BLACK GARLIC: KANDUNGAN SENYAWA BIOAKTIF, DAN BIOAKTIVITASNYA

BLACK GARLIC: BIOACTIVE COMPOUNDS AND THEIR BIOACTIVITIES

Fistara Lesti Rahmafitria dan Nuniek Herdyastuti*
Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences
Universitas Negeri Surabaya
Jl. Ketintang, Surabaya (60231), Telp. 031-8298761

** Corresponding author, email: nuniekherdyastuti@unesa.ac.id*

Abstrak. *Black garlic merupakan produk olahan bawang putih (Allium sativum L.) yang dihasilkan melalui pemanasan terkontrol pada suhu dan kelembapan tinggi selama periode tertentu. Proses ini menyebabkan perubahan sensori yang khas, berupa warna hitam, tekstur yang lebih lunak, rasa lebih manis, dan aroma yang lebih tidak terlalu menyengat dibandingkan bawang putih segar. Perubahan termal tersebut menyebabkan perubahan sifat secara kimia, seperti penurunan allicin dan peningkatan senyawa bioaktif yang lebih stabil seperti S-allyl-L-cysteine (SAC), polifenol, flavonoid, dan produk reaksi Maillard. Perubahan komposisi ini berkaitan erat dengan berbagai bioaktivitas black garlic, terutama aktivitas antioksidan, disusul aktivitas antiinflamasi, antidiabetes, antikanker, antimikroba, serta efek kardiovaskular dan metabolik. Laporan penelitian masih menunjukkan heterogenitas data yang tinggi karena dipengaruhi oleh perbedaan kondisi proses, varietas bahan baku, metode analisis, dan model biologis yang digunakan. Selain itu, bukti ilmiah yang tersedia masih terbatas pada studi analitik, in vitro, dan hewan, sementara bukti klinis pada manusia masih sangat sedikit. Artikel ini meninjau proses pembuatan, perubahan fisikokimia dan kimia, kandungan bioaktif, bioaktivitas, serta kesenjangan penelitian black garlic sebagai dasar pengembangan pangan fungsional berbasis bawang putih.*

Kata kunci**: **black garlic, pangan fungsional, proses pembuatan, perubahan fisikokimia

Abstract. *Black garlic is a processed garlic product (Allium sativum L.) produced through controlled heating at high temperatures and humidity for a specific period. This process causes distinctive sensory changes, including a black color, a softer texture, a sweeter flavor, and a less pungent aroma compared to fresh garlic. These thermal changes lead to chemical changes, such as a decrease in allicin and an increase in more stable bioactive compounds such as S-allyl-L-cysteine (SAC), polyphenols, flavonoids, and Maillard reaction products. These compositional changes are closely related to various bioactivities of black garlic, especially antioxidant activity, followed by anti-inflammatory, antidiabetic, anticancer, antimicrobial, and cardiovascular and metabolic effects. Research reports still show high data heterogeneity due to differences in processing conditions, raw material varieties, analytical methods, and biological models used. Furthermore, available scientific evidence is still limited to analytical, in vitro, and animal studies, while clinical evidence in humans is still very limited. This article reviews the manufacturing process, physicochemical and chemical changes, bioactive content, bioactivity, and research gaps in black garlic as a basis for developing garlic-based functional foods.*

Key words: black garlic, functional food, production process, physicochemical changes

© 2026 Unesa Journal of Chemistry (UJC). This work is licensed under CC 4.0

PENDAHULUAN

Bawang putih (*Allium sativum* L.) merupakan bahan pangan fungsional kaya senyawa bioaktif seperti golongan organosulfur, fenolik, dan flavonoid. Pada kondisi segar, aktivitas antimikroba, antiinflamasi, dan antioksidannya didominasi oleh senyawa sulfur volatil seperti alliin dan allicin yang juga membentuk aroma khasnya. Aroma khas bawang putih yang tajam dan menyengat membuat banyak orang tidak menyukainya, sehingga diperlukan inovasi pengolahan, salah satunya melalui proses pemanasan, untuk memperbaiki karakteristik sensori dan meningkatkan penerimaan produk. Namun, karena sifat senyawa tersebut yang tidak stabil terhadap suhu tinggi, proses pengolahan termal secara signifikan dapat mengubah profil kimia serta potensi bioaktivitasnya [1], [2].

Salah satu bentuk pengolahan yang banyak dikaji adalah *black garlic*, yaitu bawang putih yang diproses melalui pemanasan terkontrol pada suhu dan kelembapan tinggi selama periode tertentu. Secara umum, *black garlic* diproduksi pada kisaran suhu 60–90 °C [1], [3]; dan kelembapan relatif 50–90% selama 10–90 hari, meskipun studi primer menunjukkan variasi kondisi yang cukup lebar, mulai dari sekitar 30 hingga 90 °C, bergantung pada varietas bahan baku, target mutu, dan teknologi proses yang digunakan [4]. Proses tersebut menghasilkan perubahan warna menjadi hitam, rasa yang lebih manis, tekstur lebih lunak, dan aroma yang lebih ringan dibandingkan bawang putih segar [5]; contoh perubahan disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Perubahan Bawang Putih menjadi Bawang Hitam pada Proses Fermentasi (Sumber: Kimura *et al*., 2017)

Perubahan sensori pada bawang putih selama proses fermentasi berlangsung seiring dengan perubahan kimia yang besar. Selama *thermal aging*, allicin dan prekursor sulfur reaktif lain mengalami degradasi, sedangkan senyawa yang lebih stabil seperti S-allyl-L-cysteine (SAC) meningkat secara nyata. Selain itu, kandungan polifenol, flavonoid, serta produk reaksi Maillard seperti melanoidin dan 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) juga meningkat. Literatur menunjukkan bahwa SAC dapat meningkat hingga 139 kali [6], total polifenol meningkat sekitar 3–15 kali, dan flavonoid dilaporkan dapat meningkat hingga 86 kali dibandingkan bawang putih segar [7], bergantung pada kondisi proses dan bahan baku yang digunakan [8].

Perubahan komposisi kandungan senyawa tersebut berkaitan dengan berbagai bioaktivitas *black garlic*. Aktivitas antioksidan merupakan aktivitas yang paling banyak dilaporkan, tetapi aktivitas antiinflamasi, antidiabetes, antikanker, antimikroba, serta efek kardiovaskular dan metabolik juga telah banyak ditunjukkan pada studi *in vitro* dan model hewan; namun bukti ilmiah yang tersedia masih didominasi oleh studi analitik, kultur sel, dan hewan, sedangkan data intervensi manusia masih sangat terbatas dan belum cukup untuk mendukung klaim kesehatan yang kuat. Perubahan *black garlic* sangat menarik dikaji dari aspek proses pembuatan, perubahan fisikokimia dan kimia selama proses, kandungan bioaktif, serta bioaktivitasnya sebagai dasar untuk memahami potensinya sebagai pangan fungsional.

