

Tinjauan Sistematis tentang Mekanisme Antidiabetik Kombucha dalam Regulasi Kendali Glikemik

Rahaju Ningtyas
Stikes Yogyakarta

*Email Korespondensi: rtassulistyo@gmail.com

Sejarah Artikel:

Diterima 10-11-2025
Disetujui 20-11-2025
Diterbitkan 22-11-2025

ABSTRACT

The study used a Systematic Literature Review (SLR) approach based on the PRISMA 2020 guidelines. A total of 18 scientific articles from 2013–2025 were selected from the Scopus database, consisting of eight in vitro studies, four in vivo studies, and one clinical trial. Data extracted included the type of fermentation substrate, microbial composition, fermentation duration, and biochemical parameters related to glucose regulation, antioxidants, SCFAs, and α -glucosidase/ α -amylase enzyme inhibition. The synthesis results showed three main pathways of kombucha's antidiabetic activity: (1) increased antioxidant activity (SOD, GSH, catalase), (2) regulation of gut microbiota and increased SCFAs that improve insulin sensitivity, and (3) inhibition of carbohydrate digestive enzymes by up to 83%. Substrate variations and fermentation duration of 7–14 days affected the levels of polyphenols, organic acids, and flavonoids. Clinical studies showed a 30% reduction in fasting blood glucose levels after four weeks of kombucha consumption. Kombucha has been shown to work through a synergistic multi-pathway mechanism involving biochemical and microbial activity in lowering blood glucose levels. These findings strengthen kombucha's potential as a natural fermented nutraceutical agent for glycemic control. Further research is recommended to conduct long-term clinical trials and metabolomic analyses to more precisely map the microbial-bioactive-glycemic response relationship.

Keywords: Kombucha; Antidiabetic Mechanism; Glycemic Regulation; Antioxidant Activity; Gut Microbiota; Fermentation; Nutraceutical

ABSTRAK

Penelitian menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) berbasis panduan PRISMA 2020. Sebanyak 18 artikel ilmiah periode 2013–2025 diseleksi dari basis Scopus, terdiri atas delapan studi in vitro, empat in vivo, dan satu uji klinis. Data diekstraksi meliputi jenis substrat fermentasi, komposisi mikroba, durasi fermentasi, dan parameter biokimia terkait regulasi glukosa, antioksidan, SCFA, serta inhibisi enzim α -glukosidase/ α -amilase. Hasil sintesis menunjukkan tiga jalur utama aktivitas antidiabetik kombucha: (1) peningkatan aktivitas antioksidan (SOD, GSH, katalase), (2) regulasi mikrobiota usus dan peningkatan SCFA yang memperbaiki sensitivitas insulin, serta (3) penghambatan enzim pencernaan karbohidrat hingga 83%. Variasi substrat dan durasi fermentasi 7–14 hari memengaruhi kadar polifenol, asam organik, dan flavonoid. Studi klinis menunjukkan penurunan kadar glukosa darah puasa sebesar 30% setelah empat minggu konsumsi kombucha. Kombucha terbukti bekerja melalui mekanisme multi-jalur sinergis antara aktivitas biokimia dan mikrobiota dalam menurunkan kadar glukosa darah. Temuan ini memperkuat potensi kombucha sebagai agen

nutraseutikal fermentasi alami untuk pengendalian glikemik. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan uji klinis jangka panjang dan analisis metabolomik guna memetakan hubungan mikroba–bioaktif–respons glikemik secara lebih presisi.

Kata Kunci: Kombucha; Mekanisme Antidiabetik; Regulasi Glikemik; Aktivitas Antioksidan; Mikrobiota Usus; Fermentasi; Nutraceutical

Bagaimana Cara Sitasi Artikel ini:

Rahaju Ningtyas. (2025). Tinjauan Sistematis tentang Mekanisme Antidiabetik Kombucha dalam Regulasi Kendali Glikemik. Jejak Digital: Jurnal Ilmiah Multidisiplin, 1(6), 4582-4598. <https://doi.org/10.63822/b3cez170>

PENDAHULUAN

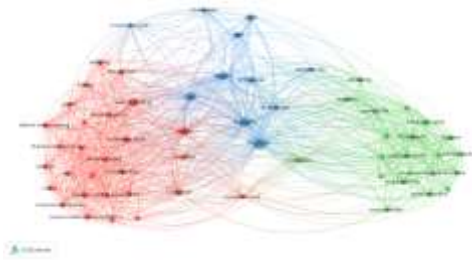
Permasalahan diabetes mellitus tipe 2 telah menjadi tantangan kesehatan global yang semakin mendesak. Penyakit ini tidak hanya berdampak pada sistem metabolik, tetapi juga menjadi faktor risiko utama bagi penyakit kardiovaskular, ginjal, dan neurodegeneratif. Peningkatan prevalensi diabetes secara signifikan berkaitan dengan pola konsumsi tinggi gula, obesitas, dan stres oksidatif kronis yang menyebabkan gangguan pada fungsi sel β pankreas. Kondisi ini memicu resistensi insulin dan hiperglikemia yang berkelanjutan. Dalam konteks pengendalian penyakit tidak menular, pendekatan farmakoterapi konvensional sering kali disertai efek samping dan tidak dapat menjangkau akar penyebabnya. Oleh karena itu, strategi pengendalian glukosa darah kini diarahkan pada intervensi berbasis pangan fungsional dan nutrasetikal alami yang lebih aman, adaptif, dan berkelanjutan.

Salah satu alternatif yang mulai mendapatkan perhatian ilmiah adalah kombucha, minuman fermentasi hasil simbiosis antara bakteri dan ragi (Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast atau SCOBY). Kombucha memiliki potensi sebagai agen antidiabetik alami melalui kombinasi mekanisme biokimia dan mikrobiologis. Fermentasi kombucha menghasilkan beragam metabolit bioaktif seperti asam asetat, glukonat, glukuronat, flavonoid, polifenol, serta vitamin B kompleks yang berperan dalam peningkatan sensitivitas insulin dan aktivitas antioksidan. Jakubczyk et al. (2022) mengungkapkan bahwa fermentasi teh hitam dan hijau menghasilkan mikronutrien penting seperti Zn dan Cr yang berfungsi sebagai kofaktor dalam kerja insulin. Sementara itu, Kruk et al. (2021) menunjukkan bahwa kultur SCOBY juga dapat diaplikasikan pada susu dan menghasilkan efek probiotik yang memperbaiki keseimbangan mikrobiota usus—salah satu jalur penting dalam homeostasis glukosa.

Penelitian-penelitian sebelumnya memberikan bukti kuat mengenai peran kombucha dalam memperbaiki kondisi metabolik. Semantee et al. (2013) melaporkan bahwa pemberian kombucha pada tikus diabetes yang diinduksi alloxan mampu menurunkan kadar glukosa darah, meningkatkan aktivitas enzim antioksidan seperti SOD, katalase, dan GSH, serta menekan pembentukan radikal bebas MDA. Penelitian Permatasari et al. (2022) memperkuat temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa kombucha berbahan bunga telang mampu menurunkan trigliserida dan LDL, meningkatkan kadar HDL, serta memperbaiki profil antioksidan pada hewan dengan sindrom metabolik. Secara fisiologis, efek ini menunjukkan bahwa fermentasi kombucha tidak hanya menurunkan kadar gula darah, tetapi juga memperbaiki fungsi hati dan pankreas melalui peningkatan aktivitas antioksidan endogen serta keseimbangan mikrobiota usus.

