e-ISSN 3062-8849
The 4th National Conference on Innovative Agriculture 2025
Jember, 26 - 27 September 2026

Jurusan Teknologi Pertanian
Politeknik Negeri Jember
doi: 10.25047/nacia.v4i1.704

Peran Matriks Pangan dalam Menentukan Efektivitas Pangan Fungsional: Dari Bioaksesibilitas hingga Respons Biologis

The Role of Food Matrix in Modulating Functional Food Efficacy: From Bioaccessibility to Biological Responses

Mentari Sekar Arum[1*], Lulus Mualimin[2], Ahmad David Royyifi Arifin[3]

[1,3]Program Studi Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember
[2]Teknologi Rekayasa Pengemasan, Departemen Teknologi Pertanian, Politeknik Negeri Jember

*Email Koresponden: mentarisekar@unej.ac.id

Received: 12 September 2026 | Accepted : 25 September 2026 | Published : 30 Oktober 2026

Kata Kunci

Bioaksesibilitas; Bioavailabilitas; Matriks Pangan; Pangan Fungsional; Respons Biologis

ABSTRAK

Efektivitas pangan fungsional tidak hanya ditentukan oleh kandungan senyawa bioaktif, tetapi juga oleh interaksi senyawa tersebut dengan matriks pangan yang memengaruhi pelepasan, bioaksesibilitas, bioavailabilitas, hingga respons biologis. Review ini bertujuan menyintesis secara integratif peran matriks pangan dalam menentukan efektivitas biologis pangan fungsional. Kajian dilakukan menggunakan pendekatan *narrative review* dengan mengadopsi prinsip PRISMA 2020. Literatur tahun 2016 – 2026 ditelusuri melalui Scopus, Web of Science, PubMed/MEDLINE, ScienceDirect, dan Google Scholar menggunakan kombinasi kata kunci terkait *food matrix*, bioaksesibilitas, senyawa bioaktif, pangan fungsional, respons biologis, dan mikrobiota usus. Literatur yang memenuhi kriteria diseleksi dan disintesis secara tematik berdasarkan interaksi matriks, proses pencernaan, serta respons biologis. Hasil menunjukkan bahwa protein, lipid, polisakarida, serat, dan struktur fisik pangan dapat meningkatkan maupun menghambat pelepasan dan bioaksesibilitas bioaktif melalui pembentukan kompleks, pengaturan miselisasi, perlindungan terhadap degradasi, serta fermentasi kolon. Pengolahan dan teknologi enkapsulasi juga dapat merekayasa matriks untuk mengoptimalkan pelepasan bioaktif. Dengan demikian, pengembangan pangan fungsional perlu bergeser dari pendekatan berbasis kandungan menuju *matrix informed/bioaccessibility based design*.

Keywords

Bioaccessibility; Bioavailability; Biological Response; Food Functional; Food Matrix

ABSTRACT

The efficacy of functional foods is determined not only by the concentration of bioactive compounds but also by their interactions with the food matrix, which regulate release, bioaccessibility, bioavailability, and subsequent biological

Jurusan Teknologi Pertanian
Politeknik Negeri Jember
doi: 10.25047/nacia.v4i1.704

responses. This review aimed to integrate current evidence on the role of food matrices in determining the biological efficacy of functional foods. A narrative review approach incorporating selected PRISMA 2020 principles was applied. Literature published between 2016 and 2026 was searched through Scopus, Web of Science, PubMed/MEDLINE, ScienceDirect, and Google Scholar using combinations of keywords related to food matrix, bioaccessibility, bioactive compounds, functional foods, biological responses, and gut microbiota. Eligible studies were thematically synthesized according to matrix interactions, gastrointestinal digestion, and biological outcomes. The findings demonstrate that proteins, lipids, polysaccharides, dietary fibers, and food microstructure can either enhance or inhibit bioactive release and bioaccessibility through complex formation, micellization, protection against degradation, and colonic fermentation. Food processing and encapsulation technologies can further modify matrix structure to regulate bioactive release. Therefore, future functional food development should shift from composition based fortification toward matrix informed/bioaccessibility based design to achieve more predictable biological efficacy.

1. PENDAHULUAN

Dalam dua dekade terakhir, paradigma konsumsi pangan telah bergeser dari sekadar pemenuhan kebutuhan gizi dasar menuju pangan yang mampu memberikan manfaat kesehatan tambahan (Hossain et al., 2025). Pergeseran ini didorong oleh meningkatnya kesadaran konsumen bahwa diet berperan penting dalam pencegahan dan penanganan penyakit tidak menular seperti diabetes dan penyakit kardiovaskular (Ma, Liu, Fu, Zhou, & Lee, 2026), sehingga sektor pangan fungsional tumbuh pesat secara global dan menarik minat ilmiah maupun komersial yang terus meningkat (Rashidinejad, 2024; Vareltzis et al., 2026). Pangan fungsional yang diperkaya dengan senyawa bioaktif seperti polifenol, karotenoid, asam lemak omega-3, probiotik, dan prebiotik kini dipasarkan secara luas dengan berbagai klaim kesehatan, mulai dari efek antioksidan dan antiinflamasi hingga modulasi mikrobiota usus (Arshad, Shahid, Hasnain, Yaseen, & Rahimi, 2025; Hossain et al., 2025). Bioaktivitas senyawa-senyawa ini dimediasi melalui beragam mekanisme fisiologis, termasuk modulasi enzim pencernaan, interaksi dengan reseptor seluler, dan pembentukan metabolit aktif oleh mikrobiota kolon (Arshad et al., 2025; Wang et al., 2024). Industri pangan pun berlomba mengembangkan produk fortifikasi baru dengan asumsi bahwa semakin tinggi kandungan senyawa bioaktif, semakin besar manfaat fisiologis yang dapat diperoleh konsumen.

Akumulasi bukti ilmiah menunjukkan bahwa asumsi hubungan linier antara kandungan senyawa bioaktif dan efektivitas biologisnya merupakan penyederhanaan yang keliru. Kehadiran suatu senyawa bioaktif dalam jumlah tinggi pada label komposisi pangan tidak serta merta menjamin bahwa senyawa tersebut akan tersedia secara biologis (bioavailable) bagi tubuh (Vareltzis et al., 2026). Terdapat mata rantai yang sering terlewatkan antara kandungan bioaktif yang ditambahkan ke dalam pangan dan dampak fisiologis aktualnya, sehingga efikasi klinis pangan fungsional masih sulit diterjemahkan secara konsisten dari bukti eksperimental menjadi manfaat kesehatan nyata (Ma et al., 2026; Vareltzis et al., 2026). Variasi bioavailabilitas antarsenyawa dapat sangat ekstrem: bioavailabilitas resveratrol dilaporkan berada di bawah 1%, sementara asam fenolik sederhana dapat mencapai 30–50%, sebuah rentang yang tidak dapat dijelaskan hanya dari konsentrasi awal senyawa dalam produk.

Jurusan Teknologi Pertanian
Politeknik Negeri Jember
doi: 10.25047/nacia.v4i1.704

Fenomena serupa juga dilaporkan pada berbagai kelas fitokimia, di mana potensi bioaktif suatu senyawa sangat rentan terhadap variasi selama proses digesti in vitro, dengan komposisi kimia dan sifat matriks sebagai faktor penentu utama (Nicolescu et al., 2023). Bahkan pada tingkat formulasi yang sama, pola bioaksesibilitas dapat berbeda drastis antarjenis produk pangan, seperti ditunjukkan pada kurkuminoid yang menunjukkan pola pelepasan berbeda dalam biskuit dibandingkan kastar meskipun formulasi seratnya identik (de Castro Cogle et al., 2024). Kondisi ini menegaskan bahwa metodologi evaluasi pangan fungsional yang hanya berbasis kuantifikasi kandungan senyawa gagal memprediksi korelasi antara bioaksesibilitas dan bioaktivitas secara konsisten (Nicolescu et al., 2023), sehingga diperlukan standardisasi protokol pengujian yang lebih memperhitungkan konteks matriks pangan tempat senyawa tersebut berada.

Akar dari ketidaksesuaian tersebut terletak pada konsep matriks pangan (food matrix), yaitu domain mikrostruktural atau susunan makromolekul yang mengandung, berinteraksi dengan, dan memberikan fungsionalitas tertentu terhadap suatu konstituen pangan (Jose M Aguilera, 2024). (José Miguel Aguilera, 2019) menegaskan bahwa aktivitas kimiawi dan biologis suatu senyawa dalam tubuh bergantung pada kinetika pelepasannya dari matriks, bukan semata-mata pada keberadaannya sebagai entitas terisolasi sebuah gagasan yang kemudian dikembangkan lebih lanjut dalam kerangka evolusi riset struktur pangan selama hampir lima dekade (Jose M Aguilera, 2024) dan diterapkan pada matriks pangan olahan sebagai unit penghantar nutrien (Jose Miguel Aguilera, 2025). Konsep serupa juga ditegaskan pada tataran matriks spesifik, seperti matriks susu, yang menunjukkan bahwa efek kesehatan suatu pangan meluas melampaui sekadar penjumlahan komponen individualnya (Mulet-Cabero et al., 2024).