PROSES PEMBUATAN

Black garlic diproduksi dengan memanaskan bawang putih utuh atau siung kupas pada suhu dan kelembapan tinggi selama periode tertentu, tanpa penambahan mikroorganisme fermentatif dalam pengertian konvensional. Literatur menunjukkan bahwa kisaran proses yang paling umum berada pada suhu 60–80 °C, tetapi banyak studi juga melaporkan penggunaan suhu lebih rendah atau lebih tinggi bergantung pada tujuan proses. Najman et al. (2020; 2021) menggunakan 70 °C dan 80% RH selama 45 hari [9], [10], sedangkan Choi et al. (2014) menggunakan 70 °C dan 90% RH hingga 35 hari [11]. Pada suhu lebih tinggi, lama proses dapat dipersingkat, sebagaimana ditunjukkan oleh Pires et al. (2019), yang memperoleh tingkat pencoklatan yang sesuai hanya dalam 5 hari pada 80 °C [12]. Ringkasan parameter dan variasi kondisi proses disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Proses Pembuatan *Black garlic*

Parameter	Kondisi proses	Fokus pengamatan	Hasil utama	Keterangan	Referensi
Suhu, RH, dan durasi	70 °C; 90% RH; hingga 35 hari	Fisikokimia, antioksidan	Polifenol, flavonoid, dan aktivitas antioksidan meningkat selama aging	Prosdur pembuatan yang paling sering dirujuk	[11]
	70 °C; 80% RH; 45 hari	Antioksidan, komponen fenolik	Antioksidan dan komponen fenolik meningkat pada *black garlic* organik dan konvensional	Pengaruh sistem budidaya bahan baku	[9], [10]
	70 °C; 85% RH; 5–40 hari	Antioksidan, bakteriostatik	DPPH meningkat hingga 70,95%; efek bakteriostatik optimal pada Gram-positif	Lama aging memengaruhi antioksidan dan antimikroba	[13]
	65 °C; 85% RH; 24 hari	Optimasi TPC, SAC, 5-HMF	TPC 1152,46 mg GAE/100 g DM; SAC 80,21 mg/100 g; 5-HMF 0,60 g/kg	Titik optimum berbasis RSM pada TPC, SAC, dan 5-HMF	[8]
Pretreatment	$CaCl_2$ 10 °C, 72 jam + freezing −18 °C, 30 jam; lalu 80 °C/80% RH, 1 minggu	SAC, DPPH, ABTS	SAC 874,26 mg/100 g DW; antioksidan sangat tinggi	Pretreatment dapat mempercepat proses dan meningkatkan bioaktif	[14]
	Freezing −16 °C, 30 jam	Aktivitas antioksidan	Antioksidan lebih tinggi daripada tanpa freezing	Pretreatment pembekuan dapat mempercepat aging	[15]
Proses inovatif	Proses 8,6 jam	SAC dan 5-HMF	SAC 2,3 kali komersial; 5-HMF hanya 5,6% dari komersial	Mampu menekan 5-HMF	[16]
RH	65–95% RH pada 70–75 °C selama 9 hari	Kualitas, polifenol, 5-HMF	RH tinggi menurunkan polifenol dan antioksidan, tetapi menurunkan 5-HMF 82,61%	RH tinggi memberikan pengaruh terhadap polifenol dan antioksidan namun juga 5-HMF	[17]

Variasi bahan baku secara signifikan memengaruhi mutu akhir *black garlic*, di mana bawang putih organik dan pemilihan varietas tertentu terbukti menghasilkan kadar polifenol

serta aktivitas antioksidan yang lebih superior dibandingkan bawang putih konvensional pada kondisi proses yang sama [9]. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik awal bahan baku merupakan faktor fundamental yang menentukan profil nutrisi dan total padatan terlarut setelah masa *aging* [18].

Kualitas tinggi *black garlic* merupakan hasil interaksi kompleks antara parameter inkubasi, inovasi *pretreatment*, dan sifat bawaan bahan baku. Pengaturan suhu dan kelembapan, seperti kondisi optimum 65 °C dan 85% RH selama 24 hari, sangat menentukan komponen bioaktif akhir [19]. Meskipun tidak ada metode standar yang mampu memaksimalkan seluruh parameter nutrisi sekaligus [20], aplikasi *pretreatment* seperti pembekuan dan perendaman $CaCl_2$ mampu mempercepat waktu proses sekaligus melipatgandakan aktivitas antioksidan, bahkan meningkatkan kadar SAC hingga 1772 mg/100 g dalam satu minggu [14], [15].

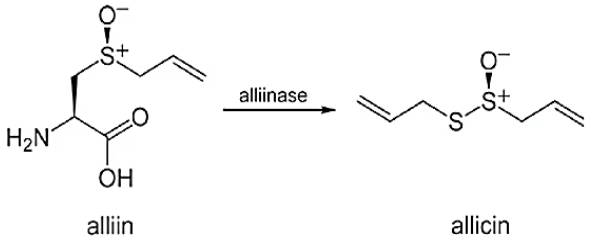
PERBEDAAN FISIKOKIMIA DAN KIMIA SELAMA PROSES FERMENTASI

Selama proses pemanasan, *black garlic* mengalami penurunan pH dan kadar air yang konsisten, disertai perubahan warna yang sangat nyata. Choi et al. (2014) melaporkan penurunan pH dari 6,33 menjadi 3,74 selama 35 hari [11], sedangkan Zhang et al. (2015) menunjukkan penurunan dari 6,25 menjadi 4,25 [21]. Kadar air juga cenderung menurun seiring berlangsungnya proses, seperti dari 66,13% menjadi 25,8% pada laporan Yuan et al. (2022) [22], sementara kecerahan menurun tajam akibat browning. Penurunan pH ini berkaitan dengan pembentukan asam organik selama reaksi Maillard dan reaksi pencoklatan lainnya.

Sejalan dengan perubahan pH dan kadar air, total padatan terlarut meningkat, mencerminkan akumulasi gula hasil degradasi polisakarida dan perubahan komponen kimia lain. Maldonade dan Mendes (2014) melaporkan peningkatan °Brix dari 22,9% menjadi 47,30% selama proses aging [23]. Tekstur juga berubah secara signifikan dimana pada awalnya bahan menjadi lebih lunak, tetapi dengan pemanasan yang terlalu lama kekerasan dapat meningkat kembali [20]. Perubahan-perubahan tersebut menunjukkan bahwa proses pembentukan *black garlic* merupakan hasil interaksi kompleks antara kehilangan air, pembentukan warna, perubahan rasa, dan modifikasi komponen kimia.

Perubahan Senyawa Organosulfur

Perubahan organosulfur adalah inti dari pembentukan *black garlic*. Pada bawang putih segar, alliin diubah menjadi allicin ketika jaringan rusak seperti pada Gambar 2. Namun, selama pemanasan, alliin dan allicin perlahan terdegradasi. Posisinya digantikan oleh *S-allylcysteine* (SAC) yang terbentuk melalui hidrolisis *γ-glutamyl-S-allyl-L-cysteine*. Pergeseran kimiawi ini sangat tegas; Sasmaz et al. (2024) mencatat bahwa allicin mendominasi bawang segar, sedangkan SAC merajai *black garlic*. Meski demikian, transisi ini terjadi secara dinamis, di mana kadar allicin sempat melonjak di awal proses sebelum akhirnya lenyap sepenuhnya di tahap akhir pemanasan (Yuan et al., 2022).