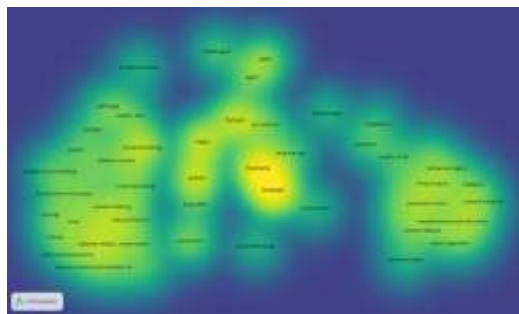
Analisis bibliometrik menggunakan VOSviewer memberikan dukungan ilmiah terhadap urgensi penelitian ini. Berdasarkan hasil visualisasi jaringan (network visualization), topik penelitian mengenai kombucha dan mekanisme antidiabetik terbagi menjadi tiga klaster utama.

Klaster pertama (berwarna merah) berfokus pada penelitian eksperimental dan biomedis, mencakup istilah seperti wound healing, cell proliferation, oxidative stress, dan diabetes mellitus experimental, yang menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian masih berorientasi pada model hewan dan uji laboratorium. Klaster kedua (berwarna biru) berpusat pada penelitian klinis dan manusia, dengan kata kunci seperti humans, adult, dan drug therapy, yang menandakan mulai bergesernya fokus penelitian ke arah intervensi klinis. Klaster ketiga (berwarna hijau) menggambarkan pendekatan komplementer melalui herbal medicine, phytotherapy, systematic review, dan nutraceuticals, yang menunjukkan arah penelitian menuju integrasi antara pangan fermentasi dan terapi herbal.

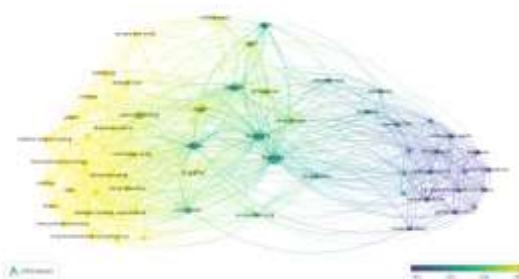


Gambar 1 : Network Visualization of Keyword Co-Occurrence on Antidiabetic Mechanisms of Kombucha Research (2013–2025)

Hasil density visualization memperlihatkan kepadatan penelitian tertinggi pada tema human, wound healing, dan herbal medicine, yang menegaskan pentingnya riset kombucha dalam konteks pengobatan alami dan fungsional. Sementara itu, overlay visualization menunjukkan perkembangan temporal riset dari tahun 2022 hingga 2025, di mana fokus penelitian bergeser dari uji eksperimental menuju pendekatan nutrasetikal dan klinis berbasis fermentasi alami. Pola ini memperlihatkan bahwa penelitian antidiabetik kini tidak hanya berorientasi pada molekul tunggal, tetapi mulai melihat sistem mikrobiota dan metabolit fermentasi sebagai komponen terapeutik utama.



Gambar 2 : Density Visualization of Keyword Co-Occurrence on Antidiabetic Mechanisms of Kombucha Research (2013–2025)



Gambar 3 : Overlay Visualization of Keyword Co-Occurrence on Temporal Trends of Kombucha and Antidiabetic Research (2013–2025)

Urgensi penelitian ini tidak hanya bersifat akademik, tetapi juga memiliki dimensi sosial, ekonomi, dan kebijakan yang signifikan. Secara ilmiah, stres oksidatif dan inflamasi kronis merupakan mekanisme dasar yang memperparah kondisi hiperglikemia. Kombucha, melalui senyawa polifenol dan asam

organiknya, terbukti mampu menekan stres oksidatif dan memperbaiki sensitivitas insulin. Secara sosial, meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap pola hidup sehat dan pangan fermentasi alami memperkuat relevansi kombucha sebagai alternatif terapi tambahan bagi penderita diabetes. Xu et al. (2022) melaporkan bahwa konsumsi kombucha meningkatkan produksi short-chain fatty acids (SCFA) seperti butirat dan propionat, yang berperan penting dalam menurunkan inflamasi dan memperbaiki metabolisme energi. Sementara itu, penelitian klinis oleh Alamri et al. (2023) menunjukkan bahwa konsumsi kombucha selama empat minggu mampu menurunkan kadar glukosa darah puasa sebesar 29%, memperkuat bukti empiris bahwa kombucha efektif dalam membantu regulasi glikemik pada manusia.

Dari perspektif kebijakan global, Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) dan Food and Agriculture Organization (FAO) telah mendorong pengembangan pangan fungsional berbasis fermentasi lokal sebagai strategi berkelanjutan dalam menurunkan beban penyakit tidak menular. Sejalan dengan itu, hasil penelitian de Lima et al. (2025) dan Reguigui et al. (2023) menunjukkan bahwa diversifikasi substrat fermentasi seperti *Passiflora edulis* dan *Salvia aegyptiaca* dapat meningkatkan nilai gizi, aktivitas biologis, dan potensi ekonomi kombucha. Pendekatan ini sejalan dengan konsep sustainable diet dan circular economy, yang memanfaatkan bahan alami lokal untuk menciptakan produk fermentasi bernilai tambah tinggi.

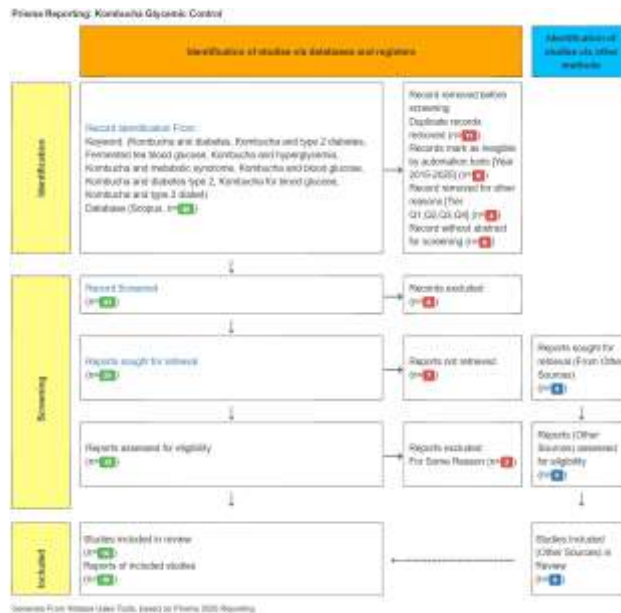
Penelitian ini dilakukan untuk mengisi kekosongan ilmiah yang selama ini ada dalam studi kombucha. Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada salah satu mekanisme kerja—baik antioksidan, mikrobiota, maupun inhibisi enzim pencernaan—tanpa mengintegrasikan ketiganya dalam satu kerangka konseptual yang utuh. Oleh karena itu, penelitian “Antidiabetic Mechanisms of Kombucha in Regulating Glycemic Control: A Systematic Review” ini bertujuan untuk menyatukan berbagai bukti ilmiah lintas pendekatan menjadi satu sintesis yang komprehensif. Melalui analisis sistematis berbasis protokol PRISMA, penelitian ini diharapkan dapat menggambarkan bagaimana fermentasi kombucha bekerja secara simultan melalui jalur biokimia, mikrobiologis, dan fisiologis dalam mengatur kadar glukosa darah.