Interaksi antara senyawa bioaktif dengan komponen utama matriks protein, lipid, serat pangan, dan mineral dapat bersifat sinergis maupun antagonistis, bergantung pada kelas senyawa dan karakteristik matriks yang menyertainya (Vareltzis et al., 2026). Sebagai contoh, kodigesti kurkumin dengan lipid pangan dapat meningkatkan bioavailabilitasnya hingga 4–5 kali lipat dibandingkan bila dikonsumsi dalam larutan air, karena matriks lipid memfasilitasi pembentukan misel yang diperlukan untuk penyerapan senyawa lipofilik. Pada sisi lain, matriks kaya serat dan fitat justru dapat menekan bioaksesibilitas mineral esensial seperti seng dan besi melalui pembentukan kompleks yang tidak larut (Mishra et al., 2024; Vareltzis et al., 2026). Struktur matriks juga menentukan laju pelepasan senyawa selama pencernaan; pemrosesan baik termal maupun non termal dapat memodifikasi arsitektur seluler dan mikrostruktur pangan sehingga mengubah profil bioaksesibilitas senyawa bioaktif yang terkandung di dalamnya (Cilla, Bosch, Barberá, & Alegría, 2018; Shahidi & Pan, 2022). Teknologi pengolahan non termal seperti pulsed electric field, ultrasonikasi, dan homogenisasi tekanan tinggi bahkan terbukti mampu meningkatkan ekstraktabilitas dan bioaksesibilitas karotenoid, senyawa fenolik, vitamin, dan mineral melalui perubahan mikrostruktural pada jaringan tanaman (López-Gámez, Elez-Martínez, Martín-Belloso, & Soliva-Fortuny, 2021), sementara strategi nanoenkapsulasi dan sistem penghantaran terstruktur menawarkan jalur pelengkap untuk melindungi senyawa labil selama transit gastrointestinal (Molteni, La Motta, & Valoppi, 2022).

Perjalanan senyawa bioaktif tidak berhenti pada usus halus. Sebagian besar polifenol dan serat yang tidak terserap di usus halus akan mencapai kolon, tempat mikrobiota usus berperan sebagai "mesin biotransformasi" yang mengubahnya menjadi metabolit aktif dengan bioaktivitas berbeda dari senyawa induknya (Ruan, Sun, Xia, & Zhang, 2022). Interaksi dua arah antara matriks pangan, senyawa bioaktif, dan komposisi mikrobiota usus ini semakin diakui sebagai determinan penting variabilitas respons kesehatan antarindividu (X. Liu, Wang, Liu, & Fan, 2025; Wang et al., 2024). Meskipun konsep matriks pangan telah banyak dibahas, sebagian besar penelitian dan tinjauan literatur yang ada cenderung berfokus secara parsial.

doi: 10.25047/nacia.v4i1.704

Sejumlah kajian menyoroti golongan senyawa bioaktif tertentu secara terisolasi, seperti polifenol atau karotenoid, tanpa mengaitkannya secara sistematis dengan struktur matriks tempat senyawa tersebut berada (Vareltzis et al., 2026). Kajian lain berfokus secara sempit pada satu dimensi tunggal, misalnya efek pemrosesan (López-Gámez et al., 2021; Shahidi & Pan, 2022), strategi enkapsulasi dan sistem penghantaran (Molteni et al., 2022), klasifikasi dan mekanisme molekuler senyawa bioaktif (Arshad et al., 2025) atau interaksi dengan mikrobiota usus pada tahap kolon (Ruan et al., 2022; Zheng, Qin, Wen, Zhang, & Wang, 2024), tanpa menyatukan keseluruhan perjalanan senyawa bioaktif mulai dari pelepasan di matriks, proses pencernaan, hingga respons biologis akhir di dalam tubuh. Akibatnya, informasi mengenai pendekatan terpadu yang mempertimbangkan keterkaitan antara struktur dan komposisi matriks, proses pencernaan, interaksi antarsenyawa, serta luaran fungsional masih sangat terbatas (Ma et al., 2026; Vareltzis et al., 2026). Fragmentasi pengetahuan semacam ini berimplikasi pada lemahnya dasar ilmiah bagi klaim kesehatan pangan fungsional serta menghambat perancangan produk secara rasional berbasis bioaksesibilitas (Mishra et al., 2024; Vareltzis et al., 2026). Dengan demikian, terdapat kebutuhan mendesak untuk menyintesiskan secara terintegrasi bagaimana matriks pangan memengaruhi keseluruhan perjalanan senyawa bioaktif dari pelepasan, bioaksesibilitas, hingga respons biologis akhir yang selama ini belum banyak dilakukan secara komprehensif dalam satu kerangka tinjauan.

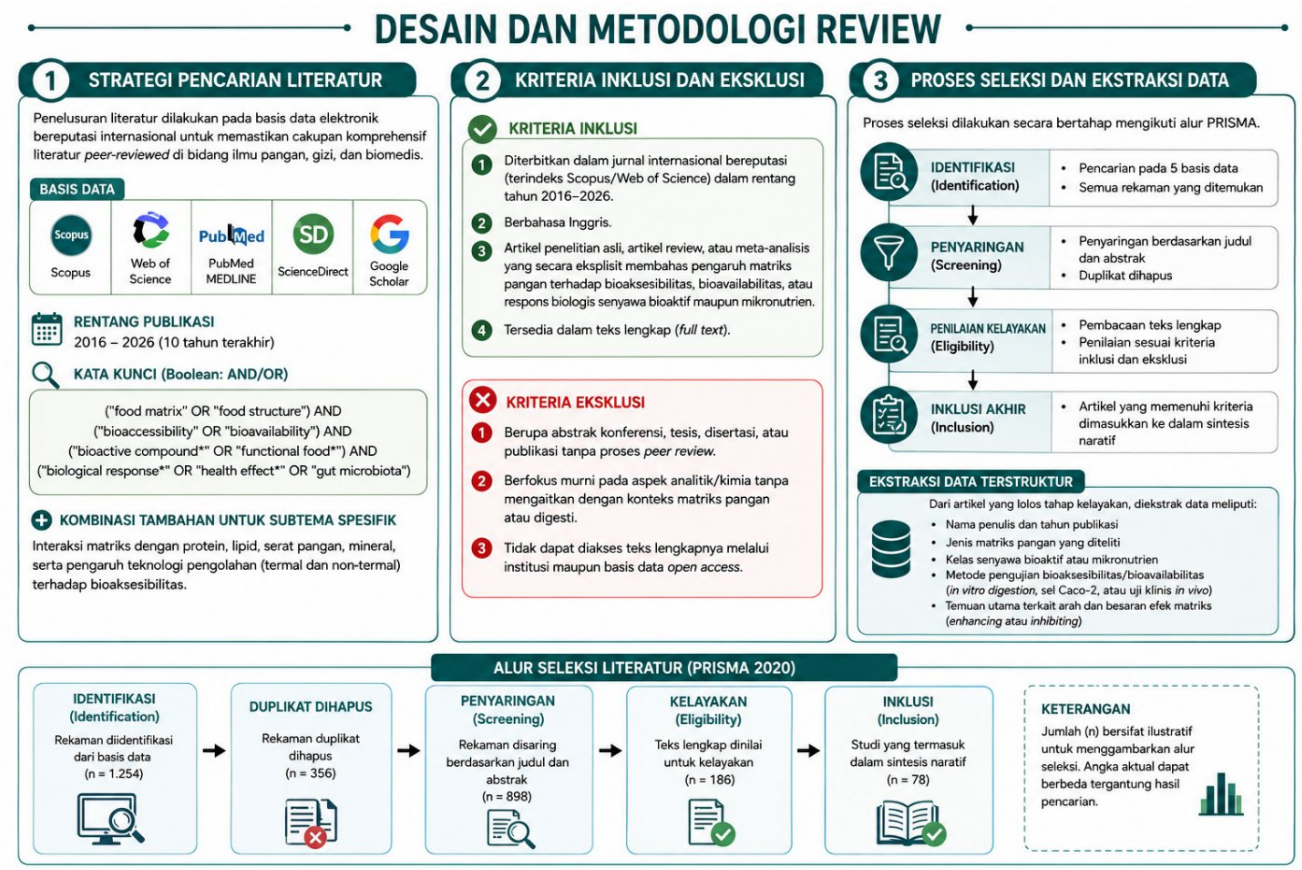
Berdasarkan uraian tersebut, review ini bertujuan untuk menyintesiskan secara terintegrasi peran matriks pangan dalam menentukan efektivitas biologis pangan fungsional, dengan menelusuri keterkaitan antara struktur dan komposisi matriks, mekanisme pelepasan dan bioaksesibilitas senyawa bioaktif selama pencernaan, serta implikasinya terhadap respons biologis di tingkat seluler maupun sistemik. Melalui pendekatan ini, review diharapkan dapat memberikan kerangka konseptual yang lebih holistik bagi pengembangan pangan fungsional generasi berikutnya, yang berorientasi pada rekayasa matriks berbasis bioaksesibilitas (matrix informed/bioaccessibility based design), bukan sekadar fortifikasi berbasis komposisi semata.