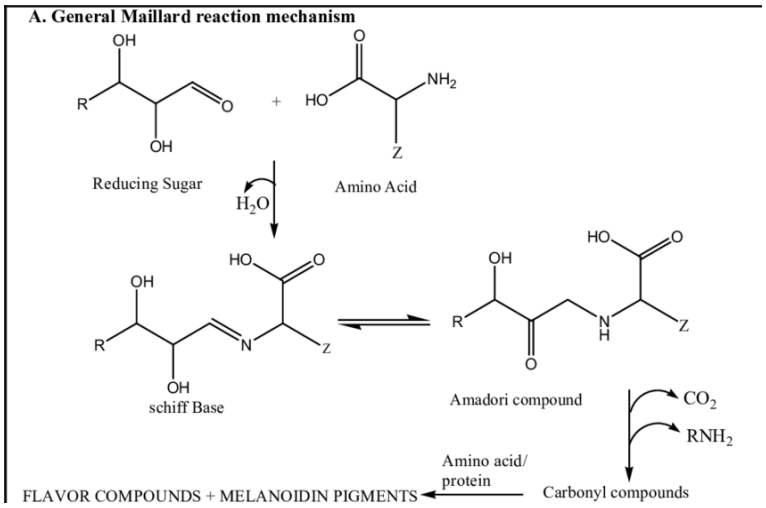
Gambar 2. Reaksi Perubahan Allicin oleh Alliinase

SAC menunjukkan pola kinetika yang khas, yaitu meningkat pada fase awal hingga menengah proses, lalu menurun kembali jika pemanasan diperpanjang. Manoonphol et al. (2023) menunjukkan bahwa SAC meningkat signifikan setelah 7 hari, lalu menurun drastis setelah pemanasan yang lebih lama, dengan kondisi optimum 70 °C, 80% RH, dan 12 hari menghasilkan peningkatan sekitar 139 kali pada beberapa sampel [6]. Hal ini menjelaskan mengapa tidak semua kondisi proses yang menghasilkan warna hitam pekat juga menghasilkan SAC tertinggi. Optimasi untuk SAC tidak selalu identik dengan optimasi untuk produk akhir yang paling hitam atau paling lama diproses.

Perubahan Polifenol, Flavonoid, Gula, dan Asam amino

Secara umum, total polifenol dan flavonoid meningkat substansial selama pembentukan *black garlic*. Najman et al. (2021) melaporkan peningkatan polifenol 118,4% dan aktivitas antioksidan 125,8% dibandingkan bawang putih putih [10]. Nguyên et al. (2017) melaporkan bahwa fenolik meningkat 8–15 kali

dan flavonoid hampir 86 kali [7]. Selain itu, sukrosa dan polisakarida terdegradasi menjadi gula reduksi, terutama fruktosa, yang berkontribusi pada rasa manis khas *black garlic* seperti yang disajikan pada Gambar 3. Sasmaz et al. (2024) menunjukkan bahwa sukrosa dominan pada bawang putih segar, sedangkan fruktosa mendominasi pada *black garlic* [24].



Gambar 3. Reaksi Maillard Pembentukan Pigmen Melanoidin pada *Black garlic*

Asam amino bebas cenderung menurun karena digunakan sebagai substrat reaksi Maillard seperti yang tersaji pada Gambar 3, walaupun beberapa asam amino spesifik dapat meningkat pada tahap tertentu. Laporan riset menunjukkan bahwa total 14 asam amino bebas dapat turun dari 843,11 ± 3,75 menjadi 167,65 ± 1,08 mg/100 g. Hal ini menunjukkan perubahan kimia selama proses tidak berjalan secara tunggal, tetapi melibatkan jaringan reaksi yang kompleks antara organosulfur, gula, fenolik, dan asam amino.

Tabel 2. Laporan Fisikokimia dan Kimia Selama Proses

Aspek	Perubahan	Hasil	Keterangan	Referensi
pH	Menurun	6,33 → 3,74; 6,25 → 4,25	Terjadi pembentukan asam selama proses	[11] [25]
Kadar air	Menurun	66,13% → 25,8%	Terjadi perubahan kadar air sehingga tekstur dan konsentrasi zat terlarut juga berubah	[22]
Warna	Menggelap drastis	Nilai L* menurun	Terjadi perubahan warna menjadi gelap atau browning akibat reaksi Maillard	[11] [12]
°Brix / padatan terlarut	Meningkat	22,9% → 47,30%	Kadar padatan terlarut naik sehingga terdapat rasa manis khas *black garlic*	[23]
Allicin	Menurun hingga tidak terdeteksi	Hilang pada tahap lanjut	Kadar allicin turun menjadi alliin sehingga bau tajam menurun	[22] [24], [26]

Aspek	Perubahan	Hasil	Keterangan	Referensi
SAC	Meningkat lalu dapat menurun	Hingga 139 kali; puncak sekitar 7–12 hari	Kadar SAC memiliki titik optimum proses	[6]
Polifenol	Meningkat	118,4% hingga 3–15 kali	Kadar polifenol meningkat akibat proses reaksi sehingga mendukung akrtivitas antioksidan	[10] [7]
Flavonoid	Meningkat	Hingga 86 kali	Kadar flavonoid meningkat sehingga scavenging radikal bebas meningkat	[7]
5-HMF	Meningkat	1,81–3,04 mg/g dw pada tahap lanjut	Kadar HMF meningkat menjadi membnerikan dampak keamanan	[27]

KANDUNGAN SENYAWA BIOAKTIF

Senyawa Organosulfur

Senyawa organosulfur yang paling penting pada *black garlic* adalah SAC dan SAMC. Yudhistira et al. (2022) merangkum bahwa SAC pada bawang putih segar berkisar antara 19,0–1736,3 μg/g, sedangkan pada *black garlic* dapat mencapai 8021,2 μg/g [28]. Sasmaz et al. (2023) melaporkan nilai SAC 80,21 mg/100 g pada kondisi optimum [8], sedangkan Moreno-Ortega et al. (2020) menunjukkan bahwa SAMC memiliki bioaksesibilitas 106% setelah pencernaan *in vitro* [29]. Temuan ini menguatkan bahwa *black garlic* memperkaya fraksi organosulfur yang lebih stabil dan *bioaccessible*.

Diallyl disulfide (DADS) dan diallyl trisulfide (DATS) mengalami hal sebaliknya, yang lebih khas pada bau tajam bawang putih segar, cenderung menurun selama aging. Harmita et al. (2020) mengonfirmasi bahwa DADS dan DATS lebih rendah pada *black garlic* dibandingkan bawang putih segar [30], hal tersebut menyebabkan perubahan organosulfur pada *black garlic* tidak sekadar penurunan atau kenaikan total sulfur, melainkan pergeseran dari sulfur volatil reaktif ke sulfur larut air yang lebih stabil.

