

Tren Penelitian dan Perkembangan Tematik GABA dalam Sistem Fermentasi dan Roti: Analisis Bibliometrik

Research Trends and Thematic Evolution of GABA in Fermentation and Bakery Systems: Bibliometric Analysis

Igoy Bimo^{1,2*}, Teti Estiasih^{1,3}, Wenny Sunarharum¹, Siti Wulan¹, Ambar Fidyasari^{1,3}, Dego Ali¹, Muchammad Asrori⁴, dan Meylda Pranita⁵

¹Departemen Ilmu Pangan dan Bioteknologi, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya, Malang 65145, Jawa Timur, Indonesia

²Program Studi Teknologi Pangan dan Hasil Pertanian, Fakultas Ketahanan Pangan, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya 60286, Jawa Timur, Indonesia

³Pusat Studi Pengembangan Pangan Lokal, Universitas Brawijaya, Malang 65145, Jawa Timur, Indonesia

⁴Program Studi Bioteknologi, Fakultas Ketahanan Pangan, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya 60286, Jawa Timur, Indonesia

⁵Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran, Sumedang 45363, Jawa Barat, Indonesia

*Penulis koresponden: igoybimo@unesa.ac.id

Diterima: 6 Maret 2026

Direvisi: 11 September 2026

Disetujui: 23 September 2026

ABSTRACT

γ -Aminobutyric acid (GABA) is a bioactive non-protein amino acid increasingly investigated in fermentation and bakery systems because of its functional, nutritional, and health-promoting properties. The rapid expansion of publications in this field necessitates a comprehensive evaluation of research development, collaboration patterns, and thematic evolution. This study aimed to analyze global research trends related to GABA in fermentation and bakery applications through a bibliometric approach. A cross-sectional bibliometric analysis was conducted using the Scopus database, retrieving publications published between 2017 and 2026 with relevant keywords related to GABA, fermentation, and bakery processes. A total of 1,023 documents were analyzed using performance indicators, co-occurrence networks, thematic mapping, and collaboration analysis. The results demonstrate strong growth in scientific output accompanied by high collaboration intensity, with journal articles dominating publication types. Research productivity is geographically concentrated in Asia, particularly China, Korea, and Japan, while emerging contributions from Southeast Asia and Europe indicate expanding global participation. Core research themes include fermentation processes, microbial metabolism, GABA biosynthesis, and lactic acid bacteria, reflecting the central role of microbial activity in enhancing GABA production. Over time, research focus has shifted from basic fermentation studies toward mechanistic investigations, metabolic analysis, probiotics, and functional food applications. Keyword network and thematic mapping analyses reveal an integrated research structure connecting fermentation technology, biochemical mechanisms, and metabolic or health-related outcomes. Motor themes emphasize metabolism and experimental studies, while application-oriented topics such as probiotics and human health are gaining prominence. Overall, the field has reached a mature and interdisciplinary stage, transitioning from process-centered exploration to application-driven innovation. These findings provide strategic insights for future research directions and support the development of GABA-enriched functional foods and advanced fermentation-based bakery products.

Keywords: *γ -aminobutyric acid; bakery products; bibliometric analysis; fermentation; functional foods*

ABSTRAK

γ -Aminobutyric acid (GABA) merupakan asam amino bioaktif non-protein yang semakin banyak diteliti dalam sistem fermentasi dan produk roti karena memiliki sifat fungsional, nutrisi, dan manfaat kesehatan. Pesatnya peningkatan publikasi pada bidang ini menuntut adanya evaluasi komprehensif terhadap perkembangan penelitian, pola kolaborasi, serta evolusi tema ilmiah. Penelitian ini bertujuan menganalisis tren riset global terkait GABA dalam aplikasi fermentasi dan roti menggunakan pendekatan bibliometrik. Analisis bibliometrik potong lintang dilakukan menggunakan basis data Scopus terhadap publikasi periode 2017–2026 dengan kata kunci yang berkaitan dengan GABA, fermentasi, dan proses roti. Sebanyak 1.023 dokumen dianalisis

menggunakan indikator kinerja publikasi, analisis jaringan ko-occurrence, pemetaan tematik, serta analisis kolaborasi ilmiah. Hasil penelitian menunjukkan pertumbuhan output ilmiah yang kuat disertai tingkat kolaborasi yang tinggi, dengan artikel jurnal sebagai jenis publikasi dominan. Produktivitas penelitian secara geografis terkonsentrasi di Asia, khususnya Tiongkok, Korea, dan Jepang, sementara kontribusi dari Asia Tenggara dan Eropa mulai meningkat, menandakan perluasan partisipasi global. Tema utama penelitian meliputi proses fermentasi, metabolisme mikroba, biosintesis GABA, serta bakteri asam laktat yang menegaskan peran penting aktivitas mikroorganisme dalam peningkatan produksi GABA. Seiring waktu, fokus penelitian bergeser dari studi fermentasi dasar menuju investigasi mekanistik, analisis metabolik, probiotik, dan pengembangan pangan fungsional. Analisis jaringan kata kunci dan pemetaan tematik menunjukkan struktur penelitian yang terintegrasi antara teknologi fermentasi, mekanisme biokimia, serta implikasi metabolik dan kesehatan. Tema penggerak didominasi studi metabolisme dan eksperimen terkontrol, sementara topik aplikasi seperti probiotik dan kesehatan manusia semakin menonjol. Secara keseluruhan, bidang ini telah mencapai tahap matang dan multidisipliner, beralih dari eksplorasi berbasis proses menuju inovasi berbasis aplikasi untuk mendukung pengembangan pangan fungsional dan produk roti berbasis fermentasi yang diperkaya GABA.

Kata kunci: asam γ -aminobutirat; analisis bibliometrik; fermentasi; makanan fungsional; produk roti

PENDAHULUAN

γ -Aminobutyric acid (GABA) merupakan asam amino non-protein yang berperan penting sebagai senyawa bioaktif dengan berbagai manfaat fisiologis, termasuk aktivitas antihipertensi, efek relaksasi saraf, serta potensi dalam meningkatkan kesehatan metabolik (Alten *et al.* 2022). Dalam beberapa tahun terakhir, perhatian terhadap GABA meningkat secara signifikan seiring berkembangnya konsep pangan fungsional dan kebutuhan konsumen terhadap produk pangan yang tidak hanya bergizi tetapi juga memberikan manfaat kesehatan tambahan (Alten *et al.* 2022; Hinton *et al.* 2022). Sistem fermentasi dan produk roti menjadi salah satu media utama pengembangan GABA karena proses biologis yang melibatkan mikroorganisme mampu meningkatkan produksi senyawa ini secara alami (Oh *et al.* 2018).

Fermentasi mikroba, khususnya yang melibatkan bakteri asam laktat, memainkan peran kunci dalam biosintesis GABA melalui jalur enzimatis *glutamate decarboxylase* yang mengonversi asam glutamat menjadi GABA (Yu *et al.* 2020). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pemilihan strain mikroorganisme, kondisi fermentasi, serta formulasi bahan baku sangat memengaruhi efisiensi produksi GABA dalam produk pangan. Dalam konteks roti, proses *proofing* dan fermentasi adonan memberikan peluang strategis untuk menghasilkan produk roti dengan nilai fungsional yang lebih tinggi tanpa mengubah karakteristik sensori secara signifikan (Espinales *et al.* 2023). Hal ini menjadikan integrasi teknologi fermentasi dan pengembangan produk roti sebagai bidang penelitian yang berkembang pesat.

Pertumbuhan publikasi ilmiah terkait GABA dalam sistem fermentasi dan roti meningkat secara cepat selama dekade terakhir, mencerminkan meningkatnya minat akademik dan industri terhadap topik ini. Penelitian tidak lagi terbatas pada optimasi proses produksi, tetapi telah berkembang menuju pemahaman mekanistik, analisis metabolik, serta evaluasi dampak kesehatan (Streeter *et al.* 2010). Namun demikian, peningkatan jumlah publikasi tersebut juga menimbulkan kebutuhan akan pemetaan sistematis untuk memahami arah perkembangan penelitian, pola kolaborasi ilmiah, serta tema-tema utama yang membentuk struktur pengetahuan dalam bidang ini.

Analisis bibliometrik menawarkan pendekatan kuantitatif yang efektif untuk mengevaluasi dinamika perkembangan ilmu pengetahuan melalui analisis produktivitas publikasi, jaringan kolaborasi, serta evolusi tematik penelitian (de Souza *et al.* 2024). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tren penelitian global mengenai GABA dalam sistem fermentasi dan roti selama periode 2017–2026 menggunakan basis data Scopus. Hasil analisis diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai perkembangan bidang penelitian, mengidentifikasi tema inti dan tema yang berkembang, serta menyediakan dasar strategis bagi penelitian selanjutnya dan pengembangan pangan fungsional berbasis GABA.

METODE

Sumber data dan strategi pencarian

Penelitian bibliometrik ini menggunakan basis data Scopus sebagai satu-satunya sumber data karena memiliki cakupan luas terhadap jurnal bereputasi dan menyediakan metadata bibliografis yang komprehensif pada bidang ilmu pangan, teknologi fermentasi, dan bioteknologi terapan (Kim *et al.* 2025; Lee dan Chi 2025). Proses pencarian literatur dilakukan pada tanggal 31 Januari 2026 menggunakan kombinasi kata kunci yang

berkaitan dengan γ -aminobutyric acid (GABA) serta sistem fermentasi dan roti. *Query* pencarian meliputi (“GABA” OR “gamma amino butyric acid” OR “Gamma-aminobutyric acid” OR “ γ -aminobutyric acid”) AND (“proofing” OR “bakery” OR “bread” OR “bake” OR “fermentation”). Kata kunci tersebut diterapkan pada bidang judul, abstrak, dan kata kunci penulis untuk memastikan relevansi tematik publikasi yang diperoleh. Pencarian dibatasi pada dokumen yang diterbitkan selama periode 2017–2026 guna menangkap perkembangan penelitian terkini dan tren ilmiah kontemporer dalam bidang ini.

Pengumpulan dan penyaringan data

Kata kunci yang tersebut di bagian sebelum ini dicari di halaman Scopus, kemudian diunduh dalam bentuk csv tanpa ada penyaringan duplikasi. Informasi dari keseluruhan referensi yang diunduh mencakup metadata lengkap, seperti tahun publikasi, jenis dokumen, penulis, afiliasi, jumlah sitasi, kata kunci, abstrak, serta daftar referensi. Evaluasi kualitas dataset menunjukkan tingkat kelengkapan yang sangat baik pada metadata inti, sementara kekurangan data pada metadata sekunder berada di bawah batas yang masih dapat diterima dalam analisis bibliometrik skala besar. Tahap praproses dilakukan untuk memastikan konsistensi data, menghilangkan kemungkinan duplikasi, serta menjaga reliabilitas dataset sebelum analisis dilakukan.