2. METODE

2.1 Desain dan Pendekatan Review

Artikel ini disusun sebagai narrative review yang mengadopsi sebagian prinsip pelaporan sistematis dari *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews* and *Meta Analyses* (PRISMA) 2020 (Page et al., 2021), khususnya pada tahap strategi pencarian, penetapan kriteria inklusi eksklusi, dan proses seleksi literatur, tanpa melakukan sintesis data kuantitatif (meta analisis) mengingat heterogenitas desain studi (*in vitro, in vivo*, dan uji klinis) yang dikaji. Pendekatan naratif dipilih karena tujuan review ini adalah mengintegrasikan konsep matriks pangan secara konseptual mulai dari struktur matriks, bioaksesibilitas, hingga respons biologis yang tersebar di berbagai disiplin ilmu pangan dan gizi, sehingga memerlukan sintesis tematik daripada agregasi statistik.

doi: 10.25047/nacia.v4i1.704



Gambar 1. Desain dan Metodologi Review

2.2 Strategi Pencarian Literatur

Penelusuran literatur dilakukan pada basis data elektronik bereputasi internasional, meliputi Scopus, Web of Science, PubMed/MEDLINE, ScienceDirect, dan Google Scholar, untuk memastikan cakupan yang komprehensif terhadap literatur peer-reviewed di bidang ilmu pangan, gizi, dan biomedis. Pencarian dibatasi pada rentang publikasi 10 tahun terakhir (2016–2026) untuk menjamin relevansi dan kemutakhiran temuan, mengingat konsep food matrix effect mengalami perkembangan metodologis yang pesat terutama sejak diperkenalkannya protokol digesti in vitro terstandardisasi seperti INFOGEST. Kata kunci disusun menggunakan kombinasi operator Boolean (AND/OR) dan mencakup istilah-istilah berikut: ("food matrix" OR "food structure") AND ("bioaccessibility" OR "bioavailability") AND ("bioactive compound*" OR "functional food*") AND ("biological response*" OR "health effect*" OR "gut microbiota"). Kombinasi tambahan digunakan untuk menjaring literatur pada subtema spesifik, seperti interaksi matriks dengan protein, lipid, serat pangan, dan mineral, serta pengaruh teknologi pengolahan (termal dan non-termal) terhadap bioaksesibilitas.

2.3 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Studi yang disertakan dalam review ini memenuhi kriteria: (1) diterbitkan dalam jurnal internasional bereputasi (terindeks Scopus/Web of Science) dalam rentang tahun 2016–2026; (2) berbahasa Inggris; (3) berupa artikel penelitian asli, artikel review, atau meta-analisis yang secara eksplisit membahas pengaruh matriks pangan terhadap bioaksesibilitas, bioavailabilitas, atau respons biologis senyawa bioaktif maupun mikronutrien; dan (4) tersedia dalam teks lengkap (full text). Studi dieksklusi apabila: (1) berupa abstrak konferensi, tesis, disertasi, atau

Jurusan Teknologi Pertanian
Politeknik Negeri Jember
doi: 10.25047/nacia.v4i1.704

publikasi tanpa proses peer review; (2) berfokus murni pada aspek analitik/kimia tanpa mengaitkan dengan konteks matriks pangan atau digesti; atau (3) tidak dapat diakses teks lengkapnya melalui institusi maupun basis data open access.

2.4 Proses Seleksi dan Ekstraksi Data

Proses seleksi dilakukan secara bertahap mengikuti alur PRISMA, yaitu identifikasi (identification), penyaringan (screening) berdasarkan judul dan abstrak, penilaian kelayakan (eligibility) melalui pembacaan teks lengkap, dan inklusi akhir (inclusion) ke dalam sintesis naratif. Artikel duplikat antarbasis data dihilangkan terlebih dahulu sebelum tahap penyaringan judul-abstrak. Dari artikel yang lolos tahap kelayakan, dilakukan ekstraksi data terstruktur meliputi: nama penulis dan tahun publikasi, jenis matriks pangan yang diteliti, kelas senyawa bioaktif atau mikronutrien, metode pengujian bioaksesibilitas/bioavailabilitas (*in vitro digestion,* sel Caco-2, atau uji klinis *in vivo*), serta temuan utama terkait arah dan besaran efek matriks (enhancing atau inhibiting).

2.5 Sintesis dan Penyajian Data

Data yang telah diekstraksi disintesis secara tematik ke dalam tiga alur pembahasan utama yang mencerminkan perjalanan senyawa bioaktif di dalam tubuh: (1) interaksi struktural dan komposisional matriks pangan dengan senyawa bioaktif pada tahap pra digesti; (2) dinamika pelepasan dan bioaksesibilitas selama proses pencernaan oral, gastrik, dan intestinal, termasuk peran mikrobiota kolon; dan (3) implikasinya terhadap respons biologis di tingkat seluler maupun sistemik. Sintesis tematik ini digunakan alih-alih tabulasi statistik mengingat variasi besar dalam unit pengukuran (persentase bioaksesibilitas, rasio molar, *fold change* bioavailabilitas) antarstudi yang tidak memungkinkan penggabungan kuantitatif secara langsung.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Matriks Pangan dan Interaksi dengan Senyawa Bioaktif

Istilah matriks pangan merujuk pada domain mikrostruktural atau susunan makromolekuler yang membungkus, berinteraksi, dan memberikan fungsionalitas tertentu terhadap komponen pangan, baik dari sisi fisikokimia, sensori, maupun nutrisi (José Miguel Aguilera, 2019). Konsep ini menegaskan bahwa aktivitas biologis suatu senyawa dalam tubuh tidak semata-mata ditentukan oleh keberadaan kimiawinya, melainkan juga oleh kinetika pelepasannya dari struktur pangan tempat ia terperangkap. Pendekatan berbasis nutrien tunggal dinilai tidak memadai untuk menjelaskan efek suatu produk pangan atau pola diet terhadap kesehatan, karena mengabaikan konteks matriks tempat nutrien tersebut berada (Weaver & Givens, 2025). Implikasinya, dua produk dengan komposisi kimia identik dapat menunjukkan perilaku pencernaan dan bioaktivitas yang berbeda apabila arsitektur matriksnya berlainan (Jose Miguel Aguilera, 2025; Capuano & Janssen, 2021). Selama proses pencernaan, matriks pangan mengalami disintegrasi bertahap melalui kombinasi mekanisme mekanis, kimiawi, dan enzimatis, sehingga nutrien serta senyawa bioaktif yang terperangkap di dalamnya secara progresif terlepas dan tersedia untuk diserap (Capuano & Janssen, 2021). Proses ini menjadi dasar bagi dua konsep kunci dalam kajian bioaktif pangan, yaitu bioaksesibilitas (fraksi senyawa yang terlepas dari matriks dan tersedia untuk diserap di saluran cerna) dan bioavailabilitas (fraksi senyawa yang benar-benar diserap dan dimanfaatkan tubuh). Kompleksitas multifase pangan yang tersusun dari fase padat, cair, dan terdispersi menjadikan setiap komponen struktural memiliki peran spesifik dalam mengatur laju pelepasan bioaktif (Andrés & Heredia, 2021).

