berkualitas tinggi.

3.2 Pengaruh Waktu Fermentasi Terhadap Aktivitas Antioksidan Pada Kombucha

Waktu fermentasi merupakan salah satu parameter kritis yang secara signifikan mempengaruhi perkembangan aktivitas antioksidan dalam minuman kombucha. Untuk memahami dinamika temporal antara durasi fermentasi dan peningkatan atau penurunan aktivitas antioksidan, penelitian dari berbagai institusi telah menghasilkan temuan empiris yang komprehensif. Komunitas mikroba yang terdapat dalam SCOBY mengkatalisis serangkaian reaksi biokimia kompleks yang menghasilkan transformasi substrat awal menjadi metabolit sekunder dengan kapasitas antioksidan yang beragam. Pemahaman mendalam tentang dinamika temporal ini menjadi fondasi esensial untuk optimalisasi proses produksi kombucha sebagai minuman fungsional. **Tabel 2** berikut menyajikan ringkasan sistematis dari 15 studi penelitian yang menganalisis hubungan spesifik antara waktu fermentasi dan tingkat aktivitas antioksidan yang dicapai. Data yang disajikan menunjukkan pola kurvalinier yang konsisten, di mana aktivitas antioksidan meningkat secara progresif pada fase awal hingga pertengahan fermentasi, mencapai puncaknya pada periode optimal yang spesifik untuk setiap substrat, kemudian mengalami penurunan pada fase akhir fermentasi yang diperpanjang.

Tabel 2. Waktu fermentasi optimal untuk aktivitas antioksidan maksimal

Peneliti & Tahun	Jenis Substrat	Waktu Fermentasi Optimal (hari)	Hasil/Nilai Aktivitas Antioksidan	Temuan Utama
Tanticharakunsiri <i>et al.</i> , 2020	Teh hitam	14 hari	IC₅₀ DPPH: 0,95 ± 0,05 mg/mL IC₅₀ ABTS: 1,14 ± 0,09 mg/mL	Aktivitas antioksidan meningkat progresif dari hari 7 hingga 21, mencapai puncak pada hari 14.
Doğan & Doğan, 2023	Teh hijau, hitam, rosella, licorice	14 hari	DPPH aktivitas: 76,5% (hari 14) vs 42,1% (awal fermentasi)	Teh hitam menghasilkan aktivitas antioksidan tertinggi. Total fenolik meningkat signifikan pada hari 14.
Jakubczyk <i>et al.</i> , 2020	Teh putih, hijau, hitam, merah	21 hari	Peningkatan DPPH: 39,7% Peningkatan ABTS: 38,36%	Peningkatan signifikan dalam aktivitas antioksidan setelah fermentasi 21 hari pada semua jenis teh.
Steiner <i>et al.</i> , 2024	Teh hijau	7 hari	DPPH: 45% (hari 3) → 85% (hari 7) → menurun 60% (hari 14)	Puncak aktivitas pada hari 7, kemudian menurun. Penurunan diduga akibat degradasi bioaktif atau perubahan pH.
Sintyadewi & Fitriani, 2024	Bunga kecambah (Etlingera elatior)	6 hari	IC₅₀ optimal: 37,73 µg/mL (aktivitas antioksidan kuat)	Hari ke-6 adalah waktu optimal. pH 3,7; total asam 0,33%; flavonoid 5,9 mg/L QE.
Saimaiti <i>et al.</i> , 2022	Teh anggur dan teh manis dengan residu teh	7-10 hari	Kapasitas antioksidan: hingga 38% Total fenolik: hingga 55%	Teh anggur menunjukkan aktivitas antioksidan kuat. Puncak dicapai dalam 7-10 hari fermentasi.
Vohra <i>et al.</i> , 2019	Teh hijau + gula putih vs teh hitam + jaggery	Bervariasi	Tertinggi (GT+S): 84% DPPH Terendah (BT+J): 9% DPPH	Interaksi jenis teh dan jenis gula sangat signifikan mempengaruhi profil aktivitas antioksidan.
Sintyadewi <i>et al.</i> , 2021	Teh hitam + bunga telang (Clitoria ternatea L.)	7-10 hari	Polifenol dan aktivitas antioksidan meningkat setelah 7 hari	Waktu fermentasi tidak lebih dari 10 hari dengan pH maksimal 2,5 untuk konsumsi aman.

