



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

META-ANALISIS: PENGARUH PENYIMPANAN DINGIN TERHADAP STABILITAS KANDUNGAN ASAM GAMMA-AMINOBUTIRAT DAN KAPASITAS MENAHAN AIR YOGURT

BELINDA NURULHIKAM PRATADI



**DEPARTEMEN ILMU DAN TEKNOLOGI PANGAN
FAKULTAS TEKNOLOGI PERTANIAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “Meta-Analisis: Pengaruh Penyimpanan Dingin terhadap Stabilitas Kandungan Asam Gamma-Aminobutirat dan Kapasitas Menahan Air Yogurt” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir skripsi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Agustus 2025

Belinda Nurulhikam Pratadi
F2401211101



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

ABSTRAK

BELINDA NURULHIKAM PRATADI. Meta-Analisis: Pengaruh Penyimpanan Dingin terhadap Stabilitas Kandungan Asam Gamma-Aminobutirat dan Kapasitas Menahan Air Yogurt. Dibimbing oleh SUGIYONO.

Yogurt merupakan produk fermentasi susu yang mengandung senyawa bioaktif asam gamma-aminobutirat (GABA) dan memiliki kemampuan menahan air yang memengaruhi mutu tekstur dan fungsional produk. Akan tetapi, stabilitas kedua parameter tersebut dapat mengalami perubahan yang tidak konsisten antar studi selama penyimpanan dingin. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh penyimpanan dingin terhadap kandungan GABA dan kapasitas menahan air yogurt menggunakan pendekatan meta-analisis. Sebanyak 9 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dan eksklusi dianalisis, mencakup total 33 studi hasil penelitian. Analisis dilakukan menggunakan *random effects model* dengan menghitung *effect size* (Hedges' *d*), heterogenitas (I^2), dan bias publikasi. Di samping itu, dilakukan analisis subkelompok untuk memperkuat hasil meta-analisis. Hasil analisis menunjukkan bahwa penyimpanan dingin selama lebih dari dua minggu memberikan pengaruh signifikan meningkatkan kandungan GABA ($SMD = 9,14$; $p < 0,001$) dan kapasitas menahan air ($SMD = 0,99$; $p = 0,024$). Penggunaan *starter*, susu, dan durasi penyimpanan dingin yang berbeda menyebabkan adanya variasi stabilitas kandungan GABA dan kapasitas menahan air yogurt. *Starter* komersial dengan *Lacticaseibacillus paracasei* serta susu kambing secara signifikan meningkatkan kedua parameter, sedangkan susu kedelai menurunkannya. Penyimpanan empat minggu menghasilkan kandungan GABA tertinggi dengan kapasitas menahan air yang stabil. Hasil *funnel plot* dan *fail-safe N* menunjukkan bahwa kedua parameter relatif kuat terhadap risiko bias publikasi.

Kata kunci: asam gamma-aminobutirat, bakteri asam laktat, kapasitas menahan air, meta-analisis, yogurt



ABSTRACT

BELINDA NURULHIKAM PRATADI. Meta-Analysis: Effects of Cold Storage on the Stability of Gamma-Aminobutyric Acid Content and Water-Holding Capacity of Yogurt. Supervised by SUGIYONO.

Yogurt is a fermented milk product that contains gamma-aminobutyric acid (GABA) and water-holding capacity that influence the product's textural and functional quality. However, the stability of these two parameters has shown inconsistent results across studies. This study aimed to evaluate the effect of cold storage on the GABA content and water-holding capacity of yogurt using a meta-analysis approach. A total of 9 scientific articles that met the inclusion and exclusion criteria were analyzed, covering 33 individual study outcomes. The analysis was conducted using a random-effects model to calculate the effect size (Hedges' g), heterogeneity (I^2), and publication bias. In addition, subgroup analysis was performed to strengthen the meta-analysis results. The findings indicated that cold storage for more than two weeks significantly increased both GABA content ($SMD = 9.14$; $p < 0.001$) and water-holding capacity ($SMD = 0.99$; $p = 0.024$). Variations in the use of starter culture, milk type, and storage duration contributed to differences in the stability of GABA content and water-holding capacity. Commercial starters supplemented with *Lacticaseibacillus paracasei* and the use of goat milk significantly increased both parameters, while soymilk decreased them. Four-week storage resulted in the highest GABA content and stable water-holding capacity. Funnel plot and fail-safe N results suggested that both parameters were relatively robust against publication bias.

Keywords: gamma-aminobutyric acid, lactic acid bacteria, meta-analysis, water-holding capacity, yoghurt

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber;
a. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2025
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.



**META-ANALISIS: PENGARUH PENYIMPANAN DINGIN
TERHADAP STABILITAS KANDUNGAN ASAM GAMMA-
AMINOBUTIRAT DAN KAPASITAS MENAHAN AIR
YOGURT**

BELINDA NURULHIKAM PRATADI

Skripsi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana pada
Program Studi Teknologi Pangan

**DEPARTEMEN ILMU DAN TEKNOLOGI PANGAN
FAKULTAS TEKNOLOGI PERTANIAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber;
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak memberikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tim Pengaji pada Ujian Skripsi:

- 1 Prof. Dr. Ir. Dede Robiatul Adawiyah, M.Si.
- 2 Dr. Ing. Dase Hunaefi S.T.P., M.Food.St.



Judul Skripsi : Meta-Analisis: Pengaruh Penyimpanan Dingin terhadap Stabilitas Kandungan Asam Gamma-Aminobutirat dan Kapasitas Menahan Air Yogurt

Nama : Belinda Nurulhikam Pratadi
NIM : F2401211101

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Sugiyono, M.AppSc.



Diketahui oleh

Ketua Departemen Ilmu dan Teknologi Pangan:
Prof. Dr. Eko Hari Purnomo S.T.P., M.Sc.
NIP. 197604121999031004



Tanggal Ujian:
31 Juli 2025

Tanggal Lulus:
8 Agustus 2025



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu wa Ta'ala atas limpahan rahmat, karunia, dan kemudahan-Nya sehingga karya ilmiah ini dapat diselesaikan dengan baik. Karya ini berjudul “Meta-Analisis: Pengaruh Penyimpanan Dingin terhadap Stabilitas Kandungan Asam-Gamma Aminobutirat dan Kapasitas Menahan Air Yogurt”, yang dilaksanakan dalam rentang waktu bulan Maret hingga Juli 2025.

Dengan penuh rasa hormat dan cinta, penulis menyampaikan terima kasih yang mendalam kepada kedua orang tua tercinta atas segala doa, dukungan, dan kasih sayang yang tak pernah putus. Segala pencapaian ini tidak akan terwujud tanpa mereka.

Ucapan terima kasih yang tulus juga penulis sampaikan kepada Prof. Dr. Ir. Sugiyono, M.AppSc., selaku dosen pembimbing, atas bimbingan, arahan, kesabaran, dan kepercayaan yang begitu besar selama proses penyusunan karya ini. Tak lupa, penulis menyampaikan apresiasi kepada seluruh dosen dan staf di Departemen Ilmu dan Teknologi Pangan atas ilmu, inspirasi, dan dukungan yang telah diberikan.

Penulis juga berterima kasih kepada sahabat-sahabat terdekat dalam “Innova Putih Goes to Sidang” yang berisikan Dianda Athaya, Puteri Stevia, Azalia Noor Kamila, Safa Fidela, Cherrylia Zahra, dan Unsya Kamila yang telah membersamai sejak semester tiga hingga akhir perjalanan ini. Terima kasih atas tawa, semangat, dan pelukan hangat di setiap masa sulit.

Kepada teman-teman magang yang setia menjadi tempat berbagi keluh kesah, geng “John” yang penuh warna dan tawa, berisikan Najla, Ainun, Dody, Dwi, Nabilla, Aldwin, dan Tauhid, terima kasih atas kebersamaan dan semangat yang menenangkan. Terima kasih juga kepada Kak Fauzan Baihaqi dan Ibu Fitriaturrahmah yang telah menjadi mentor sekaligus sumber inspirasi selama masa magang.

Secara khusus, penulis mengucapkan terima kasih yang dalam kepada Fauzi Azmi, atas dukungan tanpa batas, kesabaran, serta kehadirannya yang selalu menjadi kekuatan dari awal hingga akhir proses ini.

Penulis menyadari bahwa karya ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan di masa mendatang. Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang pangan, dan menjadi kontribusi kecil yang berarti bagi siapa pun yang membacanya.

Bogor, Agustus 2025

Belinda Nurulhikam Pratadi



DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xi
GLOSARIUM	xii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	2
II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Yogurt	3
2.2 Asam Gamma-Aminobutirat	4
2.3 Kapasitas Menahan Air Yogurt	5
2.4 Penyimpanan Dingin terhadap Kualitas Yogurt	6
2.5 Meta-Analisis	7
III METODE	11
3.1 Waktu dan Tempat	11
3.2 Alat dan Bahan	11
3.3 Prosedur Kerja	11
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	16
4.1 Analisis Sumber Studi dan Meta-Analisis	16
4.2 Analisis Bias Publikasi	18
4.3 <i>Forest Plot</i> dan Uji <i>Random Effect Model</i>	20
4.4 Analisis Subkelompok	23
V SIMPULAN DAN SARAN	35
5.1 Simpulan	35
5.2 Saran	35
DAFTAR PUSTAKA	36
LAMPIRAN	42
RIWAYAT HIDUP	48

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR TABEL

1	Kriteria inklusi dan eksklusi	12
2	Identitas artikel penelitian yang digunakan dalam meta-analisis	17
3	Uji <i>random effect model</i> studi	21
4	Uji heterogenitas studi	23
5	Hasil <i>forest plot</i> subkelompok jenis <i>starter</i>	24
6	Hasil <i>forest plot</i> subkelompok jenis susu	28
7	Hasil <i>forest plot</i> subkelompok durasi penyimpanan	32

DAFTAR GAMBAR

1	Struktur kimia GABA (Yan <i>et al.</i> 2019)	4
2	Mekanisme biosintesis GABA (Sun <i>et al.</i> 2022)	4
3	Diagram alir kajian meta-analisis (Tawfik <i>et al.</i> 2019)	8
4	Ilustrasi <i>forest plot</i> dalam hasil meta-analisis (Retnawati <i>et al.</i> 2018)	10
5	Diagram alir tahapan penelitian	11
6	Ilustrasi diagram alir seleksi studi berdasarkan metode PRISMA	13
7	Skema pencarian dan penyeleksian sumber studi	16
8	Diagram <i>funnel plot</i> bias publikasi studi kandungan GABA	19
9	Diagram <i>funnel plot</i> bias publikasi studi kapasitas menahan air	19
10	<i>Forest plot</i> pengaruh penyimpanan dingin terhadap kandungan GABA	21
11	<i>Forest plot</i> pengaruh penyimpanan dingin terhadap kapasitas menahan air	22
12	<i>Forest plot</i> subkelompok jenis <i>starter</i> terhadap kandungan GABA	26
13	<i>Forest plot</i> subkelompok jenis <i>starter</i> terhadap kapasitas menahan air	27
14	<i>Forest plot</i> subkelompok jenis susu terhadap kandungan GABA	30
15	<i>Forest plot</i> subkelompok jenis susu terhadap kapasitas menahan air	31
16	<i>Forest plot</i> subkelompok durasi penyimpanan terhadap kandungan GABA	33
17	<i>Forest plot</i> subkelompok durasi penyimpanan terhadap kapasitas menahan air	34

DAFTAR LAMPIRAN

1	Rekapitulasi data meta-analisis terhadap kandungan GABA	42
2	Rekapitulasi data meta-analisis uji stabilitas kapasitas menahan air	45



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

GLOSARIUM

Asam gamma-aminobutirat (GABA)	: Senyawa bioaktif yang berperan sebagai neurotransmitter inhibitor utama dalam sistem saraf pusat manusia
Bakteri asam laktat	: Kelompok bakteri yang mengubah karbohidrat (glukosa dan laktosa) menjadi asam laktat melalui proses fermentasi
<i>Confidence interval</i> (CI) 95%	: Rentang nilai yang digunakan dalam statistik untuk mengestimasi parameter populasi dengan tingkat kepercayaan 95%.
Dekarboksilasi	: Reaksi kimia di mana gugus karboksil dari suatu senyawa organik dilepaskan dalam bentuk gas karbon dioksida (CO ₂)
<i>Effect size</i>	: Ukuran statistik untuk menunjukkan besarnya pengaruh atau perbedaan antara dua kelompok dalam suatu penelitian
Eksopolisakarida (EPS)	: Polisakarida yang disintesis dan dikeluarkan oleh mikroorganisme ke lingkungan sekitar selama proses metabolisme atau fermentasi
Enzim <i>glutamate decarboxylase</i> (GAD)	: Enzim yang mengkatalisi dekarboksilasi glutamat menjadi asam gamma-aminobutirat (GABA) dan karbon dioksida (CO ₂)
Neurotransmitter	: Senyawa kimia yang berfungsi sebagai pembawa pesan antar neuron di sistem saraf
<i>Random effects model</i>	: Pendekatan statistik dalam meta-analisis untuk menggabungkan hasil dari berbagai studi dengan mengasumsikan bahwa perbedaan antara studi tidak hanya berasal dari kesalahan pengambilan sampel
<i>Standardized mean difference</i> (SMD)	: Ukuran statistik dalam meta-analisis untuk menunjukkan besarnya perbedaan rata-rata antara dua kelompok yang distandarisasi terhadap simpangan bakunya.
Sineresis	: Fenomena di mana cairan keluar dari matriks gel atau sistem koloid akibat terjadinya penyusutan atau pemedatan struktur internal



I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Yogurt merupakan produk hasil fermentasi susu oleh bakteri asam laktat, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* dan *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus*, yang secara luas dikonsumsi karena meningkatkan daya cerna laktosa, memperkaya kandungan nutrisi, dan memberikan efek probiotik bagi kesehatan usus (Azizan *et al.* 2022). Yogurt kaya akan nutrisi seperti protein berkualitas tinggi, kalsium, vitamin B12, dan riboflavin (B2) (El-Gammal *et al.* 2017). Proses fermentasi menghasilkan asam laktat yang dapat menurunkan pH susu, menyebabkan koagulasi kasein, dan membentuk struktur gel yang khas. Struktur gel tersebut terbentuk karena bakteri asam laktat memecah laktosa menjadi asam laktat.

Di samping kandungan nutrisinya, yogurt mengandung senyawa bioaktif seperti asam gamma-aminobutirat (GABA), yaitu asam amino non-protein yang berperan sebagai neurotransmitter inhibitor utama di sistem saraf pusat manusia (Li *et al.* 2023). GABA terbentuk melalui dekarboksilasi asam glutamat oleh enzim *glutamate decarboxylase* (GAD) yang dimiliki oleh beberapa bakteri asam laktat (Mei *et al.* 2016). Konsumsi yogurt kaya GABA dapat menurunkan tekanan darah, meningkatkan kualitas tidur, mengurangi gejala depresi, dan memperbaiki fungsi kognitif (Nishimura *et al.* 2015). Oleh karena itu, yogurt dapat dikembangkan menjadi pangan fungsional yang tidak hanya bergizi, tetapi juga memberi manfaat fisiologis spesifik. Mutu tekstur yogurt merupakan parameter penting yang perlu dijaga untuk mempertahankan penerimaan konsumen. Salah satu indikator mutu tekstur yogurt adalah kapasitas menahan air, yaitu kemampuan produk untuk mempertahankan kandungan air di dalam matriks gel yang membentuk teksturnya. Indikator ini berperan dalam menentukan kestabilan tekstur, mengurangi sineresis (pemisahan whey), dan menjaga kenampakan serta konsistensi produk (El Bouchikhi *et al.* 2019).

Namun, mutu fungsional dan tekstur yogurt dapat mengalami perubahan selama tahap pasca fermentasi, khususnya selama penyimpanan. Meskipun diperlukan untuk memperpanjang masa simpan dan menjaga viabilitas mikroba, penyimpanan pada suhu rendah (4-6°C) dapat memicu perubahan tekstur dan kandungan fungsional (de Souza *et al.* 2024). Penurunan kandungan GABA diakibatkan oleh degradasi mikroba residual atau reaksi kimia selama penyimpanan sedangkan penurunan kapasitas menahan air mengindikasikan sineresis (Linares *et al.* 2016).

Beberapa studi melaporkan hasil yang tidak konsisten. Penelitian oleh Hussin *et al.* (2021) menunjukkan bahwa kandungan GABA meningkat sebesar 93% selama 21 hari penyimpanan pada suhu 2-4°C akibat aktivitas enzim GAD yang berlanjut, sementara kapasitas menahan air menurun sebesar 11,70-15,03% akibat terjadinya relaksasi struktur gel dan aktivitas mikroba residual. Akan tetapi, penelitian oleh Keser dan Ozcar (2025) menemukan bahwa kapasitas menahan air tetap stabil tetapi kandungan GABA mengalami degradasi yang signifikan sebanyak 69,56%. Variasi hasil ini dapat disebabkan oleh perbedaan jenis bakteri *starter*, media susu, lama penyimpanan, dan parameter proses fermentasi lainnya.



Oleh karena itu, diperlukan sintesis sistematis terhadap penelitian-penelitian tersebut untuk menarik kesimpulan yang lebih kuat dan berbasis statistik.

Melalui pendekatan meta-analisis, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penyimpanan dingin pasca fermentasi terhadap stabilitas kandungan GABA dan kapasitas menahan air pada yogurt. Meta-analisis dipilih karena mampu menyatukan temuan dari berbagai studi primer secara kuantitatif dan sistematis, sehingga menghasilkan kesimpulan yang lebih kuat dan dapat digeneralisasi (Schmidt *et al.* 2019). Dalam konteks pangan fungsional seperti yogurt, pemahaman mengenai stabilitas senyawa bioaktif dan karakteristik tekstur selama penyimpanan menjadi krusial untuk menjamin konsistensi mutu dan efektivitas produk bagi konsumen. Kajian ini juga mengeksplorasi faktor-faktor memengaruhi seperti durasi penyimpanan dingin, jenis bakteri *starter* yang digunakan, dan bahan baku susu yang mungkin memengaruhi kedua parameter tersebut. Hasil penelitian ini diharapkan mampu menyusun rekomendasi teknis berbasis data yang aplikatif bagi industri pengolahan yogurt fungsional yang stabil secara kualitas dan bernilai tambah tinggi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penyimpanan dingin pasca fermentasi terhadap kandungan GABA pada yogurt?
2. Bagaimana pengaruh penyimpanan dingin pasca fermentasi terhadap stabilitas kapasitas menahan air yogurt?
3. Faktor-faktor apa saja yang menyebabkan perbedaan hasil pengaruh penyimpanan dingin terhadap kandungan GABA dan kapasitas menahan air pada berbagai studi?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis pengaruh penyimpanan dingin pasca fermentasi terhadap kandungan GABA dan kapasitas menahan air yogurt.
2. Mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi perbedaan pengaruh penyimpanan dingin terhadap kandungan GABA dan kapasitas menahan air yogurt.

1.4 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi berbasis data mengenai kondisi penyimpanan dingin yang optimal untuk menghasilkan yogurt dengan kandungan GABA yang tinggi dan kapasitas menahan air yang stabil, sehingga dapat menjadi acuan dalam pengembangan produk yogurt fungsional yang berkualitas tinggi.