doi: 10.25047/nacia.v4i1.704

Protein menyusun jejaring struktural pada banyak sistem pangan, baik dalam bentuk globular (misalnya protein whey atau kedelai) maupun fibrilar, dan dapat membentuk gel, film, atau lapisan antarmuka pada emulsi. Struktur ini memengaruhi laju hidrolisis oleh enzim pencernaan serta menjadi wahana pengikatan bagi senyawa bioaktif lain melalui ikatan hidrogen, interaksi hidrofobik, maupun ikatan kovalen (Mylvaganam, Nurkolis, & Tsopmo, 2025; Zheng et al., 2024). Lipid berperan sebagai fase pembawa bagi senyawa bioaktif lipofilik. Ukuran droplet lipid, derajat ketidakjenuhan, serta laju lipolisis menentukan kecepatan pembentukan misel campuran di usus halus, yang pada gilirannya menjadi kendaraan utama transportasi senyawa hidrofobik menuju epitel usus(Salvia-Trujillo et al., 2017). Karbohidrat dan polisakarida membentuk jejaring gel, matriks pati, maupun dinding sel tumbuhan yang dapat memerangkap senyawa bioaktif secara fisik maupun mengikatnya secara kimiawi. Polisakarida seperti pektin, β-glukan, atau arabinoxilan turut berperan sebagai pengemulsi dan penstabil sistem koloid pangan, sekaligus membentuk sistem terner bersama protein dan polifenol (Shahidi & Athiyappan, 2025; Xue et al., 2024). Serat pangan, baik larut maupun tidak larut, membentuk kompartemen tersendiri yang relatif resisten terhadap enzim pencernaan manusia. Sebagian besar senyawa bioaktif terutama polifenol terikat pada serat melalui ikatan ester, eter, atau glikosidik, sehingga pelepasannya baru terjadi secara signifikan setelah fermentasi oleh mikrobiota kolon (Cuellar-Núñez, Gonzalez de Mejia, & Loarca-Piña, 2021; Jiang et al., 2026; Li et al., 2025). Struktur fisik pangan, mencakup derajat kompartementalisasi sel, porositas, viskositas, dan tingkat pengolahan, menentukan aksesibilitas enzim pencernaan terhadap substrat di dalamnya. Pangan dengan integritas seluler tinggi (misalnya biji-bijian utuh) cenderung memperlambat laju pelepasan nutrien dan bioaktif dibandingkan pangan yang telah mengalami disrupsi mekanis atau termal (José Miguel Aguilera, 2019; Weaver & Givens, 2025).

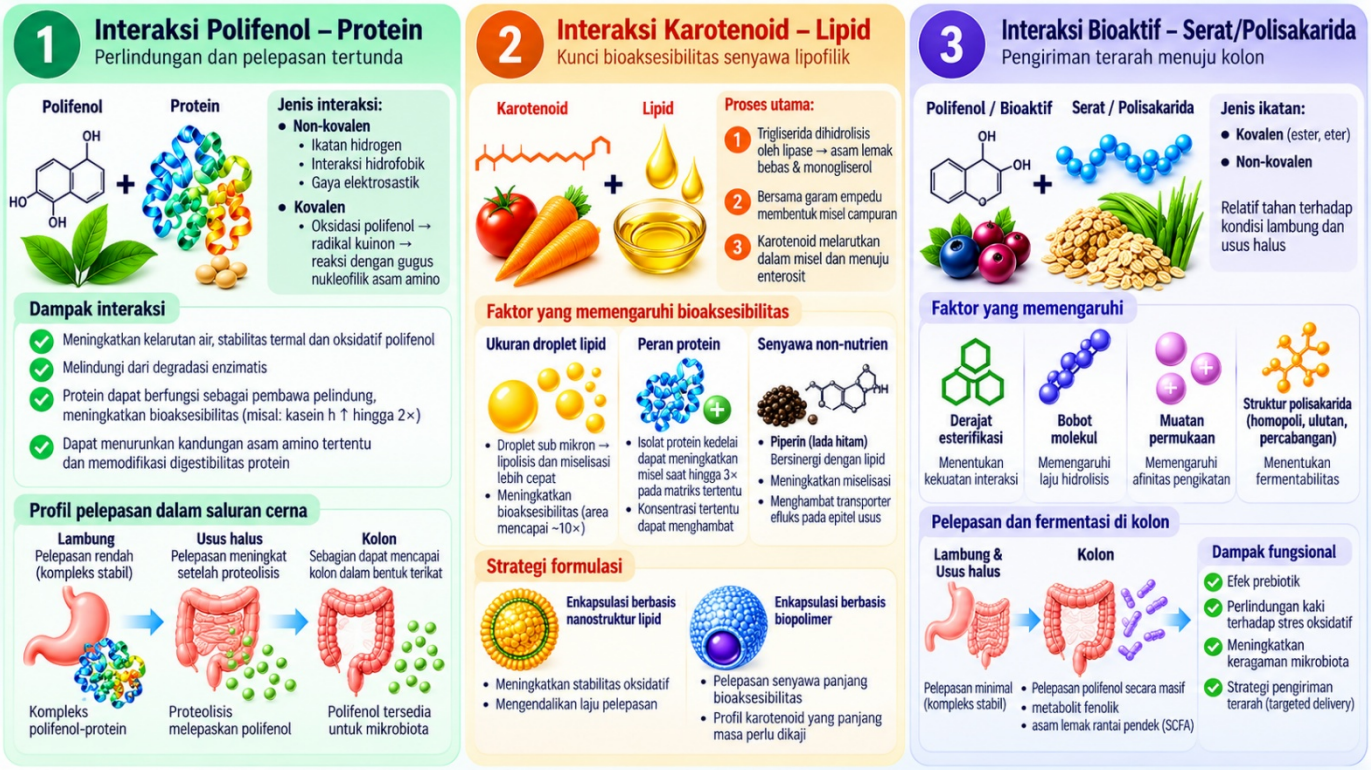
3.2 Interaksi Matriks Bioaktif

3.2.1 Interaksi Polifenol Protein

Polifenol dan protein berinteraksi melalui dua jalur utama, yaitu ikatan non kovalen (ikatan hidrogen, interaksi hidrofobik, dan gaya elektrostatik) serta ikatan kovalen yang bersifat lebih kuat dan cenderung ireversibel, umumnya terbentuk melalui oksidasi polifenol menjadi radikal kuinon yang kemudian bereaksi dengan gugus nukleofilik pada rantai samping asam amino (K. Zhang, Huang, Wang, Wan, & Wang, 2024). Faktor seperti pH, suhu, serta struktur molekul kedua komponen menentukan kekuatan dan jenis ikatan yang terbentuk (Tazeddinova et al., 2022; Xiao et al., 2023). Pembentukan kompleks polifenol protein umumnya meningkatkan kelarutan air, stabilitas termal, dan stabilitas oksidatif polifenol, sekaligus melindunginya dari degradasi enzimatis selama perjalanan di saluran cerna (Xiao et al., 2023). Studi pada sistem model susu dan nabati menunjukkan bahwa pembentukan kompleks bergantung pada pH larutan dan jenis protein yang digunakan, sehingga perilaku sistem model tidak selalu identik dengan sistem pangan utuh yang lebih kompleks (Chima, Mathews, Morgan, Johnson, & Van Buiten, 2022). Pada beberapa kajian, bioaksesibilitas katekin meningkat hingga dua kali lipat ketika dikomplekskan dengan protein kedelai, yang mengindikasikan bahwa protein dapat berfungsi sebagai pembawa pelindung bagi polifenol berpolaritas tinggi. Efek interaksi ini terhadap pelepasan bioaktif tidak selalu bersifat menguntungkan secara linear. Kompleks yang terbentuk cenderung menunda pelepasan polifenol pada fase gastrik, namun pelepasan tersebut meningkat pada fase intestinal setelah proteolisis berlangsung, sehingga profil pelepasan bersifat tertunda (*delayed release*) alih-alih instan (Mylvaganam et al., 2025). Pola ini penting secara fungsional karena memperpanjang residensi polifenol di saluran cerna dan berpotensi meningkatkan proporsi yang mencapai kolon dalam bentuk terikat. Pada sisi lain, interaksi kovalen antara polifenol dan protein juga

Jurusan Teknologi Pertanian
Politeknik Negeri Jember
doi: 10.25047/nacia.v4i1.704

dapat menurunkan kandungan asam amino tercerna serta memodifikasi digestibilitas protein itu sendiri, yang menegaskan bahwa interaksi ini bersifat dua arah (Mylvaganam et al., 2025; K. Zhang et al., 2024). Pada sistem yang lebih kompleks, keberadaan polisakarida bersama protein dan polifenol membentuk sistem terner yang dapat memodifikasi lebih lanjut kekuatan gel, kandungan struktur β-sheet, serta laju pelepasan senyawa aktif tersebut, menunjukkan bahwa interaksi matriks jarang bersifat biner dalam sistem pangan riil (Shahidi & Athiyappan, 2025; Xue et al., 2024)



Gambar 2. Interaksi polifenol protein, karotenoid lipid, dan bioaktif serat/polisakarida dalam matriks pangan memengaruhi stabilitas, bioaksesibilitas, pola pelepasan, serta potensi respons biologis senyawa bioaktif sepanjang saluran pencernaan

3.2.2 Interaksi Karotenoid Lipid

Karotenoid merupakan pigmen lipofilik yang bioaksesibilitasnya sangat bergantung pada keberadaan dan karakteristik fase lipid dalam matriks pangan. Selama pencernaan, trigliserida dihidrolisis oleh lipase menjadi asam lemak bebas dan monoasilgliserol yang, bersama garam empedu, membentuk misel campuran tempat karotenoid terlarutkan dan ditransportasikan menuju enterosit (Luo & Xiao, 2026). Ukuran droplet lipid awal menjadi determinan penting: emulsi dengan droplet berukuran sub-mikron menunjukkan laju lipolisis, pembentukan misel, dan inkorporasi karotenoid yang lebih cepat dibandingkan emulsi berdroplet besar, dengan bioaksesibilitas akhir yang dapat mencapai sekitar 70% pada sistem droplet kecil (Salvia-Trujillo et al., 2017).