Nurhayati <i>et al.</i> , 2020	<i>Cascara</i> (kulit kopi) 1% b/v	8 hari	Kombucha terbaik dan paling disukai pada waktu ini	Konsentrasi cascara dan waktu fermentasi signifikan mempengaruhi karakteristik kombucha
Fu <i>et al.</i> , 2014	Kombucha umum	90 jam (3,75 hari)	Peningkatan signifikan probiotik dan senyawa bioaktif	Kondisi optimal: 30°C, <i>shaking</i> 100 rpm untuk distribusi nutrisi merata.
Selvaraj & Gurumurthy, 2024	Kombucha standar	6 hari	Peningkatan signifikan hari 0-6, menurun hari 6-12	Puncak pada hari 6 berkorelasi dengan akumulasi tanin, flavonoid, dan fenol maksimal.
Barakat <i>et al.</i> , 2024	Kombucha <i>grape pomace</i>	Durasi pendek optimal	Korelasi negatif kuat polifenol-durasi ($r = -0,741$)	Fermentasi lebih pendek menghasilkan polifenol lebih tinggi. Peningkatan antioksidan hingga 100% dengan optimasi.
Amarasinghe <i>et al.</i> , 2018	Kombucha umum	Hingga 2 minggu	DPPH <i>scavenging</i> meningkat, namun aktivitas antioksidan total menurun signifikan pada minggu 8	Perpanjangan fermentasi menghasilkan peningkatan keasaman, kekeruhan, dan penurunan fungsionalitas.
Torre <i>et al.</i> , 2021	Kombucha berbagai jenis	Progresif seiring durasi	Fenol meningkat linear. Konversi EGCG/epicatechin-3-gallate \rightarrow EGC/epicatechin	Aktivitas enzimatik bakteri asam asetat dan ragi mengoksidasi polifenol \rightarrow kapasitas antioksidan lebih tinggi.
Kuzu <i>et al.</i> , 2023	Kombucha teh herbal	Progresif	Fenolik total meningkat progresif seiring durasi fermentasi	Jenis substrat teh dan waktu fermentasi secara sinergis mengoptimalkan bioaktif. Korelasi dengan penurunan pH.

Waktu fermentasi merupakan salah satu parameter kritis yang secara signifikan mempengaruhi perkembangan aktivitas antioksidan dalam minuman kombucha. Selama proses fermentasi, komunitas mikroba yang terdapat dalam SCOPY mengkatalisasi serangkaian reaksi biokimia kompleks yang menghasilkan transformasi substrat awal menjadi metabolit sekunder dengan kapasitas antioksidan yang beragam (Cheepchirasuk *et al.*, 2025; Tantcharakunsiri *et al.*, 2020; Vohra *et al.*, 2019). Pemahaman mendalam tentang dinamika temporal antara durasi fermentasi dan peningkatan atau penurunan aktivitas antioksidan menjadi fondasi esensial untuk optimalisasi proses produksi kombucha sebagai minuman fungsional (Lee *et al.*, 2022; Sintyadewi *et al.*, 2021).

Penelitian menunjukkan bahwa aktivitas antioksidan kombucha mengalami peningkatan progresif seiring dengan perpanjangan waktu fermentasi, terutama pada fase awal hingga pertengahan periode fermentasi. Nilai DPPH dan ABTS *radical scavenging* pada kombucha teh hitam secara bertahap meningkat setelah 7 hari fermentasi dan terus berlanjut hingga hari ke-21 fermentasi, dengan nilai IC_{50} DPPH mencapai $0,95 \pm 0,05$ mg/mL dan IC_{50} ABTS mencapai $1,14 \pm 0,09$ mg/mL pada hari ke-14 fermentasi (Tantcharakunsiri *et al.*, 2020). Peningkatan mengindikasikan bahwa aktivitas antioksidan mencapai puncaknya pada periode pertengahan fermentasi sebelum mengalami stabilisasi atau penurunan pada fase akhir. Hal ini selaras dengan studi oleh Gaggia *et al.* (2018), yang melaporkan bahwa waktu fermentasi memiliki pengaruh signifikan terhadap aktivitas antioksidan dalam kombucha, di mana perbedaan waktu antara 7 hingga 14 hari menunjukkan variasi dalam komposisi mikroba dan tingkat senyawa aktif ini. Penelitian menunjukkan bahwa molekul antioksidan dari teh dan ekstrak tanaman memainkan peran penting dalam melawan kerusakan oksidatif, yang dapat dimodulasi melalui pengaturan waktu fermentasi. Sama halnya pada penelitian yang dilakukan oleh Doğan & Doğan (2023), menunjukkan bahwa kombucha yang diperlakukan selama 21 hari menunjukkan peningkatan konsentrasi total fenolik dan aktivitas antioksidan DPPH yang signifikan, dengan aktivitas mencapai 76,5% pada hari ke-14, dibandingkan dengan 42,1% pada awal fermentasi. Penelitian ini juga