II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Yogurt

Yogurt merupakan salah satu produk fermentasi susu yang diperoleh melalui aktivitas bakteri asam laktat, terutama *Lactobacillus bulgaricus* dan *Streptococcus thermophilus*. Proses fermentasi ini memanfaatkan laktosa dalam susu yang dipecah menjadi glukosa dan galaktosa, kemudian dimetabolisme melalui jalur glikolisis menjadi asam pivurat (Wang *et al.* 2021). Asam piruvat selanjutnya difermentasi menjadi asam laktat yang menyebabkan penurunan pH hingga sekitar 4,6. Penurunan pH ini memicu koagulasi protein susu, terutama kasein, sehingga terbentuk struktur gel dan cita rasa asam khas yogurt (Syainah *et al.* 2014). Dari segi nilai gizi, yogurt mengandung protein (3,5-4,5 g/100 g), kalsium (120-150 mg/100 g), vitamin B2, dan probiotik yang berperan dalam meningkatkan saluran pencernaan dan memperkuat sistem imun (Hadjimbei *et al.* 2022).

Tahapan produksi yogurt diawali dengan pemanasan susu pada suhu 60-69°C selama 20-30 detik untuk menonaktifkan mikroorganisme patogen dan mendenaturasi protein, yang berkontribusi terhadap pembentukan gel yang stabil. Setelah pemanasan, susu didinginkan ke suhu inkulasi sebelum ditambahkan kultur *starter*, yang umumnya merupakan kombinasi *L. bulgaricus* dan *S. thermophilus* dengan rasio 1:1 atau ditambahkan bakteri asam laktat lain sesuai kebutuhan formulasi. Proses fermentasi berlangsung selama 4-8 jam hingga pH mencapai sekitar turun 4,6. Setelah fermentasi selesai, yogurt segera didinginkan dan disimpan pada suhu di bawah 5°C untuk menghentikan aktivitas mikroba dan menjaga kualitas produk selama penyimpanan (Sfakianakis dan Tzia 2014).

Seiring dengan perkembangan teknologi fermentasi, yogurt tidak hanya dimanfaatkan sebagai sumber gizi, tetapi juga sebagai media pembawa senyawa bioaktif, salah satunya adalah asam gamma-aminobutirat (GABA). GABA dapat diproduksi dalam yogurt melalui konversi asam glutamat oleh bakteri tertentu seperti *Lactobacillus plantarum* dan *Lactobacillus brevis*, dengan efisiensi konversi yang dapat mencapai 80-90% (Iorizzo *et al.* 2024). Penelitian oleh Diez-Gutiérrez *et al.* (2022) menunjukkan bahwa yogurt dengan *L. plantarum* menghasilkan GABA hingga 128 mg/L, jauh lebih tinggi dibandingkan yogurt komersial yang hanya mengandung kurang dari 10 mg/L.

Selain kandungan GABA, mutu yogurt juga dipengaruhi oleh parameter tekstur, terutama kapasitas menahan air. Parameter ini mengacu pada kemampuan struktur gel yogurt dalam mempertahankan air di dalam matriksnya, yang berperan penting dalam mencegah terjadinya sineresis, yaitu keluarnya cairan whey dari permukaan yogurt selama penyimpanan (Sumarmono 2016). Stabilitas kapasitas menahan air dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis dan aktivitas bakteri asam laktat, durasi dan suhu fermentasi, serta komposisi susu (Puvanenthiran *et al.* 2014). Beberapa jenis bakteri asam laktat mampu menghasilkan eksopolisakarida (EPS), yaitu polisakarida yang disintesis dan dilepaskan ke lingkungan sekitar sel. EPS berfungsi sebagai agen pengental alami yang mampu mengikat air dalam matriks protein sehingga dapat meningkatkan viskositas, memperkuat stabilitas fisik, dan menurunkan laju terjadinya sineresis.

2.2 Asam Gamma-Aminobutirat

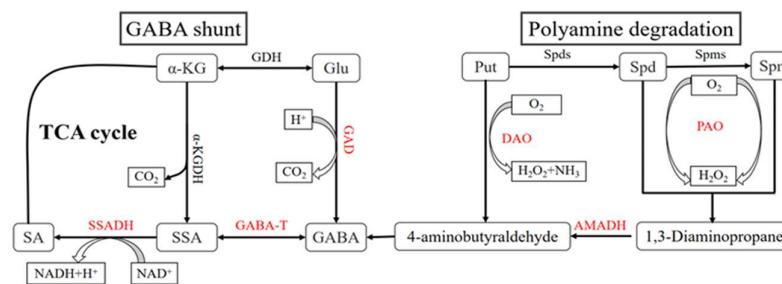
Asam gamma-aminobutirat (GABA) merupakan asam amino non-protein yang terbentuk dari dekarboksilasi asam glutamat melalui enzim *glutamate decarboxylase* (GAD) (Mei *et al.* 2016). Senyawa ini secara alami ditemukan pada tumbuhan, mikroorganisme, hewan, dan manusia. Dalam pangan, GABA dapat menurunkan tekanan darah (antihipertensi), menenangkan sistem saraf pusat (*anxiolytic*), dan meningkatkan kualitas tidur (Sheffler *et al.* 2023). GABA berfungsi untuk memperlambat kerja otak dengan menghalangi sinyal-sinyal yang datang pada sistem saraf pusat tubuh, yaitu otak dan sumsum tulang belakang (Sheffler *et al.* 2023). Oleh karena itu, GABA banyak diteliti dalam pengembangan yogurt fungsional.

Molekul GABA ($C_4H_9NO_2$) terdiri atas gugus karboksil yang mengikat atom karbon pertama dan gugus amin pada posisi γ (gamma) yang mengikat karbon keempat dari gugus karboksil, menjadikannya termasuk ke golongan asam amino gamma. Struktur GABA yang relatif sederhana, fleksibel, dan stabil memungkinkannya beradaptasi dengan berbagai kondisi lingkungan. Oleh karena itu, GABA dapat berperan sebagai *neurotransmitter* yang mengaktifasi saluran ion untuk mengalirkan ion klorida dan natrium dalam sel saraf sehingga mengurangi aktivitas neuron dan membantu mengurangi kecemasan, ketegangan otot, dan beberapa proses fisiologis lainnya (Khanal *et al.* 2021). Struktur kimia GABA dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Struktur kimia GABA (Yan *et al.* 2019)

Biosintesis GABA terjadi melalui dua jalur utama, yaitu jalur GABA *shunt* dan jalur degradasi poliamina. Jalur GABA *shunt* merupakan jalur sintesis utama karena 70% GABA diproduksi dalam kondisi anaerobik melalui dekarboksilasi ireversibel asam glutamat oleh enzim GAD pada karbon α dengan pelepasan CO_2 (Liao *et al.* 2017). Aktivitas enzim GAD dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, dengan pH optimal 5,5-6,5 dan suhu optimal 30-37°C (Kanklai *et al.* 2022; Van *et al.* 2019). Selain itu, jalur degradasi poliamina melibatkan konversi putresin membentuk 4-aminobutiraldehida (ABAL) lalu diubah menjadi GABA melalui enzim aldehida dehidrogenase (Sun *et al.* 2022). Ilustrasi biosintesis GABA dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Mekanisme biosintesis GABA (Sun *et al.* 2022)



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbaik sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Secara fisiologis, GABA memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan aktivitas neuronal dengan menjadi *neurotransmitter* inhibitor utama dalam sistem saraf pusat. Penelitian terbaru menunjukkan potensi GABA dalam mengurangi gejala gangguan spektrum autisme (ASD) melalui mekanisme neuroprotekif dan mengatur mikrobiota usus di mana suplementasi probiotik yang meningkatkan produksi GABA terbukti dapat mengurangi kecemasan dan memperbaiki kualitas tidur pada anak-anak dengan ASD (Bjørklund *et al.* 2023).

Adanya senyawa GABA juga dapat mengubah karakteristik permukaan protein susu (Chun *et al.* 2014). Gugus amino dan karboksilat GABA dapat berinteraksi dengan gugus amino pada protein susu sehingga menyebabkan gugus protein termodifikasi. Interaksi ini meningkatkan muatan negatif yang mengurangi tolakan elektrostatis antarmolekul dan membentuk ikatan silang yang memperkuat struktur jaringan gel, menjadikannya lebih stabil dan padat (Wang *et al.* 2019).

2.3 Kapasitas Menahan Air Yogurt

Kapasitas menahan air merupakan jumlah air yang dapat terperangkap oleh matriks protein saat dikenai gaya luar seperti penekanan, sentrifugasi, atau pemanasan (Shen *et al.* 2022). Pada yogurt, kapasitas menahan air berkaitan dengan kemampuan kasein susu untuk membentuk struktur gel tiga dimensi yang stabil selama fermentasi. Proses pengasaman oleh bakteri *starter* menyebabkan misel kasein saling berasosiasi, membentuk jaringan yang menjebak air dalam porinya dan menghambat terjadinya sineresis (Abdelmoneim *et al.* 2016). Kepadatan dan kohesivitas jaringan protein menentukan kapasitas menahan air dengan mengikat air dalam matriks gel. Dalam makanan, jaringan gel menciptakan matriks, sementara interaksi kimia seperti ikatan hidrogen dan interaksi ionik semakin menstabilkan air dalam struktur tersebut (Abdelmoneim *et al.* 2016).

Beberapa faktor intrinsik dan ekstrinsik dapat memengaruhi kapasitas menahan air. Salah satu faktor utama adalah pH, di mana pada titik isoelektrik protein, muatan bersih protein berkurang, menyebabkan agregasi protein-protein yang mengarah pada pengeluaran air dan penurunan kapasitas menahan air (Cheng dan Sun 2018). Kandungan protein dan serat pangan yang tinggi dapat meningkatkan kapasitas menahan air menyediakan lebih banyak situs pengikatan air, memperkuat struktur gel, dan meningkatkan retensi air (Tarahi *et al.* 2024). Suhu dan durasi penyimpanan dapat memengaruhi stabilitas gel dan kemampuan produk dalam mempertahankan air. Penyimpanan yang terlalu lama atau perubahan suhu dapat merusak struktur gel dan mengurangi kapasitas menahan air.

Secara fisik, kapasitas menahan air yang lemah cenderung menunjukkan tingkat sineresis yang lebih tinggi, yang mengakibatkan pemisahan air yang terlihat, berkurangnya kesegaran, dan tekstur yang lebih kering (Al-Kaisy dan Rahi 2023). Sebaliknya, kapasitas menahan air yang kuat dicirikan oleh struktur yang kuat dan kohesif dengan kehilangan air yang minimal, sensasi mulut (*mouthfeel*) yang lebih baik, dan stabilitas produk yang lebih baik. Faktor yang dapat memperkuat kapasitas menahan air yogurt meliputi penggunaan bakteri tertentu yang dapat menghasilkan gel yang lebih padat dan pemilihan jenis susu dengan kandungan protein yang lebih tinggi (Gyawali *et al.* 2022). Selain itu, suhu fermentasi yang lebih rendah atau penggunaan teknik fermentasi yang lebih terkontrol dapat meningkatkan pembentukan struktur gel yang lebih kuat, yang pada gilirannya memperbaiki kemampuan yogurt untuk menahan air (Li *et al.* 2023). Penambahan



hidrokoloid dan stabilisator seperti pektin, xanthan gum, guar gum, dan pati termodifikasi dapat meningkatkan viskositas dan kekuatan gel serta meningkatkan retensi air (Unur *et al.* 2024).

Selama penyimpanan dingin, kapasitas menahan air sangat penting pada yogurt karena dapat memengaruhi kestabilan produk dalam jangka panjang. Penelitian oleh Li *et al.* (2023) menunjukkan bahwa kapasitas menahan air pada awalnya meningkat seiring dengan stabilisasi jaringan gel, namun penyimpanan jangka panjang dapat menyebabkan penurunan kapasitas menahan air secara bertahap, sehingga mengakibatkan peningkatan sineresis dan kerusakan tekstur. Penurunan ini biasanya terjadi karena dehidrasi atau perubahan dalam struktur gel yang terjadi selama penyimpanan dingin. Namun, penggunaan stabilisator, serat makanan, dan kondisi pemrosesan yang optimal dapat mengurangi efek ini sekaligus mempertahankan kapasitas menahan air dan kualitas produk yang tinggi selama penyimpanan.

2.4 Penyimpanan Dingin terhadap Kualitas Yogurt

Penyimpanan dingin merupakan teknik konservasi pangan dengan menurunkan suhu untuk memperlambat aktivitas mikroba dan enzim yang dapat menurunkan mutu dan mempercepat kerusakan produk (Mafe *et al.* 2024). Suhu penyimpanan dapat bervariasi sesuai dengan jenis produk, pada yogurt umumnya dilakukan pada suhu 4-5°C. Penyimpanan dingin dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme patogen, memperlambat proses pembusukan, dan mempertahankan kesegaran produk (Taormina 2021). Selain itu, penurunan suhu dapat memperlambat aktivitas enzim yang dapat merusak rasa, tekstur, dan kandungan gizi produk (Erkmen dan Bozoglu 2016).

Beberapa metode penyimpanan dingin yang umum digunakan dalam industri pangan meliputi refrigerasi (0-5°C), pembekuan (< -18°C), dan *controlled atmosphere storage* (Mafe *et al.* 2024). Refrigerasi merupakan penyimpanan pada suhu sekitar 0-5°C yang digunakan untuk produk pangan seperti sayuran, daging, dan produk susu. Pembekuan merupakan teknik penyimpanan pada suhu di bawah -18°C untuk produk pangan yang membutuhkan umur simpan lebih lama. Pembekuan menghentikan aktivitas mikroba dan memperlambat laju reaksi kimia yang dapat merusak kualitas produk (Evans 2016). *Controlled Atmosphere (CA) Storage* adalah penyimpanan dengan pengaturan kandungan oksigen, karbon dioksida, dan nitrogen untuk memperlambat proses respirasi pada buah-buahan dan sayuran (Dumont *et al.* 2016).

Standar mutu nasional merekomendasikan penyimpanan yogurt di bawah 7°C, dengan 4-5°C ideal untuk mempertahankan mutu hingga 1-2 minggu (Isima *et al.* 2024). Penelitian oleh Mansor *et al.* (2025) menunjukkan bahwa suhu dingin dapat menjaga aktivitas metabolismik terbatas dari bakteri asam laktat, mencegah degradasi gizi, serta mengurangi fluktuasi pH yang berlebihan selama masa simpan. Dengan berjalaninya masa simpan, terjadi pula peningkatan jumlah bakteri asam laktat total dan aerob (akibat pasca fermentasi berkelanjutan), diikuti oleh penurunan pH dan kenaikan keasaman *titratable* (Mansor *et al.* 2025).

Selama penyimpanan dingin, jaringan protein casein dalam yogurt mengalami restrukturisasi akibat perubahan fisik dan kimiawi. Seiring berjalaninya waktu, interaksi antar jaringan melemah akibat perubahan ikatan hidrogen, relaksasi jaringan, dan degradasi mikrostruktur protein yang menyebabkan



pelepasan air dan peningkatan sineresis (Hoxha *et al.* 2023). Suhu yang terlalu tinggi dengan penyimpanan yang lama dapat mempercepat denaturasi protein dan menurunkan afinitas protein terhadap air, sehingga menurunkan kapasitas menahan air.

Yogurt juga mengandung probiotik yang memiliki berbagai manfaat kesehatan usus dan imun. Penyimpanan dingin dapat mempertahankan viabilitasnya, dibuktikan dengan penelitian oleh Hoxha *et al.* (2023) yang menyatakan tidak terjadi penurunan signifikan jumlah bakteri asam laktat selama 28 hari penyimpanan di 4°C dengan jumlah sel tetap di atas 10^8 cfu/g. Kondisi ini juga berpengaruh pada keberlangsungan metabolit yang dihasilkan bakteri, termasuk GABA. Aktivitas bakteri yang menghasilkan enzim GAD ini tetap berjalan secara terbatas pada suhu 4°C, sehingga menunjukkan akumulasi GABA dalam jangka waktu tertentu. Zhu *et al.* (2024) menunjukkan bahwa kadar GABA yoghurt tetap sekitar 75 mg/100 g setelah 3 minggu simpan pada 4°C. Namun demikian, suhu yang terlalu rendah atau penyimpanan yang terlalu panjang dapat menginaktivasi aktivitas bakteri, seperti ditunjukkan oleh Olson dan Aryana (2022) yang melaporkan penurunan jumlah *Lactobacillus acidophilus* dari $1,5 \times 10^8$ menjadi 4×10^6 cfu/g setelah yogurt dibekukan pada -29°C selama 17 minggu.

2.5 Meta-Analisis

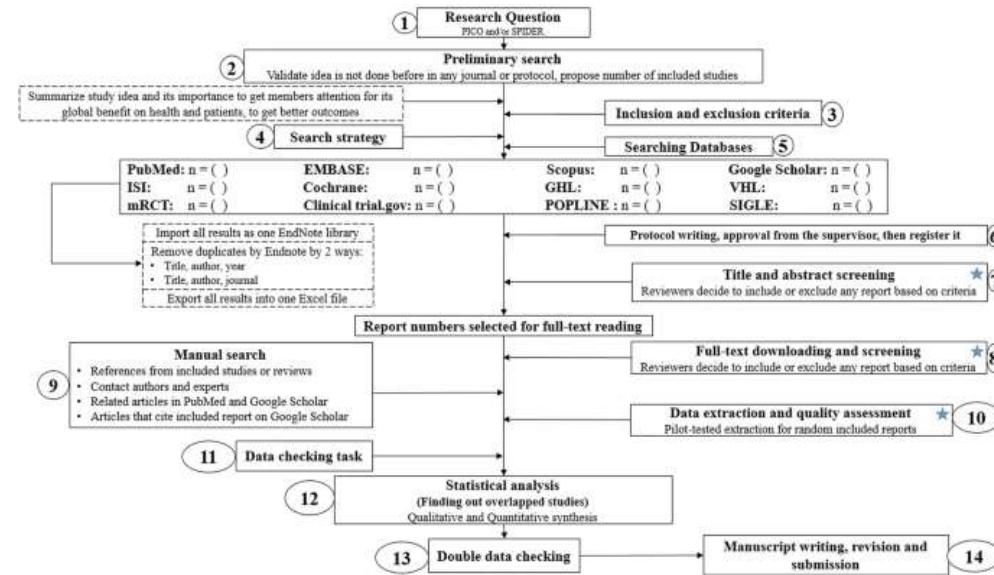
Meta-analisis merupakan bagian dari pendekatan kajian sistematis, yaitu metode penelitian yang dilakukan dengan menggabungkan data kuantitatif yang relevan dari berbagai sumber secara sistematis guna memperoleh kesimpulan yang lebih kuat melalui analisis statistik. Kesimpulan yang dihasilkan melalui meta-analisis dinilai lebih kuat dibandingkan hasil dari satu studi tunggal karena melibatkan jumlah subjek yang lebih besar, variasi data yang lebih luas, serta akumulasi perlakuan dan respons hasil dari berbagai penelitian. Oleh karena itu, metode ini banyak digunakan untuk menguji validitas teori ilmiah. Aspek-aspek yang dikaji dalam meta-analisis mencakup nilai rata-rata, simpangan baku, uji keberagaman, dan meta-regresi (Gurevitch *et al.* 2018). Pendekatan ini telah banyak diterapkan dalam berbagai bidang ilmu, termasuk ilmu kedokteran, pendidikan, dan sosial (Higgins dan Green 2019).

Tujuan utama meta-analisis adalah untuk mengidentifikasi pola umum dari hasil berbagai penelitian dan untuk mengurangi bias yang mungkin terdapat pada penelitian individual (Hunter dan Schmidt 2015). Dengan melakukan meta-analisis, peneliti dapat memperoleh estimasi efek perlakuan yang lebih presisi dan memberikan pemahaman lebih mendalam terhadap faktor-faktor yang memengaruhi hasil, sehingga dapat menjadi landasan yang lebih kuat untuk pengambilan keputusan (Schmidt *et al.* 2019). Selain itu, meta-analisis membantu menghindari bias interpretasi yang mungkin terjadi ketika hanya mengandalkan satu atau beberapa studi saja, terutama pada studi dengan jumlah sampel kecil atau hasil yang inkonsisten (Lin 2018).