Keberadaan protein dalam sistem yang sama dapat memodulasi efek lipid tersebut secara kompleks. Protein tertentu, khususnya isolat protein kedelai, terbukti meningkatkan misellisasi karotenoid hingga tiga kali lipat pada matriks dengan misellisasi awal yang buruk, seperti jus tomat, meskipun pada konsentrasi protein yang berlebihan efek ini dapat berbalik menjadi penghambatan akibat gangguan pembentukan droplet lipid selama lipolisis (Iddir et al., 2021). Selain interaksi dengan makronutrien, senyawa non-nutrien seperti piperin pada lada

Jurusan Teknologi Pertanian
Politeknik Negeri Jember
doi: 10.25047/nacia.v4i1.704

hitam terbukti bekerja sinergis dengan lipid diet untuk meningkatkan bioavailabilitas karotenoid, baik melalui peningkatan misellisasi maupun penghambatan transporter efluks pada tingkat epitel usus (Luo & Xiao, 2026). Pendekatan enkapsulasi berbasis nanostruktur lipid maupun biopolimer juga telah dikembangkan untuk mengendalikan stabilitas oksidatif dan laju pelepasan karotenoid secara lebih terarah, meskipun profil keamanan jangka panjangnya masih memerlukan kajian lanjutan (Molteni et al., 2022).

3.2.3 Interaksi Bioaktif Serat/Polisakarida

Interaksi antara senyawa bioaktif, terutama polifenol, dengan serat pangan bersifat khas karena sebagian besar ikatan yang terbentuk baik kovalen (ester, eter) maupun non-kovalen relatif tahan terhadap kondisi lambung dan usus halus. Akibatnya, fraksi bioaktif terikat serat umumnya tidak terlepas secara signifikan pada fase pencernaan atas, melainkan baru dilepaskan secara masif ketika serat difermentasi oleh mikrobiota kolon (Núñez-Gómez, Gonzalez-Barrio, & Periago, 2023). Kajian pada ampas anggur menunjukkan bahwa polifenol terikat pada serat larut dan serat tidak larut sama-sama dominan dilepaskan selama fermentasi kolon, dengan serat larut menunjukkan kapasitas pelepasan fenol total, flavonoid, dan aktivitas antioksidan yang lebih superior dibandingkan serat tidak larut, sementara serat tidak larut lebih berkontribusi terhadap peningkatan keragaman mikrobiota (Li et al., 2025).

Mekanisme pengikatan polifenol polisakarida turut dipengaruhi oleh derajat esterifikasi, bobot molekul, dan muatan permukaan polisakarida, yang menentukan kekuatan interaksi serta laju hidrolisisnya oleh enzim mikrobiota kolon (Shahidi & Athiyappan, 2025; Xue et al., 2024). Polisakarida yang lolos dari pencernaan usus halus berfungsi sebagai substrat fermentasi utama bagi mikrobiota kolon, dan sifat fermentabilitasnya sangat ditentukan oleh komposisi monosakarida, jenis ikatan glikosidik, serta derajat percabangannya, yang pada gilirannya memengaruhi profil metabolit bioaktif yang dihasilkan (Jiang et al., 2026). Interaksi antara polisakarida dan protein yang tidak tercerna di usus halus juga turut mengatur jalur fermentasi di kolon: polisakarida cenderung mendorong fermentasi karbohidrat yang menghasilkan butirat, sementara fermentasi protein berlebih justru menghasilkan metabolit yang menghambat produksi butirat, sehingga rasio kedua substrat ini penting dalam menentukan luaran metabolik kolon (Yuan et al., 2025).

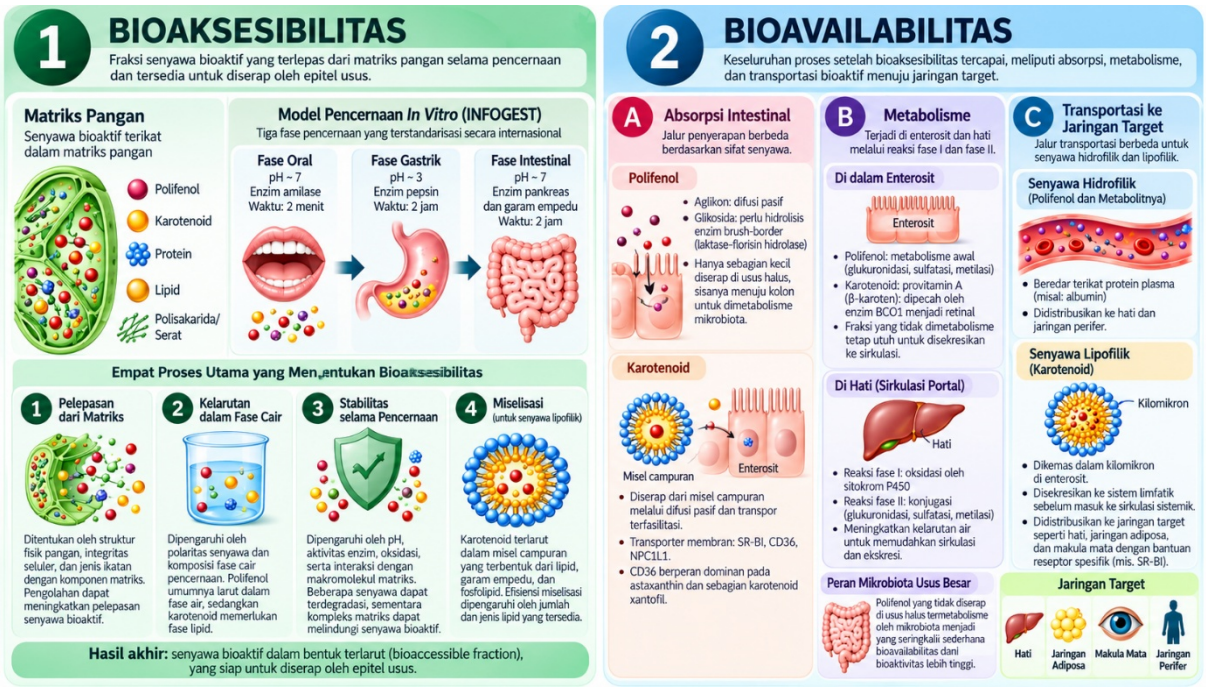
Pola pelepasan yang tertunda hingga fase kolon ini memiliki implikasi fungsional ganda: di satu sisi menurunkan bioaksesibilitas polifenol pada fase pencernaan atas, namun di sisi lain memungkinkan metabolit fenolik dan asam lemak rantai pendek yang dihasilkan dari fermentasi mencapai mukosa kolon dalam konsentrasi bermakna, memberikan efek prebiotik dan perlindungan lokal terhadap stres oksidatif (Brennan, 2024; Li et al., 2025; Núñez-Gómez et al., 2023). Fenomena ini menegaskan bahwa pengikatan bioaktif pada serat bukan semata hambatan terhadap bioavailabilitas, melainkan strategi pengiriman terarah (targeted delivery) menuju kolon yang relevan bagi pengembangan pangan fungsional. Secara keseluruhan, ketiga jenis interaksi matriks bioaktif tersebut polifenol protein, karotenoid lipid, dan bioaktif serat/polisakarida menunjukkan bahwa stabilitas dan laju pelepasan senyawa bioaktif tidak dapat dipahami secara terpisah dari konteks struktural pangan tempat senyawa tersebut berada. Rancangan matriks pangan fungsional ke depan perlu mempertimbangkan interaksi multikomponen ini secara terintegrasi, alih-alih hanya berfokus pada kandungan bioaktif secara kuantitatif.