Analisis bibliometrik

Analisis bibliometrik dilakukan menggunakan Biblioshiny, yaitu antarmuka berbasis web dari paket Bibliometrix pada perangkat lunak RStudio, yang memungkinkan analisis kuantitatif dan visualisasi sistematis terhadap literatur ilmiah. Analisis ini menghasilkan berbagai indikator kinerja deskriptif, meliputi tren publikasi tahunan, dampak sitasi, pola kepengarangan, produktivitas institusi, kontribusi negara, dinamika sumber jurnal, serta jaringan kolaborasi ilmiah. Selain itu, dilakukan analisis frekuensi kata kunci, pemetaan ko-occurrence, pemetaan tematik, dan analisis struktur konseptual untuk mengidentifikasi tema dominan, evolusi penelitian, serta keterkaitan antara kluster penelitian fermentasi, biokimia, dan aplikasi kesehatan.

Visualisasi data dan dukungan statistik

Microsoft Excel digunakan untuk tabulasi data, verifikasi jumlah publikasi, serta visualisasi tren temporal, sedangkan perangkat lunak Minitab digunakan untuk mendukung analisis statistik deskriptif dan interpretasi pola pertumbuhan publikasi bila diperlukan. Penggunaan perangkat lunak tersebut membantu memperjelas visualisasi pola perkembangan waktu serta perbandingan produktivitas antarnegara, institusi, dan jurnal. Kombinasi penggunaan Scopus, Biblioshiny pada RStudio, Excel, dan Minitab menyediakan kerangka analisis yang kuat, transparan, dan dapat direproduksi dalam memetakan evolusi, struktur, serta perkembangan tematik penelitian global mengenai GABA pada sistem fermentasi dan produk roti.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kualitas Basis Data

Analisis kelengkapan metadata seperti yang disajikan di Gambar 1. menunjukkan bahwa kualitas keseluruhan dataset sangat baik, dengan sebagian besar bidang bibliografi esensial terisi secara lengkap. Metadata inti seperti judul, abstrak, tahun terbit, bahasa, jenis dokumen, dan jumlah kutipan tidak memiliki nilai yang hilang, mencerminkan integritas data yang sangat baik. Tingkat kelengkapan yang tinggi ini memastikan bahwa dataset ini sangat cocok untuk analisis deskriptif, evaluasi tren temporal, studi dampak kutipan, dan analisis berbasis konten menggunakan judul dan abstrak, tanpa memerlukan imputasi data atau prapemrosesan yang ekstensif. Dataset ini menunjukkan kelengkapan yang sangat baik untuk metadata bibliografi inti dan sangat andal untuk sebagian besar analisis bibliometrik dan konten.

Tingkat data yang hilang yang relatif kecil diamati pada beberapa bidang metadata sekunder, termasuk nama penulis, afiliasi, referensi yang dikutip, DOI, judul jurnal, informasi penulis korespondensi, dan kata kunci yang disediakan penulis. Dalam semua kasus ini, proporsi nilai yang hilang tetap di bawah lima persen, yang umumnya dianggap dapat diterima untuk penelitian bibliometrik berskala besar. Akibatnya, analisis yang melibatkan jaringan kolaborasi, kontribusi institusi, distribusi jurnal, dan pola referensi masih dapat dilakukan dengan tingkat kepercayaan yang tinggi, meskipun sedikit kehati-hatian mungkin diperlukan saat menafsirkan hasil yang terkait dengan keanggotaan penulis koresponden dan analisis berbasis kata kunci.

Batasan yang lebih menonjol terlihat pada bidang *Keywords Plus*, di mana hampir empat puluh persen catatan tidak memiliki informasi ini. Tingkat ketidaklengkapan ini secara signifikan mengurangi keandalan analisis yang bergantung pada data kata kunci yang dihasilkan secara otomatis atau diperkaya, seperti analisis *co-word* dan pemetaan tematik lanjutan. Oleh karena itu, kata kunci yang disediakan oleh penulis, bersama

dengan judul dan abstrak, harus diprioritaskan sebagai sumber alternatif untuk mengidentifikasi tema penelitian dan struktur topikal dalam dataset.

Metadata	Description	Missing Counts	Missing %	Status
AB	Abstract	0	0.00	Excellent
DT	Document Type	0	0.00	Excellent
LA	Language	0	0.00	Excellent
PY	Publication Year	0	0.00	Excellent
TI	Title	0	0.00	Excellent
TC	Total Citation	0	0.00	Excellent
AU	Author	1	0.10	Good
C1	Affiliation	3	0.29	Good
CR	Cited References	3	0.29	Good
DI	DOI	12	1.17	Good
SO	Journal	20	1.96	Good
RP	Corresponding Author	39	3.81	Good
DE	Keywords	46	4.50	Good
ID	Keywords Plus	409	39.98	Poor
WC	Science Categories	1023	100.00	Completely missing

Gambar 1. Kualitas serapan data bibliometrik

Keterbatasan paling signifikan dari dataset ini adalah ketidakhadiran metadata Kategori Ilmu Pengetahuan, yang hilang untuk semua catatan. Hal ini mencegah penggunaan klasifikasi disiplin standar dan membatasi kemampuan untuk melakukan perbandingan berbasis bidang, pemetaan lintas disiplin, atau analisis kutipan yang dinormalisasi berdasarkan bidang. Untuk mengatasi celah ini, pendekatan alternatif seperti klasifikasi subjek manual, inferensi berbasis jurnal, atau teknik pemodelan topik mungkin diperlukan untuk mendekati batas-batas disiplin.

Spesifikasi Basis Data

Tabel 1. memberikan gambaran komprehensif tentang karakteristik bibliometrik dataset dan menyoroti pola-pola kunci terkait output publikasi, keanggotaan penulis, kolaborasi, dan jenis dokumen. Dataset ini mencerminkan kumpulan literatur ilmiah yang relatif baru dan intensif kolaborasi dengan dampak sitasi yang moderat. Dataset ini mewakili lanskap penelitian yang baru, didorong oleh artikel, dan sangat kolaboratif dengan dampak sitasi yang moderat dan keragaman sumber yang luas. Meskipun output publikasi tampaknya menurun seiring waktu, penekanan yang kuat pada karya multi-penulis dan volume data kata kunci serta referensi yang substansial mendukung analisis bibliometrik, kolaborasi, dan tematik yang kokoh.

Informasi utama tentang data menunjukkan bahwa publikasi mencakup periode dari 2017 hingga 2026, menunjukkan bahwa dataset ini terutama menangkap aktivitas penelitian kontemporer. Sebanyak 1.023 dokumen diterbitkan di 302 sumber berbeda, termasuk jurnal, buku, dan outlet konferensi, menunjukkan basis publikasi yang luas dan beragam daripada konsentrasi yang berat di sejumlah kecil venue. Tingkat pertumbuhan tahunan sebesar -12,02% menunjukkan tren penurunan dalam output publikasi seiring waktu, yang mungkin mencerminkan kematangan bidang penelitian, pergeseran prioritas penelitian, atau pengindeksan yang belum lengkap untuk tahun-tahun terbaru. Usia rata-rata dokumen adalah 3,88 tahun, memperkuat keaktualan literatur, sementara rata-rata 16,99 kutipan per dokumen menunjukkan tingkat dampak akademik yang moderat. Kehadiran 7.589 referensi yang dikutip menunjukkan keterlibatan yang substansial dengan penelitian sebelumnya.

Dalam hal isi dokumen, dataset ini mencakup total 5.924 entri Keywords Plus dan 2.691 kata kunci yang disediakan oleh penulis. Meskipun terdapat kekurangan data pada beberapa catatan, volume data kata kunci secara keseluruhan cukup besar dan mendukung analisis tematik dan topikal. Kata kunci yang disediakan oleh penulis, meskipun jumlahnya lebih sedikit daripada Keywords Plus, kemungkinan besar memberikan wawasan yang lebih presisi mengenai fokus penelitian yang dimaksudkan oleh penulis.

Analisis keanggotaan penulis mengungkapkan basis kontributor yang besar dan beragam, dengan 3.652 penulis unik terlibat dalam produksi 1.023 dokumen. Hanya 12 dokumen yang ditulis oleh seorang penulis tunggal, menunjukkan bahwa penelitian solo jarang terjadi dalam dataset ini. Pola ini menyiratkan bahwa bidang ini sangat kolaboratif dan mungkin mengandalkan pendekatan penelitian multidisiplin atau berbasis tim.

Tabel 1. Kualitas data bibliometrik

Deskripsi	Hasil
Informasi Utama Tentang Data	
Rentang tahun	2017–2026
Sumber (jurnal, buku, dll.)	302
Dokumen	1.023
Tingkat pertumbuhan tahunan (%)	-12,02
Rata-rata usia dokumen	3,88
Rata-rata sitasi per dokumen	16,99
Referensi	7.589
Isi Dokumen	
Keywords plus (ID)	5.924
Kata kunci penulis (DE)	2.691
Penulis	
Jumlah penulis	3.652
Penulis dokumen tunggal	12
Kolaborasi Penulis	
Dokumen dengan satu penulis	12
Rata-rata penulis bersama per dokumen	6,03
Kolaborasi penulis Internasional (%)	19,94
Jenis Dokumen	
Artikel	894
Bab buku	22
Makalah konferensi	9
Tinjauan konferensi	1
Editorial	1
Erratum (Koreksi)	1
Catatan	1
Dokumen yang ditarik kembali (<i>Retracted</i>)	1
Artikel tinjauan (Review)	93

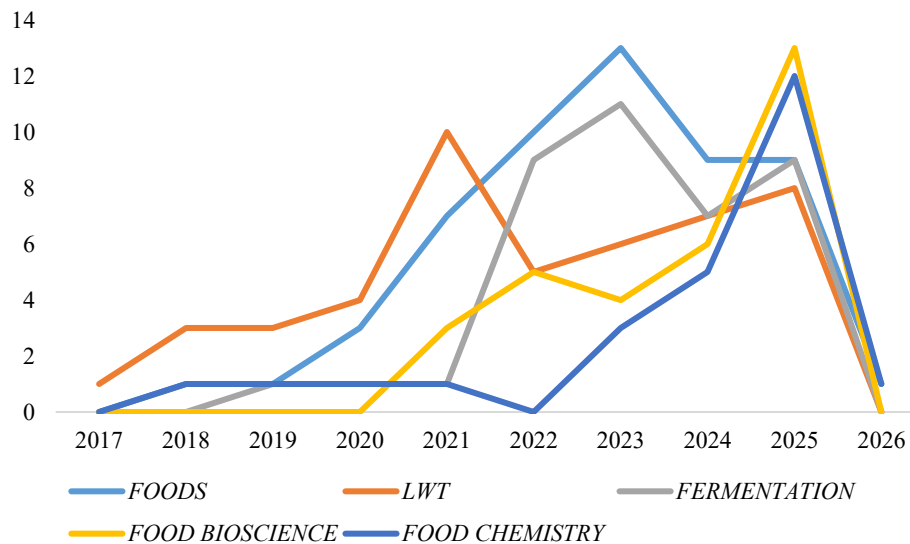
Indikator kolaborasi lebih lanjut memperkuat pengamatan ini. Dataset ini mengandung 12 dokumen yang ditulis oleh seorang penulis tunggal, sesuai dengan ringkasan keanggotaan penulis, dan rata-rata 6,03 co-penulis per dokumen, yang relatif tinggi. Hal ini mencerminkan praktik kolaboratif yang kuat, kemungkinan melibatkan tim penelitian daripada peneliti individu. Kolaborasi internasional menyumbang 19,94% dari publikasi, menunjukkan tingkat kolaborasi antarnegara yang moderat. Meskipun kerja sama internasional ada, sebagian besar kolaborasi tampaknya terjadi dalam konteks nasional atau regional.