Senyawa Fenolilk dan Flavonodi

Total polifenol pada *black garlic* meningkat 3–15 kali lipat dibandingkan bawang putih segar. Sasmaz et al. (2023) melaporkan total fenolik sebesar 1152,46 mg GAE/100 g pada kondisi optimum [8], sementara Bedrníček et al. (2021) mencatat kenaikan dari 3,82 g GAE/kg menjadi 14,03 g GAE/kg [18]. Peningkatan signifikan selama *thermal aging* juga dikonfirmasi oleh Choi et al. (2014) dari 13,91 menjadi 58,33 mg GAE/g [31], serta pada bawang putih organik oleh Najman et al. (2017) dari 7,28 menjadi 15,10 mg GAE/g [10], yang secara konsisten menunjukkan pengayaan fraksi fenolik.

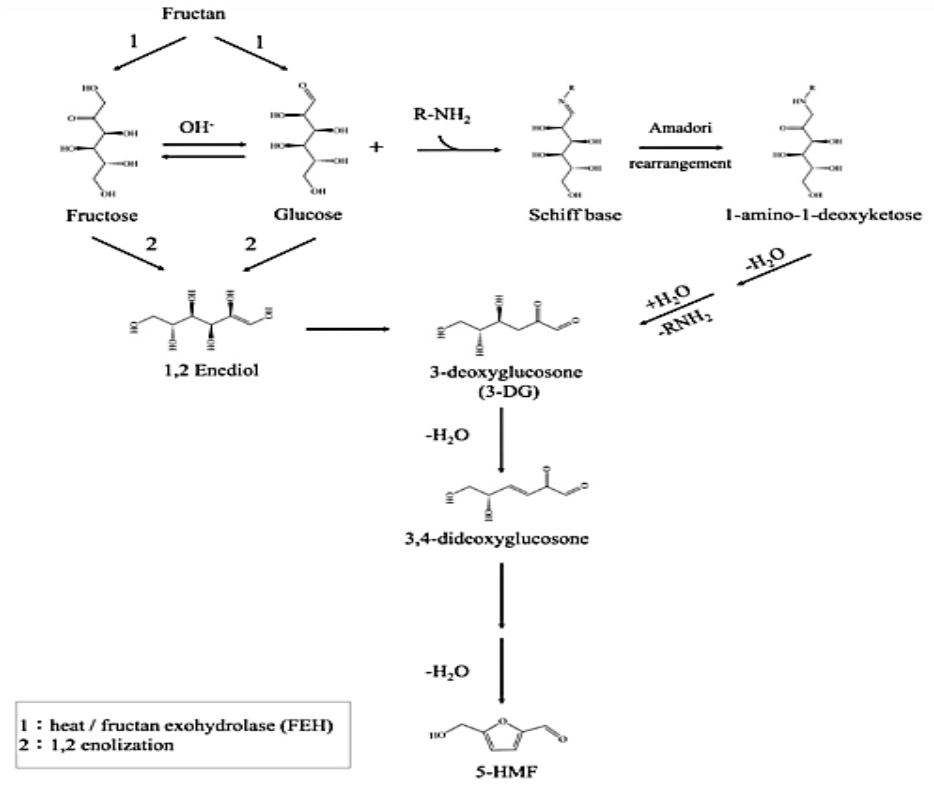
Peningkatan flavonoid juga terdokumentasi luas, dengan laporan kenaikan hingga 86 kali lipat dibandingkan bawang putih segar [7]. Data spesifik menunjukkan kadar flavonoid *black garlic* organik meningkat dari 49,29 menjadi 63,32 mg/100 g [9], sementara studi lain mencatat angka 13,28 mg RE/g pada hari ke-30 [27]. Choi et al. (2014) turut melaporkan peningkatan 4,77 kali lipat dari kadar awal 3,22 mg RE/g menjadi sekitar 15,36 mg RE/g pada produk akhir [11].

Secara kualitatif, profil polifenol menjadi lebih kompleks dengan turunan hidroksisinamat sebagai asam fenolat utama dan flavanol sebagai subkelompok flavonoid dominan [32]. Senyawa seperti resveratrol yang sebelumnya hanya berupa jejak kini muncul dalam jumlah yang lebih tinggi [33]. Perubahan ini dipicu oleh perlakuan panas suhu tinggi yang memfasilitasi pelepasan senyawa fenolik bebas dari bentuk terikatnya, seperti hasil proses esterifikasi dan glikosilasi [9], [11].

Senyawa Produk Reaksi Maillard

Produk reaksi Maillard utama pada *black garlic*, seperti 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF), melanoidin, dan senyawa Amadori/Heyns,

berperan penting dalam pembentukan warna gelap serta aktivitas antioksidannya, dengan kadar senyawa Amadori mencapai 8,02 ± 0,71 mg/g menurut Xu et al. (2026) dan peningkatan 5-HMF hingga 3,04 mg/g pada hari ke-40 menurut laporan Chang et al. (2023). Secara mekanistik, proses diawali oleh degradasi fruktan menjadi glukosa dan fruktosa [34], yang kemudian bereaksi dengan asam amino melalui pembentukan basa Schiff dan produk Amadori hingga menghasilkan intermediat kunci 3-deoksiglukoson (3-DG) [34] sebelum akhirnya terkonversi menjadi 5-HMF, seperti yang tersaji pada Gambar 4. Selain jalur konvensional tersebut, terdapat pula jalur alternatif di mana glukosa dan fruktosa dapat mengalami dehidrasi serta siklisasi langsung melalui proses 1,2-enolasi untuk membentuk 3-DG tanpa keterlibatan asam amino [34], sebagaimana dicatat oleh An-Ting Tu et al. (2021).



Gambar 4. Reaksi Pembentukan 5-HMF Selama Proses Pembuatan *Black Garlic*

Produk maillard lain adalah melanoidin yang merupakan pigmen berat molekul tinggi yang memberi kontribusi besar pada bioaktivitas. Wang et al. (2023) menunjukkan bahwa penyimpanan pada suhu lebih tinggi meningkatkan berat molekul dan aktivitas antioksidan melanoidin [35], sedangkan Wu et al. (2023) menunjukkan bahwa fraksi melanoidin berfluoresensi dengan berat molekul tinggi berperan besar dalam inhibisi α-amylase dan α-glucosidase [36]. Temuan ini menunjukkan produk Maillard sebagai komponen bioaktif utama, bukan sekadar produk samping pemanasan.

Tabel 3. Kandungan Senyawa Bioaktif *Black garlic*

Kelas senyawa	Komponen utama	Hasil	Perbandingan dengan fresh garlic	Referensi
Organosulfur larut air	SAC	Hingga 8021,2 μg/g; Hingga 139 kali lebih tinggi	Fresh garlic: 19,0–1736,3 μg/g -	Yudhistira et al. (2022) [28] Manoonphol et al. (2023) [6]