menemukan bahwa berbagai jenis teh (hijau, hitam, *rosella*, dan *licorice*) menghasilkan efek yang berbeda pada parameter bioaktif, di mana teh hitam menghasilkan aktivitas antioksidan tertinggi.

Mekanisme peningkatan aktivitas antioksidan selama fermentasi melibatkan beberapa proses biokimia yang saling terkait. Cheepchirasuk *et al.* (2025), menjelaskan bahwa peningkatan konten fenol total selama fermentasi kombucha terjadi melalui kemampuan bakteri dan ragi untuk melepaskan enzim seperti fitase, yang dapat memecah struktur selulosa daun teh dan membebaskan senyawa polifenol yang sebelumnya terikat. Proses ini menghasilkan peningkatan konsentrasi senyawa antioksidan yang dapat diukur melalui DPPH *assay*, mencerminkan peningkatan kapasitas penangkal radikal bebas dalam minuman kombucha.

Pada kombucha dari berbagai jenis teh (putih, hijau, hitam, dan merah) menunjukkan peningkatan signifikan dalam aktivitas antioksidan yang diukur melalui metode DPPH dan ABTS setelah 21 hari fermentasi, dengan peningkatan aktivitas penangkal radikal DPPH sebesar 39,7% dan ABTS sebesar 38,36% dibandingkan dengan teh awal sebelum fermentasi (Jakubczyk *et al.*, 2020). Penemuan ini mengonfirmasi bahwa proses fermentasi secara fundamental meningkatkan kapasitas antioksidan minuman berbasis teh melalui akumulasi metabolit sekunder yang dihasilkan oleh aktivitas mikroba.

Steiner *et al.* (2024), melaporkan bahwa kombucha berbasis teh hijau menunjukkan peningkatan DPPH yang signifikan dari 45% pada hari ke-3 menjadi 85% pada hari ke-7 fermentasi, sebelum mulai menurun hingga 60% pada hari ke-14. Hal ini menunjukkan bahwa selama fase awal, mikroorganisme, seperti bakteri asam laktat dan ragi aktif menghasilkan senyawa antioksidan dari substrat gula dan teh, sementara penurunan setelah puncak kemungkinan disebabkan oleh degradasi senyawa bioaktif atau perubahan pH yang berdampak pada stabilitas antioksidan. Pengujian pada kombucha dari bunga kecombrang menunjukkan hasil yang mirip, di mana aktivitas antioksidan optimal ($IC_{50} = 37,73 \mu\text{g/mL}$) diperoleh pada hari ke-6 fermentasi, dengan penurunan yang signifikan setelahnya. Hal ini mengindikasikan pentingnya penentuan waktu fermentasi yang tepat untuk mencapai keseimbangan optimal antara akumulasi senyawa mirip fenol serta profil sensorik yang diinginkan (Sintyadewi & Fitriani, 2024).

Saimaiti *et al.* (2022), melaporkan melalui studinya bahwa kombucha yang terbuat dari teh anggur dan teh manis menunjukkan aktivitas antioksidan yang kuat, terutama dari teh anggur, dengan peningkatan kapasitas antioksidan hingga 38% dan total fenolik hingga 55% saat menggunakan residu teh selama fermentasi. Puncak aktivitas antioksidan ini tercapai dalam kurun waktu 7 hingga 10 hari fermentasi, berdasarkan pengukuran dengan *assay Ferric-Reducing Antioxidant Power* (FRAP) dan *Trolox Equivalent Antioxidant Capacity* (TEAC), yang mencerminkan akumulasi senyawa bioaktif selama proses fermentasi. Penelitian oleh Gaggia *et al.* (2018) dan Jakubczyk *et al.* (2020), juga mendukung temuan ini, di mana variasi waktu fermentasi menghasilkan perbedaan signifikan dalam profil aktivitas antioksidan. Kombucha dari teh hitam dan teh hijau menunjukkan kapasitas DPPH di atas 80% setelah 10 hari fermentasi optimal, sedangkan kombinasi substrat alternatif dapat meningkatkan variasi aktivitas antioksidan.