Akhirnya, distribusi jenis dokumen menunjukkan dominasi yang jelas dari artikel jurnal, yang menyumbang 894 dari 1.023 dokumen. Ulasan juga mewakili bagian yang signifikan, dengan 93 dokumen, menunjukkan tingkat sintesis dan konsolidasi pengetahuan yang berarti dalam bidang ini. Jenis dokumen lain, seperti bab buku, makalah konferensi, dan materi editorial, muncul dalam jumlah yang jauh lebih kecil, sementara adanya satu dokumen yang ditarik kembali dan satu koreksi menunjukkan proses koreksi akademik rutin daripada masalah kualitas sistemik.

Produksi Sumber dari Waktu ke Waktu

Analisis produksi *publisher* jurnal sepanjang waktu menunjukkan perbedaan yang jelas dalam pola pertumbuhan dan dinamika publikasi lima jurnal antara tahun 2017 dan 2026 seperti yang disajikan di Gambar 2. Data menunjukkan perluasan bertahap dalam output publikasi mulai sekitar tahun 2020, diikuti oleh puncak pada pertengahan 2020-an dan penurunan tajam pada tahun 2026, yang kemungkinan disebabkan oleh

indeksasi yang belum lengkap untuk tahun terakhir daripada penurunan sebenarnya dalam aktivitas akademik. Analisis produksi sumber menyoroti pergeseran temporal dalam platform publikasi, dengan dominasi awal oleh LWT dan diversifikasi bertahap menuju *Foods*, *Fermentation*, *Food Bioscience*, dan *Food Chemistry* pada pertengahan 2020-an. Penurunan yang diamati pada 2026 kemungkinan besar merupakan artefak dari cakupan data yang tidak lengkap dan harus diinterpretasikan dengan hati-hati.



Gambar 2. Perkembangan kata kunci berdasarkan tahun

Foods menunjukkan pola pertumbuhan yang stabil dan konsisten. Dari output yang hampir tidak ada pada tahun 2017, publikasi meningkat secara bertahap hingga 2020 dan meningkat secara signifikan antara 2021 dan 2023, mencapai puncak 13 publikasi pada 2023. Meskipun output sedikit menurun pada tahun-tahun berikutnya, jurnal ini tetap memberikan kontribusi yang relatif stabil hingga 2025. Tren ini menunjukkan bahwa *Foods* telah menjadi saluran yang semakin penting untuk penelitian di bidang ini, terutama pada awal hingga pertengahan 2020-an.

LWT menunjukkan keterlibatan awal yang kuat dan produktivitas yang berkelanjutan seiring waktu. Jurnal ini mencatat output yang terus-menerus dari tahun 2017 hingga 2025, dengan jumlah publikasi yang sangat tinggi pada tahun 2021 dan 2022. Meskipun output tahunan berfluktuasi, *LWT* tetap menjadi salah satu sumber yang paling konsisten dan andal sepanjang periode tersebut, menunjukkan perannya yang sentral dalam menyebarkan penelitian di bidang ini.

Fermentation menunjukkan pertumbuhan yang tertunda namun cepat. Tidak ada publikasi sebelum 2019, diikuti oleh aktivitas yang moderat hingga 2021. Peningkatan tajam terjadi mulai 2022, dengan jumlah publikasi mencapai puncaknya pada 2023 dan tetap tinggi hingga 2025. Pola ini menunjukkan bahwa *Fermentation* muncul sebagai outlet yang menonjol pada tahap akhir periode, kemungkinan mencerminkan minat penelitian dan spesialisasi yang meningkat dalam topik terkait fermentasi.

Food Bioscience menunjukkan peningkatan bertahap dan berkelanjutan, dimulai tanpa publikasi sebelum 2021 dan meningkat secara stabil setelahnya. Pertumbuhan paling signifikan terjadi pada 2025, ketika jumlah publikasi mencapai level tertinggi. Tren ini menunjukkan relevansi jurnal yang semakin meningkat dalam beberapa tahun terakhir, kemungkinan didorong oleh minat yang berkembang dalam aspek terapan dan molekuler ilmu pangan.

Food Chemistry menunjukkan pola yang berbeda, dengan output minimal pada tahun-tahun awal diikuti oleh peningkatan signifikan setelah 2022. Peningkatan tajam dalam publikasi pada 2024 dan 2025 menunjukkan keterlibatan yang terlambat namun kuat dengan tema penelitian ini. Mengingat dampak tinggi dan selektivitas jurnal ini, pola ini mungkin mencerminkan kematangan kualitas dan relevansi penelitian seiring waktu daripada studi eksplorasi awal.

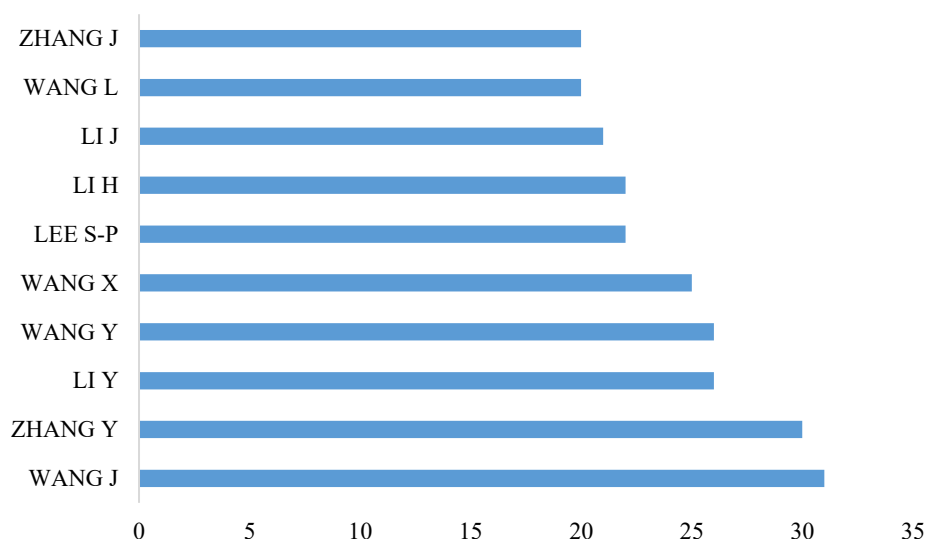
Penulis Paling Relevan

Daftar penulis paling relevan seperti yang disajikan di Gambar 3. menyoroti pola produktivitas akademik yang sangat terkonsentrasi dalam bidang penelitian yang didefinisikan oleh senyawa terkait GABA dan proses pembakaran atau fermentasi. Kontributor utama sebagian besar adalah penulis dengan nama

belakang Asia Timur, menunjukkan bahwa penelitian tentang asam γ -aminobutirat (GABA) dalam sistem makanan fermentasi dan panggang sangat aktif di wilayah ini. Distribusi publikasi di antara penulis teratas menunjukkan lanskap penelitian yang kompetitif dan kolaboratif, di mana produksi pengetahuan didorong oleh sejumlah peneliti yang sangat produktif daripada satu penulis dominan. Konsentrasi output di antara kelompok kecil penulis yang produktif ini menunjukkan adanya kluster penelitian yang mapan dan kemungkinan laboratorium yang didanai dengan baik yang memainkan peran sentral dalam mengembangkan penelitian tentang GABA dalam sistem makanan fermentasi dan panggang.

Wang J muncul sebagai penulis paling produktif dengan 31 artikel, diikuti oleh Zhang Y dengan 30 publikasi. Produksi tinggi mereka menunjukkan keterlibatan yang berkelanjutan dan jangka panjang dalam topik ini, menempatkan mereka sebagai penggerak utama produksi pengetahuan di bidang penelitian niche ini. Kelompok penulis produktif kedua meliputi Li Y dan Wang Y, masing-masing menyumbang 26 artikel, serta Wang X dengan 25 publikasi. Kehadiran beberapa penulis dengan nama belakang yang sama tetapi inisial berbeda mencerminkan komunitas penelitian yang besar dan beragam, bukan dominasi oleh satu kelompok penelitian.

Penulis seperti Lee S-P, Li H, dan Li J juga menunjukkan produktivitas yang kuat, dengan jumlah publikasi berkisar antara 21 dan 22 artikel. Produksi yang konsisten ini menunjukkan jaringan kolaborasi yang aktif dan kontribusi berkelanjutan dalam aspek eksperimental, metodologis, atau terapan dari pengayaan GABA, proses fermentasi, dan penelitian terkait roti. Zhang J dan Wang L, masing-masing dengan 20 publikasi, semakin memperkuat kedalaman keahlian yang terkonsentrasi di antara kontributor terkemuka.