Kelas senyawa	Komponen utama	Hasil	Perbandingan dengan fresh garlic	Referensi
		80,21 mg/100 g	dari 245,35 ± 1,35 µg/g	Sasmaz et al. (2023) [8]
		522,51 ± 1,19 µg/g	dari 245,35 ± 1,35 µg/g	Kim et al. (2012) [37]
		874,26 mg/100 g DW *($CaCl_2$ + Pembekuan)*	-	Pakakaew et al. (2022) [14]
		1772 mg/100 g DW *(60 °C/65% RH)*	-	Pakakaew et al. (2022) [14]
		181,42 µg/g setelah aging	dari 121,74 µg/g sebelum aging	Kim et al. (2019) [38]
		5,16 ± 0,27 mg/g DW	dari 8,34 ± 0,27 mg/g DW	Xu et al. (2026) [39]
	SAMC	Bioaksesibilitas 106%	Lebih rendah (*Lebih bioaccessible daripada pada fresh garlic)*	Moreno-Ortega et al. (2020) [29]
		(Lebih rendah pada *black garlic*)	*(Menurun selama aging*)	Harmita et al. (2020) [30]
Organosulfur volatil	DADS, DATS	DADS = 0,0012% DATS = 0,0009%	Lebih tinggi	
Polifenol total	Berbagai fenolat	1152,46 mg GAE/100 g DM;	-	Sasmaz et al. (2023) [8];
		14,03 g GAE/kg DM	dari 3,82 g GAE/kg DM pada fresh garlic	Bedrníček et al. (2021) [18]
Flavonoid	Flavanol, flavanon, flavon	Dapat meningkat hingga 86 kali	-	Nguyên et al. (2017) [7]
		TFC 13,28 mg RE/g dw	-	Chang et al. (2023) [27]
Produk Maillard	5-HMF	0,60 g/kg	0 mg/kg (*Absent*)	Sasmaz et al. (2023) [8]
		1,81 mg/g dw (hari ke-30); 3,04 mg/g dw (hari ke-40)	*Absent*	Chang et al. (2023) [27]
		hingga 4,12 µg/mL	*Absent*	Yuan et al. (2022) [22]
	Melanoidin	Polimer fluoresen BM tinggi	Terbentuk selama aging	Wu et al. (2023); Wang et al. (2023) [35], [36]

BIOAKTIVITAS *BLACK GARLIC*

Aktivitas Antioksidan

Aktivitas antioksidan merupakan bioaktivitas yang paling konsisten dan paling kuat dilaporkan pada *black garlic*. Yuan et al. (2022) menunjukkan bahwa scavenging DPPH meningkat dari 31,72% pada bawang putih segar menjadi 99,47% pada *black garlic* yang telah sepenuhnya difermentasi termal [22]. Chang et al. (2021) melaporkan peningkatan DPPH dari 12,90% menjadi 70,95% setelah 40 hari [13], sedangkan Manoonphol et al. (2023) menunjukkan bahwa FRAP, DPPH, dan ORAC masing-masing meningkat 97%, 84%, dan 65% dibandingkan *fresh garlic* [6]. Korelasi antara polifenol dan kapasitas antioksidan juga sangat kuat, dengan R^2 = 0,95 pada laporan Najman et al. (2021) [10].

Mekanisme antioksidan *black garlic* tidak hanya dijelaskan oleh polifenol, tetapi juga oleh SAC dan aktivasi jalur Nrf2-ARE. Yu et al. (2025) menunjukkan bahwa ekstrak *black garlic* yang di-aging selama 14 hari mampu mengaktivasi jalur Nrf2-ARE pada sel HepG2-C8 dan melindungi sel dari kerusakan akibat H_2O_2 [5]. Hal ini menunjukkan bahwa *black garlic* tidak hanya aktif sebagai scavenger radikal bebas pada uji kimia, tetapi juga berpotensi memperkuat pertahanan antioksidan seluler.

Aktivitas Antiinflamasi

Aktivitas antiinflamasi *black garlic* terutama ditunjukkan pada model sel dan hewan. Kim et al. (2014) menunjukkan bahwa ekstrak air *aged black garlic* menekan produksi NO, TNF-α, dan PGE_2 pada makrofag RAW264.7 yang diinduksi LPS, dengan toksisitas yang jauh lebih rendah dibandingkan ekstrak bawang putih segar [40]. Studi tersebut juga menunjukkan penurunan ekspresi iNOS, TNF-α mRNA, dan COX-2, serta inhibisi jalur MAPK dan NF-κB. Pada model tikus, perlakuan *black garlic* juga mengurangi TNF-α dan IL-6 serum setelah *LPS-induced lethal shock* [40], [41].

Efek antiinflamasi ini juga terlihat pada model hipertensi. Chen et al. (2021) menunjukkan bahwa ekstrak dan nanoemulsi *black garlic* menurunkan TNF-α, IL-6, dan IL-1β pada tikus hipertensi DOCA-salt [42]. Hal ini memberikan gambaran bahwa *black garlic* memiliki profil antiinflamasi yang sangat baik, meskipun bukti klinis manusia masih sangat terbatas.

Aktivitas Antidiabetes

Aktivitas antidiabetes *black garlic* telah dilaporkan baik pada model *in vitro* maupun *in vivo*. Wu et al. (2023) menunjukkan bahwa melanoidin *black garlic* menghambat α-amylase dan α-glucosidase melalui mekanisme non-kompetitif dan campuran, sehingga berpotensi menekan lonjakan glukosa pascaprandial [36]. Kim et al. (2017) melaporkan bahwa jus *black garlic* yang dipretreatment dengan pektinase dan HHP menurunkan hiperglikemia, memperbaiki struktur pulau pankreas, dan meningkatkan fungsi sel β pada tikus yang diinduksi streptozotocin [43]. Kim et al. (2019) mengonfirmasi bahwa perbaikan efek antidiabetes tersebut berkorelasi dengan peningkatan SAC dan polifenol [38].

Temuan ini menunjukkan bahwa aktivitas antidiabetes *black garlic* tidak hanya terkait dengan efek antioksidan umum, tetapi juga dengan penghambatan enzim pada metabolisme karbohidrat dan kemungkinan perbaikan fungsi pankreas. Namun, data klinis pengujian pada manusia masih belum memadai dalam mendukung klaim antidiabetes.

Aktivitas Kanker atau Antiproliferatif

Aktivitas antikanker *black garlic* telah teruji pada berbagai model, di mana Sasaki et al. (2007) melaporkan tingkat penyembuhan tumor hingga 50% pada model *Meth A fibrosarcoma* tikus, melampaui efikasi bawang putih segar [44]. Efek antiproliferatif juga ditunjukkan oleh Bontempo et al. (2021) pada sel U937 dan NB4, dengan nilai IC_{50} sebesar 0,8 mg/mL untuk HepG2 dan 2,0 mg/mL untuk U937 [45]. Selain itu, fraksi etil asetat *black garlic* setelah 30 hari *thermal aging* menunjukkan potensi signifikan terhadap sel MCF-7 dengan IC_{50} 47,27 μg/mL [46].

Namun, efektivitas *black garlic* tidak selalu mengungguli bawang putih segar. Sasmaz et al. (2025) menemukan ekstrak metanol bawang putih segar lebih poten pada sel A549, HCT-116, HuH-7, dan MCF-7 dibandingkan *black garlic* [33]. Farhat et al. (2023) juga mencatat aktivitas antiproliferatif rendah pada sel kanker paru H520, H1975, dan A549, di mana Garlicin® (IC_{50} 0,22 mg/mL pada H1975) dan ekstrak air segar justru lebih kuat [47]. Sebaliknya, studi lain tetap menunjukkan potensi baik pada sel MCF-7 dengan nilai IC_{50} 47,27 μg/mL [48]. Perbedaan ini menunjukkan bahwa aktivitas biologi produk sangat dipengaruhi profil kimia akhir, termasuk hilangnya allicin dan perubahan kadar gula selama pemrosesan.