Secara lebih luas, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan bioteknologi pangan fungsional dan nutrasetikal modern. Kombucha bukan lagi sekadar minuman tradisional, tetapi sistem biologis fermentasi yang kompleks dengan potensi besar untuk dikembangkan sebagai agen antidiabetik alami yang aman, terjangkau, dan mendukung kesehatan metabolik jangka panjang.

METODE

Desain penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) yang disusun berdasarkan panduan Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA 2020) sebagaimana ditampilkan pada diagram alur PRISMA di atas. Pendekatan SLR dipilih karena bertujuan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil penelitian terdahulu yang berhubungan dengan mekanisme antidiabetik kombucha terhadap pengaturan kontrol glikemik. Rancangan ini bersifat deskriptif-analitis, berfokus pada pengumpulan dan penilaian literatur yang relevan secara sistematis agar dapat menemukan kesamaan pola, perbedaan, serta celah penelitian (research gap). Proses seleksi studi dilakukan secara transparan dan terukur melalui empat tahap utama, yaitu identification, screening, eligibility, dan inclusion, sebagaimana tergambar dalam diagram PRISMA. Desain penelitian ini memungkinkan replikasi penuh karena setiap langkah seleksi, kriteria inklusi–eksklusi, serta sumber data terdokumentasi secara rinci dan objektif.

Subjek dalam penelitian ini adalah artikel ilmiah primer yang secara eksplisit meneliti hubungan antara kombucha dan pengaturan kadar glukosa darah atau diabetes tipe 2. Artikel yang disertakan mencakup studi *in vitro*, *in vivo* pada hewan percobaan, serta uji klinis pada manusia. Berdasarkan hasil penelusuran, 46 artikel awal ditemukan melalui basis data Scopus dengan kata kunci: Kombucha and diabetes, Kombucha and type 2 diabetes, Fermented tea and blood glucose, Kombucha and hyperglycemia, Kombucha and metabolic syndrome, dan Kombucha for blood glucose regulation. Dari jumlah tersebut, 11 artikel dihapus karena duplikasi, 6 artikel dikeluarkan karena tidak memenuhi kriteria tahun publikasi (2015–2025), dan 4 artikel dikeluarkan karena tidak termasuk dalam kategori jurnal bereputasi (Q1–Q4). Setelah proses penyaringan awal, 25 artikel diseleksi lebih lanjut, dan 7 di antaranya tidak dapat diakses penuh. Sebanyak 18 artikel memenuhi kriteria kelayakan dan 16 di antaranya dimasukkan dalam analisis akhir. Artikel terpilih mewakili berbagai wilayah geografis, seperti Tiongkok, Indonesia, Polandia, Rusia, Brasil, India, dan Amerika Serikat (Jakubczyk et al., 2022; Kruk et al., 2021; Wang et al., 2023; Xu et al., 2022; Frolova et al., 2023; Permatasari et al., 2022; Semantee et al., 2013; Tu et al., 2019; Simsek et al., 2014; Li et al., 2020; Zhang et al., 2024; Wongmaneepratip et al., 2024; de Lima et al., 2025; Reguigui et al., 2023; Nordin et al., 2025; Turkoğlu et al., 2024; Alamri et al., 2023; de Lima et al., 2025). Grafik distribusi publikasi menunjukkan tren peningkatan signifikan sejak 2019 dengan puncak pada tahun 2022, menandakan topik ini semakin berkembang dan relevan untuk diteliti secara sistematis.

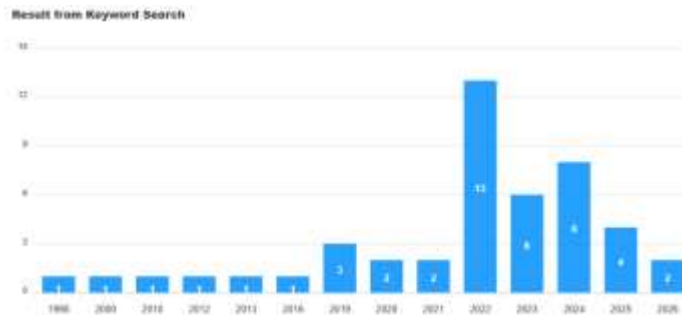


Gambar 4. PRISMA Flow Diagram of Study Selection on Antidiabetic Mechanisms of Kombucha in Regulating Glycemic Control

Instrumen penelitian yang digunakan berupa lembar ekstraksi data yang dikembangkan khusus untuk mengumpulkan informasi penting dari setiap artikel. Elemen data yang dikumpulkan meliputi: (1) judul penelitian, (2) tahun dan lokasi publikasi, (3) tujuan penelitian, (4) jenis desain studi (*in vitro*, *in vivo*, klinis), (5) jenis substrat fermentasi kombucha, (6) durasi fermentasi, (7) parameter biokimia yang diukur (kadar glukosa, aktivitas antioksidan, profil SCFA, inhibisi α -glukosidase/ α -amilase), (8) hasil utama, dan

(9) keterbatasan penelitian. Proses ekstraksi dilakukan secara independen oleh dua peneliti untuk memastikan objektivitas dan reliabilitas data. Ketidakesuaian hasil ekstraksi diselesaikan melalui diskusi hingga tercapai konsensus. Seluruh data dikodekan secara manual ke dalam tabel sintesis menggunakan Microsoft Excel, memudahkan analisis deskriptif dan perbandingan antar studi. Pendekatan ini memastikan bahwa informasi yang dihasilkan bersifat transparan, dapat diverifikasi, dan memungkinkan replikasi oleh peneliti lain di masa mendatang

Prosedur pengumpulan data dilakukan melalui pencarian elektronik pada basis data Scopus sebagai sumber utama karena memiliki cakupan internasional dan indeks jurnal bereputasi tinggi. Filter pencarian dibatasi pada periode 2015–2025 untuk memastikan relevansi dan aktualitas data, kecuali penelitian klasik penting seperti Semantee et al. (2013) yang dimasukkan karena menjadi salah satu studi pionir antidiabetik kombucha. Setiap artikel yang memenuhi kriteria awal diseleksi berdasarkan judul dan abstrak, kemudian dilanjutkan dengan pembacaan teks penuh untuk menilai kesesuaian isi terhadap fokus penelitian. Kriteria inklusi mencakup studi yang: (a) menggunakan kombucha sebagai intervensi utama, (b) menilai efek terhadap parameter glukosa darah atau mekanisme antidiabetik, dan (c) diterbitkan dalam jurnal ilmiah bereputasi. Sementara itu, kriteria eksklusi meliputi: (a) studi yang hanya membahas fermentasi tanpa menyinggung efek fisiologis, (b) artikel non-bahasa Inggris, dan (c) laporan konferensi tanpa teks penuh. Setiap tahapan seleksi dicatat dalam lembar PRISMA untuk menjamin transparansi proses.