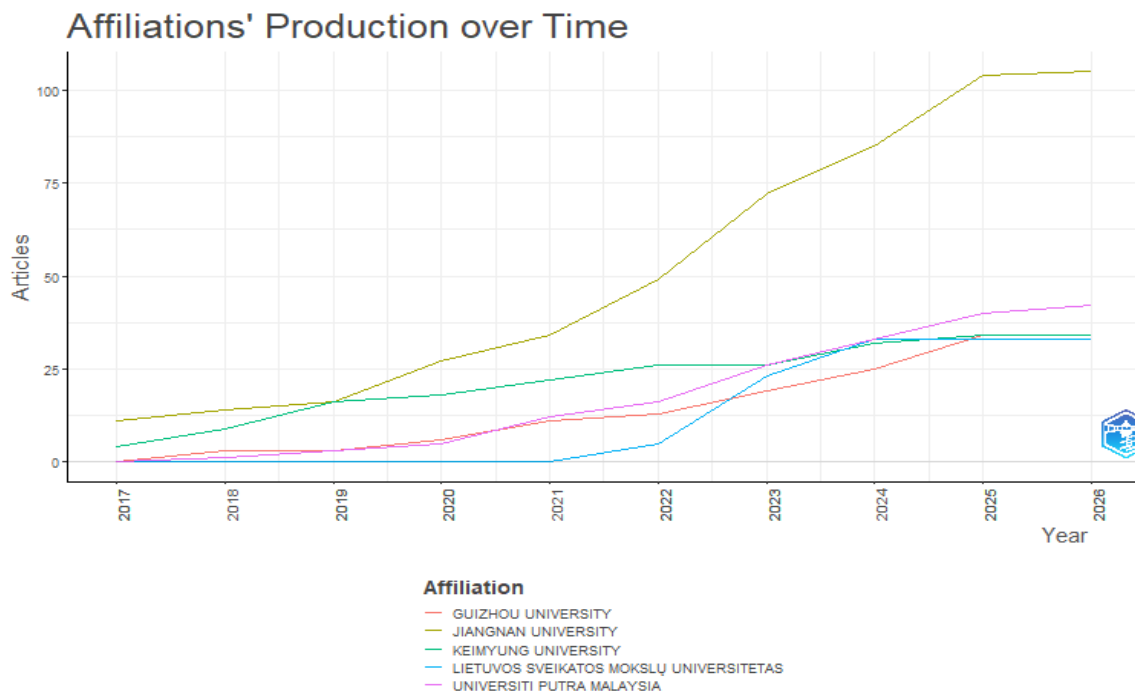
Gambar 3. Produktivitas penulis

Produksi Afiliasi dari Waktu ke Waktu

Analisis produksi afiliasi sepanjang waktu seperti yang disajikan di Gambar 4, menunjukkan pemimpin institusi yang jelas dan pola pertumbuhan yang berbeda dalam output penelitian terkait GABA, fermentasi, dan topik terkait roti. Data menunjukkan tren kenaikan yang kuat di semua institusi besar, dengan ekspansi yang sangat cepat mulai tahun 2021, menyoroti peningkatan investasi institusi dan intensitas penelitian di bidang ini. Analisis produksi afiliasi sepanjang waktu menyoroti lanskap institusi yang sangat terkonsentrasi, dengan Universitas Jiangnan memimpin dengan selisih yang signifikan, diikuti oleh kelompok institusi yang terus berkembang dan muncul. Tren kenaikan secara keseluruhan di semua afiliasi mencerminkan minat penelitian global yang meningkat dan komitmen institusional terhadap studi tentang GABA, fermentasi, dan aplikasi terkait roti, sementara pola pertumbuhan yang bervariasi menunjukkan tahap kematangan institusional yang berbeda dan fokus strategis di bidang ini.

Jiangnan University muncul sebagai kontributor institusional dominan sepanjang periode tersebut. Produksi publikasinya meningkat secara stabil dari 11 artikel pada 2017 menjadi 27 pada 2020, diikuti oleh percepatan tajam setelah 2021. Produksi universitas ini melonjak drastis menjadi 49 artikel pada 2022 dan terus tumbuh hingga 2026, mencapai 105 artikel. Pertumbuhan yang berkelanjutan dan eksponensial ini menunjukkan bahwa Universitas Jiangnan berfungsi sebagai pusat penelitian global di bidang ini,

kemungkinan didukung oleh laboratorium khusus, program penelitian jangka panjang, dan jaringan kolaboratif yang kuat.



Gambar 4. Produktivitas afiliasi berdasarkan tahun

Universitas Keimyung menunjukkan pola pertumbuhan yang konsisten dan stabil seiring waktu. Mulai dengan produksi yang moderat pada tahun 2017, produksinya meningkat secara stabil setiap tahun, mencapai 22 artikel pada tahun 2021 dan terus tumbuh hingga tahun 2026, ketika tercatat 34 artikel. Berbeda dengan lonjakan tajam yang terlihat di Universitas Jiangnan, pola pertumbuhan Universitas Keimyung mencerminkan pembangunan kapasitas secara bertahap dan keterlibatan penelitian yang berkelanjutan daripada ekspansi yang cepat.

Universitas Guizhou menunjukkan pola pertumbuhan yang tertunda namun signifikan. Tanpa publikasi pada tahun 2017 dan hanya sedikit output pada tahun-tahun awal, produksi penelitian universitas ini mulai meningkat secara signifikan setelah tahun 2020. Pertumbuhan ini mempercepat sejak tahun 2022, mencapai 34 artikel pada tahun 2025 dan tetap stabil pada tahun 2026. Pola ini menunjukkan kekuatan institusional yang berkembang dan spesialisasi yang meningkat dalam penelitian terkait GABA dan fermentasi pada periode studi terakhir.

Universiti Putra Malaysia menunjukkan tren kenaikan yang kuat dan terus meningkat, terutama setelah 2021. Mulai dari output yang sangat rendah sebelum 2020, jumlah publikasi institusi ini meningkat tajam dari 12 artikel pada 2021 menjadi 26 pada 2023 dan terus meningkat menjadi 42 artikel pada 2026. Tren ini menunjukkan perkembangan institusional yang cepat dan visibilitas internasional yang semakin meningkat di bidang penelitian ini.

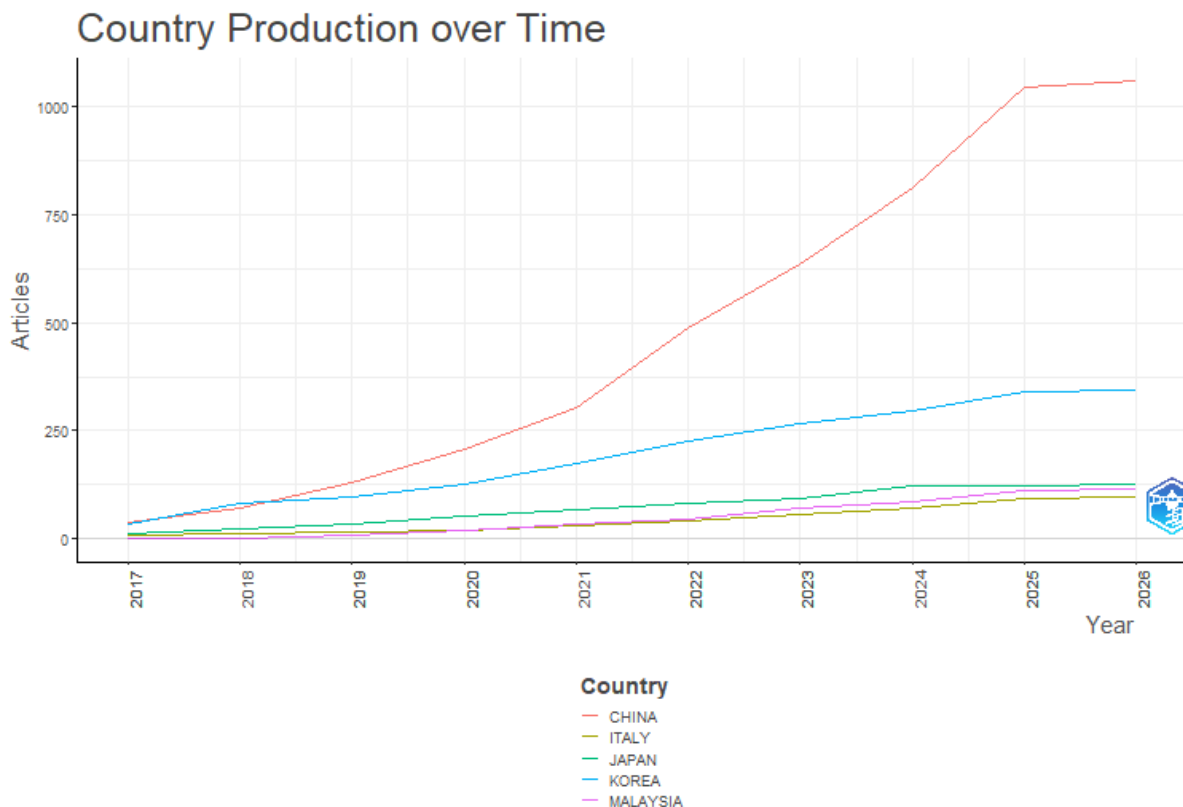
Lietuvos sveikatos mokslų universitetas (Lithuanian University of Health Sciences) menunjukkan masuknya yang terlambat, namun intens ke dalam bidang ini. Institusi ini tidak mencatat publikasi hingga 2022, setelah itu outputnya meningkat secara tiba-tiba menjadi 23 artikel pada 2023 dan stabil pada tingkat tinggi 33 artikel per tahun dari 2024 hingga 2026. Pola ini menunjukkan inisiatif penelitian yang terfokus atau pergeseran strategis menuju topik ini, yang menghasilkan pembentukan cepat sebagai kontributor signifikan dalam waktu singkat.

Produksi Negara dari Waktu ke Waktu

Analisis produksi negara dari waktu ke waktu seperti yang disajikan di Gambar 5. menunjukkan konsentrasi geografis yang kuat dalam output penelitian, dengan negara-negara Asia Timur dan Tenggara mendominasi aktivitas publikasi di bidang ini. Di seluruh negara, tren kenaikan yang jelas terlihat dari 2017 hingga 2026 menunjukkan minat global yang berkembang pesat dalam penelitian terkait GABA dalam konteks fermentasi dan roti. Analisis tingkat negara menyoroti pergeseran yang jelas menuju Asia sebagai pusat global

aktivitas penelitian dalam studi fermentasi dan roti yang terkait dengan GABA. Meskipun kontribusi Eropa, dipimpin oleh Italia, terus meningkat secara stabil, bidang ini didorong secara signifikan oleh ekspansi cepat di China, Korea, Jepang, dan negara-negara Asia Tenggara yang sedang berkembang, menyoroti kekuatan regional dalam ilmu fermentasi, pengembangan makanan fungsional, dan bioteknologi pangan terapan.