Aktivitas Antimikroba

Aktivitas antimikroba *black garlic* telah diuji terhadap berbagai bakteri dan jamur, tetapi umumnya lebih rendah daripada bawang putih segar. Sasaki et al. (2007) melaporkan aktivitas antibakteri terhadap MRSA, *E. coli* O157:H7, *Pseudomonas aeruginosa*, dan *Candida albicans*, namun potensi tersebut tetap lebih rendah daripada *fresh garlic* [44]. Chang dan Jang (2021) menunjukkan bahwa kapasitas bakteriostatik *black garlic* lebih tinggi terhadap bakteri Gram-positif seperti *Bacillus subtilis* dan *Staphylococcus aureus* dibandingkan Gram-negatif [13]. Hue et al. (2022) juga melaporkan bahwa *black garlic* yang diproses pada 70 °C menunjukkan MIC 64 μg/mL

untuk *S. aureus* dan *Candida albicans*, serta 32 µg/mL untuk *E. coli* [49].

Aktivitas ini menunjukkan bahwa *black garlic* tetap memiliki potensi antimikroba, tetapi kehilangan sebagian kekuatan *allicin-mediated* yang khas pada bawang putih segar. Hal tersebut menyebabkan profil antimikrobanya menjadi lebih selektif dan umumnya lebih lemah, meskipun dalam formulasi tertentu, seperti nanogel *black garlic*, efek antibakterinya tetap dapat dimanfaatkan.

Aktivitas Kardiovaskular, Anti-Obesitas, Hepatoprotektif, dan Neuroprotektif

Black garlic juga menunjukkan efek yang menjanjikan pada sistem kardiovaskular dan metabolik selain pada bioaktivitas yang telah dijelaskan. Chen et al. (2021) melaporkan bahwa ekstrak dan nanoemulsi *black garlic* menurunkan tekanan darah sistolik pada tikus hipertensi DOCA-salt melalui peningkatan bradikinin dan NO serta penurunan aldosteron dan angiotensin II [42]. Studi lain pada tikus hiperkolesterolemia menunjukkan penurunan kolesterol total, trigliserida, LDL-kolesterol, dan peningkatan HDL-kolesterol setelah pemberian ekstrak *black garlic* [50].

Aktivitas anti-obesitas juga telah dilaporkan pada tikus obesitas dan model hewan diabetes-obesitas, sementara aktivitas hepatoprotektif dan neuroprotektif didukung oleh penurunan akumulasi lipid, perlindungan sel HepG2, dan perbaikan fungsi kognitif pada model hewan [5]. Temuan ini dapat memperluas bioaktivitas *black garlic*, namun bukti klinis maupun studi hewan dan sel masih sangat dibutuhkan.

Tabel 4. Bioaktivitas *Black garlic*

Bioaktivitas	Model/assay	Hasil utama	Keterangan	Referensi
Antioksidan	DPPH	31,72% → 99,47%	Aktivitas meningkat sangat tajam selama proses	[22]
	FRAP, DPPH, ORAC	+97%, +84%, +65%	Antioksidan adalah bioaktivitas paling baik	[6]
	TEAC	654,93 ± 4,54 µmol TEAC/g DM	Nilai sangat tinggi pada *black garlic* organik	[9]
Antiinflamasi	RAW264.7 + LPS	Menekan NO, TNF-α, PGE_2	Antiinflmasi jalur NF-κB dan MAPK	[40]
	Tikus hipertensi DOCA-salt	TNF-α, IL-6, IL-1β menurun	Efek antiinflamasi sistemik	[42]
Antikanker	Tumor Meth A pada BALB/c	50% *tumor cure rate*	Efek antitumor awal yang kuat	[44]
	MCF-7	IC_{50} 47,27 µg/mL	Aktivitas antiproliferatif	[46]
Antidiabetes	α-amylase / α-glucosidase	Inhibisi *dose-dependent*	Melanoidin berperan penting dalam penghambatan enzim	[36]

Bioaktivitas	Model/assay	Hasil utama	Keterangan	Referensi
	Tikus STZ	Hiperglikemia menurun; fungsi sel β membaik	Antidiabetes dipengaruhi pektinase + HHP	[43]
Antimikroba	Gram+ dan Gram−	Gram+ lebih sensitif daripada Gram−	Antimikroba lebih rendah daripada *fresh garlic*	[13]
Kardiovaskular	Tikus hipertensi	Tekanan darah turun; NO meningkat	Efek protektif vaskular	[42]
Metabolik / anti-obesitas	Tikus hiperkolesterolemia / obesitas	Kolesterol, TG, LDL turun; HDL naik	Manfaat metabolik dan anti-obesitas	[50], [51]
Hepatoprotektif / neuroprotektif	HepG2 dan model sel	Perlindungan terhadap stres oksidatif dan akumulasi lipid	Efek protektif dengan jalur Nrf2	[5], [45]

KESIMPULAN

Black garlic merupakan produk olahan bawang putih yang terbentuk melalui proses pemanasan pada suhu dan kelembapan tinggi, sehingga mengalami perubahan fisikokimia dan kimia yang signifikan. Proses ini menyebabkan penurunan allicin, peningkatan *S-allyl-L-cysteine* (SAC), akumulasi polifenol dan flavonoid, serta pembentukan produk reaksi Maillard seperti 5-HMF dan melanoidin. Perubahan tersebut berperan dalam pembentukan karakteristik sensori dan potensi fungsional black garlic. Berbagai studi menunjukkan bahwa aktivitas antioksidan merupakan bioaktivitas yang paling dominan, disertai potensi antiinflamasi, antidiabetes, antikanker, antimikroba, serta efek kardiovaskular dan metabolik. Namun, karena bukti klinis pada manusia masih terbatas dan hasil penelitian dipengaruhi oleh kondisi proses, varietas bahan baku, metode ekstraksi, serta model biologis yang digunakan, manfaat kesehatan black garlic tetap perlu diinterpretasikan secara hati-hati.

Sebagian besar bukti ilmiah yang tersedia masih berasal dari studi *in vitro* dan model hewan, sedangkan uji klinis manusia masih sangat terbatas. Belum adanya standardisasi produksi yang seragam menyebabkan perbandingan antarstudi menjadi sulit dilakukan secara langsung. Oleh karena itu, pengembangan *black garlic* sebagai pangan fungsional berbasis bukti masih memerlukan standardisasi kondisi proses, evaluasi keamanan yang lebih komprehensif, serta penelitian klinis manusia yang lebih terkontrol sebelum manfaat kesehatannya dapat direkomendasikan secara luas.

DAFTAR PUSTAKA

[1] T. Ahmed and C.-K. Wang, “Black Garlic and Its Bioactive Compounds on Human Health Diseases: A Review,” *Molecules*, vol. 26, no. 16, p. 5028, 2021, doi: 10.3390/molecules26165028.

[2] V. Vecchi *et al.*, “Black Garlic: Evolution of the Chemical Composition and Broad Biological Activities,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 73, no. 44, pp. 27933–27949, 2025, doi: 10.1021/acs.jafc.5c09705.