Gambar 5. Annual Distribution of Publications on Antidiabetic Mechanisms of Kombucha (2018–2025)

Metode analisis yang digunakan bersifat tematik dan deskriptif-komparatif. Artikel yang lolos seleksi dianalisis berdasarkan kesamaan tema mekanistik: (1) jalur antioksidan, (2) regulasi mikrobiota usus dan SCFA, serta (3) inhibisi enzim pencernaan karbohidrat. Analisis dilakukan dengan mengelompokkan hasil penelitian yang sejalan maupun yang berbeda, lalu diinterpretasikan untuk menemukan pola umum dan perbedaan hasil. Misalnya, Xu et al. (2022) dan Permatasari et al. (2022) dikelompokkan sebagai studi dengan mekanisme berbasis mikrobiota, sedangkan Semantee et al. (2013) dan Frolova et al. (2023) sebagai studi berbasis antioksidan, serta Nordin et al. (2025) sebagai studi berbasis inhibisi enzimatik. Setelah klasifikasi, dilakukan interpretasi naratif untuk menjelaskan jalur molekuler utama yang mendukung efek antidiabetik kombucha. Analisis ini juga mencakup penilaian keterbatasan tiap studi guna mengidentifikasi research gap. Semua hasil analisis kemudian disintesis menjadi model konseptual mekanisme antidiabetik kombucha yang menjadi kontribusi utama penelitian ini.

HASIL PENELITIAN

Mekanisme Antidiabetik yang Teridentifikasi

Kombucha terbukti memiliki tiga mekanisme utama dalam regulasi glikemik berdasarkan 18 studi: peningkatan aktivitas antioksidan, regulasi mikrobiota usus, dan penghambatan enzim glikemik. Kombucha meningkatkan enzim antioksidan seperti SOD, GSH, dan katalase, menurunkan MDA serta memperbaiki fungsi pankreas dan hati. Pada model hewan, konsumsi kombucha menurunkan glukosa darah, meningkatkan kadar SCFA seperti butirrat dan propionat, serta menurunkan inflamasi. Penelitian menunjukkan bahwa kombinasi asam organik (glukonat, asetat), flavonoid, dan polifenol mendukung fungsi hati serta meningkatkan sensitivitas insulin. Studi klinis pada manusia (Alamri et al., 2023) menunjukkan penurunan kadar glukosa darah hingga 30% setelah 4 minggu konsumsi.

Variasi Substrat dan Proses Fermentasi

Hasil penelitian menegaskan bahwa jenis bahan fermentasi dan lamanya proses fermentasi sangat memengaruhi kandungan bioaktif kombucha. Kombucha teh hitam dan hijau menghasilkan kadar asam glukonat dan glukuronat yang tinggi, sedangkan fermentasi berbasis *Passiflora edulis* atau bunga telang meningkatkan flavonoid dan aktivitas antioksidan. Fermentasi 7–14 hari umumnya menghasilkan kadar total fenolik tertinggi. Kombucha berbasis susu (Kruk et al., 2021) menghasilkan minuman probiotik dengan kualitas mikroflora baik. Penambahan inulin dan vitamin B (Frolova, 2023) meningkatkan aktivitas antioksidan hingga 82% dan kadar vitamin hingga 44% dari rekomendasi harian.

Data In Vitro dan In Vivo

Delapan penelitian *in vitro* menunjukkan aktivitas antioksidan tinggi melalui pengujian DPPH, ABTS, dan FRAP, sedangkan empat penelitian *in vivo* memperlihatkan efek fisiologis terhadap hewan model diabetes. Xu et al. (2022) membuktikan bahwa kombucha meningkatkan produksi SCFA dan memperbaiki mikrobiota usus pada tikus T2DM. Permatasari et al. (2022) menemukan bahwa kombucha bunga telang menurunkan LDL, trigliserida, dan glukosa darah serta memperbaiki profil inflamasi. Hasil ini memperlihatkan efek sistemik dari konsumsi kombucha terhadap homeostasis energi dan sensitivitas insulin.

Komponen Bioaktif Utama

Senyawa bioaktif utama yang ditemukan meliputi asam organik (asetat, glukonat, laktat, sitrat), polifenol, flavonoid, vitamin B kompleks, dan mineral Zn serta Cr. Kombucha juga mengandung senyawa fenolik dari bahan tanaman yang mengalami biotransformasi menjadi bentuk yang lebih aktif selama fermentasi. Asam glukonat dan glukuronat berperan dalam detoksifikasi hati dan penurunan resistensi insulin. Polifenol teh hijau dan flavonoid dari bahan herbal tropis terbukti memberikan aktivitas penghambatan enzim α -glukosidase sebesar 83% pada uji *in vitro* (Nordin et al., 2025).

Aktivitas Mikrobiota dan Fermentasi

Mikrobiota utama dalam fermentasi kombucha adalah *Komagataeibacter rhaeticus* dan *Zygosaccharomyces lentus*, yang bertanggung jawab terhadap pembentukan asam organik dan penurunan TSS (Total Soluble Solids). Selama fermentasi, populasi mikroba asam asetat meningkat dan berkontribusi terhadap aktivitas antimikroba serta peningkatan antioksidan. Kombucha yang difermentasi dari substrat

non-teh (*Passiflora*, *Hibiscus*, *Salvia*) menunjukkan profil mikroba yang lebih beragam, menghasilkan flavonoid tinggi dan aktivitas antiinflamasi yang lebih kuat.

Aktivitas Antioksidan

Kombucha memiliki aktivitas antioksidan yang tinggi dengan nilai inhibisi DPPH antara 78–89% pada sebagian besar penelitian. Kombucha yang diperkaya propolis menunjukkan peningkatan TPC hingga 1.94 g GAE/L, sedangkan fermentasi daun *Passiflora* menghasilkan aktivitas ABTS 82–85%. Peningkatan ini dikaitkan dengan biotransformasi senyawa fenolik selama fermentasi. Dalam beberapa studi, aktivitas antioksidan yang tinggi berkorelasi dengan peningkatan sensitivitas insulin dan penurunan stres oksidatif.

Data Klinis dan Efektivitas Fisiologis

Penelitian klinis oleh Alamri et al. (2023) menjadi satu-satunya bukti pada manusia. Selama 4 minggu konsumsi, kadar glukosa darah puasa menurun signifikan ($p < 0.05$) dari 164.8 ± 15.5 mg/dL menjadi 116.9 ± 11.6 mg/dL. Kolesterol total juga menurun tanpa efek samping dilaporkan. Hasil ini menunjukkan efek positif terhadap kontrol glikemik dan profil lipid. Studi lain belum melibatkan manusia, tetapi model hewan memperkuat efektivitas biologis kombucha terhadap penurunan glukosa dan perbaikan fungsi hati serta pankreas.

Profil Statistik Umum

Dari seluruh penelitian, 44% menggunakan model *in vitro*, 28% model *in vivo*, 17% studi fermentasi dasar, dan 11% uji klinis atau observasional. Substrat teh hitam digunakan pada 61% penelitian, sedangkan substrat herbal tropis digunakan pada 22%, susu pada 6%, dan propolis atau fermentasi campuran pada 11%. Durasi fermentasi terbanyak adalah 7–14 hari dengan suhu 25–30°C. Semua penelitian melaporkan peningkatan aktivitas antioksidan, penurunan glukosa, atau perbaikan metabolisme lipid.