Waktu fermentasi yang optimal dalam fermentasi kombucha berperan penting untuk memaksimalkan aktivitas antioksidan dari minuman probiotik ini. Berdasarkan penelitian oleh Fu *et al.* (2014), proses fermentasi kombucha dilakukan dalam kondisi yang terkontrol, di mana waktu fermentasi yang disarankan adalah selama 90 jam pada suhu 30°C dengan *shaking* (100 rpm) untuk memastikan distribusi nutrisi yang merata dan peningkatan aktivitas mikroba. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa dalam periode waktu tersebut, terjadi peningkatan signifikan dalam jumlah probiotik dan senyawa bioaktif yang menyumbang aktivitas antioksidan, seperti asam organik dan polifenol. Ketersediaan senyawa-senyawa ini sangat tergantung pada waktu fermentasi, karena selama proses itu, mikroorganisme dalam kultur simbiotik akan memanfaatkan gula dan zat-zat lainnya untuk menghasilkan senyawa yang memiliki sifat antioksidan.

Penelitian Selvaraj & Gurumurthy (2024), menunjukkan bahwa aktivitas antioksidan kombucha mengalami peningkatan pada fase awal fermentasi, mencapai puncaknya pada periode tertentu, kemudian mengalami penurunan pada fase akhir fermentasi. Selama periode fermentasi 12 hari, aktivitas antioksidan yang diukur menggunakan metode DPPH dan FRAP menunjukkan pola yang konsisten. Aktivitas antioksidan meningkat signifikan dari hari 0 hingga hari 6, diikuti dengan penurunan yang terukur dari hari 6 hingga hari 12. Peningkatan awal ini berkorelasi dengan akumulasi metabolit sekunder, khususnya tanin, flavonoid, dan fenol, yang merupakan komponen utama penentu aktivitas antioksidan kombucha. Nilai FRAP untuk sampel kombucha menunjukkan tren yang sama,

dengan peningkatan selama periode fermentasi awal diikuti penurunan yang jelas setelah hari ke-6. Pada titik ini, kombucha mencapai keseimbangan ideal antara akumulasi senyawa bioaktif dan stabilitas nutrisi. Penurunan aktivitas antioksidan setelah hari ke-6 diduga berkaitan dengan degradasi senyawa fenol dan perubahan kondisi lingkungan fermentasi yang semakin asam, sehingga mempengaruhi stabilitas antioksidan.

Pola peningkatan aktivitas antioksidan selama fermentasi menunjukkan variasi signifikan tergantung pada jenis substrat teh yang digunakan. Penelitian komparatif menunjukkan bahwa kombucha dari teh hijau menunjukkan peningkatan aktivitas antioksidan yang lebih konsisten dibandingkan dengan substrat lainnya. Vohra *et al.* (2019), melaporkan bahwa fermentasi teh hijau dengan gula putih (GT+S) menunjukkan nilai DPPH tertinggi sebesar 84%, sementara fermentasi teh hitam dengan *jaggery* (BT+J) menunjukkan aktivitas antioksidan terendah sebesar 9%, mengindikasikan bahwa interaksi antara jenis teh dan jenis gula substrat secara signifikan mempengaruhi profil aktivitas antioksidan yang berkembang selama fermentasi.

Penelitian empiris menunjukkan bahwa terdapat periode optimal fermentasi yang spesifik untuk memaksimalkan aktivitas antioksidan kombucha. Studi terdahulu terhadap kombucha teh hitam dan bunga telang (*Clitoria ternatea* L.) dilaporkan bahwa poliphenol dan aktivitas antioksidan kombucha meningkat setelah 7 hari fermentasi, dengan penelitian menunjukkan bahwa waktu fermentasi yang direkomendasikan tidak lebih dari 10 hari dengan pH maksimal 2,5 untuk konsumsi manusia (Sintyadewi *et al.*, 2021). Temuan ini mengindikasikan bahwa periode 7-10 hari merupakan jendela waktu optimal untuk mencapai keseimbangan antara akumulasi senyawa antioksidan dan karakteristik organoleptik yang diinginkan.