3.3 *Bioaksesibilitas Selama Pencernaan*

Bioaksesibilitas didefinisikan sebagai fraksi senyawa bioaktif yang terlepas dari matriks pangan selama pencernaan dan tersedia untuk diserap oleh epitel usus, sebuah konsep yang menjadi titik tolak evaluasi nilai fungsional pangan sejak konsep matriks pangan berkembang

(José Miguel Aguilera, 2019; Capuano & Janssen, 2021). Penilaian bioaksesibilitas umumnya dilakukan melalui model pencernaan in vitro statis terstandardisasi INFOGEST, yang membagi proses pencernaan menjadi fase oral, gastrik, dan intestinal dengan parameter enzim, pH, dan waktu yang telah disepakati secara internasional, sehingga hasil antarstudi dapat dibandingkan secara konsisten (Brodkorb et al., 2019). Empat proses berurutan menentukan besarnya bioaksesibilitas suatu senyawa bioaktif: pelepasan dari matriks, kelarutan dalam fase cair pencernaan, stabilitas terhadap kondisi kimiawi saluran cerna, dan khusus bagi senyawa lipofilik misellisasi. Pelepasan dari matriks merupakan tahap pertama dan paling menentukan. Struktur fisik pangan, derajat kompartementalisasi sel, serta jenis ikatan antara bioaktif dan komponen matriks (protein, lipid, polisakarida) menentukan seberapa mudah enzim pencernaan dan cairan lambung-usus dapat menjangkau senyawa target (José Miguel Aguilera, 2019; Andrés & Heredia, 2021). Pangan dengan integritas seluler tinggi menahan pelepasan bioaktif lebih lama dibandingkan pangan yang dinding selnya telah terdisrupsi oleh pengolahan mekanis atau termal.

Kelarutan menjadi penentu berikutnya, terutama untuk senyawa dengan polaritas berbeda. Polifenol yang umumnya bersifat hidrofilik cenderung larut dalam fase cair pencernaan segera setelah terlepas dari matriks, sementara karotenoid yang sangat lipofilik memerlukan fase lipid sebagai media pelarutan awal sebelum dapat berpindah ke fase misel (Geng et al., 2023). Ketidaksesuaian antara polaritas senyawa dan komposisi fase cair pencernaan dapat menjadi faktor pembatas utama bioaksesibilitas, terlepas dari seberapa efisien senyawa tersebut terlepas dari matriks. Stabilitas senyawa bioaktif terhadap kondisi asam lambung, aktivitas enzim, dan potensi oksidasi turut menentukan proporsi yang bertahan hingga fase intestinal. Sebagian polifenol mengalami degradasi struktural pada pH basa usus halus, sementara karotenoid rentan terhadap isomerisasi dan oksidasi akibat paparan oksigen dan enzim lipoksigenase selama pencernaan (Geng et al., 2023; Molteni et al., 2022). Interaksi dengan makromolekul matriks sebagaimana dibahas pada bagian sebelumnya berperan ganda disini yaitu kompleks polifenol protein maupun ikatan bioaktif serat dapat memperlambat degradasi dengan cara membatasi paparan langsung senyawa terhadap lingkungan pencernaan yang reaktif (Núñez-Gómez et al., 2023; Xue et al., 2024). Miselisasi **a**dalah tahap akhir yang khusus relevan bagi senyawa lipofilik seperti karotenoid. Selama fase intestinal, lipase pankreas menghidrolisis trigliserida menjadi asam lemak bebas dan monoasilgliserol yang, bersama garam empedu dan fosfolipid, membentuk misel campuran tempat karotenoid terlarutkan (Reboul, 2019). Efisiensi miselisasi sangat bergantung pada jumlah dan jenis lipid yang tersedia untuk dicerna bersama bioaktif; rasio lipid terhadap karotenoid yang terlalu rendah membatasi kapasitas pembentukan misel meskipun karotenoid telah terlepas sempurna dari matriks (Salvia-Trujillo et al., 2017).



Gambar 3. Skema bioaksebilitas dan bioavaibilitas senyawa bioaktif

3.4 Bioavailabilitas

Bioavailabilitas mencakup keseluruhan rangkaian proses setelah bioaksesibilitas tercapai, yaitu absorpsi oleh epitel usus, metabolisme intraseluler maupun sistemik, dan transportasi bioaktif menuju jaringan target. Berbeda dengan bioaksesibilitas yang dapat diukur secara in vitro, bioavailabilitas memerlukan konfirmasi pada sistem biologis hidup (sel Caco-2, model hewan, atau uji klinis pada manusia) karena melibatkan proses aktif yang tidak dapat direplikasi sepenuhnya oleh model pencernaan statis (Geng et al., 2023). Absorpsi intestinal senyawa bioaktif berlangsung melalui jalur yang berbeda bergantung pada sifat kimiawinya. Polifenol aglikon berukuran kecil dapat menembus membran enterosit melalui difusi pasif, sementara sebagian besar polifenol glikosilasi memerlukan hidrolisis oleh enzim brush-border seperti laktase-florizin hidrolase sebelum dapat diserap, dan hanya sebagian kecil yang benar-benar diserap di usus halus sisanya mencapai kolon untuk dimetabolisme mikrobiota (Mahdi et al., 2025). Karotenoid, sebaliknya, diserap dari misel campuran melalui kombinasi difusi pasif dan transpor terfasilitasi oleh protein membran seperti *scavenger receptor class B type I (SR-BI), cluster of differentiation 36 (CD36)*, dan *Niemann-Pick C1-like 1 (NPC1L1)* yang terekspresi pada brush border enterosit (Reboul, 2019; Zhao et al., 2021). Afinitas transporter ini bersifat spesifik-senyawa; CD36 misalnya menunjukkan peran dominan dalam penyerapan astaxanthin dan sebagian karotenoid xantofil, dengan tingkat penyerapan yang menurun tajam pada kondisi ekspresi CD36 yang direndahkan (G. Liu, Zhu, Zhang, & Pan, 2023).

Metabolisme bioaktif terjadi baik di dalam enterosit maupun di hati melalui reaksi fase I (oksidasi oleh sitokrom P450) dan fase II (konjugasi glukuronidasi, sulfasi, dan metilasi) yang meningkatkan kelarutan air senyawa lipofilik-menengah seperti polifenol untuk memudahkan ekskresi maupun sirkulasi (Mahdi et al., 2025). Karotenoid provitamin A seperti β-karoten sebagian dipecah oleh enzim sitosolik BCO1 menjadi retinal di dalam enterosit, sementara fraksi yang tidak dimetabolisme tetap dalam bentuk utuh untuk disekresikan ke sirkulasi limfatik (Geng et al., 2023; Reboul, 2019). Polifenol yang tidak diserap di usus halus mencapai

Jurusan Teknologi Pertanian
Politeknik Negeri Jember
doi: 10.25047/nacia.v4i1.704

kolon dan mengalami biotransformasi ekstensif oleh mikrobiota menjadi metabolit fenolik sederhana yang seringkali memiliki bioavailabilitas dan bioaktivitas lebih tinggi dibandingkan senyawa induknya (Jiang et al., 2026; Mahdi et al., 2025). Transportasi bioaktif menuju jaringan target berbeda jalur antara senyawa hidrofilik dan lipofilik. Metabolit polifenol terkonjugasi umumnya bersirkulasi terikat protein plasma menuju hati dan jaringan perifer melalui sirkulasi portal. Karotenoid dan produk pencernaan lipid lain dikemas ke dalam kilomikron di dalam enterosit dan disekresikan ke sistem limfatik sebelum memasuki sirkulasi sistemik, di mana mereka kemudian didistribusikan ke jaringan target seperti hati, jaringan adiposa, dan makula mata dengan bantuan reseptor spesifik seperti SR-BI (Bohn et al., 2017; Reboul, 2019).