[3] C. Park *et al.*, “Induction of apoptosis by a hexane extract of aged black garlic in the human leukemic U937 cells.,” *Nutr. Res. Pract.*, vol. 8, no. 2, pp. 132–137, Apr. 2014, doi: 10.4162/nrp.2014.8.2.132.

[4] K. Najman, A. Sadowska, K. Buczak, H. Leontowicz, and M. Leontowicz, “Effect of Heat-Treated Garlic (Allium sativum L.) on Growth Parameters, Plasma Lipid Profile and Histological Changes in the Ileum of

Atherogenic Rats," *Nutrients*, 2022, doi: 10.3390/nu14020336.

[5] S.-S. Yu, Y.-L. Chu, Y. Tung, and Z.-Y. Su, "Thermal Ageing of Black Garlic Enhances Cellular Antioxidant Potential Through the Activation of the Nrf2-Mediated Pathway," *Food Technol. Biotechnol.*, 2025, doi: 10.17113/ftb.63.01.25.8474.

[6] K. Manoonphol, U. Suttisansanee, C. Promkum, and C. Butryee, "Effect of Thermal Processes on S-Allyl Cysteine Content in Black Garlic," *Foods*, 2023, doi: 10.3390/foods12061227.

[7] N. Nguyên, P. N. Hoa, L. T. T. Thao, and P. Tuan, "Effect Of Thermal Treatment On The Quality Of Black Galic Produced From Phan Rang's Natural Fresh Material," *J. Sci. Technol.*, 2017, doi: 10.15625/0866-708X/55/1/9014.

[8] H. K. Sasmaz, E. Adal, P. Kadiroğlu, S. Selli, T. Uzlaşır, and H. Kelebek, "Optimization of complex coacervation parameters for the production of encapsulated black garlic using response surface methodology.," *J. Food Sci.*, 2023, doi: 10.1111/1750-3841.16768.

[9] K. Najman, A. Sadowska, and E. Hallmann, "Influence of Thermal Processing on the Bioactive, Antioxidant, and Physicochemical Properties of Conventional and Organic Agriculture Black Garlic (Allium sativum L.)," *Appl. Sci.*, 2020, doi: 10.3390/app10238638.

[10] K. Najman, A. Sadowska, and E. Hallmann, "Evaluation of Bioactive and Physicochemical Properties of White and Black Garlic (Allium sativum L.) from Conventional and Organic Cultivation," *Appl. Sci.*, 2021, doi: 10.3390/APP11020874.

[11] I. Choi, H. Cha, and Y. S. Lee, "Physicochemical and Antioxidant Properties of Black Garlic," *Molecules*, 2014, doi: 10.3390/molecules191016811.

[12] L. de S. Pires, K. M. Todisco, N. S. Janzantti, and M. A. Mauro, "Black garlic: Effects of the processing on the kinetics of browning and moisture transfer and on antioxidant properties," *J. Food Process. Preserv.*, vol. 43, no. 10, 2019, doi: 10.1111/jfpp.14133.

[13] T.-C. Chang and H. Jang, "Optimization of Aging Time for Improved Antioxidant Activity and Bacteriostatic Capacity of Fresh and Black Garlic," *Appl. Sci.*, 2021, doi: 10.3390/APP11052377.

[14] P. Pakakaew, Y. Phimolsiripol, S. Taesuwan, S. Kumphune, W. Klangpetch, and N. Utama-ang, "The Shortest Innovative Process of Black And Golden Garlic For Enhancing The S-Allylcysteine Content And Antioxidant Activity," 2022, doi: 10.21203/rs.3.rs-1192931/v1.

[15] F. Kandemirli, N. İçli, T. Bakır, B. Nazli, and S. Aydın, "The investigation of the effect of freezing pretreatment on properties of black garlic produced from Kastamonu garlic," *Food Heal.*, 2020, doi: 10.3153/fh20001.

[16] J. Liu *et al.*, "Optimization of Black Garlic Protein Extraction Process and Exploration of Its Properties and Functions with Enzymatic Hydrolysis Products," *Molecules*, 2024, doi: 10.3390/molecules30010125.

[17] S. Ma *et al.*, "Effects of Processing Relative Humidity on Physicochemical Properties and Antioxidant Capacity of Black Garlic," *J. Food Process Eng.*, vol. 49, no. 2, 2026, doi: 10.1111/jfpe.70394.

[18] J. Bedrníček *et al.*, "The Use of a Thermal Process to Produce Black Garlic: Differences in the Physicochemical and Sensory Characteristics Using Seven Varieties of Fresh Garlic," *Foods*, 2021, doi: 10.3390/foods10112703.

[19] H. K. Sasmaz *et al.*, "Optimization of black garlic production parameters using response surface methodology: Assessment and characterization of bioactive properties," *J. Appl. Res. Med. Aromat. Plants*, vol. 34, p.

100477, 2023, doi: 10.1016/j.jarmap.2023.100477.

[20] J.-H. Shin, M. Kang, B. H. Lee, and D. Kang, "Effect of Temperature Conditions on the Physicochemical Quality of Aged Black Garlic," *Foods*, 2024, doi: 10.3390/foods13233974.

[21] X. Zhang, N. Li, X. Lu, P. Liu, and X. Qiao, "Effects of temperature on the quality of black garlic," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 96, no. 7, pp. 2366–2372, 2015, doi: 10.1002/jsfa.7351.

[22] X. Yuan *et al.*, "Changes of Physicochemical Properties in Black Garlic during Fermentation," *Fermentation*, 2022, doi: 10.3390/fermentation8110653.

[23] I. Maldonade and D. Mendes, "Chemical And Physical Characteristics Of Black Garlic," 2014.

[24] H. K. Sasmaz, T. Uzlaşır, S. Selli, and H. Kelebek, "Changes in bioactive compounds and antioxidant activity of Gaziantep and Kastamonu garlic during black garlic production," *Int. J. Agric. Environ. Food Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 111–118, 2024, doi: 10.31015/jaefs.2024.1.12.

[25] Z. Zhang, M. Lei, R. Liu, Y. Gao, M. Xu, and M. Zhang, "Evaluation of Alliin, Saccharide Contents and Antioxidant Activities of Black Garlic during Thermal Processing," *J. Food Biochem.*, 2015, doi: 10.1111/JFBC.12102.

[26] H. K. Sasmaz, G. Guclu, O. Sevindik, S. Selli, and H. Kelebek, "Decoding the Changes of Volatiles and Key Odorants of Fresh Garlic and Black Garlic Produced with Different Parameters by GC-MS-Olfactometry," *ACS Food Sci. & Technol.*, 2024, doi: 10.1021/acsfoodscitech.4c00540.

[27] W.-C. Chang, W. Lin, and S.-C. Wu, "Optimization of the Black Garlic Processing Method and Development of Black Garlic Jam Using High-Pressure Processing," *Foods*, 2023, doi: 10.3390/foods12081584.

[28] B. Yudhistira, F. Punthi, J. Lin, A. S. Sulaimana, C. Chang, and C. Hsieh, "S-Allyl cysteine in garlic (*Allium sativum*): Formation, biofunction, and resistance to food processing for value-added product development," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 21, no. 3, pp. 2665–2687, 2022, doi: 10.1111/1541-4337.12937.