Terdapat beberapa tahapan untuk mengkaji penelitian dengan metode meta-analisis, yaitu perumusan pertanyaan penelitian, penelitian pendahuluan dan validasi ide, penentuan kriteria inklusi dan eksklusi, pengumpulan sumber penelitian, ekstraksi data, dan analisis statistik. Tahap pertama dalam meta-analisis adalah merumuskan pertanyaan penelitian. Pertanyaan seharusnya logis dan didefinisikan dengan baik dan jelas. Terdapat dua metode pendekatan yang

umumnya digunakan, yaitu PICO (*Population, Intervention, Comparison, dan Outcome*) dan SPIDER (*Sample, Phenomenon of Interest, Design, Evaluation, dan Research Type*) (Tawfik *et al.* 2019). Perbedaan dari kedua metode tersebut terletak pada tipe penelitiannya, PICO berfokus pada data kuantitatif sedangkan SPIDER untuk data kualitatif sehingga metode PICO lebih sesuai untuk kajian meta-analisis (Cook dan West 2012).

Tahap selanjutnya yaitu identifikasi dan pengumpulan literatur yang relevan serta memvalidasi ide yang diajukan. Pengumpulan literatur dilakukan secara sistematis dengan kata kunci relevan melalui *database* ilmiah seperti PubMed, Scopus, dan Google Scholar. Diagram alir PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis*) digunakan untuk membantu pencarian literatur (Moher *et al.* 2015). Pengumpulan sumber penelitian berdasarkan grafik PRISMA dilakukan melalui empat tahap yaitu identifikasi, seleksi, kelayakan, dan terakhir pengambilan beberapa literatur terpilih. Setelah mengidentifikasi studi yang relevan, peneliti menentukan kriteria inklusi dan eksklusi untuk memilih studi yang memenuhi syarat untuk dimasukkan ke dalam meta-analisis. Kriteria ini bisa didasarkan pada jenis penelitian, populasi studi, metode yang digunakan, atau kualitas studi. Kriteria inklusi dan eksklusi yang ketat membantu mengurangi bias dan meningkatkan kepercayaan terhadap hasil analisis (Higgins dan Green 2019). Diagram alir prosedur kajian meta-analisis dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Diagram alir kajian meta-analisis (Tawfik *et al.* 2019)

Tahap analisis kemudian melibatkan pengolahan dan analisis data dari studi-studi yang telah diseleksi yang kemudian diekstrak dengan cara dimasukkan secara terpisah ke dalam *spreadsheets* Excel. Data yang diperlukan untuk meta-analisis mencakup rata-rata, standar deviasi, dan ukuran sampel untuk perlakuan uji dan kontrol. Analisis statistik ini membantu dalam menggabungkan hasil studi secara objektif, sehingga dapat menghasilkan *effect size* yang lebih reliabel. *Effect size* adalah persamaan matematika yang mengukur seberapa besar efek faktor yang dianalisis dalam sebuah penelitian, yang memungkinkannya digunakan untuk memperkirakan pentingnya efek dan jumlah dampak yang terjadi (Khairunnisa *et*



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

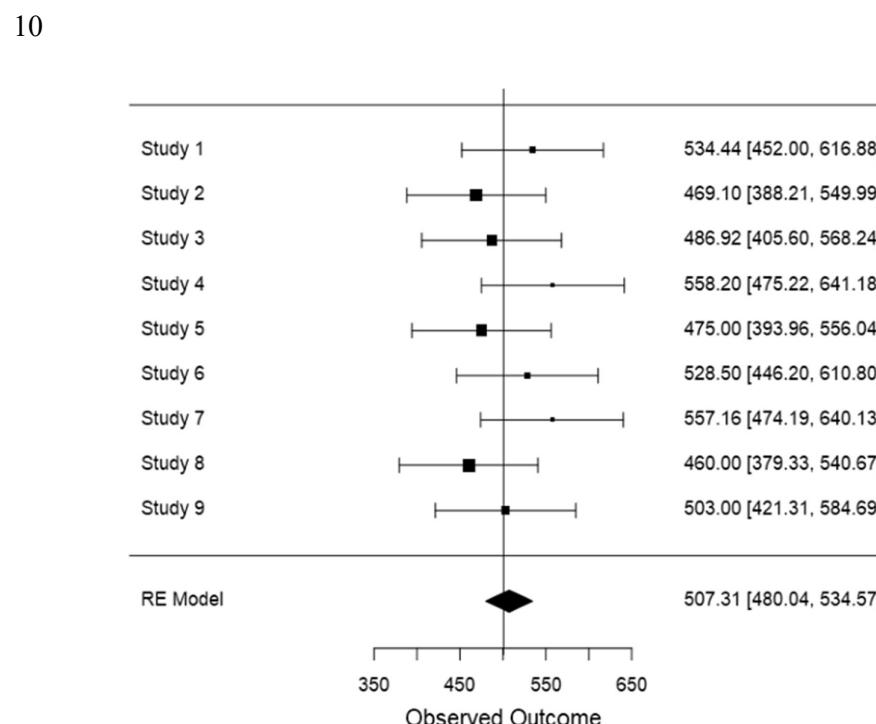
b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

al. 2022). *Effect size* dalam meta-analisis biasanya diklasifikasikan menjadi dua model, yaitu *fixed-effects* atau *random-effects model*, tergantung pada derajat heterogenitas data (Borenstein *et al.* 2021). Model *fixed-effects* mengasumsikan bahwa penelitian yang dianalisis tidak memiliki perbedaan atau homogen, sedangkan model *random-effects* mengasumsikan bahwa penelitian yang dianalisis adalah sampel acak dari populasi dengan komponen varians baik di antara maupun di dalam penelitian. *Effect size* merupakan ukuran kekuatan efek suatu perlakuan dengan menstandarisasi data penelitian, memastikan interpretasi yang konsisten di seluruh faktor dan ukuran. Akibatnya, salah satu langkah penting dalam meta-analisis adalah menentukan *effect size* yang mewakili temuan kuantitatif dari beberapa investigasi penelitian sekaligus memungkinkan perbandingan dan analisis numerik yang cukup besar di seluruh pengaturan studi.

Hasil meta-analisis divisualisasikan dalam bentuk *forest plot*, yang menggambarkan hasil studi secara keseluruhan dan individual. *Forest plot* terdiri atas garis horizontal dan vertikal, di mana garis vertikal merupakan garis nol atau acuan. Setiap garis horizontal menunjukkan hasil dari satu studi, termasuk nilai *effect size*, *confidence interval* 95%, dan nilai heterogenitas (I^2). *Confidence interval* (CI) menunjukkan estimasi batas atas dan batas bawah dari nilai *effect size* yang sebenarnya. Apabila CI tidak memotong garis nol, maka hasil dianggap signifikan secara statistik. Kotak berwarna hitam pada setiap garis menunjukkan nilai *effect size* dari masing-masing studi, di mana ukuran kotak menggambarkan bobot atau kekuatan data dari studi tersebut. Studi dengan jumlah sampel besar dan variasi rendah akan memiliki bobot yang lebih besar, ditampilkan dengan kotak berukuran lebih besar. Bentuk wajik pada bagian bawah diagram menggambarkan nilai agregat dari seluruh studi yang dianalisis (Retnawati *et al.* 2018). Bentuk wajik pada bagian bawah merupakan agregat bobot *effect size* setiap penelitian.

Selain itu, analisis bias publikasi dapat dilakukan dengan metode Rosenthal's *fail-safe* diinterpretasikan dalam *software OpenMee* menunjukkan bias publikasi dalam meta-analisis. Rumus nilai N digunakan dalam Rosenthal's *fail-safe number* untuk menilai bias publikasi. Nilai N menunjukkan jumlah artikel yang diterbitkan yang membantah temuan meta-analisis yang penting. Jika angka N melebihi $5N + 10$ menunjukkan risiko bias publikasi rendah, yang menunjukkan model meta-analisis yang baik (Palupi *et al.* 2012). Gambaran hasil analisis dengan diagram *forest plot* dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Ilustrasi *forest plot* dalam hasil meta-analisis (Retnawati *et al.* 2018)

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



III METODE

3.1 Waktu dan Tempat

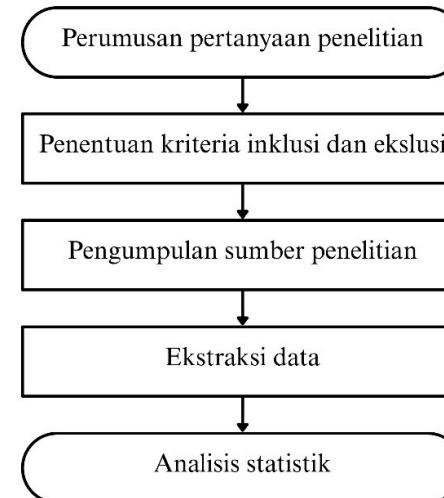
Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret hingga Juli 2025. Kegiatan pencarian literatur, seleksi artikel, analisis data, dan penyusunan pembahasan dilakukan di tempat tinggal dan tempat magang secara daring.

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan berupa laptop, jaringan internet, *Microsoft Excel*, *Zotero*, *Perish 8*, dan *OpenMEE*. Bahan yang digunakan dalam kajian meta-analisis ini berupa data yang diambil dari artikel yang dipublikasikan dalam jurnal nasional maupun internasional, serta *database* akademik terpercaya seperti *PubMed*, *ScienceDirect*, *Taylor & Francis*, *Google Scholar*, *Scopus*, *SpringerLink*, dan *Wiley Online Library*.

3.3 Prosedur Kerja

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis meta-analisis yang dimodifikasi dari penelitian oleh Tawfik *et al.* (2019). Tahapan penelitian meta-analisis yang akan dilakukan dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Diagram alir tahapan penelitian

3.3.1 Perumusan Pertanyaan Penelitian

Metode PICO (*Population*, *Intervention*, *Comparison*, *Outcome*) digunakan dalam perumusan pertanyaan. *Population* diartikan sebagai populasi dalam penelitian, *Intervention* mewakili variabel bebas atau kelompok eksperimen dalam penelitian, *Comparison* merupakan interferensi yang akan dibandingkan atau kelompok kontrol dalam penelitian, dan *Outcome* adalah hasil yang akan dicapai dari penelitian. Secara detail, metode PICO yang digunakan dalam penelitian meta-analisis ini adalah:

<i>Population (P)</i>	: Yogurt kaya senyawa GABA
<i>Intervention (I)</i>	: Yogurt setelah penyimpanan lebih dari 2 minggu



- Comparison (C)* : Yogurt sebelum penyimpanan
Outcome (O) : Nilai kandungan GABA dan kapasitas menahan air

3.3.2 Penentuan Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Artikel yang sudah diperoleh dan akan digunakan untuk pengolahan data meta-analisis diseleksi kesesuaianya berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Penentuan kriteria inklusi dan eksklusi dalam penelitian meta-analisis tercantum pada Tabel 1.

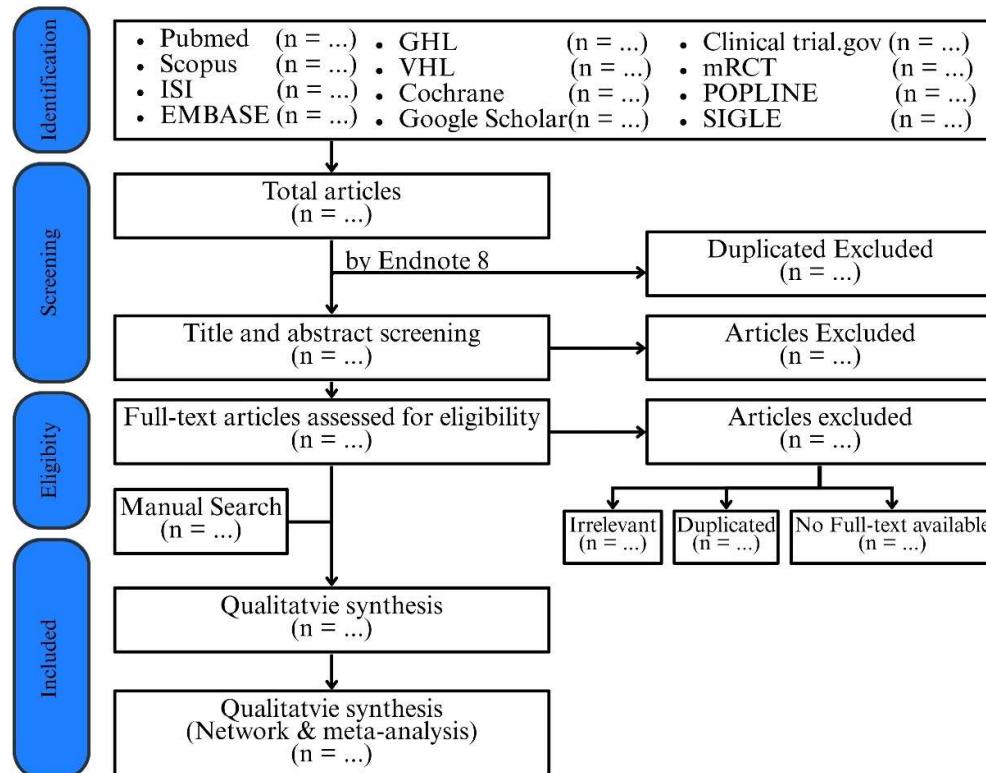
Tabel 1 Kriteria inklusi dan eksklusi

Kriteria inklusi	<ol style="list-style-type: none"> 1. Artikel merupakan artikel penelitian 2. Artikel membahas mengenai yogurt atau susu fermentasi memberikan jenis <i>starter</i> (wajib <i>Streptococcus thermophilus</i> dan <i>Lactobacillus bulgaricus</i>), jenis susu, durasi penyimpanan, nilai kandungan GABA, dan nilai kapasitas menahan air yang disuguhkan secara statistik 3. Tidak ada batasan bahasa artikel 4. Tidak terdapat batasan negara 5. Artikel memiliki batasan tahun publikasi maksimal 20 tahun terakhir 6. Artikel terakreditasi nasional (Sinta 1-3) dan internasional (Q1-Q4)
Kriteria eksklusi	<ol style="list-style-type: none"> 1. Artikel tidak berisi data lengkap berupa tidak ada kandungan GABA dan kapasitas menahan air selama penyimpanan 2. <i>Gray literature</i> (data berupa hasil laporan pemerintahan, skripsi, tesis, dan disertasi yang belum dipublikasikan) 3. Artikel tidak bereputasi atau terakreditasi 4. Artikel berasal dari <i>review</i>, buku, dan paten

3.3.3 Pengumpulan Sumber Penelitian

Pencarian sumber penelitian dilakukan untuk mengumpulkan artikel yang dapat digunakan untuk kajian meta-analisis. Saat mencari sumber penelitian, perlu digunakan kata kunci untuk memudahkan pencarian artikel atau jurnal yang relevan. Kata kunci yang digunakan dalam diantaranya “*gamma-aminobutyric acid*”, “GABA”, “*water-holding capacity*”, dan “yogurt”. Strategi pencarian menggunakan fungsi OR/AND/NOT pada *boolean operator* untuk mempersempit hasil pencarian. *Database* untuk mencari artikel adalah *Pubmed*, *ScienceDirect*, *Taylor & Francis*, *Google Scholar*, *Scopus*, *SpringerLink*, dan *Wiley Online Library*. Aplikasi manajemen literatur seperti diagram alur *Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analyses* (PRISMA) digunakan untuk mengelola hasil pencarian artikel berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Terdapat 5 langkah dalam metode PRISMA yaitu, 1) Pengumpulan data (melakukan penelusuran artikel yang relevan dengan penelitian di basis

data), 2) Penyaringan data (langkah yang dilakukan untuk memilih artikel berdasarkan kriteria yang ditentukan sebelumnya), 3) Integrasi data (mengintegrasikan referensi terpilih yang ditemukan dan akan dipilih), 4) Analisis data (menganalisis data terintegrasi), dan 5) Kesimpulan data (memberikan hasil penelitian) (Tariq *et al.* 2014). Koleksi artikel yang dihasilkan kemudian disusun menggunakan aplikasi pengelolaan literatur, yaitu *Zotero*. Diagram alir prosedur seleksi studi artikel dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Ilustrasi diagram alir seleksi studi berdasarkan metode PRISMA

3.3.4 Ekstraksi Data

Data dari artikel yang memenuhi kriteria inklusi diekstrak ke dalam *Microsoft Excel*. Data terdiri atas identitas artikel (judul, abstrak, tahun, penulis, nama jurnal, dan akreditasi) dan data penelitian (jenis *starter*, media fermentasi, durasi penyimpanan dingin, kandungan GABA, dan nilai kapasitas menahan air). Data kandungan GABA dan kapasitas menahan air selama penyimpanan dingin yang dicatat mencakup rata-rata, standar deviasi, dan jumlah ulangan untuk setiap eksperimen dan kontrol. Data yang diekstrak akan disusun pada lembar *Excel* berdasarkan parameter dan variabel yang sudah ditentukan.

3.3.5 Analisis Statistik

Pengolahan data pada penelitian ini dilakukan menggunakan *software OpenMEE*. Analisis yang dilakukan merupakan analisis bias publikasi, analisis *effect size*, dan analisis subkelompok (jenis *starter*, jenis susu, dan durasi penyimpanan dingin). Perhitungan *effect size* bertujuan untuk mengetahui



besarnya pengaruh dari suatu penelitian independen. Dalam meta-analisis, jenis *effect size* yang digunakan adalah *Hedges' d* untuk menggabungkan beberapa studi dan menghasilkan satu kesimpulan analisis statistik dengan nilai selang kepercayaan (*Confidence Interval*) 95% dan dikumpulkan dalam suatu model efek acak (*Random Effects Model*) (Afandi *et al.* 2021). Rumus perhitungan *effect size* dengan metode *Hedge's* adalah sebagai berikut:

$$d = \frac{\bar{X}_e - \bar{X}_c}{SD} \times J$$

Keterangan:

d = *effect size*

\bar{X}_e = rata-rata nilai kelompok eksperimen

\bar{X}_c = rata-rata nilai kelompok kontrol

SD = simpangan baku gabungan (*pooled*)

J = faktor koreksi

Rumus nilai simpangan baku gabungan (SD) dan faktor koreksi (J) adalah sebagai berikut:

$$SD = \sqrt{\frac{(Ne - 1)(SDe)^2 + (Nc - 1)(SDc)^2}{(Ne + Nc - 2)}}$$

$$J = 1 - \frac{3}{(4(Nc + Ne - 2) - 1)}$$

Keterangan:

N_c = jumlah sampel kelompok kontrol

N_e = jumlah sampel kelompok eksperimen

SD_c = simpangan baku kelompok kontrol

SDe = simpangan baku kelompok eksperimen

Setelah mendapatkan nilai *effect size* (d), nilai varian *Hedges' d* (V_d), simpangan baku (SD), dan bobot (Wd) dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$V_d = \frac{(N_c + N_e)}{(N_c \times N_e)} + \frac{d^2}{2(N_c + N_e)}$$

$$SD = \sqrt{V_d}$$

$$Wd = \sqrt{\frac{1}{V_d}}$$

Nilai *effect size* kumulatif (d_+) didapatkan dari rumus berikut:

$$d_+ = \frac{\sum_{i=1}^n Wd_i \times d_i}{\sum_{i=1}^n Wd_i}$$

Setelah mendapatkan nilai *effect size* kumulatif (d_+) dan simpangan baku gabungan (SD), nilai *p-value* dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:



$$z = \frac{d_+}{S}$$

$$p-value = 2 \times (1 - \Phi(|z|))$$

Hasil perhitungan *effect size* kumulatif dinyatakan sebagai *Standardized Mean Difference* (SMD) untuk menunjukkan seberapa besar perbedaan antara kedua kelompok (kontrol dan eksperimen) dalam satuan yang distandarisasi. Nilai SMD positif menunjukkan kelompok eksperimen meningkat sedangkan nilai SMD negatif adalah sebaliknya. Secara umum, nilai SMD sekitar 0,2 dikategorikan sebagai efek kecil, sekitar 0,5 sebagai efek sedang, dan di atas 0,8 sebagai efek besar (Andrade 2020). Nilai *p-value* adalah angka yang menunjukkan apakah nilai SMD benar-benar signifikan secara statistik atau hanya terjadi karena kebetulan. Jika *p-value* < 0,05, maka perbedaan antara kelompok eksperimen dengan kontrol dianggap signifikan secara statistik (Leo dan Sardanelli 2020).