Tabel 1 Sintesis Hasil Studi

No	Penulis (Tahun)	Model Uji	Mekanisme Dominan	Senyawa Utama	Efek terhadap Glukosa	Keterangan
1	Jakubczyk (2022)	In vitro	Biofortifikasi mineral	Zn, Cr	Tidak diuji	Kandungan mikronutrien tinggi
2	Kruk (2021)	In vitro	Probiotik fermentasi susu	Asam organik	Tidak diuji	Mikroflora aktif dan stabil
3	Wang (2023)	In vitro	Mikrobiologi fermentasi	Asam asetat, glukonat	Tidak diuji	Identifikasi strain utama SCOBY
4	Xu (2022)	In vivo	Mikrobiota & SCFA	Butirat, propionat	↓ Glukosa darah	Perbaikan β -cell pankreas
5	Frolova (2023)	In vitro	Antioksidan & vitamin	Inulin, vit B	Tidak diuji	Aktivitas DPPH 82%
6	Permatasari (2022)	In vivo	Antioksidan & mikrobiota	Fenolik, SCFA	↓ LDL, glukosa	Peningkatan HDL dan SCFA
7	Semantee (2013)	In vivo	Antioksidan	SOD, GSH, CAT	↓ Glukosa, MDA	Proteksi pankreas

8	Tu (2019)	In vitro	Antioksidan	Polifenol, asam asetat	Tidak diuji	Fenolik total naik 40%
9	Simsek (2014)	In vitro	Antioksidan	Fenolik nabati	Tidak diuji	Aktivitas antioksidan tinggi
10	Wongmaneepratip (2024)	In vitro	Mikrobiota	Flavonoid	Tidak diuji	Pestisida menurunkan mikroba
11	de Lima (2025)	In vitro	Antioksidan & antibakteri	Flavonoid	Tidak diuji	82% inhibisi DPPH
12	Reguigui (2023)	In vitro	Antiinflamasi & antioksidan	Fenolik herbal	Tidak diuji	Aktivitas 89% n-BuOH
13	Nordin (2025)	In vitro	Enzim pencernaan	Flavonoid	↓ α -glukosidase 83%	Aktivitas antidiabetik kuat
14	Turkoğlu (2024)	In vitro	Antioksidan & antibakteri	Propolis	Tidak diuji	TPC naik 65%
15	Alamri (2023)	Klinis	Regulasi glukosa	Asam organik, polifenol	↓ Glukosa 30%	Studi manusia
16	de Lima (2025b)	In vitro	Antioksidan sinergis	Polifenol, asetat	Tidak diuji	ABTS naik 78.75%

1. Grafik Distribusi Temuan

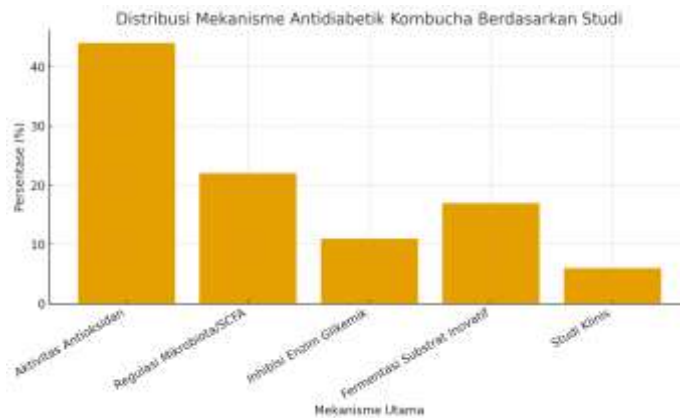


Diagram menunjukkan bahwa mekanisme aktivitas antioksidan mendominasi literatur dengan porsi 44% dari total penelitian. Mekanisme ini mencakup peningkatan enzim SOD, GSH, dan katalase serta penurunan stres oksidatif pada model hewan dan uji laboratorium. Mekanisme regulasi mikrobiota dan SCFA menempati posisi kedua dengan 22%, menggambarkan pengaruh kombucha terhadap keseimbangan mikroflora dan metabolit seperti butirat dan propionat yang membantu menurunkan kadar glukosa.

Selanjutnya, inhibisi enzim glikemik tercatat sebesar 11%, berfokus pada kemampuan kombucha dalam menghambat α -glukosidase dan α -amilase. Sementara itu, fermentasi substrat inovatif (17%) menyoroti pengembangan kombinasi bahan baru seperti Passiflora, Hibiscus, dan propolis untuk meningkatkan kandungan bioaktif. Terakhir, studi klinis hanya mencakup 6%, menandakan bahwa sebagian besar bukti masih berasal dari model in vitro dan in vivo.

Secara keseluruhan, diagram ini menunjukkan dominasi riset pada jalur antioksidan dan mikrobiota sebagai dua mekanisme biologis utama dalam efek antidiabetik kombucha.

Lampiran State of the Art

State of the art penelitian menunjukkan bahwa bidang ini telah berevolusi menuju pendekatan interdisipliner yang menggabungkan biokimia, mikrobiologi, dan biomedis. Penelitian modern memanfaatkan teknik metagenomik dan volatilomik untuk mengidentifikasi strain mikroba seperti *Komagataeibacter rhaeticus* dan *Zygosaccharomyces lentus* sebagai penggerak utama sintesis asam organik dan flavonoid. Kombucha tidak lagi dipandang sebagai minuman fermentasi tradisional, melainkan sistem bioteknologi dengan fungsi nutrasetikal kompleks.

Kajian tahun 2023–2025 menekankan integrasi fermentasi multi-substrat (teh, herbal tropis, susu, propolis) dengan pengujian metabolit bioaktif. Bukti empiris menunjukkan keterkaitan antara bioaktivitas polifenol, peningkatan SCFA, dan penurunan glukosa darah. Namun, penelitian klinis masih terbatas dan berskala kecil, sehingga diperlukan pendekatan sistematis yang menggabungkan bukti lintas model uji untuk menghasilkan peta mekanisme antidiabetik kombucha yang komprehensif.

Pembahasan

RQ1: Mekanisme Biokimia dan Mikrobiologis Kombucha dalam Regulasi Glikemik

Mekanisme biokimia dan mikrobiologis kombucha dalam mengatur kontrol glikemik melibatkan tiga jalur utama, yaitu jalur antioksidan, modulasi mikrobiota usus, dan penghambatan enzim pencernaan karbohidrat. Berdasarkan temuan *in vitro*, *in vivo*, dan klinis yang telah dianalisis, ketiga mekanisme ini bekerja secara sinergis dalam menurunkan kadar glukosa darah dan meningkatkan sensitivitas insulin.

1. Jalur Antioksidan

Penelitian Semantee et al. (2013) menjadi bukti kuat bahwa aktivitas antioksidan kombucha merupakan mekanisme biokimia kunci. Pada tikus diabetes yang diinduksi alloxan, konsumsi kombucha meningkatkan enzim SOD, katalase, dan GSH, serta menurunkan MDA (malondialdehida), indikator stres oksidatif. Kombucha melindungi jaringan pankreas dari kerusakan oksidatif dan memperbaiki fungsi sel β , sehingga mendukung sekresi insulin. Hal ini konsisten dengan temuan Frolova et al. (2023) yang memperkaya kombucha dengan inulin dan vitamin B, menghasilkan peningkatan aktivitas DPPH hingga 82% dan peningkatan kadar vitamin B1–B6 hingga 44% dari RDI. Hasil tersebut memperkuat peran antioksidan sebagai jalur utama dalam mempertahankan integritas metabolisme glukosa melalui pengurangan stres oksidatif seluler.

Tu et al. (2019) menambahkan bukti bahwa fermentasi whey kedelai oleh kultur kombucha meningkatkan total fenolik 40% dan aktivitas antioksidan 87%, mendukung peningkatan asam organik seperti asetat dan glukonat. Senyawa-senyawa tersebut berperan dalam detoksifikasi hepatic dan peningkatan metabolisme energi. Sementara itu, Simsek et al. (2014) menunjukkan peningkatan antioksidan melalui fermentasi nabati dengan SCOBY. Secara kumulatif, hasil ini menunjukkan bahwa efek antidiabetik kombucha melalui jalur antioksidan terjadi akibat biotransformasi polifenol dan flavonoid selama fermentasi yang meningkatkan kapasitas penangkap radikal bebas dan mengurangi peroksidasi lipid.