3.5 Pengaruh Pengolahan terhadap Memodifikasi Struktur Matriks

Pengolahan pangan dapat memodifikasi struktur matriks secara signifikan sehingga mengubah bioaksesibilitas bioaktif, baik ke arah peningkatan maupun penurunan, bergantung pada jenis, intensitas, dan durasi perlakuan**.** Pemanasan memiliki efek dua sisi. Perlakuan termal seperti perebusan, pengukusan, dan pasteurisasi dapat melunakkan dinding sel dan melemahkan ikatan kovalen antara bioaktif dan matriks, sehingga meningkatkan pelepasan dan bioaksesibilitas fenomena yang teramati konsisten pada polifenol maupun karotenoid dari berbagai sayuran (Narra et al., 2024; Yumeng Wu, Wu, & Hu, 2024). Pada kasus ekstrem seperti cardoon, bioaksesibilitas polifenol meningkat dari hanya sekitar 2% pada kondisi mentah menjadi 60–67% setelah pemasakan, karena proses pemanasan melonggarkan struktur dinding sel dan memudahkan ekstraksi polifenol selama pencernaan. Namun demikian, suhu dan durasi pemanasan yang berlebihan dapat menyebabkan degradasi termal langsung terhadap senyawa bioaktif itu sendiri, sehingga keseimbangan antara pelepasan matriks dan degradasi kimiawi senyawa perlu dipertimbangkan pada setiap jenis pangan (Narra et al., 2024; Yingying Wu et al., 2024). Fermentasi**,** khususnya oleh bakteri asam laktat (BAL), bekerja melalui mekanisme berbeda: enzim ekstraseluler yang disekresikan mikroorganisme (misalnya *β-glukosidase* dan *esterase*) menghidrolisis ikatan glikosidik atau ester yang mengikat polifenol pada matriks serat maupun protein, sehingga melepaskan bentuk aglikon yang lebih mudah diserap (Dissanayake et al., 2025). Fermentasi jus buah dan sayur dengan galur BAL seperti *Lactiplantibacillus plantarum* dan *Pediococcus pentosaceus* secara konsisten dilaporkan meningkatkan kandungan fenolik total maupun karotenoid terukur (termasuk *β-karoten* dan lutein-zeaxantin) dibandingkan kontrol tidak difermentasi (Mantzourani et al., 2024). Efek serupa juga teramati pada serat pangan terikat polifenol dari ampas buah, yang pelepasannya baru optimal setelah fermentasi kolon oleh mikrobiota usus (Jiang et al., 2026; Li et al., 2025).

Homogenisasi dan pengecilan ukuran partikel, terutama pada sistem berbasis lipid, meningkatkan luas permukaan droplet yang tersedia bagi kerja lipase pankreas, sehingga mempercepat lipolisis dan pembentukan misel campuran yang membawa karotenoid. Penurunan ukuran droplet emulsi dari skala mikron ke sub-mikron secara konsisten meningkatkan bioaksesibilitas karotenoid pada berbagai matriks, mulai dari emulsi model hingga produk berbasis buah (Lara-Abia, Lobo, Pérez-Pascual, Welti-Chanes, & Cano, 2023; Salvia-Trujillo et al., 2017). Perbandingan antara homogenisasi tekanan tinggi dan emulsifikasi spontan menunjukkan bahwa homogenisasi tekanan tinggi cenderung menghasilkan bioaksesibilitas lebih tinggi karena ukuran droplet yang lebih kecil dan luas permukaan lebih besar untuk kerja enzim, meskipun stabilitas penyimpanan karotenoid dapat lebih unggul pada metode emulsifikasi spontan (Lew, Okechukwu, Tan, Tan, & Tan, 2026).

Enkapsulasi**,** baik melalui teknik spray drying, freeze drying, koaservasi kompleks, maupun pembentukan nanoemulsi, dirancang untuk melindungi senyawa bioaktif dari degradasi selama pengolahan dan pencernaan awal, sekaligus mengendalikan laju pelepasannya

Jurusan Teknologi Pertanian
Politeknik Negeri Jember
doi: 10.25047/nacia.v4i1.704

di lokasi pencernaan yang diinginkan. Mikrokapsul polifenol dari limbah kakao yang dienkapsulasi dengan gum arab melalui spray drying menunjukkan peningkatan bioaksesibilitas dari hanya sekitar 6% pada ekstrak tidak terenkapsulasi menjadi lebih dari 76% (Natalia, López-Giraldo, Erika, & Yaiza, 2025), sementara enkapsulasi *freeze drying* berbasis alginat pada ekstrak ampas anggur turut meningkatkan indeks bioaksesibilitas fenolik total secara signifikan (Martinović et al., 2024). Prinsip serupa berlaku bagi enkapsulasi berbasis protein untuk polifenol dan enkapsulasi lipid/biopolimer untuk karotenoid, yang keduanya bekerja dengan menunda pelepasan senyawa pada fase gastrik dan mengoptimalkan pelepasan pada fase intestinal (Molteni et al., 2022; Xiao et al., 2023).

Tabel 1. Matriks efek senyawa bioaktif dengan beberapa perlakuan terhadap dampak bioaksesibilitasnya

Matriks	Bioaktif	Perlakuan	Dampak Bioaksesibilitas	Referensi
Isolat protein whey	Antosianin (ekstrak kulit ceri asam)	Mikroenkapsulasi (koaservasi + freeze-drying)	Protein whey melindungi antosianin dari degradasi lambung; pelepasan optimal terjadi di fase usus (EE ±70%)	(Oancea et al., 2018)
Jus mandarin satsuma (matriks pektin)	Karotenoid (lutein, β-karoten)	Tekanan hidrostatik tinggi (HHP, 300–600 MPa)	Bioaksesibilitas karotenoid meningkat signifikan, optimal pada 600 MPa/1 menit, berkorelasi dengan perubahan kadar & derajat esterifikasi pektin	(Huang et al., 2025)
Minuman susu–mandarin	Karotenoid & senyawa fenolik	Fortifikasi kadar lemak susu & kalsium	Lemak susu sedang (1,7%) memaksimalkan bioaksesibilitas karotenoid; kalsium tinggi (500 mg/100 mL) menurunkannya dari 76% menjadi 43%	(Stinco, Benítez-González, Hernanz, & Vicario, 2022)
Jus ceri asam (*Prunus cerasus*)	Polifenol total & antosianin	Pemrosesan tekanan tinggi (HPP 300–500 MPa) vs pasteurisasi	Kedua perlakuan meningkatkan bioaksesibilitas	(Ozkan, Kamiloglu, Demir, &

doi: 10.25047/nacia.v4i1.704

	monomerik	termal	polifenol dibanding kontrol; pasteurisasi termal memberi bioaksesibilitas antosianin tertinggi (82%)	Capanoglu, 2025)
Jus garden cress (*Lepidium sativum*)	Polifenol total & klorofil	Ultrasonikasi vs pasteurisasi termal	Ultrasonikasi meningkatkan laju pemulihan bioaksesibilitas pascadigesti (TPC +34,96%) dibanding pasteurisasi	(Levent et al., 2025)
Fraksi protein legum (lupin, kacang polong, faba)	Mineral besi & seng (Fe, Zn)	Ko-digesti dengan fraksi albumin/globulin legum	Globulin faba meningkatkan kelarutan Fe^{2+}/Zn; fraksi lain menurunkan kelarutan, bergantung pada fraksi protein dan kondisi lambung-usus	(Y. Y. Zhang, Stockmann, Ng, & Ajlouni, 2021)
Gel pati jagung (waxy, normal, tinggi amilosa)	Kurkumin (dalam nanoemulsi)	Variasi struktur gel berdasarkan kadar amilosa	Gel amilosa tinggi & normal melepaskan kurkumin lebih cepat; waxy menunjukkan pelepasan lambat dan berkelanjutan	(Qazi, Ye, Acevedo-Fani, & Singh, 2023)
Susu rekonstitusi (bubuk susu skim)	Kurkumin (nanoemulsi)	Perlakuan panas bubuk susu (rendah/sedang/tinggi)	Bubuk susu perlakuan panas tinggi menghasilkan bioaksesibilitas kurkumin lebih tinggi akibat struktur curd gastrik yang lebih terbuka	(Qazi, Ye, Acevedo-Fani, & Singh, 2022)
Nanoemulsi lipid dengan asam fitat	Kurkumin	Penambahan asam fitat pada berbagai konsentrasi	Asam fitat menghambat pencernaan lipid (turun hingga	(Pei et al., 2019)

doi: 10.25047/nacia.v4i1.704

			78% FFA) namun tetap meningkatkan bioaksesibilitas kurkumin	
Bahan pangan nabati komersial (isolat/konsentrat kedelai, kacang polong, faba)	Mineral besi & seng	Perbandingan bentuk pengolahan (isolat vs konsentrat vs tekstur)	Bioaksesibilitas Fe/Zn sangat terbatas pada hampir semua bahan; hanya isolat faba & kacang polong menunjukkan Fe terlarut bermakna	(Auer et al., 2024)

4. KESIMPULAN

Matriks pangan merupakan determinan fundamental yang menghubungkan keberadaan senyawa bioaktif dengan efektivitas biologis pangan fungsional. Hasil sintesis menunjukkan bahwa protein, lipid, polisakarida, serat pangan, dan struktur mikro pangan secara dinamis mengatur stabilitas, pelepasan, kelarutan, miselisasi, bioaksesibilitas, serta jalur absorpsi dan metabolisme senyawa bioaktif. Interaksi tersebut dapat bersifat meningkatkan maupun menghambat, bergantung pada karakteristik senyawa, komposisi dan arsitektur matriks, serta kondisi pencernaan. Pengolahan termal dan non-termal, fermentasi, pengecilan ukuran, serta teknologi enkapsulasi terbukti berpotensi merekayasa matriks untuk mengoptimalkan ketersediaan bioaktif pada lokasi target. Dengan demikian, efektivitas pangan fungsional tidak tepat diprediksi hanya berdasarkan kandungan bioaktif, tetapi perlu dievaluasi melalui keterkaitan matriks pencernaan bioaksesibilitas respons biologis. Kerangka ini mendukung pergeseran menuju *matrix informed/bioaccessibility based design* sebagai strategi pengembangan pangan fungsional generasi berikutnya. .