Heterogenitas antar studi direpresentasikan menggunakan nilai statistik I^2 (Mikolajewicz dan Komarova 2019) dan bias publikasi diuji dengan Rosenthal's *fail-safe number* (Fragkos *et al.* 2014). Apabila nilai $I^2 > 75\%$, maka hasil analisis menunjukkan heterogenitas yang tinggi sehingga diperlukan analisis lanjutan dengan menganalisis subkelompok untuk melihat variabel lain yang memengaruhi (Afandi *et al.* 2021). Rumus heterogenitas (I^2) adalah sebagai berikut:

$$I^2 = \frac{Q - df}{Q} \times 100$$

$$Q = \sum Wd \times d^2 - \left(\frac{\sum Wd \times d^2}{\sum Wd} \right)$$

$$df = n - 1$$

Untuk menganalisis bias publikasi, *funnel plot* digunakan untuk mempresentasikan indikasi bias publikasi artikel yang digunakan dalam meta-analisis berdasarkan analisis visual. Apabila *funnel plot* berbentuk simetri maka tidak ditemukannya indikasi bias publikasi. Dalam memperkuat model meta-analisis yang digunakan, metode Rosenthal's *fail-safe number* umumnya digunakan di mana nilai yang melebihi $5N+10$ menandakan model analisis yang digunakan kuat dan tidak dipengaruhi bias publikasi (Palupi *et al.* 2012). Hasil keseluruhan analisis dari penelitian meta-analisis ini mencakup diagram *forest plot* dan diagram *funnel plot* yang diolah menggunakan *software OpenMEE*.

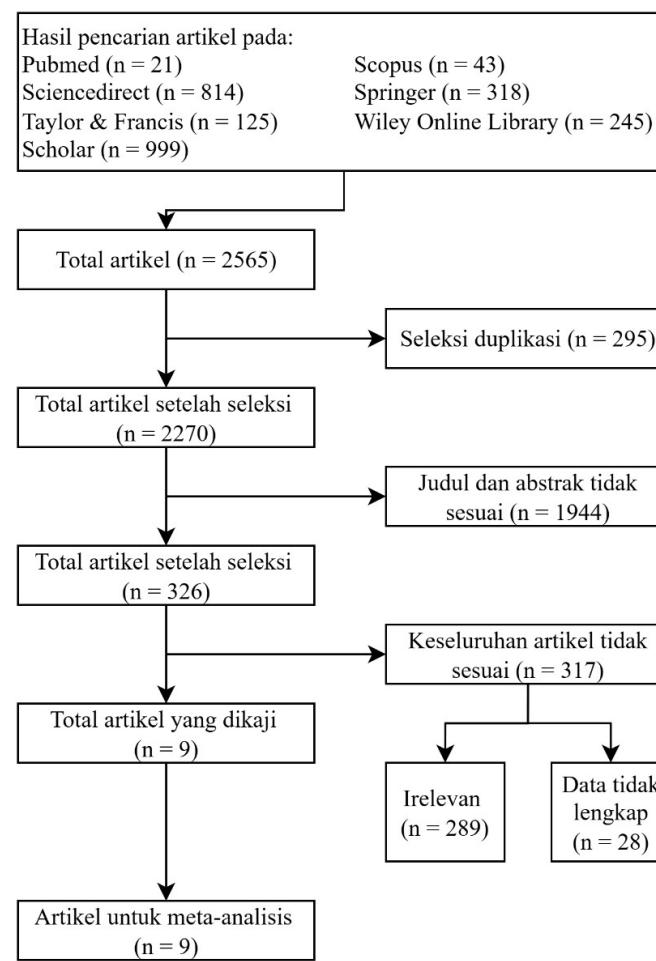


IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Sumber Studi dan Meta-Analisis

Sebanyak 2565 artikel berhasil dikumpulkan dari pencarian pada *database* yang digunakan dalam penelitian ini. Proses penyaringan awal dilakukan dengan menghapus duplikasi artikel menggunakan *software Zotero*, sehingga tersisa 2270 artikel unik. Selanjutnya, seleksi artikel berdasarkan kecocokan judul dan abstrak dilakukan. Sebanyak 1944 artikel yang dianggap tidak relevan dieliminasi, menghasilkan 326 artikel untuk ditinjau lebih lanjut.

Artikel-artikel tersebut kemudian dinilai berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Dari proses ini, 317 artikel dinyatakan tidak memenuhi syarat karena data yang disajikan tidak lengkap atau tidak sesuai. Setelah seluruh proses seleksi dilakukan, diperoleh 9 artikel yang layak untuk dianalisis lebih lanjut dalam meta-analisis ini. Artikel-artikel tersebut merupakan hasil penelitian yang dipublikasikan antara tahun 2005 hingga 2025. Proses pemilihan artikel secara rinci ditunjukkan dalam diagram PRISMA yang dapat dilihat pada Gambar 7, yang menggambarkan tahapan seleksi studi terkait stabilitas kandungan GABA dan kapasitas menahan air yogurt selama penyimpanan dingin.



Gambar 7 Skema pencarian dan penyeleksian sumber studi



Artikel yang dikumpulkan meliputi studi-studi sebelumnya yang telah dipublikasikan oleh berbagai peneliti seperti Chen *et al.* (2018), El-Fattah *et al.* (2018), Ghanzafari *et al.* (2024), Hussin *et al.* (2021), Keser dan Ozcan (2025), Linares *et al.* (2016), Ramos dan Poveda (2022), Wan *et al.* (2023), dan Zhu *et al.* (2024). Rentang tahun artikel yang didapatkan berkisar antara tahun 2016 hingga 2025 dengan jumlah data sebanyak 33 studi. Identitas masing-masing studi yang digunakan dalam meta-analisis disajikan pada Tabel 2. Data dari setiap studi kemudian diekstrak dan dikumpulkan berdasarkan penulis, tahun publikasi, ulangan eksperimen dan kontrol, nilai rata-rata eksperimen dan kontrol, dan simpangan baku eksperimen dan kontrol yang kemudian dikumpulkan pada Microsoft Excel. Rekapitulasi data uji kandungan GABA dapat dilihat pada Lampiran 1 sedangkan data uji kapasitas menahan air dilihat pada Lampiran 2.

Tabel 2 Identitas artikel penelitian yang digunakan dalam meta-analisis

No.	Judul	Penulis	Tahun terbit	Jurnal	Jumlah studi
<i>Optimized cultural conditions of functional yogurt for γ-aminobutyric acid augmentation using response surface methodology</i>					
1.	<i>aminobutyric acid augmentation using response surface methodology</i>	Chen <i>et al.</i>	2018	<i>Journal of Dairy Science</i>	2
2.	<i>Developing functional yogurt rich in bioactive peptides and gamma aminobutyric acid related to cardiovascular health</i>	El-Fattah <i>et al.</i>	2018	<i>LWT - Food Science and Technology</i>	2
3.	<i>Development and characterization of gamma-aminobutyric acid (GABA)-enriched functional yogurt using Limosilactobacillus fermentum 4-17</i>	Ghanzafari <i>et al.</i>	2024	<i>Applied Food Research</i>	1
4.	<i>GABA enhancement by simple carbohydrates in yoghurt fermented using novel, self-cloned Lactobacillus plantarum Taj-Apis362 and metabolomics profiling</i>	Hussin <i>et al.</i>	2021	<i>Scientific Reports</i>	6
5.	<i>Cross-over fermentation dynamics and proteomic properties of acid gels with indigenous Lactobacillus spp. isolated from cheeses Streptococcus thermophilus</i>	Keser dan Ozcan	2025	<i>Food Microbiology</i>	4
6.	<i>APC151 strain is suitable for the manufacture of naturally GABA-enriched bioactive yogurt</i>	Linares <i>et al.</i>	2016	<i>Frontiers in Microbiology</i>	2



Tabel 2 Identitas artikel penelitian yang digunakan dalam meta-analisis (lanjutan)

No.	Judul	Penulis	Tahun terbit	Jurnal	Jumlah studi
7.	<i>Fermented sheep's milk enriched in gamma-amino butyric acid (GABA) by the addition of lactobacilli strains isolated from different food environments</i>	Ramos dan Poveda	2022	<i>LWT - Food Science and Technology</i>	12
8.	<i>Effects of Polygonatum sibiricum on physicochemical properties, biological compounds, and functionality of fermented soymilk Production and quality evaluation of a novel γ-aminobutyric acid-enriched yogurt.</i>	Wan <i>et al.</i>	2023	<i>Foods</i>	2
9.		Zhu <i>et al.</i>	2024	<i>Frontiers in Nutrition</i>	2

4.2 Analisis Bias Publikasi

Untuk mengidentifikasi kemungkinan adanya bias publikasi dalam meta-analisis, digunakan alat visual berupa *funnel plot*. Diagram ini menggambarkan hubungan antara ukuran sampel dan besar efek dari masing-masing studi yang dianalisis. Prinsip dari *funnel plot* adalah bahwa studi dengan ukuran sampel kecil cenderung memiliki kesalahan acak yang lebih besar, sehingga nilai efeknya tersebar lebih luas di sekitar rata-rata (Fragkos *et al.* 2014). Dalam kondisi tanpa bias publikasi, titik-titik dalam *funnel plot* akan tersebar secara simetris membentuk pola menyerupai corong terbalik. Namun, apabila terdapat bias, penyebaran titik menjadi tidak simetris, yang mengindikasikan adanya kecenderungan bias dalam pemilihan studi. Oleh karena itu, evaluasi terhadap simetri diagram ini dapat dijadikan indikator awal adanya bias, meskipun interpretasinya bersifat subjektif karena bergantung pada pengamatan visual (Lin dan Chu 2018). Untuk meminimalisir penilaian subjektif, diperlukan analisis kuantitatif dengan metode Rosenthal untuk memperkuat validitas kesimpulan. Hasil analisis terkait bias publikasi ditampilkan pada Gambar 8 dan Gambar 9.

Pada Gambar 8 dan Gambar 9, sumbu X merepresentasikan efek yang diamati dari masing-masing studi (*observed outcome*), sedangkan sumbu Y menunjukkan *standard error* (SE) dari setiap studi. Studi dengan ukuran sampel besar umumnya memiliki SE yang rendah dan terletak di bagian atas *plot*, sedangkan studi dengan sampel kecil memiliki SE yang tinggi dan terletak di bagian bawah *plot*. Dalam kondisi tanpa adanya bias publikasi, titik-titik akan tersebar secara simetris membentuk pola menyerupai corong terbalik (*funnel*), di mana titik-titik pada bagian atas lebih terkonsentrasi di sekitar estimasi efek rata-rata, sementara titik-titik pada bagian bawah lebih menyebar karena tingginya variasi pada studi bersampel kecil.



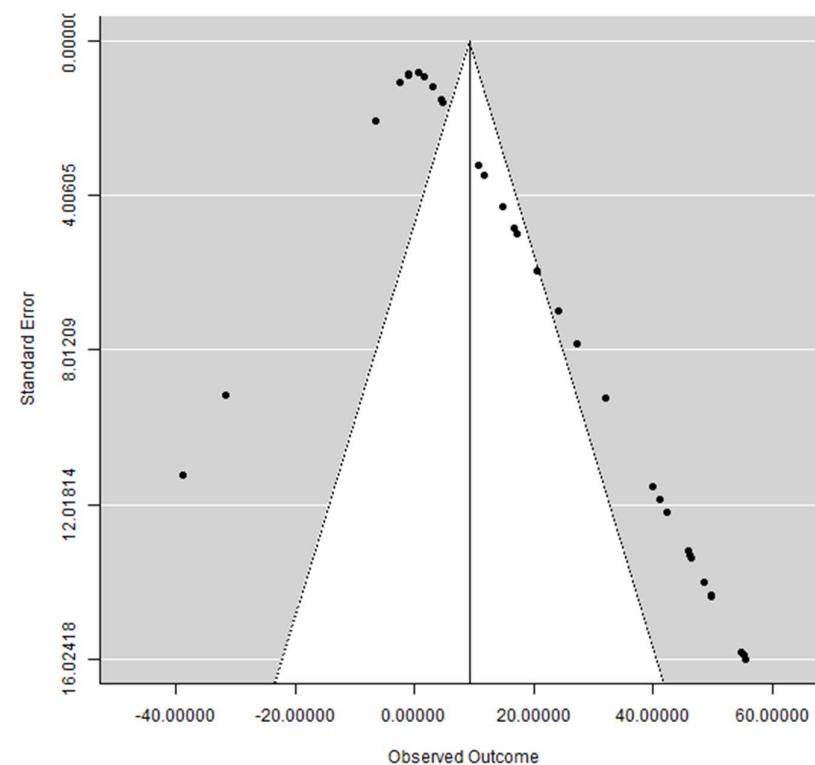
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber;

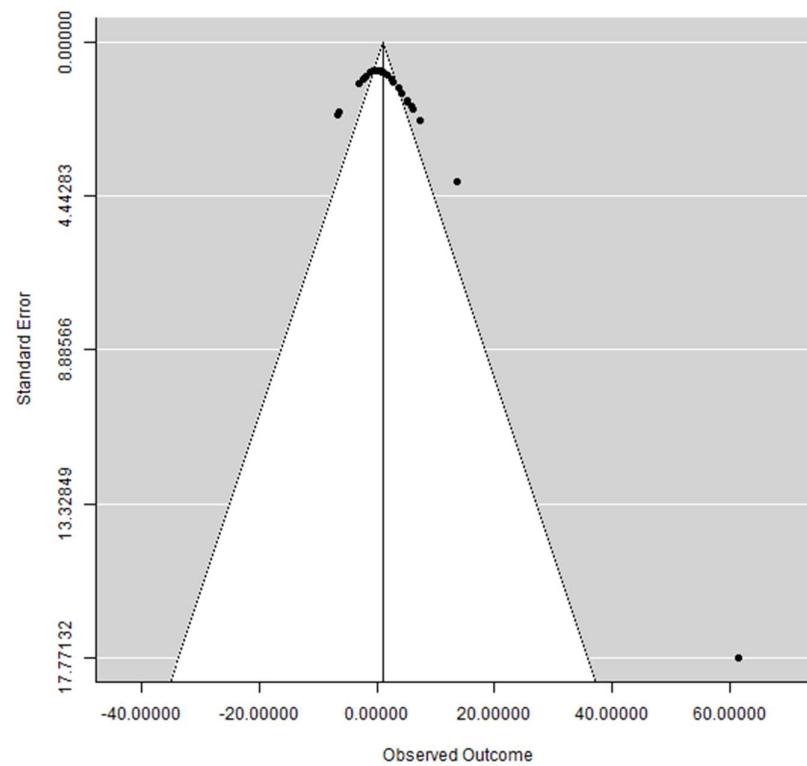
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Gambar 8 Diagram *funnel plot* bias publikasi studi kandungan GABA



Gambar 9 Diagram *funnel plot* bias publikasi studi kapasitas menahan air



Gambar 8 yang menghasilkan *funnel plot* studi kandungan GABA menunjukkan adanya indikasi bias publikasi. Hal ini terlihat dari pola penyebaran titik yang tidak simetris terhadap garis tengah, dengan dominasi sebaran di sisi kanan dan relatif kosong di sisi kiri. Ketidakseimbangan ini mengindikasikan kecenderungan studi dengan hasil signifikan positif lebih banyak dipublikasikan. Demikian pula pada Gambar 9 untuk *funnel plot* studi kapasitas menahan air menunjukkan pola asimetris karena penyebaran titik cukup dominan di sisi kanan dan terkonsentrasi pada bagian atas *funnel plot*. Kondisi ini menandakan bahwa studi yang dikumpulkan cukup homogen dengan tingkat presisi yang tinggi karena titik berkumpul pada bagian atas. Selain itu, keberadaan dua titik studi yang menunjukkan efek sangat besar di sisi kanan dan berada di bawah dapat mengindikasikan adanya *outlier* atau seleksi hasil yang positif. Dengan demikian, kedua *funnel plot* menunjukkan bahwa studi dengan hasil positif lebih dominan dalam analisis yang dapat memunculkan potensi bias publikasi.

Untuk mengevaluasi ketahanan (*robustness*) hasil meta-analisis terhadap potensi bias publikasi, dilakukan perhitungan nilai *fail-safe N* menggunakan pendekatan Rosenthal (1979). Metode ini menghitung jumlah studi tambahan yang tidak signifikan yang diperlukan untuk mengubah hasil meta-analisis dari signifikan ($p < 0,05$) menjadi tidak signifikan ($p > 0,05$). Semakin tinggi nilai *fail-safe N*, semakin kuat hasil kesimpulan meta-analisis terhadap potensi bias publikasi. Menurut kriteria Rosenthal, hasil meta-analisis dianggap tahan terhadap bias publikasi apabila nilai *fail-safe N* melebihi batas minimum $5N + 10$, dengan N adalah jumlah studi yang dianalisis. Dalam penelitian ini, jumlah studi (N) adalah 33 studi, sehingga batas minimum *fail-safe N* adalah 175. Pada penelitian ini, diperoleh nilai *fail-safe N* sebesar 1615 untuk studi uji kandungan GABA dan 230 untuk studi kapasitas menahan air. Kedua parameter ini memiliki tingkat signifikansi sebesar $p < 0,001$ dengan ambang signifikansi sebesar $p = 0,05$. Dengan demikian, kedua nilai *fail-safe N* yang diperoleh melebihi batas minimum $5N + 10$ yang menunjukkan bahwa hasil meta-analisis pada kedua parameter bersifat kuat dan stabil terhadap potensi bias publikasi. Oleh karena itu, kesimpulan yang dihasilkan untuk studi kandungan GABA dan kapasitas menahan air bersifat reliabel secara statistik.

4.3 Forest Plot dan Uji Random Effect Model

Pengukuran *effect size* dalam penelitian ini bertujuan untuk membandingkan stabilitas kandungan GABA dan kapasitas menahan air yogurt sebelum penyimpanan dingin (sebagai kelompok kontrol) dan setelah penyimpanan lebih dari dua minggu (sebagai kelompok eksperimen). Untuk mengakomodasi perbedaan antarstudi dalam meta-analisis, dipilih pendekatan *random effect model* karena mampu menggabungkan hasil dari berbagai studi dengan karakteristik populasi yang bervariasi.