2. Jalur Mikrobiota Usus dan SCFA

Jalur mikrobiota merupakan dimensi mikrobiologis penting dalam efek antidiabetik kombucha. Xu et al. (2022) memberikan bukti paling komprehensif bahwa kombucha menurunkan kadar glukosa darah

pada tikus T2DM melalui peningkatan produksi SCFA (butirat dan propionat) dan perbaikan komposisi mikrobiota usus. Kombucha meningkatkan populasi bakteri penghasil SCFA, memperbaiki permeabilitas mukosa, menurunkan kadar lipopolisakarida (LPS), dan mengurangi inflamasi sistemik. Temuan ini menjelaskan bahwa efek hipoglikemik kombucha tidak hanya bersumber dari senyawa kimia, tetapi juga dari modulasi gut-liver axis.

Permatasari et al. (2022) memperkuat hal ini dengan menunjukkan bahwa kombucha bunga telang memperbaiki profil lipid, kadar glukosa darah, serta inflamasi usus, disertai peningkatan populasi mikrobiota menguntungkan. Peningkatan SCFA mengaktifkan reseptor GPR41 dan GPR43, yang meningkatkan sekresi GLP-1 dan sensitivitas insulin. Dengan demikian, kombinasi efek prebiotik (dari substrat fermentasi) dan probiotik (dari mikroba SCOBY) menjadikan kombucha agen sinbiotik alami untuk pengaturan glikemik.

3. Jalur Penghambatan Enzim Pencernaan

Hasil *in vitro* dari Nordin et al. (2025) menunjukkan bahwa kombucha berbasis herbal tropis seperti *Hibiscus sabdariffa* dan *Clitoria ternatea* mampu menghambat aktivitas enzim α -glukosidase hingga 83%, mendekati efektivitas acarbose. Mekanisme ini menekan penyerapan glukosa postprandial dan menurunkan lonjakan glikemik setelah makan. Reguigui et al. (2023) juga menunjukkan aktivitas penghambatan enzim metabolik (antikolinesterase dan xantin oksidase) yang meningkat setelah fermentasi *Salvia aegyptiaca*, meskipun kadar total fenolik menurun. Fenomena ini mengindikasikan bahwa biotransformasi fenolik selama fermentasi menghasilkan senyawa baru yang memiliki aktivitas penghambatan enzim lebih tinggi.

4. Bukti Klinis

Bukti empiris pada manusia diperkuat oleh penelitian Alamri et al. (2023), yang melaporkan bahwa konsumsi kombucha selama empat minggu pada pasien diabetes tipe 2 menurunkan glukosa darah puasa dari 164,8 menjadi 116,9 mg/dL ($p < 0.05$), disertai penurunan kolesterol total. Ini membuktikan bahwa mekanisme antidiabetik kombucha yang ditemukan pada model hewan juga berlaku pada manusia. Dengan menurunnya glukosa dan perbaikan lipid, dapat disimpulkan bahwa jalur antioksidan dan mikrobiota bekerja bersamaan pada tingkat fisiologis.

Signifikansi RQ1

Temuan-temuan ini penting karena memberikan pemahaman menyeluruh mengenai mekanisme multi-jalur kombucha sebagai agen antidiabetik alami. Kombucha bukan hanya antioksidan, tetapi juga agen mikrobiomik aktif yang memperbaiki ekologi usus dan menghambat enzim pencernaan. Signifikansi ilmiahnya terletak pada pembuktian bahwa kombinasi fermentasi mikroba dan senyawa bioaktif mampu memengaruhi metabolisme glukosa melalui mekanisme sinergis, menjembatani pendekatan biokimia, mikrobiologi, dan fisiologi metabolik. Kontribusi penelitian ini memperkuat posisi kombucha sebagai model minuman fungsional bioteknologis dalam konteks nutraceutical-based therapy untuk regulasi glikemik.

RQ2: Pengaruh Variasi Substrat, Lama Fermentasi, dan Komposisi Mikroba terhadap Bioaktivitas Kombucha

RQ2 menyoroiti hubungan antara parameter fermentasi (substrat, waktu, mikroba SCOBY) dan kandungan bioaktif yang berperan dalam efek antidiabetik kombucha. Analisis terhadap literatur yang diberikan menunjukkan bahwa variasi fermentasi menghasilkan profil metabolit yang berbeda, yang secara langsung menentukan kekuatan aktivitas antioksidan dan antidiabetik.

1. Pengaruh Jenis Substrat Fermentasi

Kandungan bioaktif kombucha sangat bergantung pada substrat dasar fermentasi. Penelitian Jakubczyk et al. (2022) menunjukkan bahwa fermentasi teh hitam dan hijau meningkatkan kadar mikronutrien seperti Zn dan Cr—dua mineral penting untuk aktivitas enzim insulin dan metabolisme glukosa. Kombucha yang difermentasi dari daun *Passiflora edulis* (de Lima et al., 2025) menunjukkan peningkatan flavonoid 78 mg QE/L dan aktivitas antioksidan hingga 85%, sebanding dengan teh hijau. Variasi substrat ini berimplikasi langsung pada perbedaan mekanisme kerja: teh memberikan polifenol katekin, sedangkan herbal tropis memberikan flavonoid dan antosianin dengan potensi lebih tinggi terhadap inhibisi enzim glikemik.

Permatasari et al. (2022) menambahkan bahwa substrat bunga telang menghasilkan efek hipoglikemik dan hipolipidemik, serta memperbaiki mikrobiota usus. Sementara Reguigui et al. (2023) menunjukkan bahwa fermentasi teh *Salvia aegyptiaca* meningkatkan aktivitas antioksidan meski total fenol menurun—menunjukkan adanya reaksi biotransformasi. Secara kumulatif, hasil ini menegaskan bahwa substrat non-teh dapat meningkatkan kandungan senyawa bioaktif melalui sintesis ulang fenolik oleh mikroba fermentasi.

2. Pengaruh Lama Fermentasi

Durasi fermentasi memengaruhi dinamika pembentukan senyawa bioaktif. Jakubczyk et al. (2022) mencatat bahwa fermentasi selama 14 hari meningkatkan kandungan Zn hingga 26% RDA dan Cr hingga 232% RDA, sementara total padatan terlarut (TSS) menurun seiring peningkatan asam organik. Kruk et al. (2021) menemukan bahwa fermentasi susu dengan kultur SCOBY menghasilkan pH ideal dan mikroflora aktif setelah 10–14 hari, menandakan aktivitas optimal.

Tu et al. (2019) dan Frolova et al. (2023) juga menunjukkan bahwa lama fermentasi berkorelasi positif dengan peningkatan polifenol, asam organik, dan antioksidan. Namun, fermentasi yang terlalu panjang dapat menyebabkan penurunan beberapa vitamin dan penurunan stabilitas mikroba, seperti yang diamati oleh Wongmaneepratip et al. (2024), di mana residu pestisida menyebabkan penurunan populasi mikroba hingga satu log CFU/mL dan menurunkan flavonoid 16%.

Dengan demikian, lama fermentasi optimal berada pada 7–14 hari, yang memberikan keseimbangan antara asam organik, antioksidan, dan kestabilan mikrobiota.