China jauh unggul sebagai kontributor utama sepanjang periode ini dan menunjukkan tren pertumbuhan yang sangat tajam. Produksi publikasi meningkat dari 36 artikel pada 2017 menjadi lebih dari 1.000 artikel pada 2025 dan 2026. Peningkatan yang berkelanjutan dan eksponensial ini menyoroti peran sentral China dalam mendorong penelitian global di bidang ini, kemungkinan didukung oleh pendanaan penelitian nasional berskala besar, jaringan institusi yang kuat, dan konsentrasi tinggi pusat penelitian ilmu pangan dan fermentasi yang spesialis. Pada pertengahan 2020-an, output China jauh melampaui total output semua negara lain, menunjukkan posisi dominan yang sangat kuat.



Gambar 5. Produktivitas negara berdasarkan tahun

Korea menempati peringkat kedua dalam produktivitas keseluruhan dan menunjukkan pola pertumbuhan yang konsisten dan kuat. Mulai dari 35 artikel pada 2017, output penelitian lebih dari dua kali lipat pada 2019 dan terus meningkat secara stabil hingga 2026, mencapai 343 artikel. Tren ini mencerminkan keahlian Korea yang telah lama dalam ilmu fermentasi dan makanan fungsional, serta minat nasional yang berkelanjutan terhadap produk yang diperkaya dengan GABA dan aplikasi roti.

Jepang juga menunjukkan pertumbuhan yang stabil dan berkelanjutan selama periode studi. Produksi publikasi meningkat dari 13 artikel pada 2017 menjadi 126 artikel pada 2026. Meskipun volume absolutnya lebih rendah dibandingkan dengan China dan Korea, tren kenaikan yang konsisten menunjukkan aktivitas penelitian yang stabil dan dasar ilmiah yang kokoh dalam kimia pangan, teknologi fermentasi, dan senyawa biofungsional.

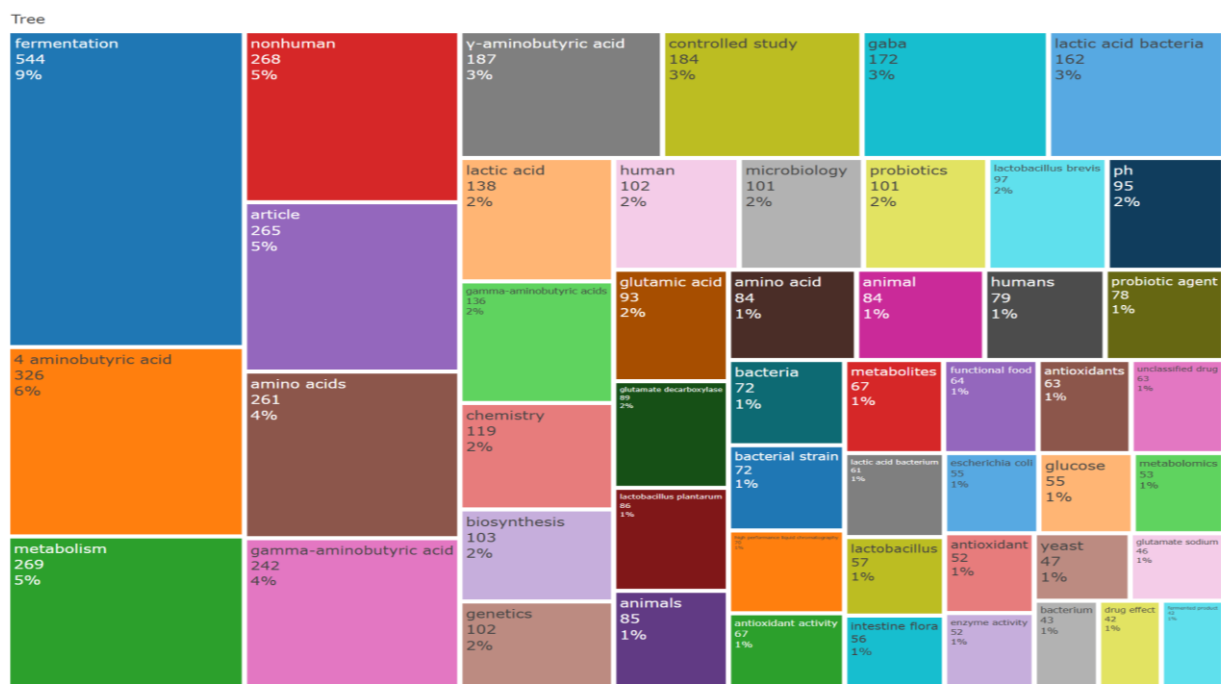
Italia merupakan kontributor Eropa terkemuka dalam dataset ini. Produksi publikasinya meningkat secara bertahap dari 9 artikel pada 2017 menjadi 97 artikel pada 2026. Meskipun pertumbuhannya lebih lambat dibandingkan dengan negara-negara Asia, peningkatan yang stabil menunjukkan keterlibatan yang berkelanjutan dan minat yang semakin besar dalam bidang penelitian ini, kemungkinan didorong oleh tradisi kuat Italia dalam ilmu pangan, produk roti, dan penelitian terkait fermentasi.

Malaysia menunjukkan tren yang menonjol, dengan output minimal sebelum 2019 diikuti oleh pertumbuhan pesat setelah 2020. Publikasi meningkat dari 18 artikel pada 2020 menjadi 116 artikel pada 2026.

Peningkatan tajam ini menunjukkan bahwa Malaysia telah menjadi pemain yang semakin aktif di bidang ini, kemungkinan mencerminkan kapasitas penelitian yang berkembang, kolaborasi internasional, dan fokus strategis pada makanan fungsional dan teknologi fermentasi.

Treemap Frekuensi Kata Kunci

Peta frekuensi kata kunci seperti yang disajikan di Gambar 6. memberikan gambaran komprehensif tentang struktur tematik bidang penelitian, mengungkap konsep dominan, fokus metodologis, dan area aplikasi yang sedang berkembang terkait GABA, fermentasi, dan sistem pangan. Distribusi kata kunci menunjukkan bahwa bidang ini sangat berfokus pada proses produksi biokimia, aktivitas mikroba, dan aplikasi pangan fungsional. Peta pohon mengungkapkan bidang penelitian yang sangat berorientasi pada proses dan didasarkan pada mekanisme, dengan fermentasi dan metabolisme mikroba sebagai inti utamanya. Pada saat yang sama, kehadiran yang semakin meningkat dari kata kunci terkait makanan fungsional, probiotik, dan kesehatan menunjukkan penekanan yang semakin besar pada aplikasi dan manfaat kesehatan, mencerminkan kematangan penelitian terkait GABA dari studi fundamental menuju inovasi makanan dan nutrisi praktis.



Gambar 6. Frekuensi kata kunci keseluruhan

Fermentasi adalah kata kunci paling menonjol, dengan proporsi kemunculan terbesar (544; 9%), menyoroti perannya yang sentral sebagai proses utama dalam produksi dan peningkatan GABA dalam sistem pangan. Tema biokimia yang erat terkait seperti 4-aminobutyric acid, gamma-aminobutyric acid, γ -aminobutyric acid, dan GABA secara kolektif menempati porsi signifikan dalam treemap, menyoroti fokus kuat pada GABA sebagai senyawa bioaktif fungsional. Kehadiran istilah sinonim yang beragam mencerminkan penggunaan interdisipliner dan variasi dalam praktik pengindeksan antarstudi.

Metabolisme dan asam amino juga muncul sebagai kluster tematik utama, menunjukkan bahwa sebagian besar literatur membahas jalur metabolik, ketersediaan prekursor, dan transformasi biokimia yang terlibat dalam biosintesis GABA. Kata kunci seperti asam glutamat, glutamat dekarboksilase, dan biosintesis lebih lanjut menekankan penyelidikan mekanistik terhadap proses konversi enzim, terutama peran glutamat dekarboksilase dalam produksi GABA.

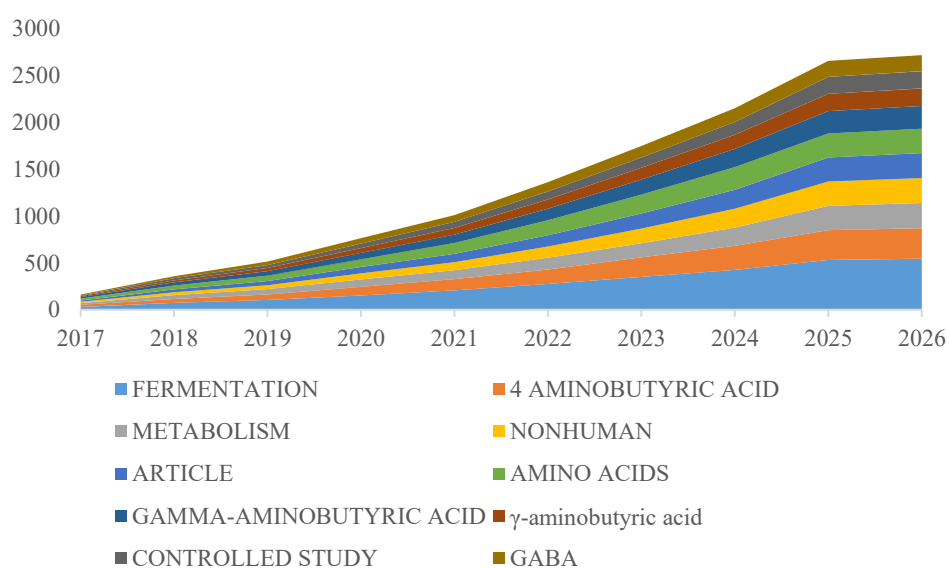
Tema mikrobiologi sangat dominan, dengan kemunculan sering bakteri asam laktat, spesies *Lactobacillus* (termasuk *Lactobacillus plantarum* dan *Lactobacillus brevis*), strain bakteri, mikrobiologi, dan bakteri. Pola ini mencerminkan pentingnya fermentasi mikrobiologis dan pemilihan strain dalam mengoptimalkan hasil GABA. Dominasi probiotik dan agen probiotik menunjukkan minat yang meningkat terhadap implikasi kesehatan dari mikroorganisme penghasil GABA dan integrasinya ke dalam makanan fungsional.

Aspek metodologis dan analitis juga terlihat dalam treemap. Kata kunci seperti studi terkontrol, kimia, genetika, kromatografi cair kinerja tinggi, metabolomik, dan aktivitas enzim menunjukkan penggunaan desain eksperimental yang ketat dan teknik analitis canggih untuk mengukur GABA, menyelidiki jalur metabolik, dan mengarakterisasi fungsi mikrobial.