Hasil analisis yang ditampilkan dalam Tabel 3 menggunakan interval kepercayaan sebesar 95%, dengan estimasi nilai *effect size* dalam bentuk *Standardized Mean Difference* (SMD). Untuk parameter kandungan GABA, diperoleh nilai SMD sebesar 9,14 [6,40 s.d. 11,89] dan $p\text{-value} < 0,001$. Nilai ini menunjukkan adanya peningkatan kandungan GABA yang signifikan setelah penyimpanan dingin lebih dari dua minggu dengan $p\text{-value}$ yang sangat kecil menunjukkan tingkat signifikansi yang tinggi. Sementara itu, untuk parameter



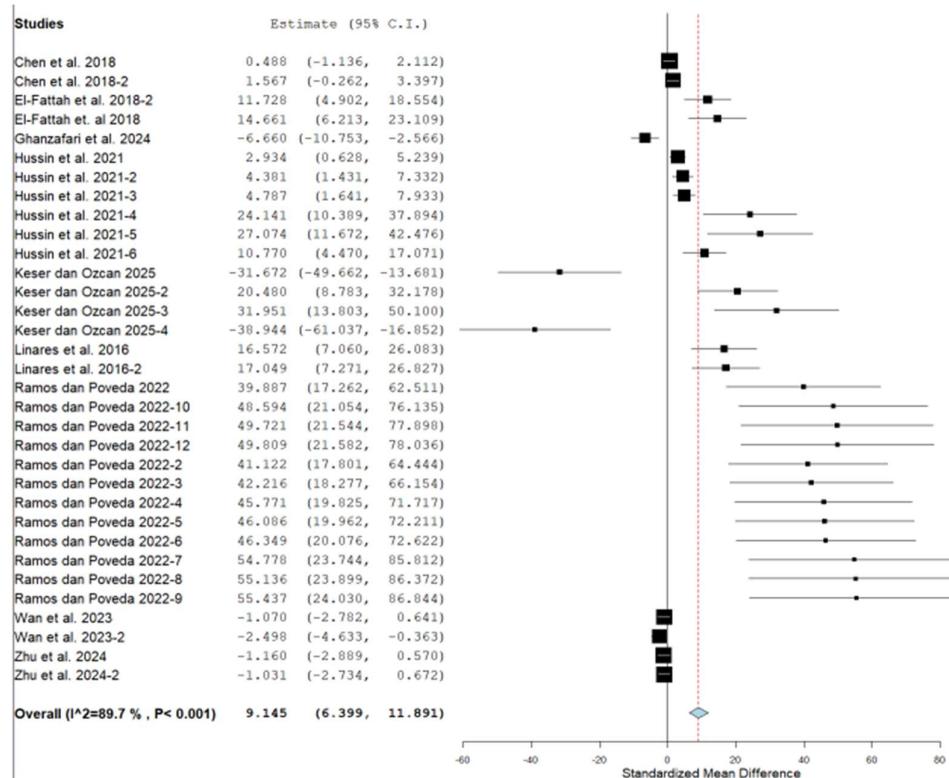
kapasitas menahan air, diperoleh estimasi SMD sebesar 0,99 [0,13 s.d. 1,85] dan *p-value* sebesar 0,024. Karena kedua nilai *p-value* berada di bawah tingkat signifikan 0,05, maka hasil dari kedua parameter dianggap signifikan secara statistik.

Tabel 3 Uji *random effect model* studi

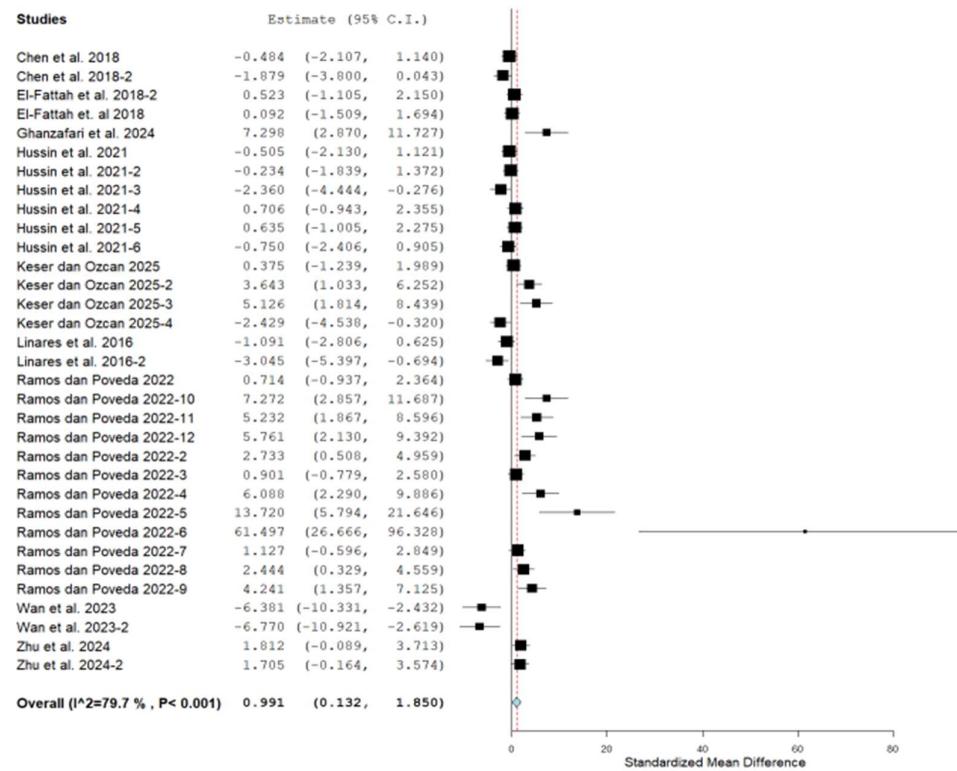
Parameter	Estimasi SMD	CI 95%		<i>Std. error</i>	<i>p-value</i>
		BB	BA		
Kandungan GABA	9,14	6,40	11,89	1,40	< 0,001
Kapasitas menahan air	0,99	0,13	1,85	0,44	0,024

Keterangan: SMD: *Standardized Mean Difference*; CI: *Confidence Interval*; BB: Batas Bawah; BA: Batas Atas

Hasil *forest plot* pada Gambar 10 untuk analisis terhadap kandungan GABA menunjukkan bahwa sebagian besar studi berada di sisi kanan garis nol dan tidak melintasinya. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kandungan GABA setelah penyimpanan dingin ditemukan secara konsisten dan signifikan pada sebagian besar studi. Ukuran kotak hitam yang relatif besar dan terdistribusi seragam pada arah positif memperkuat keyakinan terhadap efek penyimpanan dingin. Sementara itu, *forest plot* pada Gambar 11 untuk analisis terhadap kapasitas menahan air menunjukkan bahwa sebagian besar titik studi berada di sekitar atau memotong garis nol, menandakan bahwa secara statistik tidak semua studi menunjukkan perbedaan signifikan antara sebelum dan sesudah penyimpanan dingin. Meskipun demikian, terdapat beberapa studi yang berada di sisi kanan garis nol tanpa memotongnya, yang menunjukkan adanya peningkatan kapasitas menahan air yogurt secara signifikan setelah penyimpanan dingin.



Gambar 10 *Forest plot* pengaruh penyimpanan dingin terhadap kandungan GABA



Gambar 11 Forest plot pengaruh penyimpanan dingin terhadap kapasitas menahan air

Penyimpanan dingin pasca fermentasi berperan penting dalam menjaga stabilitas tekstur dan biokimia yogurt. Pada penyimpanan suhu 4°C, aktivitas metabolisme bakteri asam laktat melambat, namun enzim GAD masih aktif secara lambat sehingga konversi asam glutamat menjadi GABA terus berlangsung melalui proses dekarboksilasi. Proses ini melibatkan konsumsi proton (H^+) di dalam sel, menghasilkan karbon dioksida (CO_2) dan amonia (NH_3) sebagai produk samping (Yogeswara *et al.* 2020). Konsumsi proton dapat meningkatkan pH sitoplasma, sedangkan produksi amonia mengurangi keasaman. Mekanisme ini berkontribusi terhadap peningkatan sel bakteri terhadap lingkungan asam selama penyimpanan. Selain itu, GABA bukan merupakan substrat yang dikonsumsi oleh mikroorganisme, sehingga cenderung terakumulasi dalam yogurt selama masa simpan (Hussin *et al.* 2021).

Selama penyimpanan dingin, pH yogurt terus mengalami penurunan secara perlahan. Penurunan pH ini berkontribusi positif terhadap kestabilan struktur gel karena proses koagulasi protein kasein berlangsung lebih optimal pada kondisi asam. Pada pH mendekati 4, muatan permukaan misel kasein semakin netral sehingga terbentuk ikatan antar partikel protein dan pembentukan jaringan gel yang lebih rapat. Di samping itu, suhu rendah membantu menjaga hidrasi misel kasein dan mempertahankan molekul air dalam rongga matriks protein. Kombinasi antara penyerapan proton oleh enzim GAD yang meningkatkan ketahanan sel bakteri terhadap keasaman serta proses koagulasi protein yang semakin stabil pada pH rendah mendukung terbentuknya GABA secara berkelanjutan dan kestabilan kapasitas menahan air selama penyimpanan dingin.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.



Selain itu, dilakukan analisis heterogenitas antarstudi untuk menilai sejauh mana hasil dari masing-masing studi menunjukkan keberagaman. Berdasarkan Tabel 4, analisis terhadap kandungan GABA memiliki nilai I^2 sebesar 89,70%, sedangkan analisis terhadap kapasitas menahan air menunjukkan nilai I^2 yang lebih rendah, yaitu sebesar 78,66%. Menurut kriteria Higgins *et al.* (2019), nilai I^2 di atas 75% menunjukkan heterogenitas yang tinggi, yang berarti hasil dari masing-masing studi bervariasi secara substansial dan tidak hanya disebabkan oleh faktor acak semata. Tingginya heterogenitas ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan karakteristik metodologis antar studi, seperti jenis *starter* yang digunakan, jenis susu, dan durasi penyimpanan. Dikarenakan heterogenitasnya yang tinggi, seluruh data studi memiliki potensi untuk dilakukan analisis subkelompok.

Tabel 4 Uji heterogenitas studi

Parameter	τ^2	Q (df=32)	Het. p-value	I^2
Kandungan GABA	32,55	310,70	< 0,001	89,70
Kapasitas menahan air	4,11	149,93	< 0,001	78,66

Keterangan: τ^2 : varian antar studi; I^2 : heterogenitas

4.4 Analisis Subkelompok

4.4.1 Subkelompok Jenis Starter Produksi Yogurt

Sebanyak enam kelompok jenis *starter* dari 33 studi dianalisis sebagai subkelompok, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 5. Kelompok tersebut terdiri atas *starter* komersial (*Streptococcus thermophilus* dan *Lactobacillus bulgaricus*), *starter* komersial dengan penambahan *Lacticaseibacillus rhamnosus*, penambahan *Limosilactobacillus*, penambahan *Lactobacillus plantarum*, penambahan *Levilactobacillus brevis*, dan penambahan *Lacticaseibacillus paracasei*.

Berdasarkan hasil analisis terhadap kandungan GABA, penggunaan berbagai jenis *starter* menunjukkan tingkat efektivitas yang berbeda dalam meningkatkan kadar GABA selama penyimpanan dingin. Penggunaan *starter* komersial saja menghasilkan *effect size* positif dengan nilai SMD sebesar 4,64 [1,81 s.d. 7,47] yang berada jauh di atas nol dan memiliki *confidence interval* (CI) tidak melewati nol, sehingga menunjukkan efek yang signifikan. Nilai SMD meningkat ketika menggunakan *starter* komersial dengan penambahan *Lactobacillus plantarum*, yaitu sebesar 18,99 [7,64 s.d. 30,33] dan lebih tinggi dengan penambahan *Lactobacillus paracasei* dengan nilai SMD sebesar 45,90 [37,55 s.d. 54,25]. Kedua jenis *starter* tersebut menunjukkan efek yang besar dan signifikan karena rentang CI-nya tidak melewati nol dan bernilai positif. Sebaliknya, kombinasi *starter* komersial dengan penambahan *Lacticaseibacillus rhamnosus* menunjukkan *effect size* negatif dengan nilai SMD sebesar -12,47 [-62,08 s.d. 37,13] dengan rentang CI yang sangat lebar dan melintasi nol, yang menandakan tidak adanya signifikansi. Penambahan *Levilactobacillus brevis* dengan *starter* komersial juga menunjukkan hasil tidak signifikan dengan nilai SMD sebesar 0,90 [-3,04 s.d. 4,84] karena rentang CI-nya melintasi nol.

Untuk analisis terhadap kapasitas menahan air, penggunaan *starter* komersial dengan penambahan *Levilactobacillus brevis* dengan nilai SMD sebesar 2,15 [0,96 s.d. 3,33] dan penambahan *Lactobacillus paracasei* dengan



nilai SMD sebesar 5,08 [2,96 s.d. 7,19] memberikan *effect size* positif yang signifikan karena rentang CI-nya sepenuhnya berada di atas nol. Sebaliknya, penggunaan *starter* komersial saja dengan nilai SMD sebesar -0,80 [-1,73 s.d. 0,13] dan *starter* komersial dengan penambahan *Lacticaseibacillus rhamnosus* dengan nilai SMD sebesar -0,87 [-3,76 s.d. 2,01] menghasilkan *effect size* negatif yang tidak signifikan karena rentang CI-nya melewati nol. Penambahan *Lactobacillus plantarum* dengan nilai SMD sebesar 0,20 [-0,75 s.d. 1,15] juga tidak menunjukkan berpengaruh yang signifikan.

Dapat disimpulkan bahwa penggunaan *starter* komersial dengan penambahan *Lacticaseibacillus paracasei* memberikan *effect size* tertinggi dan signifikan untuk kedua parameter, yang menunjukkan pengaruh paling kuat terhadap peningkatan kandungan GABA dan kapasitas menahan air yogurt selama penyimpanan dingin. Sementara itu, jenis *starter* lain menunjukkan pengaruh yang lebih rendah atau tidak signifikan karena nilai SMD yang lebih kecil atau rentang CI yang melintasi nol.

Tabel 5 Hasil *forest plot* subkelompok jenis *starter*

Subkelompok	N	Kandungan GABA		Kapasitas menahan air	
		SMD (CI 95%)	p-value	SMD (CI 95%)	p-value
Komersial	14	4,64 (1,81;7,47)	0,001	-0,80 (-1,73;0,13)	0,090
Komersial + <i>Lacticaseibacillus rhamnosus</i>	2	-12,47 (-62,08;37,13)	0,622	-0,87 (-3,76;2,01)	0,553
Komersial + <i>Limosilactobacillus fermentum</i>	1	-6,66 (-10,75;-2,57)	-	7,30 (2,87;11,73)	-
Komersial + <i>Lactobacillus plantarum</i>	3	18,99 (7,64;30,33)	0,001	0,20 (-0,75;1,15)	0,679
Komersial + <i>Levilactobacillus brevis</i>	3	0,90 (-3,04;4,84)	0,656	2,15 (0,96;3,33)	< 0,001
Komersial + <i>Lacticaseibacillus paracasei</i>	10	45,90 (37,55;54,25)	< 0,001	5,08 (2,96;7,19)	< 0,001

Keterangan: SMD: *Standardized Mean Difference*; CI: *Confidence Interval*

Beberapa bakteri asam laktat mampu memproduksi GABA melalui dekarboksilasi glutamat yang dikatalisis oleh enzim GAD. Bakteri tersebut antara lain *Lactobacillus* (*Lb. brevis*, *Lb. paracasei*, *Lb. delbrueckii*, *Lb. buchneri*, *Lb. plantarum*, dan *Lb. helveticus*) dan *Lactococcus lactis* (Cui *et al.* 2020). Efisiensi konversi glutamat menjadi GABA bervariasi antar spesies bakteri karena adanya perbedaan aktivitas enzim GAD yang dipengaruhi oleh jumlah dan ekspresi gen GAD, afinitas enzim GAD terhadap glutamat, dan toleransi bakteri terhadap stres metabolismik (Wu *et al.* 2020; Braga *et al.* 2024; Sun



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1.

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a.

Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b.

Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.

2.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

et al. 2021). Bakteri dengan salinan gen GAD yang lebih banyak atau lebih aktif dapat menghasilkan enzim GAD dalam jumlah lebih besar sehingga meningkatkan kapasitas konversi glutamat menjadi GABA (Braga *et al.* 2024). Bakteri dengan bentuk enzim GAD yang memiliki afinitas lebih tinggi terhadap glutamat juga mampu mengonversi dengan efisiensi lebih tinggi (Sun *et al.* 2021). Kemampuan untuk memanfaatkan berbagai sumber karbon dan nitrogen turut mendukung produksi GAD secara optimal. Selain itu, bakteri yang mampu bertahan terhadap stres metabolismik dan oksidatif cenderung memiliki aktivitas enzim GAD yang lebih stabil, sehingga memungkinkan produksi GABA yang konsisten meskipun kondisi fermentasi atau penyimpanan kurang ideal.

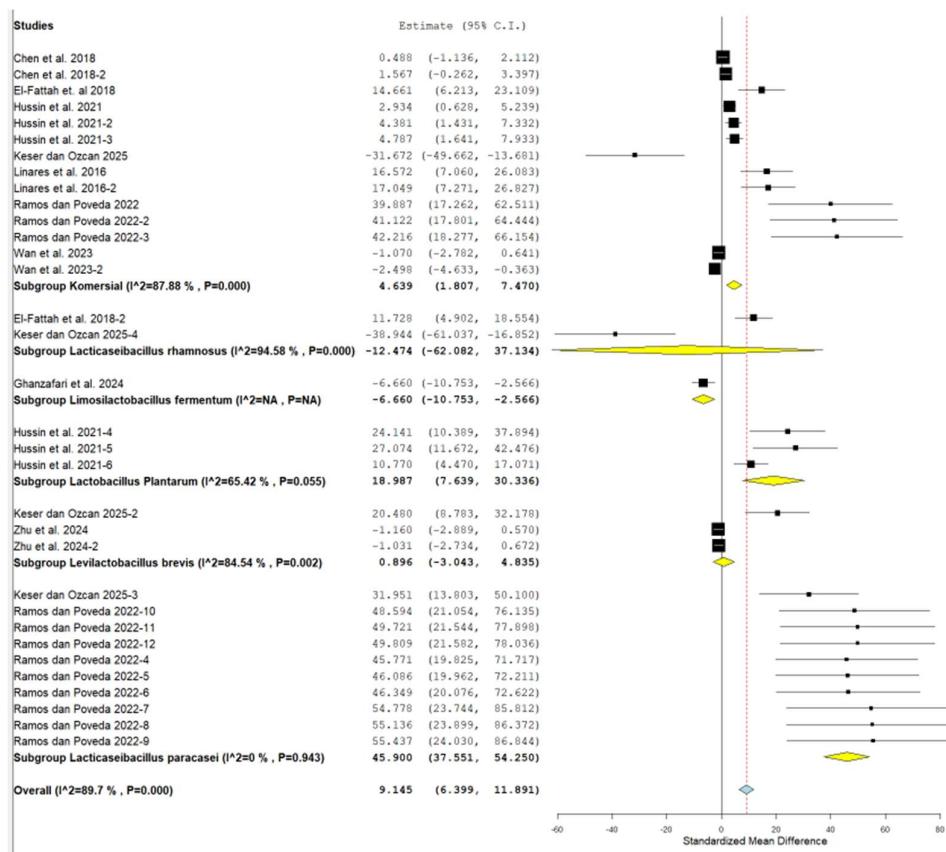
Kemampuan proteolitik juga memengaruhi ketstabilitan tekstur yogurt selama penyimpanan. Bakteri dengan aktivitas proteolitik tinggi dapat menghidrolisis kasein menjadi peptida atau asam amino, menyebabkan melemahnya struktur gel dan menyebabkan sineresis (Erem dan Kilic-Akyilmaz 2024). Aktivitas proteolitik dikategorikan tinggi jika degradasi kasein melebihi 30%, sedangkan degradasi 10-20% cenderung mempertahankan struktur gel yang stabil. Selain itu, produksi eksopolisakarida (EPS) oleh bakteri selama fermentasi memperkuat struktur gel dan meningkatkan kapasitas menahan air (Nurhasanah *et al.* 2020). EPS bekerja dengan cara menyelimuti struktur protein dalam gel dan menangkap air dalam matriks tersebut, meningkatkan viskositas dan memperkuat jaringan protein yang terbentuk.