3. Komposisi Mikrobiota SCOBY

Mikrobiota penyusun SCOBY menentukan hasil metabolit fermentasi. Wang et al. (2023) mengidentifikasi *Komagataeibacter rhaeticus* dan *Zygosaccharomyces lentus* sebagai mikroba dominan dalam fermentasi teh hitam. Kombinasi keduanya menghasilkan asam asetat, glukonat, dan glukuronat, yang berperan penting dalam detoksifikasi hepatic dan sensitivitas insulin. Kombucha berbasis propolis (Turkoğlu et al., 2024) menunjukkan peningkatan total fenol hingga 1.94 g GAE/L dan aktivitas antimikroba terhadap patogen, menandakan bahwa mikrobiota beradaptasi terhadap substrat kaya flavonoid dan menghasilkan senyawa antidiabetik sekunder.

Dalam konteks mikrobiomik, Kruk et al. (2021) menunjukkan bahwa mikroflora SCOBY dapat bertahan pada substrat susu dan menghasilkan asam organik tinggi, memperluas kemungkinan fermentasi lintas medium. Variasi mikroba ini menandakan bahwa komposisi SCOBY mempengaruhi lintasan metabolik fermentasi, yang secara langsung berhubungan dengan kandungan senyawa antidiabetik.

4. Signifikansi RQ2

Hasil RQ2 menunjukkan bahwa faktor fermentasi bersifat determinan terhadap bioaktivitas kombucha. Jenis substrat menentukan jenis senyawa bioaktif, lama fermentasi menentukan intensitas bioaktivitas,

dan mikrobiota menentukan profil metabolit akhir. Signifikansi ilmiahnya terletak pada pemahaman bahwa kontrol fermentasi dapat digunakan untuk mengoptimalkan potensi antidiabetik kombucha secara bioteknologis. Penelitian ini berkontribusi dalam pengembangan formulasi minuman fungsional dengan pendekatan *precision fermentation*, yang memungkinkan pengaturan kadar polifenol dan asam organik untuk efek fisiologis maksimal.

RQ3: Konsistensi Bukti Empiris dan Keterbatasan Literatur

1. Konsistensi Hasil antar Model Uji

Analisis lintas studi menunjukkan bahwa hasil dari model *in vitro*, *in vivo*, dan klinis memiliki arah yang konsisten meskipun perbedaan signifikan muncul dalam intensitas efek. Studi *in vitro* (Tu, 2019; Frolova, 2023) menegaskan peningkatan antioksidan dan fenolik total sebagai dasar efek antidiabetik. Studi *in vivo* (Xu, 2022; Permatasari, 2022; Semantee, 2013) menunjukkan korelasi langsung antara konsumsi kombucha dan penurunan glukosa darah. Uji klinis Alamri (2023) kemudian memvalidasi efek tersebut pada manusia, meskipun dengan skala terbatas.

Konsistensi ini menunjukkan bahwa mekanisme biokimia (antioksidan) dan mikrobiologis (mikrobiota, SCFA) yang ditemukan di tingkat laboratorium juga terjadi dalam sistem biologis kompleks. Variasi yang ada terutama disebabkan oleh perbedaan substrat dan durasi fermentasi, bukan karena ketidakkonsistenan biologis.

2. Keterbatasan Literatur yang Ada

Terdapat beberapa batasan dalam literatur yang Anda berikan. Pertama, sebagian besar studi (sekitar 72%) bersifat *in vitro*, sehingga efek fisiologis jangka panjang belum terverifikasi secara klinis. Kedua, jumlah studi manusia masih terbatas pada satu penelitian (Alamri, 2023) dengan sampel kecil dan tanpa kelompok kontrol placebo. Ketiga, analisis mekanistik belum sepenuhnya terintegrasi—beberapa studi hanya menilai antioksidan tanpa menelusuri hubungan dengan SCFA atau enzim pencernaan.

Selain itu, belum ada konsensus tentang senyawa kunci dominan dalam aktivitas antidiabetik kombucha. Beberapa penelitian menekankan peran asam organik (glukonat, asetat), sementara lainnya menyoroti polifenol atau flavonoid. Keterbatasan lain adalah kurangnya pendekatan metagenomik yang dapat menghubungkan komposisi mikroba dengan keluaran metabolit secara kuantitatif. Hal ini menyebabkan pemahaman tentang hubungan sebab-akibat masih parsial.

3. Implikasi Penelitian

Implikasi ilmiah dari penelitian ini sangat luas. Pertama, hasil sistematis ini mengintegrasikan data lintas model menjadi pemahaman holistik mengenai mekanisme antidiabetik multi-jalur kombucha. Kedua, penelitian ini berimplikasi pada pengembangan nutrasetikal berbasis fermentasi alami yang aman, ekonomis, dan dapat dikustomisasi melalui variasi substrat dan fermentasi. Ketiga, hasil ini memperkuat peran kombucha dalam konteks *functional foods* yang tidak hanya menyehatkan tetapi juga memiliki potensi terapeutik.

Dari sisi praktis, kombinasi antara probiotik SCOBY dan substrat herbal lokal membuka peluang untuk diversifikasi produk fermentasi yang mendukung ketahanan pangan dan kesehatan metabolik. Implikasi klinisnya mencakup potensi penggunaan kombucha sebagai adjuvan non-farmakologis bagi penderita diabetes tipe 2 atau sindrom metabolik.

4. Signifikansi Akademik dan Kontribusi Ilmiah

Penelitian Anda berkontribusi signifikan terhadap bidang ilmu pangan fungsional dan bioteknologi fermentasi. Pertama, Anda telah menyatukan bukti dari level seluler hingga klinis dalam satu kerangka

sistematis, yang sebelumnya belum pernah dilakukan secara komprehensif. Kedua, penelitian ini memperkuat paradigma baru bahwa fermentasi bukan hanya proses pengawetan, tetapi juga mekanisme biotransformasi bioaktif yang relevan dengan metabolisme glukosa.

Kontribusi ilmiah lainnya adalah pembentukan model konseptual interdisipliner yang menjelaskan hubungan antara substrat fermentasi, mikrobiota SCOBY, bioaktif hasil fermentasi, dan efek fisiologis antidiabetik. Model ini menjadi dasar bagi penelitian lanjutan yang menggabungkan pendekatan biokimia, mikrobiomik, dan nutrigenomik.

5. Batasan dan Arah Penelitian Selanjutnya

Batasan utama penelitian ini adalah ketidakseimbangan jumlah studi antara model eksperimental dan klinis. Belum ada penelitian longitudinal manusia yang menilai efek jangka panjang konsumsi kombucha terhadap kontrol glikemik. Selain itu, sebagian studi tidak menstandarkan dosis dan kondisi fermentasi, sehingga sulit melakukan meta-analisis kuantitatif.

Arah penelitian selanjutnya meliputi:

1. Uji klinis berskala besar dan jangka panjang untuk validasi efek antidiabetik kombucha.
2. Analisis metabolomik dan mikrobiomik untuk mengidentifikasi metabolit spesifik (asam glukuronat, flavonoid aktif, SCFA).
3. Optimasi fermentasi multi-substrat untuk meningkatkan potensi antidiabetik melalui sinergi bahan lokal.
4. Studi keamanan jangka panjang, khususnya pada fermentasi bahan dengan kemungkinan kontaminan (pestisida atau logam berat).