Tema-tema terkait kesehatan dan aplikasi muncul melalui kata kunci seperti makanan fungsional, antioksidan, aktivitas antioksidan, metabolit, flora usus, dan studi pada manusia atau hewan. Kehadiran kata kunci baik pada manusia maupun non-manusia menunjukkan bahwa penelitian mencakup eksperimen *in vitro*, model hewan, dan, dalam skala yang lebih kecil, studi berfokus pada manusia. Hal ini menunjukkan arah translasi dari penelitian mikrobiologi dan biokimia dasar menuju aplikasi nutrisi dan kesehatan.

Frekuensi Kata Kunci dari Waktu ke Waktu

Analisis frekuensi kata kunci sepanjang waktu seperti yang disajikan di Gambar 7. menunjukkan perluasan yang jelas dan sangat konsisten dalam tema-tema penelitian terkait GABA, fermentasi, dan proses metabolik dari tahun 2017 hingga 2026. Pada semua kata kunci utama, terlihat tren kenaikan yang kuat, menunjukkan pertumbuhan volume publikasi dan konsolidasi tematik yang semakin meningkat di bidang ini. Tren frekuensi kata kunci menunjukkan bidang penelitian yang semakin matang, ditandai dengan perluasan kuantitatif dan pendalaman tematik. Fase pertumbuhan awal ditandai dengan studi biokimia dan fermentasi dasar, sementara tahun-tahun berikutnya menunjukkan fokus yang lebih intensif pada mekanisme metabolik, eksperimen terkontrol, dan terminologi standar. Konvergensi tren ini menunjukkan bahwa penelitian tentang GABA dalam sistem fermentasi dan pangan telah berkembang menjadi bidang yang mapan dan metodologis yang kokoh pada pertengahan 2020-an.



Gambar 7. Tren penggunaan kata kunci berdasarkan tahun

Fermentasi menunjukkan pertumbuhan yang paling menonjol dan berkelanjutan, meningkat dari 31 kali pada 2017 menjadi 544 pada 2026. Peningkatan yang stabil ini mengonfirmasi fermentasi sebagai tulang punggung konseptual dan metodologis utama bidang penelitian ini. Peningkatan berkelanjutan tanpa fluktuasi besar menunjukkan stabilitas penelitian jangka panjang dan minat yang semakin besar dalam pendekatan berbasis fermentasi untuk produksi GABA dan pengembangan makanan fungsional.

Tema biokimia yang erat terkait seperti 4-aminobutyric acid, gamma-aminobutyric acid, γ -aminobutyric acid, dan GABA semuanya menunjukkan pola pertumbuhan paralel. Frekuensi penggunaan istilah-istilah ini meningkat secara stabil sepanjang periode studi, mencerminkan fokus ilmiah inti pada GABA sebagai senyawa bioaktif. Peningkatan simultan dari beberapa istilah sinonim menyoroti baik peningkatan output penelitian maupun variasi penggunaan terminologi di berbagai disiplin ilmu dan sistem pengindeksan.

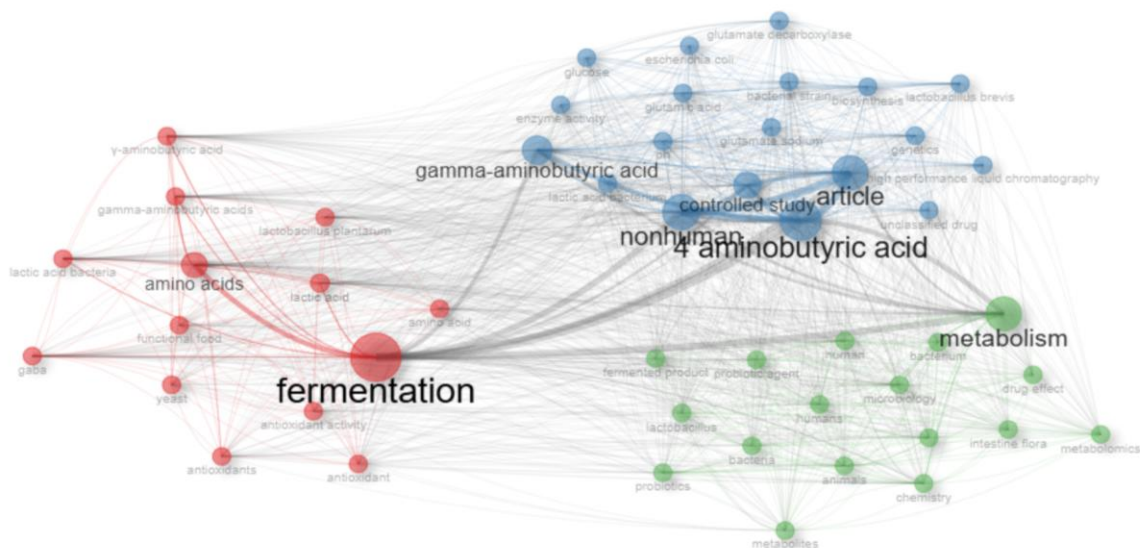
Metabolisme dan asam amino juga menunjukkan pertumbuhan yang kuat seiring waktu, meningkat dari 20 dan 20 pada 2017 menjadi 269 dan 261, masing-masing, pada 2026. Tren ini menyoroti penekanan yang semakin besar pada pemahaman jalur metabolik, pemanfaatan prekursor, dan mekanisme biokimia yang

mendasari biosintesis GABA. Peningkatan yang berkelanjutan menunjukkan pergeseran dari studi eksploratif menuju penyelidikan mekanistik dan sistemik yang lebih rinci.

Kata kunci terkait metodologi dan desain studi, termasuk nonhuman, artikel, dan studi terkontrol, meningkat secara stabil sepanjang periode. Peningkatan studi terkontrol dari 9 kali pada 2017 menjadi 184 pada 2026 menunjukkan peningkatan ketelitian metodologis dan standardisasi eksperimental di bidang ini. Dominasi studi non-manusia menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian masih berbasis laboratorium atau berfokus pada hewan, meskipun hal ini juga mencerminkan pekerjaan dasar yang diperlukan sebelum penerapan pada manusia secara luas.

Keterhubungan Kata Kunci dalam Warna yang Sama

Jaringan interaksi kata kunci seperti yang disajikan di Gambar 8, tidak hanya mengungkapkan struktur keseluruhan bidang penelitian, tetapi juga memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang dinamika internal setiap kluster tematik, yang diwakili oleh warna-warna yang berbeda. Setiap kluster berwarna mencerminkan fokus penelitian yang unik namun saling terhubung, dengan hubungan internal yang kuat yang menunjukkan kohesi tematik dan kematangan.



Gambar 8. Konektivitas kluster kata kunci

Dalam kluster merah yang berpusat pada fermentasi, hubungan internalnya padat dan sangat kohesif. Kata kunci seperti asam amino, asam laktat, bakteri asam laktat, *Lactobacillus plantarum*, ragi, antioksidan, dan makanan fungsional saling terhubung erat, menunjukkan bahwa studi dalam kluster ini sering membahas fermentasi sebagai proses multifaset yang melibatkan metabolisme mikroba, transformasi biokimia, dan peningkatan kualitas makanan. Hubungan yang kuat antara fermentasi, asam amino, dan bakteri asam laktat menyoroti pentingnya jalur konversi asam amino yang didorong oleh mikroba untuk produksi GABA. Hubungan dengan antioksidan dan makanan fungsional menunjukkan bahwa kluster ini melampaui optimasi proses untuk mencakup hasil nutrisi dan biofungsional, terutama dalam produk makanan fermentasi.

Kelompok biru mewakili inti biokimia dan eksperimental bidang ini, didominasi oleh asam 4-aminobutirat dan asam gamma-aminobutirat. Di dalam kelompok ini, hubungan internal yang kuat menghubungkan istilah terkait GABA dengan biosintesis, asam glutamat, dekarboksilase glutamat, genetika, strain bakteri, dan teknik analitis seperti kromatografi cair kinerja tinggi. Interaksi ini menunjukkan bahwa penelitian dalam kluster ini sangat berfokus pada pemahaman mekanisme enzim, regulasi genetik, dan pengukuran presisi produksi GABA dalam kondisi terkontrol. Asosiasi yang sering dengan studi terkontrol dan non-manusia lebih lanjut menyarankan bahwa kluster ini didorong oleh eksperimen berbasis laboratorium, yang menyediakan landasan mekanistik untuk penelitian fermentasi terapan dan berbasis makanan.

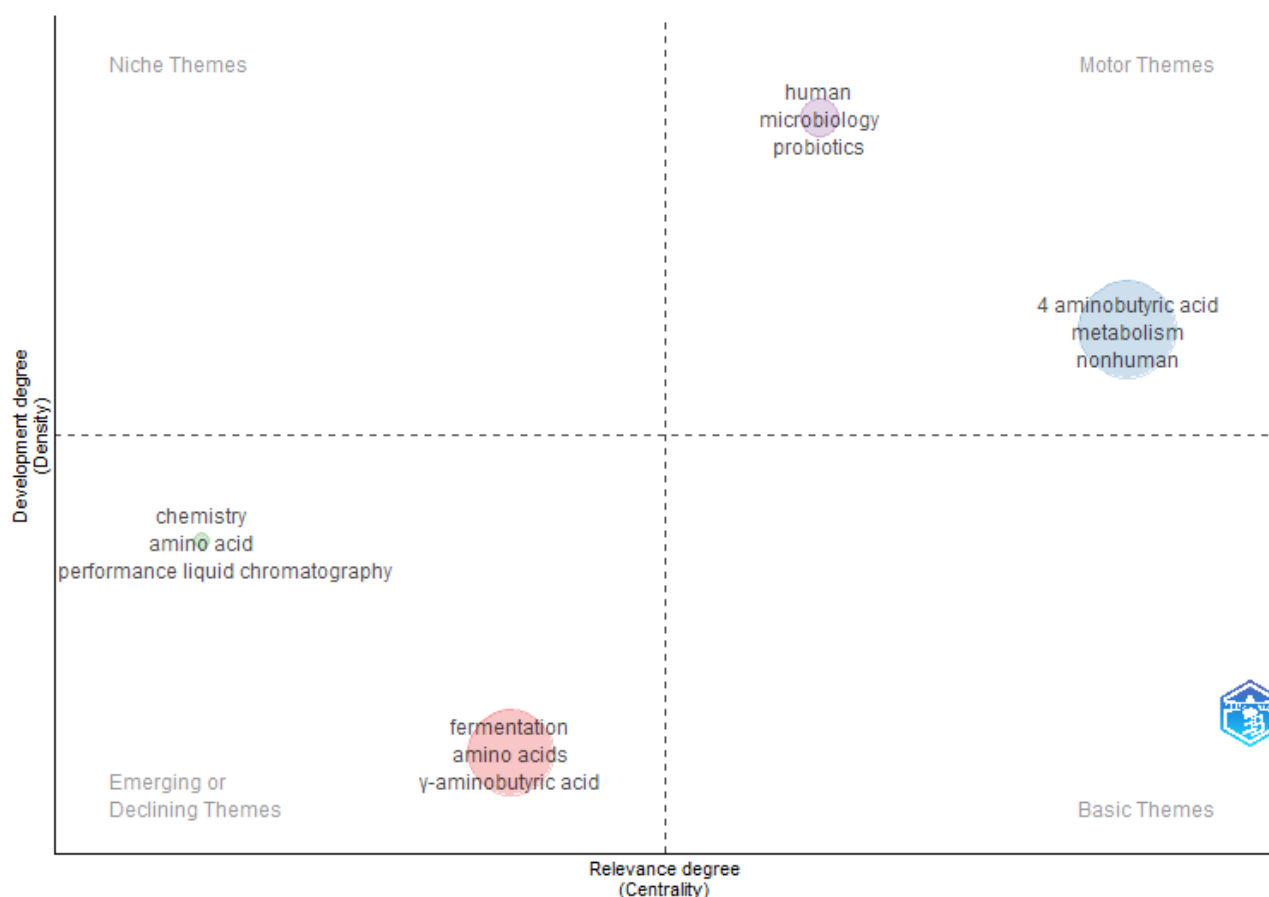
Kluster hijau berpusat pada metabolisme dan menunjukkan konektivitas internal yang kuat di antara kata kunci seperti probiotik, mikrobiologi, flora usus, metabolit, metabolomik, kimia, hewan, dan manusia. Koneksi internal ini menunjukkan aliran penelitian tingkat sistem dan berorientasi pada aplikasi yang