Gambar 12 menunjukkan perbandingan kandungan GABA setelah penyimpanan dingin berdasarkan jenis *starter* yang digunakan. *Starter* komersial dengan penambahan *Lacticaseibacillus paracasei* menghasilkan peningkatan kandungan GABA tertinggi, hingga sebesar 1900% dari 0,91 mg/100g menjadi 18,23 mg/100g (Ramos dan Poveda 2022). Efek ini dikaitkan dengan aktivitas proteolitik tinggi *L. paracasei* yang mampu meningkatkan ketersediaan asam amino glutamat sebagai prekursor GABA. Aktivitas enzim GAD yang tinggi juga mendukung efisiensi konversi glutamat menjadi senyawa GABA. Selain itu, interaksi simbiotik antara *L. paracasei*, *S. thermophilus*, dan *L. bulgaricus* turut memperkaya lingkungan metabolismik selama fermentasi dan penyimpanan, termasuk melalui produksi asam folat dan formiat yang menunjang pertumbuhan *L. bulgaricus* (Siddiqi *et al.* 2024). *Starter* lain seperti *L. plantarum* menghasilkan peningkatan kandungan GABA secara signifikan sebesar 84% dari 58,53 mg/100g menjadi 107,47 mg/100g namun tidak sebesar peningkatan dengan *L. paracasei* (Hussin *et al.* 2021). *Starter* komersial tanpa penambahan bakteri tambahan menghasilkan peningkatan kandungan GABA sebesar 68% dari 8,69 mg/100g menjadi 14,63 mg/100g juga berpengaruh signifikan namun peningkatannya paling rendah (Hussin *et al.* 2021). Sementara itu, penambahan *L. brevis* menghasilkan peningkatan hanya sebesar 3% dan penambahan *L. rhamnosus* menghasilkan penurunan kandungan GABA sebesar 70% dengan tidak adanya efek signifikan terhadap stabilitas kandungan GABA setelah penyimpanan dingin (Zhu *et al.* 2024; Keser dan Ozcan 2025).



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Gambar 12 Forest plot subkelompok jenis *starter* terhadap kandungan GABA

Gambar 13 menunjukkan perbandingan kapasitas menahan air setelah penyimpanan dingin berdasarkan jenis *starter* yang digunakan. *Starter* dengan penambahan *L. paracasei* menunjukkan peningkatan kapasitas menahan air tertinggi, sebesar 17% dari 46,9% menjadi 54,7%, dengan nilai SMD yang positif dan signifikan yang mengindikasikan efek paling besar terhadap stabilitas tekstur yogurt (Ramos dan Poveda 2022). Hal ini didukung oleh kemampuan *L. paracasei* dalam menghasilkan eksopolisakarida (EPS) yang meningkatkan kekakuan struktur gel dan mencegah sineresis. EPS bekerja dengan menyelimuti matriks protein dan menangkap air, sehingga dapat mempertahankan viskositas dan mengurangi sineresis selama penyimpanan. Selain itu, kecepatan pengasaman *L. paracasei* turut memperkuat tekstur yogurt karena pH yang menurun secara konsisten berkontribusi pada stabilisasi koagulasi protein (Vitheepongjaroen *et al.* 2024). *Starter* *L. brevis* menunjukkan peningkatan kapasitas menahan air secara signifikan sebesar 7% dari 43,8% menjadi 46,9%, dengan nilai SMD yang lebih kecil dibandingkan *L. paracasei* (Zhu *et al.* 2024). Penambahan *L. plantarum* menghasilkan peningkatan kapasitas menahan air secara signifikan yang hanya sebesar 2% dari 51,2% menjadi 52,5% (Hussin *et al.* 2021). Sementara itu, penambahan *L. rhamnosus* dan hanya *starter* komersial justru menurunkan kapasitas menahan air, yaitu sebesar 1% dan 6% yang tidak signifikan, mengindikasikan kecenderungan struktur gel yang lebih lemah selama penyimpanan dingin (Keser dan Ozcan 2025; Chen *et al.* 2018).



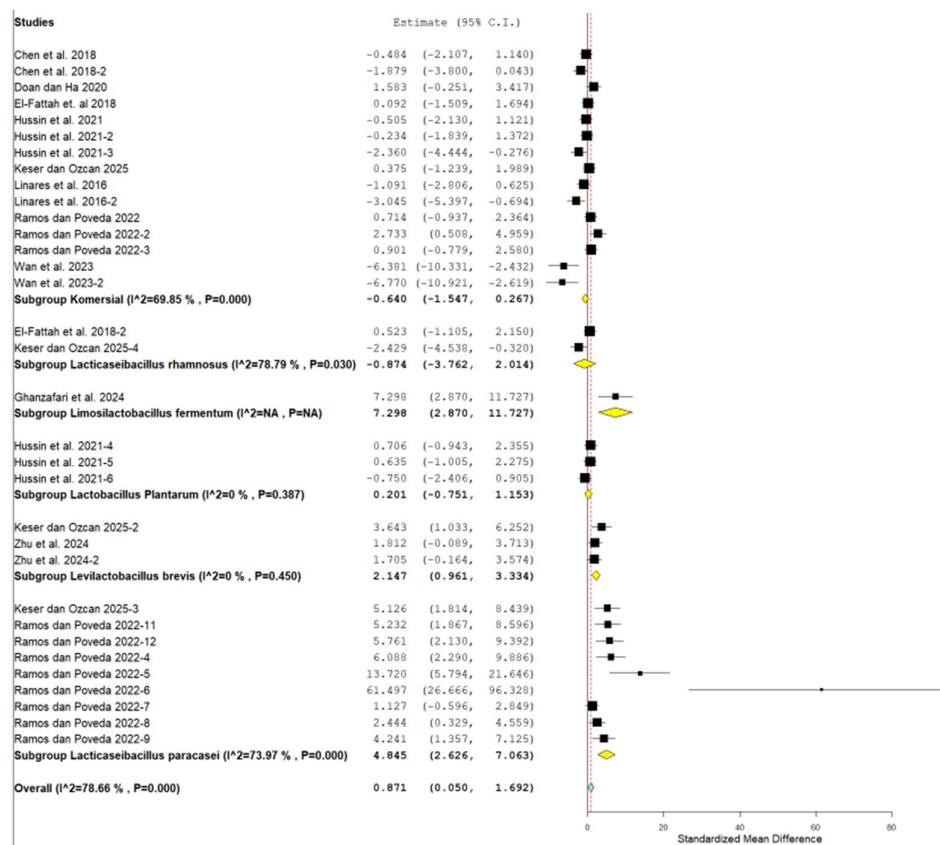
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Gambar 13 Forest plot subkelompok jenis *starter* terhadap kapasitas menahan air

Berdasarkan hasil analisis, jenis *starter* yang digunakan memiliki pengaruh terhadap kestabilan kandungan GABA maupun kapasitas menahan air yogurt selama penyimpanan dingin. *Starter* komersial dengan penambahan *Lacticaseibacillus paracasei* secara konsisten menunjukkan performa terbaik untuk kedua parameter tersebut, dengan nilai kandungan GABA dan kapasitas menahan air yang paling tinggi serta didukung oleh nilai SMD paling besar dan berpengaruh signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa karakteristik fungsional *L. paracasei*, seperti aktivitas proteolitik tinggi, produksi EPS, dan kemampuan menurunkan pH dengan cepat, berkontribusi penting terhadap peningkatan mutu fungsional dan tekstur yogurt selama penyimpanan.

4.4.2 Subkelompok Penggunaan Susu

Sebanyak empat kelompok jenis susu dari 33 studi dianalisis sebagai subkelompok, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 6. Terdapat kelompok susu rekonstitusi, susu sapi, susu kambing, dan susu kedelai. Berdasarkan hasil analisis terhadap kandungan GABA, penggunaan susu kambing menunjukkan *effect size* paling tinggi dan berpengaruh signifikan dengan nilai SMD sebesar 46,81 [39,11 s.d. 54,52] yang mencerminkan efek sangat kuat dan positif karena seluruh rentang CI berada di atas nol. Susu rekonstitusi juga memberikan pengaruh signifikan dengan nilai SMD sebesar 5,98 [3,28 s.d. -8,69].



Sebaliknya, penggunaan susu kedelai menunjukkan penurunan secara signifikan terhadap kandungan GABA dengan nilai SMD negatif sebesar -1,64 [-3,00 s.d. -0,27] dan rentang CI sepenuhnya berada di bawah nol. Hal ini menandakan bahwa susu kedelai berpengaruh negatif secara signifikan terhadap stabilitas GABA selama penyimpanan. Untuk penggunaan susu sapi, nilai SMD sebesar -6,66 [-10,75 s.d. -2,57] namun tidak dapat disimpulkan pengaruhnya secara statistik karena hanya terdapat satu studi yang menyajikan, sehingga *p-value* tidak tersedia.

Untuk analisis terhadap kapasitas menahan air, penggunaan susu kambing juga berpengaruh signifikan dengan nilai SMD sebesar 3,71 [2,08 s.d. 5,33] dengan rentang CI sepenuhnya berada di atas nol, mengindikasikan efek positif dalam meningkatkan kapasitas menahan air yogurt. Sebaliknya, penggunaan susu kedelai menunjukkan nilai SMD negatif yang signifikan sebesar -6,57 [-9,43 s.d. -3,70] yang menandakan adanya penurunan terhadap kapasitas menahan air selama penyimpanan dingin. Sementara itu, penggunaan susu rekonstitusi menunjukkan hasil yang tidak signifikan dengan nilai SMD sebesar -0,02 [-0,76 s.d. 0,71] karena rentang CI-nya melintasi nol. Dengan demikian, hanya susu kambing yang terbukti konsisten memberikan pengaruh positif dan signifikan untuk meningkatkan kedua parameter yogurt selama penyimpanan dingin.

Tabel 6 Hasil *forest plot* subkelompok jenis susu

Subkelompok	N	Kandungan GABA		Kapasitas menahan air	
		SMD (CI 95%)	<i>p-value</i>	SMD (CI 95%)	<i>p-value</i>
Susu rekonstitusi	18	5,98 (3,28;8,69)	< 0,001	-0,02 (-0,76;0,71)	0,951
Susu sapi	1	-6,66 (-10,75;-2,57)	-	7,30 (-2,87;11,73)	-
Susu kambing	12	46,81 (39,11;54,52)	< 0,001	3,71 (2,08;5,33)	< 0,001
Susu kedelai	2	-1,64 (-3,00;-0,27)	< 0,001	-6,57 (-9,43;-3,70)	< 0,001

Keterangan: SMD: *Standardized Mean Difference*; CI: *Confidence Interval*

Susu digunakan sebagai bahan dasar utama dalam pembuatan yogurt karena mengandung komponen penting seperti protein, lemak, laktosa, mineral, dan vitamin. Di antara komponen tersebut, protein susu, terutama kasein, berperan penting dalam membentuk tekstur yogurt yang padat. Selama fermentasi, penurunan pH hingga titik isoelektrik kasein (~4,6) menyebabkan kasein menggumpal dan membentuk jaringan padat melalui ikatan antarmolekul protein (Prayitno *et al.* 2020). Jaringan ini berfungsi untuk menahan, menyelubungi, dan memerangkap molekul-molekul air di dalam yogurt, membuat pori-pori antar protein menjadi lebih kecil dan rapat sehingga air terikat lebih kuat dan sulit lepas.

Komposisi dan jenis protein dalam susu berbeda tergantung pada jenis hewan atau bahan tanaman yang menjadi sumbernya. Susu sapi segar mengandung sekitar 3,3–3,5% protein total dengan komposisi 80% kasein dan



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

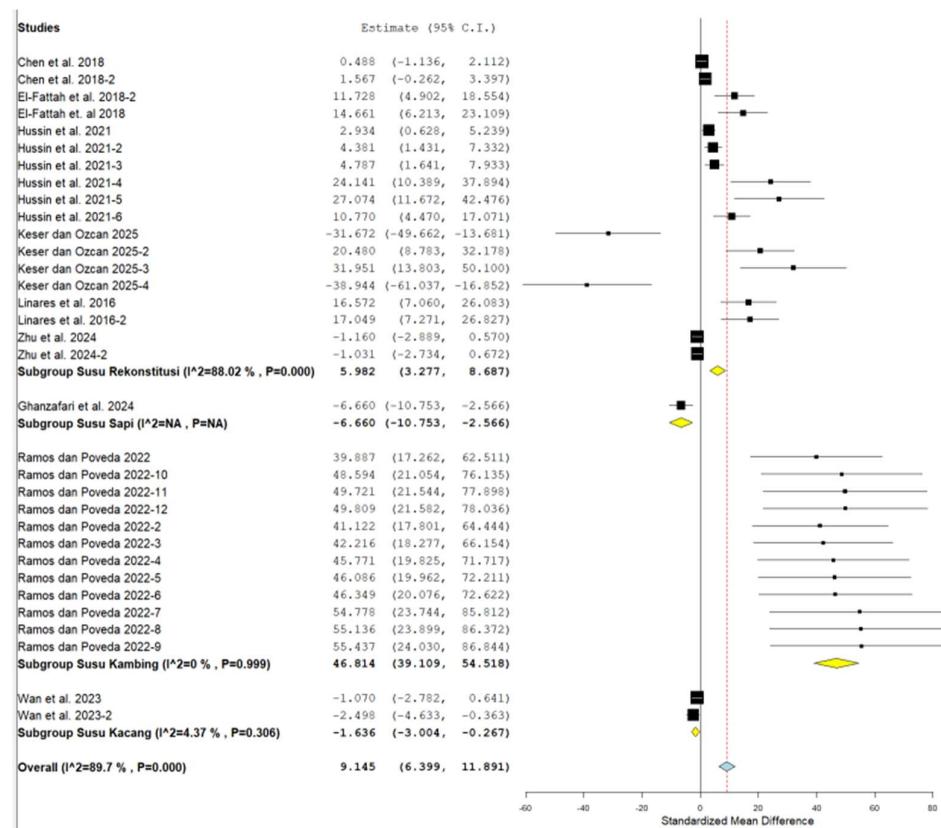
b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

20% *whey* (Arab *et al.* 2022). Susu kambing memiliki kandungan protein sekitar lebih tinggi (sekitar 3,6%) dengan rasio kasein dan *whey* yang mirip. Namun, struktur kasein dalam susu kambing berbeda: kadar α -1-kasein lebih rendah dan β -kasein lebih tinggi, sehingga gumpalan protein yang terbentuk lebih kecil dan hasul (Xavier *et al.* 2024). Hal ini membuat tekstur yogurt dari susu kambing lebih padat dan mampu menahan air dengan lebih baik selama penyimpanan dingin. Sebaliknya, susu kedelai biasanya memiliki kadar protein yang lebih rendah dengan susunan protein yang berbeda. Protein utama dalam susu kedelai adalah glisin dan β -konglisin yang membentuk jaringan protein dengan ronggarongga besar dan kurang rapat saat dipanaskan atau difermentasi (Kong *et al.* 2024). Akibatnya, yogurt dari susu kedelai lebih mudah kehilangan air selama penyimpanan.

Selain itu, protein kasein dalam susu juga dapat dipecah menjadi asam amino bebas glutamat oleh enzim protease. Glutamat dibutuhkan oleh enzim GAD untuk menghasilkan senyawa GABA. Sekitar 20% dari total asam amino dalam protein susu sapi dan kambing adalah glutamat (Yao *et al.* 2023). Sebaliknya, susu kedelai biasanya mengandung glutamat yang lebih sedikit dan bentuknya tidak sepenuhnya mendukung proses pembentukan GABA oleh bakteri. Di sisi lain, laktosa dalam susu juga berperan penting karena menjadi sumber energi utama bagi bakteri penghasil GABA. Susu sapi rata-rata mengandung 4,5-4,8% laktosa, sedangkan susu kambing sedikit lebih rendah (~4,2%) (Kapadiya *et al.* 2016). Laktosa membantu pertumbuhan dan aktivitas enzimatik bakteri asam laktat secara optimal sehingga GABA yang dihasilkan dapat meningkat. Akan tetapi, susu kedelai tidak mengandung laktosa, melainkan jenis gula lain seperti sukrosa dan oligosakarida yang kurang optimal mendukung aktivitas bakteri penghasil GABA (Hati *et al.* 2015). Pada penelitian ini, susu kedelai yang digunakan merupakan sari kedelai yang dicampur dengan susu bubuk, sehingga tidak sepenuhnya sama dengan sari kedelai murni.

Gambar 14 menunjukkan perbandingan kandungan GABA setelah penyimpanan dingin berdasarkan jenis susu yang digunakan. Susu kambing menunjukkan peningkatan kandungan GABA paling besar secara signifikan sebesar 529% dari rata-rata 2,6 mg/100g menjadi 16,6 mg/100g, didukung dengan nilai SMD positif yang paling besar (Ramos dan Poveda 2022). Ini mengartikan susu kambing sangat efektif mempertahankan atau meningkatkan kadar GABA selama penyimpanan dingin. Hal ini disebabkan oleh tingginya kandungan glutamat yang tinggi, struktur protein yang mudah dipecah oleh enzim GAD, dan adanya laktosa sebagai sumber energi bakteri. Sebaliknya, susu kedelai menunjukkan penurunan kandungan GABA yang signifikan sebesar 3% dari rata-rata 29,2 mg/100g menjadi 28,3 mg/100g karena glutamat yang lebih rendah, tidak mengandung laktosa, dan struktur proteinnya kurang cocok untuk dihidrolisis bakteri asam laktat (Wan *et al.* 2023). Susu rekonstitusi memberikan peningkatan kandungan GABA sebesar 68%, namun tidak signifikan secara statistik dan masih lebih rendah dibandingkan susu kambing (Hussin *et al.* 2021).



Gambar 14 Forest plot subkelompok jenis susu terhadap kandungan GABA

Gambar 15 menunjukkan perbandingan kapasitas menahan air setelah penyimpanan dingin berdasarkan jenis susu yang digunakan. Susu kambing kembali menunjukkan nilai SMD tertinggi yang signifikan dengan peningkatan sebesar 14% dengan dari 45,9% menjadi 52,4%, menandakan bahwa yogurt dari susu kambing paling mampu mempertahankan molekul air selama penyimpanan dingin (Ramos dan Poveda 2022). Hal ini terjadi karena struktur protein susu kambing lebih padat dan pori-pori yang kecil sehingga air tidak mudah keluar. Di sisi lain, susu kedelai memiliki nilai SMD yang negatif secara signifikan, dengan penurunan sebesar 20% dengan dari 64,6% menjadi 51,4% yang menunjukkan kapasitas menahan air menurun karena struktur gelnya renggang dan mudah melepaskan air (Wan *et al.* 2023). Susu rekonstitusi secara statistik tidak berpengaruh signifikan dengan penurunan sebesar 1% (Keser dan Ozcan 2025).