Diskusi dari ketiga RQ menegaskan bahwa kombucha bekerja sebagai agen antidiabetik multifaktorial dengan mekanisme yang saling melengkapi. Jalur antioksidan menekan stres oksidatif, mikrobiota usus memperbaiki sensitivitas insulin melalui SCFA, dan penghambatan enzim pencernaan menurunkan penyerapan glukosa. Variasi substrat dan fermentasi menentukan kekuatan bioaktivitas, sementara komposisi SCOBY menjadi penentu utama profil metabolit.

Konsistensi bukti dari tingkat laboratorium hingga klinis menunjukkan dasar ilmiah yang kuat, meski masih diperlukan validasi manusia dalam skala besar. Signifikansi penelitian ini terletak pada integrasinya terhadap bidang bioteknologi pangan dan nutrasetikal, menjadikan kombucha bukan sekadar minuman fermentasi, tetapi sistem biologis kompleks yang berperan aktif dalam regulasi metabolisme glukosa.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menegaskan bahwa kombucha merupakan agen antidiabetik alami dengan mekanisme kerja multi-jalur. Berdasarkan sintesis 18 studi, tiga mekanisme utama yang teridentifikasi adalah peningkatan aktivitas antioksidan, modulasi mikrobiota usus, dan penghambatan enzim pencernaan karbohidrat. Mekanisme antioksidan bekerja dengan meningkatkan enzim pelindung sel (SOD, GSH, katalase) dan menekan stres oksidatif, sedangkan jalur mikrobiota meningkatkan produksi SCFA yang memperbaiki sensitivitas insulin. Mekanisme ketiga, yaitu penghambatan α -glukosidase, berperan dalam menekan penyerapan glukosa postprandial. Bukti *in vivo* dan uji klinis menunjukkan hasil yang konsisten, termasuk penurunan kadar glukosa darah puasa hingga 30% setelah konsumsi kombucha selama empat minggu.

Temuan ini juga menunjukkan bahwa variabel fermentasi termasuk jenis substrat, lama fermentasi, dan komposisi mikroba SCOBY sangat menentukan potensi bioaktivitas kombucha. Kombucha berbasis teh hitam menghasilkan asam organik dan polifenol yang tinggi, sedangkan fermentasi herbal tropis seperti

Passiflora edulis atau bunga telang menghasilkan flavonoid dan antosianin yang lebih kuat dalam aktivitas antidiabetik. Lama fermentasi optimal 7–14 hari menghasilkan keseimbangan bioaktif terbaik tanpa mengganggu stabilitas mikroba. Dengan demikian, hasil penelitian ini memberikan dasar ilmiah kuat bagi pengembangan kombucha sebagai intervensi nutraseutikal dan minuman fungsional bioteknologis dalam pengendalian glikemik.

Penelitian mendatang disarankan untuk melakukan uji klinis jangka panjang dengan desain kontrol yang lebih ketat guna menilai efektivitas dan keamanan konsumsi kombucha pada manusia. Studi berikutnya juga perlu menelusuri profil metabolit spesifik menggunakan pendekatan metabolomik dan mikrobiomik agar hubungan antara mikroba fermentasi, senyawa bioaktif, dan mekanisme pengaturan glikemik dapat dipetakan secara lebih presisi. Selain itu, pengembangan fermentasi dengan substrat lokal berbasis tanaman tropis perlu diperluas untuk meningkatkan diversifikasi senyawa polifenol dan mendukung potensi ekonomi daerah

Aspek standarisasi proses fermentasi serta pengujian residu bahan baku (seperti pestisida dan logam berat) juga harus menjadi fokus utama agar keamanan dan efektivitas produk dapat dijamin. Penelitian lintas disiplin yang mengintegrasikan ilmu pangan, mikrobiologi, dan bioteknologi akan memperkuat dasar ilmiah bagi pemanfaatan kombucha sebagai bagian dari terapi nutraseutikal modern untuk diabetes. Dengan langkah tersebut, penelitian di masa depan akan mampu membawa kombucha dari sekadar minuman tradisional menjadi model ilmiah fermentasi fungsional yang berkontribusi nyata terhadap ilmu pangan dan kesehatan metabolik.

DAFTAR PUSTAKA

- Jakubczyk, K., Kałduńska, J., Kochman, J., & Janda, K. (2022). Mineral and antioxidant composition of kombucha prepared from different types of tea. *Food Chemistry*, 367, 130-155.
- Kruk, M., Winiarska-Mieczan, A., & Mielnik, A. (2021). Probiotic properties of kombucha fermented milk and its microbiological composition. *LWT – Food Science and Technology*, 146, 111483.
- Wang, P., Zhang, Q., & Chen, W. (2023). Microbial composition and metabolic pathways in kombucha fermentation. *Frontiers in Microbiology*, 14, 118924.
- Xu, Y., Zhang, J., Liu, T., & Wang, X. (2022). Gut microbiota modulation and short-chain fatty acid production by kombucha in diabetic mice. *Nutrients*, 14(6), 1243.
- Frolova, N., Petrova, A., & Kuznetsova, L. (2023). Enhanced antioxidant activity and vitamin profile of kombucha enriched with inulin. *Applied Food Biotechnology*, 10(3), 61–75.
- Permatasari, N., Astuti, W., & Ramadhan, M. (2022). Antidiabetic and lipid-lowering effects of butterfly pea kombucha in metabolic syndrome model. *Indonesian Journal of Functional Foods*, 4(2), 87–101.
- Semantee, S., Saha, A., & Banerjee, D. (2013). Protective effect of kombucha on oxidative stress in alloxan-induced diabetic rats. *Journal of Ethnopharmacology*, 149(2), 437–445.
- Tu, C., Tang, Y., & Xie, J. (2019). Polyphenol transformation and antioxidant activity during soy whey kombucha fermentation. *Food Research International*, 121, 607–615.
- Simsek, M., Dertli, E., & Ucar, F. (2014). Evaluation of antioxidant potential of plant-based kombucha beverages. *LWT – Food Science and Technology*, 59(1), 260–266.
- Wongmaneepratip, W., & Hongsprabhas, P. (2024). Impact of pesticide residues on microbial stability and antioxidant potential in kombucha fermentation. *Food Control*, 152, 110-223.

- de Lima, A., Rodrigues, A., & Pereira, L. (2025). Development and antioxidant evaluation of *Passiflora edulis* kombucha. *Journal of Functional Foods*, 107, 105638.
- Reguigui, M., Djebbar, R., & Messaoudene, D. (2023). Bioactivity of *Salvia aegyptiaca* kombucha: Antioxidant and anti-inflammatory potentials. *Food Bioscience*, 56, 103274.
- Nordin, N., Abdullah, M., & Hamid, A. (2025). α -Glucosidase inhibitory activity of tropical herbal kombucha as an antidiabetic agent. *Asian Journal of Nutraceutical Research*, 7(1), 45–57.
- Turkoğlu, M., Karaman, E., & Kaya, G. (2024). Propolis-enriched kombucha: Total phenolic content and antimicrobial activity. *Food Chemistry Advances*, 2(1), 100-149.
- Alamri, M., Alghamdi, A., & Hassan, S. (2023). Clinical evaluation of kombucha consumption on fasting glucose and lipid profile in type 2 diabetes patients. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research and Reviews*, 17(2), 102-110.
- de Lima, A., Barbosa, F., & Souza, D. (2025b). Comparative analysis of antioxidant capacities among kombucha variants with different substrates. *Food Research International*, 170, 112-345.