mengeksplorasi bagaimana GABA dan produk fermentasi berinteraksi dengan sistem biologis. Hubungan erat antara metabolisme, probiotik, dan flora usus mencerminkan minat yang meningkat dalam modulasi mikrobiota usus dan efek kesehatan dari makanan yang diperkaya dengan GABA. Hubungan dengan hewan dan manusia menunjukkan bahwa klaster ini mencakup studi praklinis dan translasional, yang bertujuan untuk menghubungkan mekanisme metabolik dengan hasil fisiologis dan kesehatan.

Pentingnya kohesi internal dalam setiap klaster berwarna menunjukkan bahwa aliran penelitian ini terdefinisi dengan baik rather than terfragmentasi. Pada saat yang sama, hubungan antarkluster yang kuat, terutama yang menghubungkan fermentasi dengan kluster biokimia dan metabolik, menyoroti sifat integratif bidang ini. Secara keseluruhan, interaksi berbasis warna mengungkapkan lanskap penelitian yang berkembang secara logis dari proses fermentasi mikrobial (merah), melalui validasi mekanistik dan biokimia (biru), hingga aplikasi metabolik dan berorientasi kesehatan (hijau), menggambarkan struktur pengetahuan yang kohesif dan terus berkembang.

Peta Tematik

Peta tematik seperti yang disajikan di Gambar 9, memberikan gambaran strategis tentang struktur konseptual dan tingkat kematangan penelitian terkait GABA, fermentasi, dan topik-topik ilmu pangan lainnya dengan mengelompokkan tema-tema berdasarkan sentralitas (relevansi) dan kepadatan (tingkat perkembangan). Keempat kuadran (motor, niche, dasar, dan tema-tema yang sedang berkembang atau menurun), secara kolektif menggambarkan bagaimana topik-topik penelitian yang berbeda saling berkontribusi dan berkembang dalam bidang ini.



Gambar 9. Tren kelompok kata kunci

Kuadran tema motor (tinggi sentralitas dan tinggi kepadatan) mencakup tema-tema terkait asam 4-aminobutirat, metabolisme, dan studi nonmanusia. Posisi mereka menunjukkan bahwa topik-topik ini sangat relevan dengan bidang ini dan telah berkembang dengan baik. Hal ini menyiratkan bahwa penyelidikan mekanistik dan metabolik tentang GABA, terutama dalam model eksperimental dan non-manusia, menjadi pendorong utama penelitian saat ini. Tema-tema ini menjadi inti struktur intelektual bidang ini dan didukung oleh kumpulan literatur yang matang dengan kohesi internal yang kuat.

Kelompok lain yang sangat berkembang dan sentral di wilayah kanan atas berkaitan dengan manusia, mikrobiologi, dan probiotik. Kelompok ini mencerminkan pentingnya penelitian translasional dan berorientasi pada aplikasi yang menghubungkan proses mikrobiologis dan produksi GABA dengan hasil kesehatan manusia. Posisi dekat dengan tema motorik menunjukkan bahwa perspektif probiotik dan mikrobiologi semakin berpengaruh dan mungkin terus membentuk arah penelitian di masa depan.

Kuadran tema dasar (tinggi sentralitas tetapi rendah kepadatan) relatif kurang padat, menunjukkan bahwa sebagian besar topik sentral telah melampaui tahap dasar. Hal ini menyiratkan bahwa bidang ini telah beralih dari pembentukan konseptual menuju jalur penelitian yang lebih spesifik dan matang, dengan sedikit tema yang masih bersifat murni dasar atau eksploratif.

Kuadran tema *niche* (sentralitas rendah tetapi kepadatan tinggi) mencakup topik seperti kimia, analisis asam amino, dan kromatografi cair kinerja tinggi. Tema-tema ini telah berkembang secara metodologis tetapi tetap perifer dalam diskursus penelitian yang lebih luas. Penempatan mereka menunjukkan bahwa kimia analitik dan teknik pengukuran adalah alat khusus yang mendukung bidang ini daripada mendorong pengembangan konseptual intinya.

Kuadran tema yang muncul atau menurun (sentralitas rendah dan kepadatan rendah) mencakup fermentasi, asam amino, dan asam γ -aminobutirat. Meskipun fermentasi telah banyak diteliti dan menjadi pusat dalam analisis sebelumnya, posisinya di sini menunjukkan pergeseran konseptual: fermentasi mungkin kini berfungsi sebagai proses latar belakang yang mapan daripada tema penelitian baru atau yang sedang berkembang secara aktif. Alternatifnya, penempatan ini mungkin menunjukkan bahwa penelitian fermentasi sedang berkembang dan terintegrasi ke dalam studi metabolik dan aplikasi yang lebih luas, daripada berdiri sendiri sebagai frontir penelitian yang terpisah.

Peta tematik ini mengungkapkan bidang yang telah mencapai tahap perkembangan yang relatif maju. Penekanan penelitian telah bergeser dari proses fermentasi dasar menuju tema-tema mekanistik, metabolik, dan berorientasi pada kesehatan, terutama yang melibatkan metabolisme GABA dan aplikasi probiotik. Kehadiran yang kuat dari tema-tema motorik dan jumlah topik yang benar-benar baru yang terbatas menyarankan bahwa penelitian di masa depan kemungkinan akan berfokus pada mendalami pemahaman biologis dan memperluas aplikasi translasi daripada menetapkan domain konseptual yang sepenuhnya baru.

Keterhubungan Antar Klaster Kata Kunci dan Pengaruh Terhadap Perspektif Produk Roti

Jaringan interaksi kata kunci tidak hanya menunjukkan adanya klaster tematik yang jelas, tetapi juga memperlihatkan hubungan yang kuat dan bermakna antara klaster merah, biru, dan hijau. Hal ini menunjukkan bahwa lanskap penelitian dalam bidang tersebut bersifat terintegrasi dan interdisipliner, bukan hanya aliran penelitian yang berdiri sendiri. Interaksi ketiga klaster tersebut membentuk kerangka penelitian yang saling terkait dan berkembang secara siklikal. Klaster merah berperan sebagai landasan teknologi dan mikrobiologi, klaster biru memberikan pemahaman mengenai mekanisme serta validasi eksperimental, sedangkan klaster hijau mengarahkan temuan tersebut pada konteks metabolisme, gizi, dan kesehatan. Hubungan timbal balik yang kuat antarklaster menunjukkan adanya mekanisme umpan balik, yaitu temuan terkait metabolisme dan kesehatan dapat menjadi dasar bagi pengembangan strategi fermentasi serta optimasi biokimia. Dengan demikian, keterkaitan antarklaster mencerminkan semakin matang dan terintegrasinya perkembangan penelitian dalam bidang tersebut.

Hubungan antara klaster merah (penelitian berfokus pada fermentasi) dan klaster biru (studi biokimia dan eksperimental) sangat kuat dan langsung. Fermentasi bertindak sebagai jembatan konseptual dan metodologis yang menghubungkan pemrosesan mikrobial dengan validasi biokimia produksi GABA (Kim *et al.* 2009; Kittibunchakul *et al.* 2021). Kata kunci seperti asam amino, bakteri asam laktat, dan spesies *Lactobacillus* dalam klaster merah terkait erat dengan istilah terkait GABA, biosintesis, asam glutamat, dan glutamat dekarboksilase dalam klaster biru. Interkoneksi ini mencerminkan alur kerja di mana proses fermentasi dioptimalkan terlebih dahulu, lalu dievaluasi dalam kondisi eksperimental terkontrol untuk mengungkap jalur enzim, regulasi genetik, dan optimasi hasil GABA (Zhang *et al.* 2023; Zhao *et al.* 2025). Hubungan silang yang padat menunjukkan bahwa kemajuan dalam teknologi fermentasi erat terkait dengan penelitian biokimia mekanistik.

Kluster merah juga menunjukkan interaksi substansial dengan kluster hijau (metabolisme dan penelitian berorientasi aplikasi). Produk fermentasi sering dikaitkan dengan metabolisme, probiotik, mikrobiologi, flora usus, dan konsep makanan fungsional. Fermentasi bukan hanya strategi produksi, tetapi juga penentu utama fungsi biologis yang menunjukkan bahwa transisi dari proses fermentasi ke hasil metabolik dan kesehatan menunjukkan bahwa penelitian semakin mengevaluasi bagaimana makanan fermentasi yang kaya GABA

memengaruhi ekologi mikroba, respons metabolik, dan efek fisiologis pada sistem hewan dan manusia (Abdelshafy *et al.* 2024; Bimo *et al.* 2025; Gutiérrez-Nava *et al.* 2024; Vaitkeviciene *et al.* 2021).