Berdasarkan hasil analisis, jenis susu yang digunakan sangat memengaruhi kestabilan kandungan GABA dan kapasitas menahan air yogurt selama penyimpanan dingin, di mana susu kambing menunjukkan performa terbaik untuk meningkatkan kedua parameter sedangkan susu kedelai menghasilkan hasil yang negatif karena menurunkan kedua parameter selama penyimpanan dingin.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber;

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

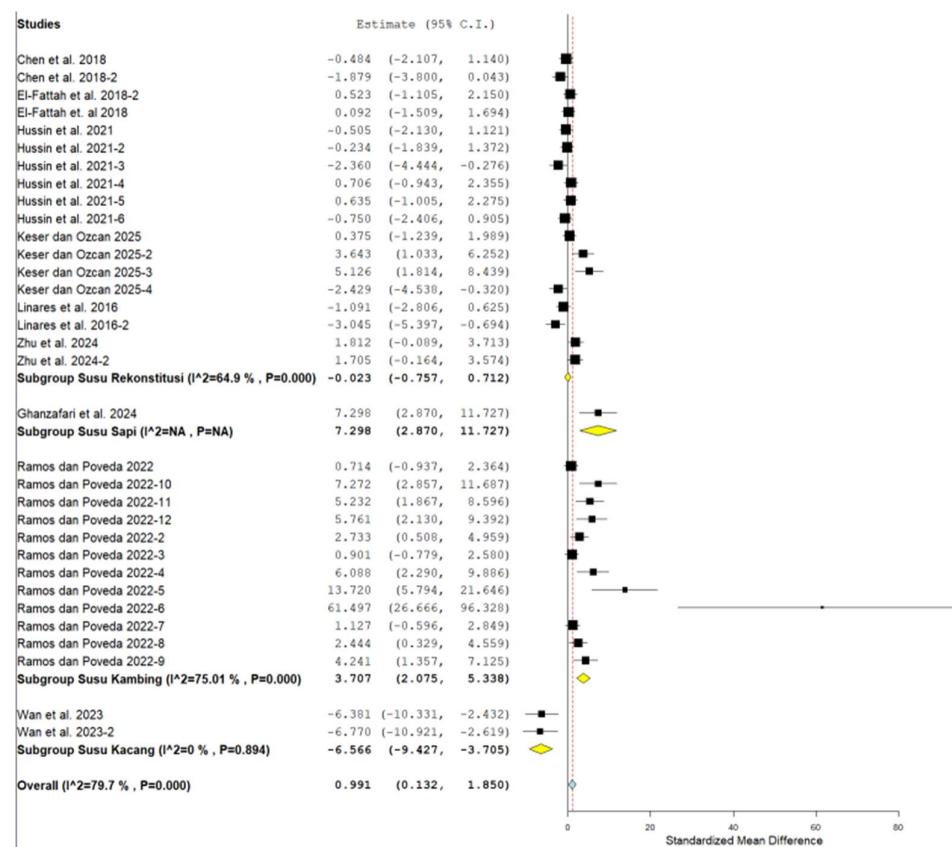
b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber;
 a. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Gambar 15 Forest plot subkelompok jenis susu terhadap kapasitas menahan air

4.4.3 Subkelompok Durasi Penyimpanan Setelah Fermentasi

Sebanyak tiga kelompok durasi penyimpanan dingin pasca fermentasi dari 33 studi dianalisis sebagai subkelompok, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 7. Terdapat kelompok durasi selama dua minggu, tiga minggu, dan empat minggu. Berdasarkan hasil analisis terhadap kandungan GABA, seluruh kelompok durasi penyimpanan dingin menunjukkan pengaruh yang signifikan dalam meningkatkan kandungan GABA selama penyimpanan. Durasi penyimpanan selama dua minggu menghasilkan nilai SMD sebesar 6,95 [3,34 s.d. 10,57] lalu bertambah besar pada penyimpanan tiga minggu dengan nilai SMD sebesar 8,45 [3,66 s.d. 13,24]. Efek peningkatan kandungan GABA paling tinggi terlihat pada durasi penyimpanan empat minggu dengan nilai SMD sebesar 27,62 [14,40 s.d. 40,85]. Seluruh nilai positif dengan rentang CI-nya tidak melewati nol, menandakan efek yang signifikan.

Sementara itu, berdasarkan hasil analisis terhadap kapasitas menahan air, tidak ditemukan pengaruh yang signifikan dari ketiga durasi penyimpanan dingin. Hal ini terlihat pada nilai SMD untuk penyimpanan dua minggu sebesar 0,86 [-0,27 s.d. 1,99], tiga minggu sebesar 0,93 [-0,54 s.d. 2,41], dan empat minggu sebesar 1,73 [-1,16 s.d. 4,62]. Seluruh CI-nya melintasi nol, sehingga menunjukkan bahwa peningkatan durasi penyimpanan tidak memberikan efek signifikan terhadap kestabilan kapasitas menahan air yogurt. Dengan demikian,



durasi penyimpanan dingin pasca fermentasi cenderung meningkatkan kandungan GABA secara signifikan, namun tidak diikuti oleh peningkatan yang signifikan terhadap kapasitas menahan air yogurt.

Tabel 7 Hasil *forest plot* subkelompok durasi penyimpanan

Subkelompok	N	Kandungan GABA		Kapasitas menahan air	
		SMD (CI 95%)	p-value	SMD (CI 95%)	p-value
Dua minggu	13	6,95 (3,34;10,57)	< 0,001	0,86 (-0,27;1,99)	0,14
Tiga minggu	14	8,45 (3,66;13,24)	< 0,001	0,93 (-0,54;2,41)	0,21
Empat minggu	6	27,62 (14,40;40,85)	< 0,001	1,73 (-1,16;4,62)	0,21

Keterangan: SMD: *Standardized Mean Difference*; CI: *Confidence Interval*

Pada penyimpanan bersuhu (4-5°C), meskipun laju pertumbuhan bakteri melambat, viabilitas dan sebagian aktivitas metaboliknya tetap terjaga. Menurut Sionek *et al.* (2024), suhu penyimpanan di atas titik beku tidak menyebabkan kematian bakteri asam laktat, meskipun aktivitasnya menurun. Hal ini diperkuat oleh temuan Hussin *et al.* (2021) yang menunjukkan bahwa viabilitas bakteri dalam yogurt tetap tinggi selama penyimpanan, yaitu dari 9,68 log CFU/g pada hari ke-1 lalu turun menjadi 9,06 log CFU/g pada hari ke-28. Dengan demikian, bakteri tetap mampu memetabolisme sisa laktosa, menghasilkan asam laktat secara bertahap, yang mempertahankan lingkungan fermentasi tetap bersifat asam dengan penurunan jumlah bakteri masih di atas batas probiotik minimum (6 log CFU/g) sepanjang 4 minggu penyimpanan. Kondisi ini mendukung keberlangsungan aktivitas enzim GAD, yang bertanggung jawab dalam pembentukan GABA.

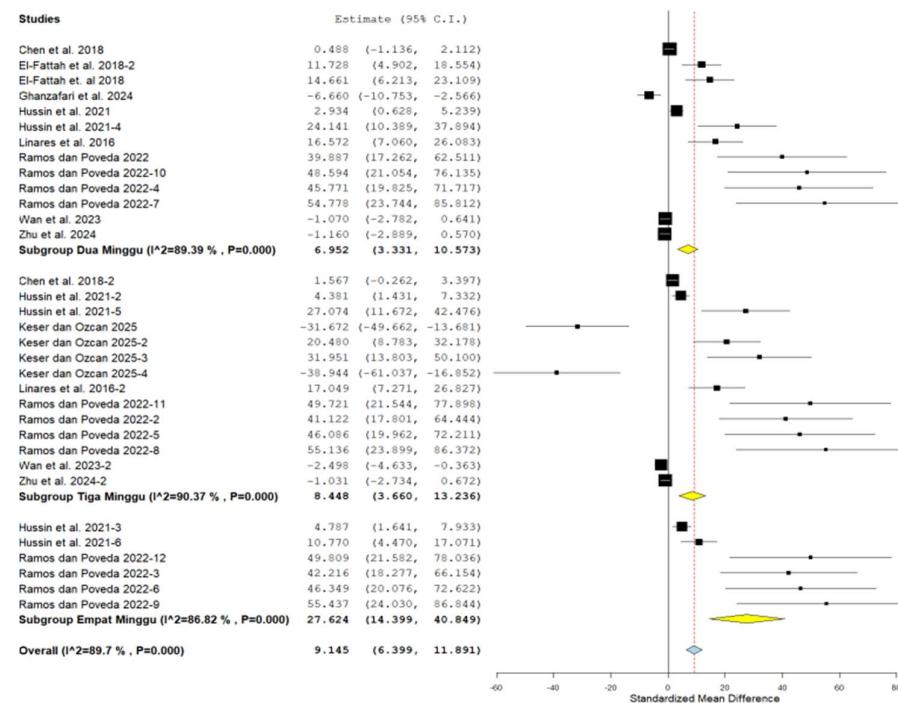
Meskipun laju fermentasi melambat, bakteri asam laktat tetap melanjutkan proses fermentasi sekunder selama penyimpanan, sehingga senyawa GABA terus diproduksi secara bertahap dari sisa asam glutamat yang tersedia. Hussin *et al.* (2021) menyatakan bahwa GABA cenderung terakumulasi dalam medium fermentasi karena bukan merupakan substrat utama bagi mikroorganisme lain. Oleh karena itu, GABA yang terbentuk akan menumpuk dan tidak diuraikan lebih lanjut. Hal ini menunjukkan bahwa akumulasi GABA berlangsung progresif seiring waktu, karena aktivitas enzim GAD tetap berlanjut meskipun populasi bakteri yang sedikit menurun.

Mekanisme pada yogurt yang diperkaya GABA menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan dibandingkan dengan yogurt konvensional. GABA yang dihasilkan oleh bakteri asam laktat memiliki kemampuan menetralkan ion H⁺ dalam medium fermentasi. Selama proses fermentasi, jalur metabolisme pembentukan GABA mengonsumsi ion H⁺, sehingga penurunan pH berlangsung lebih lambat dan tidak sedrastis yogurt biasa (Hussin *et al.* 2021). Stabilitas pH yang relatif terjaga ini membantu mempertahankan struktur gel protein yogurt, sehingga tekstur yogurt tetap stabil dan kapasitas menahan air cenderung meningkat selama penyimpanan. Meski demikian, peningkatan ini tidak signifikan secara statistik ($p > 0,05$), sehingga kapasitas menahan air

dikategorikan stabil selama periode penyimpanan. Stabilitas ini menunjukkan bahwa struktur gel protein tidak mengalami kerusakan besar yang dapat menyebabkan sineresis.

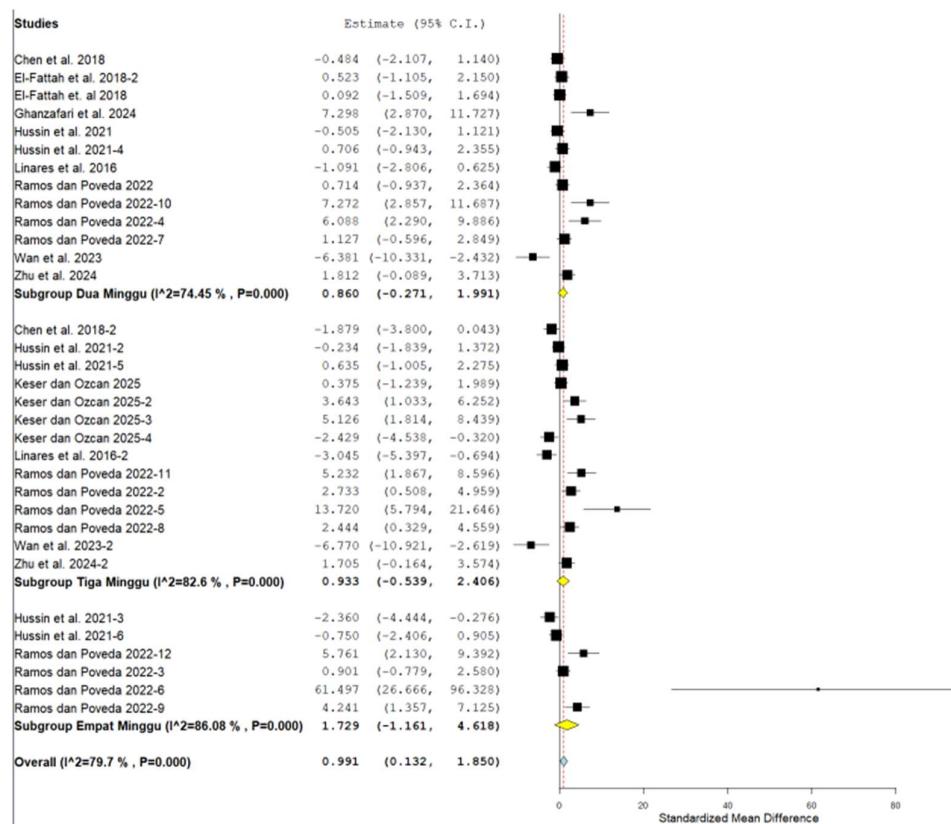
Selain itu, aktivitas bakteri *starter* tetap berlangsung meskipun lebih lambat akibat suhu rendah. Kedua bakteri tersebut memiliki toleransi terhadap lingkungan asam dan tetap dapat memproduksi asam laktat dalam kondisi dingin yang menyebabkan penurunan pH yogurt secara bertahap. Penurunan ini memicu terjadinya post-asidifikasi, yaitu proses lanjutan produksi asam laktat setelah fermentasi utama selesai. Kondisi ini mendorong denaturasi protein susu dan memengaruhi kekuatan serta integritas struktur gel, yang pada akhirnya dapat meningkatkan sineresis dan menurunkan kapasitas menahan air, terutama pada penyimpanan yang lebih lama (Arab *et al.* 2022). Akan tetapi, kehadiran senyawa GABA yang terbentuk selama penyimpanan dingin dapat membantu menetralkan sebagian ion H⁺ yang dihasilkan, sehingga menjaga kestabilan pH dan memperlambat efek degradasi struktur gel tersebut.

Berdasarkan Gambar 16, kandungan GABA dalam yogurt meningkat secara signifikan seiring bertambahnya durasi penyimpanan dingin. Nilai peningkatan kandungan GABA tertinggi ditemukan pada minggu keempat, yaitu sebesar 95% dengan rata-rata dari 8,7 mg/100g menjadi 16,9 mg/100g, yang secara signifikan lebih tinggi dibandingkan minggu ketiga sebesar 94% dan minggu kedua penyimpanan dingin yang sebesar 84% (Hussin *et al.* 2021). Peningkatan ini memperlihatkan bahwa aktivitas enzim GADA tetap berlangsung secara bertahap selama penyimpanan dan didukung oleh lingkungan asam yang stabil serta keberadaan glutamat sebagai substrat utama. Dengan demikian, proses penyimpanan tidak hanya menjaga viabilitas bakteri, tetapi juga mempertahankan jalur biosintesis GABA secara aktif.



Gambar 16 Forest plot subkelompok durasi penyimpanan terhadap kandungan GABA

Sementara itu, berdasarkan Gambar 17, kapasitas menahan air yogurt menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya waktu namun tidak signifikan secara statistik ($p > 0,05$) dengan peningkatan rata-rata sebesar 21% dengan nilai kapasitas menahan air sebesar 50% – 56% sepanjang penyimpanan dingin, sehingga kapasitas menahan air dinyatakan relatif stabil (Ramos dan Poveda 2022). Hal ini mengindikasikan bahwa struktur gel protein tidak mengalami kerusakan berarti selama penyimpanan, bahkan mengalami perbaikan akibat penguatan struktur protein oleh stabilitas pH. Di sisi lain, post-asidifikasi yang terjadi akibat produksi lanjutan asam laktat dalam kondisi dingin oleh bakteri asam laktat cenderung menurunkan pH dan berpotensi meningkatkan sineresis (Arab *et al.* 2022). Namun, akumulasi GABA yang menjaga kestabilan pH mampu menghambat efek negatif ini dan mempertahankan kapasitas menahan air pada tingkat yang relatif konstan.



Gambar 17 Forest plot subkelompok durasi penyimpanan terhadap kapasitas menahan air



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak meninggikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

V SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Penyimpanan dingin selama lebih dari dua minggu menunjukkan pengaruh signifikan terhadap peningkatan kandungan GABA dan kapasitas menahan air yogurt. Hasil meta-analisis menunjukkan bahwa variasi jenis *starter*, tipe susu, dan durasi penyimpanan merupakan faktor penting yang memengaruhi stabilitas kedua parameter tersebut. Penggunaan *starter* komersial dengan penambahan *Lacticaseibacillus paracasei* serta pemanfaatan susu kambing secara konsisten meningkatkan kandungan GABA dan kapasitas menahan air yogurt selama penyimpanan dingin. Sebaliknya, penggunaan susu kedelai menyebabkan penurunan signifikan pada kedua parameter. Durasi penyimpanan selama empat minggu menghasilkan kandungan GABA tertinggi tanpa menurunkan stabilitas kapasitas menahan air. Oleh karena itu, penyimpanan dingin berpotensi dimanfaatkan sebagai strategi untuk mempertahankan dan meningkatkan kualitas fungsional serta tekstur yogurt, khususnya jika didukung oleh formulasi dan proses produksi yang sesuai.

5.2 Saran

Berdasarkan temuan penelitian ini, disarankan untuk melakukan validasi lebih lanjut terhadap efektivitas penyimpanan dingin selama empat minggu dalam kondisi nyata, termasuk selama proses distribusi dan setelah kemasan yogurt dibuka. Penelitian lanjutan juga perlu mengaplikasikan pendekatan meta-regresi untuk mengevaluasi interaksi antara jenis *starter*, tipe susu, dan durasi penyimpanan dalam memengaruhi ketabilan kandungan GABA dan kapasitas menahan air. Kombinasi penggunaan *Lacticaseibacillus paracasei* dan susu kambing yang terbukti optimal dari sisi fungsionalitas perlu diuji lebih lanjut dari aspek sensoris dan penerimaan konsumen. Selain itu, bagi industri pangan, hasil ini menjadi dasar penting dalam pengembangan yogurt sehingga diperlukan pengembangan formulasi produk yang stabil secara fungsional selama penyimpanan serta optimal dalam segi rasa dan tekstur. Penelitian ini juga disarankan untuk mengevaluasi biaya produksi dan potensi komersialisasi produk yogurt tinggi GABA, agar dapat bersaing secara ekonomi dan memenuhi kebutuhan konsumen yang semakin sadar akan manfaat pangan fungsional.