Penelitian Sintyadewi & Fitriani (2024), pada kombucha bunga kecombrang (*Etlingera elatior*) menunjukkan bahwa waktu fermentasi memiliki pengaruh yang sangat signifikan ($P < 0,01$) terhadap aktivitas antioksidan, dengan aktivitas antioksidan optimal dicapai pada hari ke-6 fermentasi dengan nilai IC_{50} sebesar 37,73 $\mu\text{g/mL}$, yang mengklasifikasikan kombucha tersebut memiliki aktivitas antioksidan kuat ($IC_{50} < 50 \text{ ppm}$). Pada titik waktu optimal ini, kombucha menunjukkan karakteristik fisikokimia yang seimbang dengan pH 3,7; total asam 0,33%; dan total flavonoid 5,9 mg/L QE, mengkonfirmasi bahwa terdapat waktu fermentasi spesifik di mana akumulasi senyawa antioksidan mencapai puncaknya sebelum mengalami degradasi atau konversi lebih lanjut.

Penelitian pada kombucha *cascara* (kulit kopi) oleh Nurhayati *et al.* (2020), menunjukkan bahwa konsentrasi *cascara* dan waktu fermentasi secara signifikan mempengaruhi karakteristik kombucha, dengan hasil penelitian menunjukkan bahwa kombucha yang dibuat dari 1% b/v *cascara* dan fermentasi selama 8 hari menghasilkan kombucha terbaik dan paling disukai. Hasil penelitian ini konsisten dengan penelitian lainnya yang mengidentifikasi periode 6-10 hari sebagai jendela waktu optimal untuk fermentasi kombucha.

Meskipun peningkatan awal aktivitas antioksidan terjadi pada fase awal hingga pertengahan fermentasi, penelitian menunjukkan bahwa perpanjangan waktu fermentasi yang berlebihan dapat menghasilkan penurunan aktivitas antioksidan. Studi oleh Barakat *et al.* (2024), terhadap kombucha dari anggur *pomace* menunjukkan hubungan negatif yang kuat antara durasi fermentasi dan konsentrasi polifenol total ($r = -0,741$), mengindikasikan bahwa periode fermentasi yang lebih pendek menghasilkan konsentrasi polifenol yang lebih tinggi dalam produk kombucha. Peningkatan potensi antioksidan hingga 100% dicapai melalui optimalisasi kondisi fermentasi, termasuk variasi durasi fermentasi dan suhu, dengan konsentrasi antosianin menunjukkan korelasi negatif yang cukup kuat dengan durasi fermentasi ($r = -0,289$), meskipun hubungannya lebih lemah dibandingkan dengan suhu fermentasi ($r = -0,834$) (Ziemlewska, 2025).

Penelitian Amarasinghe *et al.* (2018), pada kombucha selama periode fermentasi 8 minggu dengan monitoring mingguan menemukan fenomena yang menarik, yaitu sifat penangkal radikal DPPH (DPPH *scavenging properties*) meningkat secara statistik signifikan ($p < 0,05$) seiring dengan bertambahnya waktu fermentasi, namun aktivitas antioksidan keseluruhan justru mengalami penurunan yang signifikan ($p < 0,05$) pada akhir periode 8 minggu, mengindikasikan berkurangnya sifat fungsional minuman seiring perpanjangan waktu fermentasi (Jayabalan *et al.*, 2014). Penurunan aktivitas antioksidan pada fermentasi yang diperpanjang dikaitkan dengan peningkatan keasaman dan kekeruhan yang signifikan, yang tidak hanya mengurangi daya antioksidan tetapi juga dapat menurunkan daya tarik konsumen terhadap produk fermentasi tersebut (Jayabalan *et al.*, 2014).

Peningkatan aktivitas antioksidan selama fermentasi kombucha didorong oleh transformasi kompleks senyawa polifenol dan pembentukan metabolit sekunder yang dihasilkan oleh aktivitas mikroba. Torre *et al.* (2021), menjelaskan bahwa selama proses fermentasi, konsentrasi fenol dalam kombucha menunjukkan peningkatan linear seiring dengan durasi fermentasi, di mana senyawa polifenol seperti *epigallocatechin-3-gallate* (EGCG) dan *epicatechin-3-gallate* terkonversi menjadi epigallocatechin (EGC) dan *epicatechin* (EC) yang berkontribusi pada aktivitas antioksidan keseluruhan (Hu *et al.*, 2022). Mekanisme konversi ini melibatkan aktivitas enzimatik dari bakteri asam asetat dan ragi yang secara progresif mengoksidasi dan mengubah struktur polifenol, menghasilkan senyawa dengan kapasitas penangkal radikal bebas yang lebih tinggi.