[29] A. Moreno-Ortega, G. Pereira-Caro, J. L. Ordóñez, R. Moreno-Rojas, V. Ortíz-Somovilla, and J. Moreno-Rojas, "Bioaccessibility of Bioactive Compounds of 'Fresh Garlic' and 'Black Garlic' through In Vitro Gastrointestinal Digestion," *Foods*, 2020, doi: 10.3390/foods9111582.

[30] H. Harmita, H. Suryadi, M. Syarif, and L. D. Liksasa, "Gas Chromatography Analysis of Diallyl Disulphide and Diallyl Trisulphide and Antioxidant Activity in Black Garlic," *Int. J. Pharm. Investig.*, 2020, doi: 10.5530/ijpi.2020.1.4.

[31] M. H. Choi *et al.*, "Quality Characteristics and Antioxidant Activity of Soy Sauce with Added Levels of Black Garlic Extract," *Korean J. Food & Cook. Sci.*, vol. 32, no. 2, pp. 188–196, 2016, doi: 10.9724/kfcs.2016.32.2.188.

[32] J.-S. Kim, O. Kang, and O.-C. Gweon, "Comparison of phenolic acids and flavonoids in black garlic at different thermal processing steps," *J. Funct. Foods*, 2013, doi: 10.1016/J.JFF.2012.08.006.

[33] H. K. Sasmaz, C. Ilgaz, P. Kadiroğlu, O. C. Erkin, S. Selli, and H. Kelebek, "Comparative phytochemical analysis and bioactive potential of white and black garlic," *Sci. Rep.*, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-03843-6.

[34] A.-T. Tu *et al.*, "Reduction of 3-Deoxyglucosone by Epigallocatechin Gallate Results Partially from an Addition Reaction: The Possible Mechanism of Decreased 5-Hydroxymethylfurfural in Epigallocatechin Gallate-Treated Black Garlic," *Molecules*, vol. 26, no. 16, p. 4746, 2021, doi: 10.3390/molecules26164746.

[35] B. Wang, Y. Zhong, D. Wang, F. Meng, Y. Li, and Y. Deng, "Formation, Evolution, and Antioxidant Activity of Melanoidins in Black Garlic under Different Storage Conditions," *Foods*, 2023, doi: 10.3390/foods12203727.

[36] J. Wu *et al.*, "Black garlic melanoidins inhibits in vitro α-amylase and α-glucosidase activity: The role of high molecular weight fluorescent compounds.," *J. Sci. Food Agric.*, 2023, doi: 10.1002/jsfa.12634.

[37] S. H. Kim, E. Jung, D. Kang, U. Chang, Y. Hong, and H. Suh, "Physical stability, antioxidative properties, and photoprotective effects of a functionalized formulation containing black garlic extract.," *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, 2012, doi: 10.1016/j.jphotobiol.2012.08.013.

[38] J. H. Kim *et al.*, "Utilization of Pectinase Cocktail and High Hydrostatic Pressure for the Production of Aged Black Garlic Juice with Improved Nutritional Value," *Prev. Nutr. Food Sci.*, 2019, doi: 10.3746/pnf.2019.24.3.357.

[39] X. Xu, C. Yang, and L. Zhang, "Study on the formation, structural characterization, and antioxidant activity of Amadori compound Fru-SAC during black garlic processing.," *Food Res. Int.*, 2026, doi: 10.1016/j.foodres.2025.118293.

[40] M. J. Kim *et al.*, "Aged Black Garlic Exerts Anti-Inflammatory Effects by Decreasing NO and Proinflammatory Cytokine Production with Less Cytoxicity in LPS-Stimulated RAW 264.7 Macrophages and LPS-Induced Septicemia Mice," *J. Med. Food*, vol. 17, no. 10, pp. 1057–1063, Sep. 2014, doi: 10.1089/jmf.2013.3043.

[41] H. L. Oh, M. J. Kim, B. R. You, and M. R. Kim, "Anti-Inflammatory Action of Black Garlic through downregulation of NF-κB activation and MAP kinase phosphorylation," *FASEB J.*, vol. 26, no. S1, 2012, doi: 10.1096/fasebj.26.1_supplement.823.33.

[42] C.-Y. Chen, T.-Y. Tsai, and B. Chen, "Effects of Black Garlic Extract and Nanoemulsion on the Deoxy Corticosterone Acetate-Salt Induced Hypertension and Its Associated Mild Cognitive Impairment in Rats," *Antioxidants*, 2021, doi: 10.3390/antiox10101611.

[43] J. H. Kim *et al.*, "Preparation of S-Allylcysteine-Enriched Black Garlic Juice and Its Antidiabetic Effects in Streptozotocin-Induced Insulin-Deficient Mice.," *J. Agric. Food Chem.*, 2017, doi: 10.1021/acs.jafc.6b04948.

[44] J. Sasaki, C. Lu, E. Machiya, M. Tanahashi, and K. Hamada, "Processed Black Garlic (Allium sativum) Extracts Enhance Anti-Tumor Potency against Mouse Tumors," 2007.

[45] P. Bontempo *et al.*, "Metabolite Profile and In Vitro Beneficial Effects of Black Garlic (Allium sativum L.) Polar Extract," *Nutrients*, 2021, doi: 10.3390/nu13082771.

[46] S. A. Riyadi, N. Vanawati, H. I. Farah, A. U. I. Hafizah, U. Hasanah, and E. Herlina, "Free-Radical Scavenging and In Vitro Anticancer Assay of Indonesian Black Garlic with Different Time Processing," *Hydrog. J. Kependidikan Kim.*, 2025, doi: 10.33394/hjkk.v13i6.18919.

[47] Z. Farhat *et al.*, "Antioxidant and Antiproliferative Activities of Several Garlic Forms," *Nutrients*, 2023, doi: 10.3390/nu15194099.

[48] S. Atun, N. Aznam, R. Arianingrum, Senam, Y. Devi, and R. Melasari, "Characterization and Biological Activity Test of Garlic and Its Fermentation as Antioxidant, Analgesic, and Anticancer," *Proc. 7th Int. Conf. Res. Implementation, Educ. Math. Sci. (ICRIEMS 2020)*, 2021, doi: 10.2991/ASSEHR.K.210305.025.

[49] C. T. Hue *et al.*, "Assessment of the physicochemical properties and biological activity of Vietnamese single-bulb black

garlic," *Food Biosci.*, 2022, doi: 10.1016/j.fbio.2022.101866.

[50] H.-S. Lee, S.-T. Yang, and B.-H. Ryu, "Effects of Aged Black Garlic Extract on Lipid Improvement in Rats Fed with High Fat-Cholesterol Diet," *J. Life Sci.*, vol. 21, no. 6, pp. 884–892, 2011, doi: 10.5352/JLS.2011.21.6.884.

[51] Y.-M. Jung *et al.*, "Fermented garlic protects diabetic, obese mice when fed a high-fat diet by antioxidant effects," *Nutr. Res.*, vol. 31, no. 5, pp. 387–396, 2011, doi: 10.1016/j.nutres.2011.04.005.