Hubungan antara klaster biru dan klaster hijau mewakili jalur translasi bidang ini. Studi biokimia dan terkontrol yang berfokus pada sintesis GABA, aktivitas enzim, dan stabilitas senyawa terhubung erat dengan penelitian metabolik dan kesehatan. Kata kunci seperti metabolit, metabolomik, kimia, hewan, dan manusia menghubungkan wawasan mekanistik yang dihasilkan dalam klaster biru dengan penilaian tingkat sistem dan fisiologis dalam klaster hijau. Hubungan ini menunjukkan bahwa validasi eksperimental produksi GABA secara langsung memberikan informasi untuk studi tentang ketersediaan hayati, dampak metabolik, dan manfaat fungsional atau probiotik.

Produk bakery atau roti merupakan salah satu konteks aplikasi yang terhubung dengan tema utama penelitian GABA dalam hasil analisis *keywords* dan *co-occurrence*. Strategi pencarian penelitian mencakup kata kunci *bakery*, *bread*, *bake*, dan *proofing* yang dikombinasikan dengan GABA dan *fermentation*, menunjukkan keterkaitan antara pengembangan produk roti dan proses fermentasi sebagai bagian dari lanskap penelitian GABA. Hasil analisis *co-occurrence* memperlihatkan bahwa tema bakery/roti berada dalam jaringan penelitian yang berhubungan erat dengan *fermentation*, *GABA*, *gamma-aminobutyric acid*, *amino acids*, *metabolism*, *lactic acid bacteria*, dan *Lactobacillus*. Keterhubungan tersebut menunjukkan bahwa penelitian mengenai roti dalam dataset tidak berdiri sebagai topik yang terpisah, tetapi terintegrasi dengan kajian fermentasi, aktivitas mikroba, metabolisme asam amino, dan biosintesis GABA. Fermentasi bahkan menjadi kata kunci dengan perkembangan paling menonjol selama periode penelitian, meningkat dari 31 kemunculan pada 2017 menjadi 544 pada 2026, yang memperkuat posisinya sebagai tema utama dalam struktur pengetahuan bidang ini.

Keterkaitan *co-occurrence* tersebut juga menunjukkan perkembangan fokus penelitian dari proses fermentasi dasar menuju mekanisme metabolik dan aplikasi pangan fungsional. Kata kunci *metabolism*, *amino acids*, dan istilah yang berkaitan dengan GABA menunjukkan hubungan konseptual antara aktivitas mikroorganisme selama fermentasi dengan pembentukan senyawa bioaktif, sedangkan kemunculan tema *probiotics* dan *human health* menunjukkan perluasan penelitian menuju aspek fungsional dan kesehatan. Dalam konteks bakery, pola tersebut mengindikasikan bahwa roti berpotensi menjadi salah satu bentuk aplikasi dari integrasi antara teknologi fermentasi, metabolisme mikroba, dan pengembangan pangan fungsional berbasis GABA. Dengan demikian, berdasarkan jaringan *keywords* dan *co-occurrence*, bakery/roti dapat dipandang sebagai tema aplikasi yang menghubungkan penelitian fundamental mengenai fermentasi dan biosintesis GABA dengan pengembangan produk pangan fungsional.

KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis tren penelitian global, pola kolaborasi, dan perkembangan tematik γ -aminobutyric acid (GABA) dalam sistem fermentasi dan produk roti selama periode 2017–2026 menggunakan analisis bibliometrik terhadap 1.023 dokumen dari 302 sumber. Hasil analisis menunjukkan bahwa penelitian GABA berkembang secara multidisipliner dengan keterlibatan 3.652 penulis dan rata-rata 6,03 penulis bersama per dokumen. Analisis *keywords* dan *co-occurrence* menunjukkan bahwa fermentasi merupakan tema paling dominan dengan 544 kemunculan atau sekitar 9% dari keseluruhan kata kunci, sedangkan *metabolism*, *amino acids*, GABA, *gamma-aminobutyric acid*, serta bakteri asam laktat membentuk jaringan tematik yang saling berkaitan. Fermentasi juga menunjukkan peningkatan penggunaan yang sangat kuat, dari 31 kemunculan pada 2017 menjadi 544 pada 2026, yang menegaskan posisinya sebagai fondasi utama penelitian GABA. Pola tersebut memperlihatkan pergeseran fokus dari kajian fermentasi dasar menuju pemahaman mekanisme metabolik, biosintesis GABA, probiotik, dan pangan fungsional.

Secara khusus, hasil pemetaan *keywords* dan *co-occurrence* menegaskan bahwa bakery atau produk roti merupakan salah satu konteks aplikasi yang terintegrasi dengan tema fermentasi, GABA, metabolisme, dan pangan fungsional, bukan merupakan topik yang berdiri sendiri. Hal ini konsisten dengan strategi pencarian yang secara eksplisit memasukkan istilah *bakery*, *bread*, *bake*, dan *proofing* bersama istilah GABA dan *fermentation*. Keterhubungan tersebut menunjukkan bahwa pengembangan produk roti berbasis fermentasi berpotensi menjadi arah aplikasi dari perkembangan penelitian GABA, khususnya melalui integrasi aktivitas mikroorganisme, metabolisme asam amino, dan pengembangan pangan fungsional. Temuan bibliometrik ini menempatkan bakery/roti sebagai salah satu bidang aplikasi yang menghubungkan penelitian fundamental mengenai fermentasi dan biosintesis GABA dengan inovasi produk pangan fungsional. Arah penelitian selanjutnya perlu memperkuat kajian pada produk roti nyata, termasuk optimasi fermentasi dan formulasi, serta evaluasi bioavailabilitas dan manfaat fungsional GABA pada produk pangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelshafy AM, Mustafa MA, Hassan MA, Al-Asmari F. 2024. Probiotic-fermentation of oat: Safety, strategies for improving quality, potential food applications and biological activities. *Trends in Food Science & Technology*. 151:104640. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104640>
- Alten B, Guzikowski NJ, Zurawski Z, Hamm HE, Kavalali ET. 2022. Presynaptic mechanisms underlying GABAB-receptor-mediated inhibition of spontaneous neurotransmitter release. *Cell Reports*. 38(3):110255. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2021.110255>
- Bimo IA, Estiasih T, Wulan SN, Sunarhum WB, Pranita MD. 2025. A Systematic Review of GABA, Rice Germination, and Rice Bran: Insights into Hedonic Sensory Profiles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1564(1):012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1564/1/012022>
- de Souza HF, Monteiro GF, Bogáz LT, Freire ENS, Pereira KN, de Carvalho MV, da Cruz AG, Brandi IV, Kamimura ES. 2024. Bibliometric analysis of water kefir and milk kefir in probiotic foods from 2013 to 2022: A critical review of recent applications and prospects. *Food Research International*. 175:113716. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113716>
- Espinales C, Palacios-Ponce S, Plaza-Ibarra L, Peñas E, Martinez-Villaluenga C, Cáceres PJ. 2023. Addition of ungerminated and germinated white rice and brown rice to improve the quality of salami. *LWT*. 181:114769. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114769>
- Gutiérrez-Nava MA, Jaén-Echeverría E, Acevedo-Sandoval OA, Román-Gutiérrez AD. 2024. Fermentation of barley wort with *Saccharomyces boulardii* to generate a beverage with probiotic potential. *Future Foods*. 9:100373. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100373>
- Hinton T, Li KM, Viengkhou V, Kam SY, Kindaro S, Jelinek HF, Matthews S, Johnston GAR. 2022. GABA-enriched oolong tea: Reducing stress in a student cohort may involve more than just GABA. In *Recent Advances in the Health Benefits of Tea*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.106896>
- Kim GH, Baek KR, Lee GE, Lee JH, Moon JH, Seo SO. 2025. Development of starter cultures for precision fermentation of kombucha with enriched gamma-aminobutyric acid (GABA) content. *Fermentation (Basel)*. 11(1):17. <https://doi.org/10.3390/fermentation11010017>
- Kim JY, Lee MY, Ji GE, Lee YS, Hwang KT. 2009. Production of γ -aminobutyric acid in black raspberry juice during fermentation by *Lactobacillus brevis* GABA100. *International Journal of Food Microbiology*. 130(1):12-16. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2008.12.028>
- Kittibunchakul S, Yuthaworawit N, Whanmek K, Suttisansanee U, Santivarangkna C. 2021. Health beneficial properties of a novel plant-based probiotic drink produced by fermentation of brown rice milk with GABA-producing *Lactobacillus pentosus* isolated from Thai pickled weed. *Journal of Functional Foods*. 86:104710. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104710>
- Lee JJ, Chi G. 2025. Five decades of eating disorder research: A bibliometric analysis of publication trends, research themes, and the relationship between public and academic attention (1975-2024). *International Journal of Eating Disorders*. 58(7):1278-1295. <https://doi.org/10.1002/eat.24436>
- Oh SJ, Kwon YH, Shin HH, Kim HS, Choi HD, Lim ST. 2018. Changes in physical characteristics of white pan bread by addition of GABA rice bran and its extract. *Korean Journal of Food Science and Technology*. 50(6):614-620.
- Streeter CC, Whitfield TH, Owen L, Rein T, Karri SK, Yakhkind A, Perlmutter R, Prescott A, Renshaw PF, Ciraulo DA, Jensen JE. 2010. Effects of yoga versus walking on mood, anxiety, and brain GABA Levels: A randomized controlled MRS study. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*. 16(11):1145-1152. <https://doi.org/10.1089/acm.2010.0007>
- Vaitkeviciene R, Zadeike D, Gaizauskaite Z, Valentaviciute K, Marksa M, Mazdzieriene R, Bartkiene E, Lele V, Juodeikiene G, Jakstas V. 2021. Functionalisation of rice bran assisted by ultrasonication and fermentation for the production of rice bran-lingonberry pulp-based probiotic nutraceutical. *International Journal of Food Science and Technology*. 57(3):1462-1472. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15053>
- Yu L, Han X, Cen S, Duan H, Feng S, Xue Y, Tian F, Zhao J, Zhang H, Zhai Q, Chen W. 2020. Beneficial effect of GABA-rich fermented milk on insomnia involving regulation of gut microbiota. *Microbiological Research*. 233:126409. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126409>
- Zhang S, Hu Y, Wang Y, Li M, Han D, Gao S, Hu Y, Guo J, Zhang T, Shi L. 2023. Integrated transcriptomics and metabolomics reveals that regulating biosynthesis and metabolism of HCN and GABA plays a key role in drought resistance of wild soybean. *Environmental and Experimental Botany*. 215:105505. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105505>

Zhao Y, Wu Y, Zhang X, Zhu X, Hou Y, Chen J, Cui K, Li X, Wu W. 2025. Methyl jasmonate attenuates chilling injury of prune fruit by maintaining ROS homeostasis and regulating GABA metabolism and energy status. *Postharvest Biology and Technology*. 220:113303. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.113303>