Kuzu *et al.* (2023), menunjukkan bahwa senyawa fenolik total meningkat secara progresif seiring dengan durasi fermentasi, dengan konsentrasi tertinggi teramat pada kombucha teh herbal, mengindikasikan bahwa jenis substrat teh dan waktu fermentasi secara sinergis mengoptimalkan akumulasi komponen bioaktif. Peningkatan aktivitas antioksidan ini berkorelasi dengan penurunan pH dan peningkatan total *acidity* yang dihasilkan dari produksi asam organik dan metabolit mikroba sekunder selama fermentasi, menciptakan lingkungan yang kondusif untuk sintesis dan transformasi senyawa *phenolic* yang meningkatkan kapasitas penangkal radikal bebas (DPPH) (Ziemlewska, 2025).

Shahbazi *et al.* (2018), menggunakan suhu 30°C dengan *shaking* (100 rpm) untuk memastikan distribusi nutrisi yang merata dan peningkatan aktivitas mikroba pada kombucha. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa dalam periode waktu tersebut, terjadi peningkatan signifikan dalam jumlah probiotik dan senyawa bioaktif yang menyumbang aktivitas antioksidan, seperti asam organik dan polifenol. Ketersediaan senyawa-senyawa ini sangat tergantung pada waktu fermentasi, karena selama proses itu, mikroorganisme dalam kultur simbiotik akan memanfaatkan gula dan zat-zat lainnya untuk menghasilkan senyawa yang memiliki sifat antioksidan.

Penelitian Selvaraj & Gurumurthy (2024), menunjukkan bahwa aktivitas antioksidan kombucha mengalami peningkatan pada fase awal fermentasi, mencapai puncaknya pada periode tertentu, kemudian mengalami penurunan pada fase akhir fermentasi. Selama periode fermentasi 12 hari, aktivitas antioksidan yang diukur menggunakan metode DPPH dan FRAP menunjukkan pola yang konsisten. Aktivitas antioksidan meningkat signifikan dari hari ke-0 hingga hari ke-6, diikuti dengan penurunan yang terukur dari hari ke-6 hingga hari ke-12. Peningkatan awal ini berkorelasi dengan akumulasi metabolit sekunder, khususnya tanin, flavonoid, dan fenol yang merupakan komponen utama penentu aktivitas antioksidan kombucha. Nilai FRAP untuk sampel kombucha menunjukkan tren yang sama, dengan peningkatan selama periode fermentasi awal diikuti penurunan yang jelas setelah hari ke-6. Pada titik ini, kombucha mencapai keseimbangan ideal antara akumulasi senyawa bioaktif dan stabilitas nutrisi. Penurunan aktivitas antioksidan setelah hari ke-6 diduga berkaitan dengan degradasi senyawa fenol dan perubahan kondisi lingkungan fermentasi yang semakin asam.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis sistematis terhadap 35 penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa aktivitas antioksidan kombucha optimal pada kondisi waktu fermentasi 6–10 hari dan konsentrasi gula 7–10% (w/v) atau 50–70 g/L yang menghasilkan aktivitas antioksidan puncak sebesar 80–90% dengan profil senyawa bioaktif optimal. Data menunjukkan pola kurva linier yang konsisten lintas berbagai substrat teh, di mana aktivitas antioksidan meningkat pada fase awal fermentasi, mencapai puncak pada hari ke-6 hingga hari ke-10, kemudian menurun pada fermentasi yang lebih lama, sementara konsentrasi gula rendah (<5%) menghambat pertumbuhan mikroba dan gula tinggi (>15%) menyebabkan stres osmosis. Rekomendasi parameter optimal ini dapat diterapkan sebagai standar *baseline* produksi kombucha komersial, meskipun variasi substrat (jenis teh, jenis gula) memerlukan penyesuaian minor dan validasi lokal terhadap strain SCOPY spesifik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Biologi Dasar, Program Studi Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman atas dukungan dan fasilitas serta lingkungan akademik yang kondusif dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan artikel ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada sesama rekan dosen Program Studi Biologi Fakultas

Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman atas diskusi ilmiah dan kolaborasi akademik yang memperkaya kualitas artikel ini.