DAFTAR PUSTAKA

- Abdelmoneim AH, Sherif AM, Sameh KA. 2016. Rheological properties of yoghurt manufactured by using different types of hydrocolloids. *Austin J Nutri Food Sci.* 4(2):1082.
- Afandi FA, Wijaya CH, Faridah DN, Suyatma NE, Jayanegara A. 2021. Evaluation of various starchy foods: A systematic review and meta-analysis on chemical properties affecting the glycemic index values based on in vitro and in vivo experiments. *Foods.* 10(2):364. doi:10.3390/FOODS10020364.
- Al-Kaisy QH, Rahi AK. 2023. Desirable physical and rheological properties of yogurt produced with a traditional starter compared to different commercial starters. *Journal of Hygienic Engineering and Design.*
- Andrade C. 2020. Mean difference, standardized mean difference (SMD) and their use in meta-analysis: as simple as it gets. *J Clin Psychiatry.* 81(5):20f13681. doi:10.4088/JCP.20f13681
- Arab M, Yousefi M, Khanniri E, Azari M, Ghasemzadeh-Mohammadi V, Mollakhalili-Meybodi N. 2022. A comprehensive review on yogurt syneresis: effect of processing conditions and added additives. *J Food Sci Technol.* 60:6:1656-1665. doi:10.1007/s13197-022-05403-6
- Azizan NAZ, Lim TC, Raseeta S, Wan-Mohtar WA. 2022. Development of γ -aminobutyric acid (GABA)-rich yoghurt using *Tetragenococcus halophilus* strain KBC isolated from a commercial soy sauce moromi. *Food Research.* 6(6):39-47. doi:10.26656/fr.2017.6(6).676
- Bjørklund G, Meguid NA, El-Ansary A. 2023. Neuroprotection through probiotic intervention: Lessons from autism research. *ARS Medica Tomitana.* 29(2):100-106. doi:10.2478/arstm-2023-0015
- Borenstein M, Hedges LV, Higgins JPT, Rothstein HR. 2021. *Introduction to Meta-Analysis.* Wiley Publishing: Hoboken (USA)
- Braga JD, Thongngam M, Kumrungsee T. 2024. Gamma-aminobutyric acid as a potential postbiotic mediator in the gut–brain axis. *npj Science of Food.* 8:16. doi:10.1038/s41538-024-00253-2
- Chen L, Alcazar J, Yang T, Lu Z, Lu Y. 2018. Optimized cultural conditions of functional yogurt for gamma-aminobutyric acid augmentation using response surface methodology. *J. Dairy Sci.* 101:10685-10693. doi:10.3168/jds.2018-15391
- Cheng Q, Sun DW. 2018. Factors affecting the water holding capacity of red meat products: a review of recent research advances. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition.* 48(2):137–159. doi:10.1080/10408390601177647
- Chun JY, Kim B, Lee JG, Cho HY, Min SG, Choi MJ. 2014. Effects of NaCl replacement with gamma-aminobutyric acid (GABA) on the quality characteristics and sensorial properties of model meat products. *Korean J Food Sci Anim Resour.* 34(4):552-557. doi:10.5851/kosfa.2014.34.4.552
- Cook DA, West CP. 2012. Conducting systematic reviews in medical education: A stepwise approach. *Medical Education.* 46(10):943-952.
- Cui Y, Miao K, Niyaphorn S, Qu X. 2020. Production of gamma-aminobutyric acid from lactic acid bacteria: a systematic review. *International Journal of Molecular Sciences.* 21(3):995. doi:10.3390/ijms21030995



- Diez-Gutiérrez L, Vicente LS, Sáenz J, Esquivel A, Barron LJR, Chávarri M. 2022. Biosynthesis of gamma-aminobutyric acid by *Lactiplantibacillus plantarum* K16 as an alternative to revalue agri-food by-products. *Sci Rep.* 12(1):18904. doi:10.1038/s41598-022-22875-w
- Dumont M, Orsat V, Raghavan V. 2016. *Emerging Technologies for Promoting Food Security*. Woodhead Publishing: Cambridge (UK)
- de Souza M, Drunkler DA, Colla E. 2024. Probiotic functional yogurt: challenges and opportunities. *Fermentation*. 10(6). doi:10.3390/fermentation10010006
- Doan ND, Hà DT. 2020. Ảnh hưởng của các phương pháp xử lý nhiệt kết hợp với lên men đến hàm lượng axit gamma-aminobutyric, axit phytic và tính chất lý hóa của sữa chua đậu nành này mầm. *J. Agri. Sci.* 18(5):367-377.
- El Bouchikhi S, Pagès P, El Alaoui Y, Ibrahim A, Bensouda Y. 2019. Investigasi sineresis natrium caseinat terfermentasi lakto dalam sistem model campuran. *BMC Biotechnol.* 19:57. doi:10.1186/s12896-019-0539-1
- El-Fattah AA, Sakr S, El-Dieb S, Elkashef H. 2018. Developing functional yogurt rich in bioactive peptides and gamma-aminobutyric acid related to cardiovascular health. *LWT- Food Science and Technology*. 98:390-397. doi:10.1016/j.lwt.2018.09.022
- El-Gammal RE, Abdel-Aziz ME, Darwish MS. 2017. Utilization of aqueous extract of moringa oleifera for production of functional yogurt. *JFDS*. 7(8):45-53. doi:10.21608/jfds.2017.37114-ga
- Erem E, Kilic-Akyilmaz. 2024. The role of fermentation with lactic acid bacteria in quality and health effects of plant-based dairy analogues. *Comprehensive Review in Food Science and Technology*. 23:e13302. doi:10.1111/1541-4337.13302
- Erkmen O, Bozoglu TF. 2016. *Food Microbiology: Principles to Practice*. Elsevier: Amsterdam (NDL)
- Evans J. 2016. *The Stability and Shelf Life of Food*. Elsevier: Amsterdam (NDL)
- Fragkos KC, Tsagris M, Frangos CC. 2014. Publication bias in meta-analysis: Confidence intervals for Rosenthal's Fail-Safe number. *International Scholarly Research Notices*. 2014(1):825383. doi:10.1155/2014/825383
- Ghanzafari N, Falah F, Yazdi FT, Behbahani BA, Vasiee A. 2024. Development and characterization of gamma-aminobutyric acid (GABA)-enriched functional yogurt using *Limosilactobacillus fermentum* 4-17. *Applied Food Research*. 100557. doi:10.1016/j.afres.2024.100557
- Gurevitch J, Koricheva J, Nakagawa S, Stewart G. 2018. Meta-analysis and the science of research synthesis. *Nature*. 555(7695):175–182.
- Gyawali R, Feng X, Chen YP, Lorenzo JM, Ibrahim SA. 2022. A review of factors influencing the quality and sensory evaluation techniques applied to Greek yogurt techniques applied to Greek yogurt. *Journal of Dairy Research*. 89:213-219. doi:10.1017/S0022029922000336
- Hadjimbei E, Botsaris G, Chrysostomou S. 2022. Beneficial effects of yoghurts and probiotic fermented milks and their functional food potential. *Foods*. 11(17):2691. doi:10.3390/foods11172691
- Hati S, Vij S, Mandal S, Malik R, Kumari V, Khetra Y. 2015. α -Galactosidase activity and oligosaccharides utilization by lactobacilli during fermentation of soy milk. *Journal of Food Processing and Preservation*. 38(3). doi:10.1111/jfpp.12063



- Higgins JP, Thomas J, Chandler J, Cumpston M, Li T, Page MJ, Welch VA. 2019. *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions*. John Wiley & Sons: Chichester (UK)
- Hunter JE, Schmidt FL. 2015. *Methods of Meta-Analysis: Correcting Error and Bias in Research Findings*. SAGE Publications: Los Angeles (USA)
- Hussin FS, Chay SY, Hussin ASM, Ibadullah WZW, Muhialdin BJ, Ghani MSA, Saari N. 2021. GABA enhancement by simple carbohydrates in yoghurt fermented using novel, self-cloned *Lactobacillus plantarum* Taj-Apis362 and metabolomics profiling. *Scientific Reports*. 11:9417. doi:10.1038/s41598-021-88436-9
- Hoxha R, Evstatieva Y, Nikolova D. 2023. Physicochemical, rheological, and sensory characteristics of yogurt fermented by lactic acid bacteria with probiotic potential and bioprotective properties. *Foods*. 12(13):2552. doi:10.3390/foods12132552
- Iorizzo M, Paventi G, Di Martino C. 2024. Biosynthesis of gamma-aminobutyric acid (gaba) by *Lactiplantibacillus plantarum* in fermented food production. *Current Issues in Molecular Biology*. 46(1):200-220. doi:10.3390/cimb46010015
- Isima CU, Gagu N, Legi NN, Paruntu OL. 2024. Umur simpan minuman probiotik yoghurt labu kuning dengan kacang hijau. *Journal Health and Nutritions*. 10(1):1-5.
- Kanklai J, Thongwai N, Rungsirivanich P, Tragoonrueang Y, Pekkoh J. 2022. Optimization of GABA production and partial gad gene identification of potential probiotic *Levilactobacillus brevis* F064A isolated from thai fermented sausage. *Chiang Mai J. Sci.* 49(4):1013-1027. doi:10.12982/CMJS.2022.068
- Kapadiya DB, Prajapati DB, Jain AK, Mehta BM, Darji VB, Aparnathi KD. 2016. Comparison of surti goat milk with cow and buffalo milk for gross composition, nitrogen distribution, and selected minerals content. *Vet World*. 9(7):710-716. doi:10.14202/vetworld.2016.710-716
- Keser G, Ozcan T. 2025. Cross-over fermentation dynamics and proteomic properties of acid gels with indigenous *iLactobacillus* spp. isolated from cheeses. *Food Microbiology*. 128:104700. doi:10.1016/j.fm.22024.104700
- Khairunnisa, Sari FF, Anggelan M, Agustika D, Nursa'adah E. 2022. Penggunaan effect size sebagai mediasi dalam koreksi efek suatu penelitian. *Jurnal Pendidikan Matematika: Judika Education*. 5(2):138-151. doi:10.31539/judika.v5i2.4802
- Khanal SP, Koirala RP, Mishra E, Adhikari NP. 2021. Molecular dynamics study of structural properties of γ -aminobutyric acid (GABA). *BIBECHAN*. 18(1):67-74. doi:10.3126/bibechna.v18i1.29442
- Kong X, Xiao Z, Du M, Wang K, Yu W, Chen Y, Liu Z, Cheng Y, Gan J. 2024. Physicochemical, textural, and sensorial properties of soy yogurt as affected by addition of low acyl gellan gum. *Gels*. 8(7):453. doi:10.3390/gels8070453
- Leo GD, Sardanelli F. 2020. Statistical significance: p value, 0.05 threshold, and applications to radiomics—reasons for a conservative approach. *European Radiology Experimental*. 4(18). doi:10.1186/s41747-020-0145-y
- Li A, Han x, Zheng J, Zhai J, Cui N, Du P, Xu J. 2023. Effects of freezing raw yak milk on the fermentation performance and storage quality of yogurt. *Foods*.



12(17): 32-50. doi: 10.3390/foods1217322

- Liao J, Wu X, Xing Z, Li Q, Duan Y, Fang W, Zhu X. 2017. γ -aminobutyric acid (GABA) accumulation in tea (*Camellia sinensis* L.) through the GABA shunt and polyamine degradation pathways under anoxia. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 65:3013-3018. doi:10.1021/acs.jafc.7b00304
- Lin L. 2018. Bias caused by sampling error in meta-analysis with small sample sizes. *PloS One*. 13(9):e0204056. doi:10.1371/journal.pone.0204056
- Linares DM, O-Callaghan TF, O'Connor PM, Ross RP, Stanton C. 2016. *Streptococcus thermophilus* APC151 strain is suitable for the manufacture of naturally GABA-enriched bioactive yogurt. *Front. Microbiol.* 7:1876. doi:10.3389/fmicb.2016.01876
- Mafe AN, Edo GI, Makia RS, Joshua OA, Akpoghelie PO, Gaaz TS, Jikah AN, Yousif E, Isoje EF, Igbuku UA, Ahmed DS, Essaghah AEA, Umar H. 2024. A review on food spoilage mechanisms, food borne diseases and commercial aspects of food preservation and processing. *Food Chemistry Advances*. 5:100852. doi:10.1016/j.focha.2024.100852
- Mansor M, Zulkifli A, Lotfi ARM, Sani, MSA, Al-Obaidi JR, Ab Rashid NM, Khatib A, Razis AFA, Hussin ASM, Selamat J, Jambari N. 2025. Evaluation of cold storage effect on murrah buffalo milk yoghurt quality and safety attributes through fourier transform infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Food Control*. 176(1):111395. doi:10.1016/j.foodcont.2025.111395
- Mei X, Chen Y, Zhang L, Fu X, Wei Q, Grierson D, Zhou Y, Huang Y, Dong F, Yang Z. 2016. Dual mechanisms regulating glutamate decarboxylases and accumulation of gamma-aminobutyric acid in tea (*Camellia sinensis*) leaves exposed to multiple stresses. *Sci Rep*. 23685. doi:10.1038/srep23685
- Mikolajewicz N, Komarova S V. 2019. Meta-analytic methodology for basic research: a practical guide. *Front Physiol*. 10. doi:10.3389/fphys.2019.00203
- Moher D, Shamseer L, Clarke M, Ghersi D, Liberati A, Petticrew M, Shekelle P, Stewart LA. 2015. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P). *Syst Rev*. 4(1):1. doi:10.1186/2046-4053-4-1
- Nishimura M, Yoshida S, Haramoto M, Mizuno H, Fukuda T, Kagami-Katsuyama H, Tanaka A, Ohkawara T, Sato Y, Nishihira J. 2015. Effects of white rice containing enriched gamma-aminobutyric acid on blood pressure. *J Tradit Complement Med*. 6(1):66-71. doi:10.1016/j.jtcme.2014.11.022
- Nurhasanah, Fu'adah IT, Satria H, Yuwono SD. 2020. Analisis eksopolisakarida dari bakteri asam laktat hasil fermentasi kefir kolostrum. *Analit*. 5(1):65-73. doi:10.23960/aec.v5.i1.2020.p65-73
- Olson DW, Aryana KJ. 2022. Probiotic incorporation into yogurt and various novel yogurt-based products. *Applied Sciences*. 12(24):12607. doi:10.3390/app122412607
- Palupi E, Jayanegara A, Ploeger A, Kahl J. 2012. Comparison of nutritional quality between conventional and organic dairy products: A meta-analysis. *J Sci Food Agric*. 92(14):2774-2781. doi:10.1002/jsfa.5639.
- Prayitno SSP, Sumarmono J, Rahardjo AHD, Setyawardani T. 2020. Modifikasi sifat fisik yogurt susu kambing dengan penambahan microbial transglutaminase dan sumber protein eksternal. *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*. 9(2):77-82. doi:10.17728/jatp.6396
- Puvanenthiran A, Stevovitch-Rykner C, McCann TH, Day L. 2014. Synergistic



- effect of milk solids and carrot cell wall particles on the rheology and texture of yoghurt gels. *Food Research International.* 62:701-708. doi:10.1016/j.foodres.2014.04.023.
- Ramos IM, Poveda JM. 2022. Fermented sheep's milk enriched in gamma amino butyric acid (GABA) by the addition of lactobacilli strains isolated from different food environments. *LWT.* 163:113581. doi:10.1016/j.lwt.2022.113581
- Retnawati H, Apino E, Djidu H, Anazifa RD. 2018. *Pengantar Analisis Meta.* Parama Publishing: Yogyakarta (ID)
- Schmidt FL, Oh IS, Hayes TL. 2019. Fixed- versus random-effects models in meta-analysis: model properties and an empirical comparison of differences in results. *The British Journal of Mathematical and Statistical Psychology.* 62(1):97-128. doi:10.1338/000711007X255327
- Sfakianakis P, Tzia C. 2014. Conventional and innovative processing of milk for yogurt manufacture; Development of texture and flavor: A review. *Foods.* 3(1):176-193. doi:10.3390/foods3010176
- Sheffler ZM, Reddy V, Pillarisetty LS. 2023. *Physiology, Neurotransmitter.* Treasure Island (FL): StatPearls Publishing.
- Shen Y, Hong S, Li Y. 2022. *Advances in Food and Nutrition Research.*
- Siddiqi M, Tarrah A, Chen Z, LaPointe G. 2024. Phenotypic differentiation of *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgaricus* isolates found in yogurt starter cultures. *Fermentation.* 10:601. doi:10.3390/fermentation10120601
- Sionek B, Szydłowska A, Trząskowska M, Kołożyn-Krajewska D. 2024. the impact of physicochemical conditions on lactic acid bacteria survival in food products. *Fermentation.* 10(6):298. doi:10.3390/fermentation10060298
- Sumarmono J. 2016. *Yogurt & Concentrated Yogurt: Makanan Fungsional Dari Susu.*
- Sun L, Bai Y, Zhang X, Zhou C, Zhang J, Su X, Luo H, Yao B, Wang Y, Tu T. 2021. Characterization of three glutamate decarboxylases from *Bacillus* spp. for efficient γ -aminobutyric acid production. *Microbial Cell Factories.* 20:153. doi:10.1186/s12933-021-01646-8
- Sun Y, Mehmood A, Battino M, Xiao J, Chen X. 2022. Enrichment of gamma-aminobutyric acid in foods: From conventional methods to innovative technologies. *Food Research International.* 162:111801. doi:10.1016/j.foodres.2022.111801.
- Syainah E, Novita S, Yani R. 2014. Kajian pembuatan yoghurt dari berbagai jenis susu dan inkubasi yang berbeda terhadap mutu dan daya terima. *Jurnal Skala Kesehatan.* 5(1). doi:10.31964/jsk.v5i1.10
- Tarahi M, Abdolalizadeh L, Hedayati S. 2024. Mung bean protein isolate: Extraction, structure, physicochemical properties. *Food Chemistry.* 444. doi:10.1016/j.foodchem.2024.138626
- Taormina PJ. 2021. *Food Safety and Quality-Based Shelf Life of Perishable Foods.*
- Tawfik GM, Dila KAS, Mohamed MYF, Tam DNH, Kien ND, Ahmed AM, Huy NT. 2019. A step by step guide for conducting a systematic review and meta-analysis with simulation data. *Trop Med Health* 47(46). doi:10.1186/s41182-019-0165-6
- Unur D, Fathimah, Nursafitri E, Asadel B, Yunita CN, Purwadi, Thohari I, Jaya F,



- Rahayu PP. 2024. The quality of yoghurt drink with guar gum and cornstarch as stabilizer. 22(3):156-166. doi:10.20961/lar.v22i3.87368
- Van LA, Giang NT, Hang NT. 2019. Study on appropriate conditions to obtain germinated brown rice with high biological activities. *Vietnam Journal of Science and Technology*. 57(3B):116-126. doi:10.15625/2525-2518/57/3B/14444
- Vitheejongjaroen P, Phettakhu P, Arsayot W, Taweechotipatr M, Pachekrepapol U. 2024. The ability of lacticaseibacillus paracasei msnc 36-9 strain with probiotic potential to ferment coconut milk and produce a yogurt-type beverage. *Beverages*. doi:10.3390/beverages10020030
- Wan P, Liu H, Zhu Y, Xin H, Ma Y, Chen Z. 2023. Effects of *Polygonatum sibiricum* on physicochemical properties, biological compounds, and functionality of fermented soymilk. *Foods*. 12: 2715. doi:10.3390/foods12142715
- Wang Y, Wu J, Lv M, Shao Z, Hungwe M, Wang J, Bai X, Xie J, Wang Y, Geng W. 2021. Metabolism characteristics of lactic acid bacteria and the expanding applications in food industry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 9:612285. doi:10.3389/fbioe.2021.612285
- Wang Y, Zhao J, Liu C, Li W. 2019. Influence of γ -aminobutyric acid on gelling properties of heat-induced whey protein gels. *Food Hydrocolloids*. 94:287-293. doi:10.1016/j.foodhyd.2019.03.031
- Wu X, Jia Q, Ji S, Gong B, Li J, Lü G, Gao H. 2020. Gamma-aminobutyric acid (GABA) alleviates salt damage in tomato by modulating Na⁺ uptake, the GAD gene, amino acid synthesis and reactive oxygen species metabolism. *BMC Plant Biology*. 20:465. doi:10.1186/s12870-020-02669-w
- Xavier LS, Pacheco FC, Nalon GA, Cunha JS, Santos FR, Pacheco AFC, Tribst AAL, Leite Júnior BRC. 2024. Strategies to improve the quality of goat yogurt: whey protein supplementation and milk pre-treatment with high shear dispersion assisted by ultrasound. 13:1558. doi:10.3390/foods13101558
- Yan Y, Li Q, Du HZ, Shen CX, Li AP, Pei XP, Du CH, Qin XM. 2019. Determination of five neurotransmitters in the rat brain for the study of the hypnotic effects of Ziziphi Spinosae Semen aqueous extract on insomnia rat model by UPLC-MS/MS. *Chinese Journal of Natural Medicines*. 17(7):551-560.
- Yao R, Cools A, Matthijs A, De Deyn PP, Maes D, Janssens GPJ. 2023. Peculiarities in the amino acid composition of sow colostrum and milk, and their potential relevance to piglet development. *Veterinary Sciences*. 10(298). doi:10.3390/vetsci10040298
- Yogeswara IBA, Maneerat S, Haltrich D. 2020. Glutamate decarboxylase from lactic acid bacteria—A key enzyme in GABA synthesis. *Microorganisms*. 8(12):1923. doi:10.3390/microorganisms8121923
- Zhu F, Hu S, Mei L. 2024. Production and quality evaluation of a novel γ -aminobutyric acid-enriched yogurt. *Front. Nutr.* 11:1404743. doi:10.3389/fnut.2024.1404743