KEPUSTAKAAN

- Amarasinghe, H., Weerakkody, N. S., & Waisundara, V. Y. (2018). Evaluation of physicochemical properties and antioxidant activities of kombucha “tea fungus” during extended periods of fermentation. *Food Science and Nutrition*, 6(3), 659–665. <https://doi.org/10.1002/FSN3.605>.
- Ayed, L. & Hamdi, M. (2015). Manufacture of a beverage from cactus pear juice using “tea fungus” fermentation. *Annals of Microbiology*, 65(4), 2293-2299. <https://doi.org/10.1007/s13213-015-1071-8>.
- Barakat, N., Bouajila, J., Beaufort, S., Rizk, Z., Taillandier, P., & Rayess, Y. El. (2024). Development of a new kombucha from grape pomace: the impact of fermentation conditions on composition and biological activities. *Beverages*. 10(2), 29. <https://doi.org/10.3390/beverages10020029>.
- Cheepchirasuk, N., Kaewkod, T., Suriyaprom, S., Intachaisri, V., Ngamsaard, P., & Tragooolpua, Y. (2025). Functional metabolites and inhibitory efficacy of kombucha beverage on pathogenic bacteria, free radicals and inflammation. *Scientific Reports*, 15(1), 19187. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03545-z>.
- Doğan, C. & Doğan, N. (2023). Kombucha Beverage: Comparative Study Based on Bioactive Properties and Antimicrobial Potentials of Different Plant Infusion. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 9(1), 15–27. <https://doi.org/10.28979/jarnas.1140573>
- Fu, C., Yan, F., Cao, Z., Xie, F., & Lin, J. (2014). Antioxidant activities of kombucha prepared from three different substrates and changes in content of probiotics during storage. *Food Science and Technology*, 34, 123-126. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612014005000012>.
- Gaggia, F., Baffoni, L., Galiano, M., Nielsen, D. S., Jakobsen, R. R., Castro-Mejía, J. L., Bosi, S., Truzzi, F., Musumeci, F., Dinelli, G., & Gioia, D. Di. (2018). Kombucha beverage from green, black and rooibos teas: a comparative study looking at microbiology, chemistry and antioxidant activity. *Nutrients*, 11(1), 1. <https://doi.org/10.3390/nu11010001>.
- Hu, T., Shi, S., & Ma, Q. (2022). Modulation effects of microorganisms on tea in fermentation. *Frontiers in Nutrition*, 9, 931790. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.931790>.
- Jakubczyk, K., Kałduńska, J., Kochman, J., & Janda, K. (2020). Chemical profile and antioxidant activity of the kombucha beverage derived from white, green, black and red tea. *Antioxidants*, 9(5), 447. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX9050447>.
- Jayabalan, R., Malbaša, R., Lončar, E., Витас, J., & Sathishkumar, M. (2014). A review on kombucha tea—microbiology, composition, fermentation, beneficial effects, toxicity, and tea fungus. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(4), 538-550. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12073>.
- Kuzu, K. T., Aykut, G., Tek, S., Yatmaz, E., Germec, M., Yavuz, İ., & Turhan, İ. (2023). Production and characterization of kombucha tea from different sources of tea and its kinetic modeling. *Processes*, 11(7), 2100. <https://doi.org/10.3390/pr11072100>.
- Lee, K. R., Jo, K., Ra, K. S., Suh, H. J., & Hong, K. B. (2022). Kombucha fermentation using commercial kombucha pellicle and culture broth as starter. *Food Science and Technology*, 42, e70020. <https://doi.org/10.1590/FST.70020>.
- Malbaša, R., Lončar, E., & Djurić, M. (2008). Comparison of the products of kombucha fermentation on sucrose and molasses. *Food Chemistry*, 106(3), 1039–1045. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2007.07.020>.
- Mihai, R. A., Cubi-Insuaste, N. S., & Catană, R. D. (2024). Biological activity and phenolic content of kombucha beverages under the influence of different tea extract substrates. *Fermentation*, 10(7), 338. <https://doi.org/10.3390/fermentation10070338>.
- Nurhayati, Yuwanti, S., & Urbahillah, A. (2020). Karakteristik fisikokimia dan sensori kombucha cascara (kulit kopi ranum). *Jurnal Teknologi Dan Industri Pangan*, 31(1), 38–49. <https://doi.org/10.6066/JTIP.2020.31.1.38>.
- Phan Van, T., Phan, Q. K., Gia, N., Pham, B., Hoa, N., Quang, P., & Do, A. D. (2023). Repurposing Coffee Husk By-Products (Cascara) for the Production of Kombucha Beverage. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-3041292/V1>.

- Robles-Apodaca, S. M., González-Vega, R. I., Ruiz-Cruz, S., Estrada-Alvarado, M. I., Cira-Chávez, L. A., Márquez-Ríos, E., Del-Toro-Sánchez, C. L., Jesús Ornelas-Paz, J. de, Suárez-Jiménez, G. M., & Ocaño-Higuera, V. M. (2024). Optimization of extraction process for improving polyphenols and antioxidant activity from papaya seeds (*Carica papaya* L.) using response surface methodology. *Processes*, 12(12), 2729. <https://doi.org/10.3390/pr12122729>
- Saimaiti, A., Huang, S., Xiong, R.-G., Wu, S.-X., Zhou, D.-D., Yang, Z.-J., Luo, M., Gan, R., & Li, H. (2022). Antioxidant capacities and polyphenol contents of kombucha beverages based on vine tea and sweet tea. *Antioxidants*, 11(9), 1655. <https://doi.org/10.3390/antiox11091655>.
- Selvaraj, S. & Gurumurthy, K. (2024). Metagenomic, organoleptic profiling, and nutritional properties of fermented kombucha tea substituted with recycled substrates. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1367697. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1367697>.
- Sintyadewi, P. R., Agung RS, I. G., & Wulansari, N. T. (2021). Analysis of chemical characteristics and antioxidant activity test of kombucha black tea and butterfly pea flower (*Clitoria ternatea* L.) based on fermentation time. *International Journal of Chemical & Material Sciences*, 4(1), 27-32. <https://doi.org/10.21744/ijcms.v4n1.1768>.
- Sintyadewi, P. R. & Fitriani, P. P. E. (2024). Determination of antioxidant activity in kombucha of kecombrang flower (*Etlingera elatior*) for the development of functional beverages. *Jurnal Pijar Mipa*, 19(2), 343-347. <https://doi.org/10.29303/jpm.v19i2.6616>.
- Steiner, K., Kunz, S., & Florack, A. (2024). How can health look tasty? effects of packaging color saturation on beverage health and taste expectations depend on color match. *British Food Journal*, 127(13), 1-19. [https://doi.org/10.1108/BFJ-06-2024-0651/FULL/HTML](https://doi.org/10.1108/BFJ-06-2024-0651).
- Tanticharakunsiri, W., Mangmool, S., Wongsariya, K., & Ochaikul, D. (2020). Characteristics and upregulation of antioxidant enzymes of kitchen mint and oolong tea kombucha beverages. *Journal of Food Biochemistry*, 45(1), e13574. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13574>.
- Torre, C. La, Fazio, A., Caputo, P., Plastina, P., Caroleo, M. C., Cannataro, R., & Cione, E. (2021). Effects of long-term storage on radical scavenging properties and phenolic content of kombucha from black tea. *Molecules*, 26(18), 5474. <https://doi.org/10.3390/molecules26185474>.
- Villarreal-Soto, S. A., Beaufort, S., Bouajila, J., Souchard, J. P., & Taillandier, P. (2018). Understanding kombucha tea fermentation: a review. *Journal of Food Science*, 83(3), 580-588. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14068>.
- Villarreal-Soto, S. A., Beaufort, S., Bouajila, J., Souchard, J., & Taillandier, P. (2018). Understanding kombucha tea fermentation: a review. *Journal of Food Science*, 83(3), 580-588. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14068>.
- Vohra, B. M., Fazry, S., Sairi, F., & Othman, B. A. (2019). Effects of medium variation and fermentation time on the antioxidant and antimicrobial properties of kombucha. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 15(2-1), 298-302. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v15n2-1.1536>.
- Zhang, S., Cheng, M., Li, Z., Guan, S., Cai, B., Li, Q., & Rong, S. (2020). Composition and biological activity of rose and jujube kernel after fermentation with kombucha SCOBY. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(10), e14758. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14758>.
- Ziemlewska, A. (2025). Anti-aging, anti-inflammatory, and cytoprotective properties of *lactobacillus*-and kombucha-fermented c. pepo l. peel and pulp extracts with prototype skin toner development. *Molecules*, 30(20), 4082. <https://doi.org/10.3390/molecules30204082>.
- Zubaidah, E., Dewantari, F. J., Novitasari, F. R., Srianta, I., & Blanc, P. (2018). Potential of snake fruit (*Salacca zalacca* (Gaerth.) Voss) for the development of a beverage through fermentation with the kombucha consortium. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 13, 198-203. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.12.012>.