DAFTAR PUSTAKA

Aguilera, Jose M. (2024). Food structure revisited. *Trends in Food Science & Technology*, *147*, 104459.

Aguilera, Jose Miguel. (2025). Food matrices as delivery units of nutrients in processed foods. *Journal of Food Science*, *90*(2), e70049.

Aguilera, José Miguel. (2019). The food matrix: implications in processing, nutrition and health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *59*(22), 3612–3629.

Andrés, A., & Heredia, A. (2021). Advanced research in food digestion. *Foods*, Vol. 10, p. 122. MDPI.

Arshad, Z., Shahid, S., Hasnain, A., Yaseen, E., & Rahimi, M. (2025). Functional foods enriched with bioactive compounds: therapeutic potential and technological innovations. *Food Science & Nutrition*, *13*(10), e71024.

Auer, J., Alminger, M., Marinea, M., Johansson, M., Zamaratskaia, G., Högberg, A., & Langton, M. (2024). Assessing the digestibility and estimated bioavailability/bioaccessibility of plant-based proteins and minerals from soy, pea, and faba bean ingredients. *Lwt*, *197*, 115893.

Bohn, T., Desmarchelier, C., Dragsted, L. O., Nielsen, C. S., Stahl, W., Rühl, R., … Borel, P. (2017). Host-related factors explaining interindividual variability of carotenoid bioavailability and tissue concentrations in humans. *Molecular Nutrition & Food Research*, *61*(6), 1600685.

Brennan, C. S. (2024). The role of valorised plant proteins and phenolic compounds on the digestibility of foods: a short review of recent trends and future opportunities in addressing sustainability issues. *Frontiers in Food Science and Technology*, *4*, 1354391.

Brodkorb, A., Egger, L., Alminger, M., Alvito, P., Assunção, R., Ballance, S., … Carrière, F. (2019). INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion. *Nature Protocols*, *14*(4), 991–1014.

Capuano, E., & Janssen, A. E. M. (2021). Food matrix and macronutrient digestion. *Annual Review of Food Science and Technology*, *12*(1), 193–212.

Chima, B., Mathews, P., Morgan, S., Johnson, S. A., & Van Buiten, C. B. (2022). Physicochemical characterization of interactions between blueberry polyphenols and food proteins from dairy and plant sources. *Foods*, *11*(18), 2846.

Cilla, A., Bosch, L., Barberá, R., & Alegría, A. (2018). Effect of processing on the bioaccessibility of bioactive compounds–A review focusing on carotenoids, minerals, ascorbic acid, tocopherols and polyphenols. *Journal of Food Composition and Analysis*, *68*, 3–15.

Cuellar-Núñez, M. L., Gonzalez de Mejia, E., & Loarca-Piña, G. (2021). Moringa oleifera leaves alleviated inflammation through downregulation of IL-2, IL-6, and TNF-α in a colitis-associated colorectal cancer model. *Food Research International*, *144*. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110318

de Castro Cogle, K., Kubo, M. T. K., Merlier, F., Josse, A., Anastasiadi, M., Mohareb, F. R., & Rossi, C. (2024). Probabilistic modelling of the food matrix effects on curcuminoid's in vitro oral bioaccessibility. *Foods*, *13*(14), 2234.

Dissanayake, I. H., Tabassum, W., Alsherbiny, M., Chang, D., Li, C. G., & Bhuyan, D. J. (2025). Lactic acid bacterial fermentation as a biotransformation strategy to enhance the bioavailability of phenolic antioxidants in fruits and vegetables: A comprehensive review. *Food Research International*, *209*, 116283.

Geng, T., Bao, S., Sun, X., Ma, D., Zhang, H., Ge, Q., … Ma, T. (2023). A clarification of concepts related to the digestion and absorption of carotenoids and a new standardized carotenoids bioavailability evaluation system. *Food Chemistry*, *400*, 134060.

Hossain, M. S., Wazed, M. A., Shuvo, S. Das, Sultana, Z., Preya, M. S. A., Khanom, H., … Ahmad, T. (2025). Fortified and functional foods: Trends, innovations, and their public health impact for future nutrient enrichment. *Journal of Agriculture and Food Research*, 102275.

Huang, S., Lu, L., Yang, J., Zhang, Y., Xu, X., Pan, S., & Liu, F. (2025). In vitro bioaccessibility of carotenoids in satsuma mandarin juice: Effects of high hydrostatic pressure and it-mediated matrix changes. *Food Research International*, *219*, 117012.

Iddir, M., Porras Yaruro, J. F., Cocco, E., Hardy, E. M., Appenzeller, B. M. R., Guignard, C., … Bohn, T. (2021). Impact of protein-enriched plant food items on the bioaccessibility and cellular uptake of carotenoids. *Antioxidants*, *10*(7), 1005.

Jiang, Z., Li, B., Zhao, R., Zhao, X., Zhang, X., & Jiao, L. (2026). Digestive properties in fermentation driven interactions of plant polysaccharides with gut microbiota and their health implications. *Frontiers in Pharmacology*, *17*, 1733849.

Lara-Abia, S., Lobo, G., Pérez-Pascual, N., Welti-Chanes, J., & Cano, M. P. (2023). *Supplementary Materials: Improvement in the stability and bioaccessibility of carotenoid and carotenoid esters from a papaya by-product using O/W emulsions*.

Levent, O., Şimşek, M. A., Yıkmış, S., Demirel, S., Tokatlı Demirok, N., Türkol, M., … Mohamed Ahmed, I. A. (2025). Ultrasound-assisted sustainable processing of garden cress juice: enhancing bioactive compounds and bioaccessibility through XGBoost optimization. *ACS Omega*, *10*(48), 59300–59313.

Lew, L. A., Okechukwu, N. P., Tan, T. B., Tan, C. P., & Tan, C. H. (2026). Impacts of high-pressure homogenization and spontaneous emulsification on the physicochemical properties and stability of red palm olein-based beta-carotene nanoemulsion. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 1–15.

Li, Y., Chen, X., Wang, G., Xu, L., Liu, Y., Yuan, C., & Li, J. (2025). The release patterns and potential prebiotic characteristics of soluble and insoluble dietary fiber-bound polyphenols from pinot noir grape pomace in vitro digestion and fermentation. *Food Chemistry: X*, *29*, 102694.

Liu, G., Zhu, M., Zhang, M., & Pan, F. (2023). Emerging Role of IGF-1 in Prostate Cancer: A Promising Biomarker and Therapeutic Target. *Cancers*, *15*(4). https://doi.org/10.3390/cancers15041287

Liu, X., Wang, T., Liu, Z., & Fan, G. (2025). Food Bioactive for Gut-Metabolic Axis Regulation and Microbiota Modulation. *Foods*, Vol. 14, p. 2617. MDPI.

López-Gámez, G., Elez-Martínez, P., Martín-Belloso, O., & Soliva-Fortuny, R. (2021). Recent advances toward the application of non-thermal technologies in food processing: An insight on the bioaccessibility of health-related constituents in plant-based products. *Foods*, *10*(7), 1538.

Luo, M., & Xiao, H. (2026). Black Pepper and Dietary Lipids Synergistically Enhance Carotenoid Bioavailability: A Narrative Review. *Nutrition Reviews*, *84*(Supplement_1), 81–88.

Ma, Z. F., Liu, S., Fu, C., Zhou, S., & Lee, Y. Y. (2026). Functional foods in health promotion and disease prevention: Innovations, evidence and challenges. *Foods*, *15*(4), 764.

Mahdi, L., Graziani, A., Baffy, G., Mitten, E. K., Portincasa, P., & Khalil, M. (2025). Unlocking polyphenol efficacy: The role of gut microbiota in modulating bioavailability and health effects. *Nutrients*, *17*(17), 2793.

Mantzourani, I., Nikolaou, A., Kourkoutas, Y., Alexopoulos, A., Dasenaki, M., Mastrotheodoraki, A., … Plessas, S. (2024). Chemical profile characterization of fruit and vegetable juices after fermentation with probiotic strains. *Foods*, *13*(7), 1136.

Martinović, J., Ambrus, R., Planinić, M., Šelo, G., Klarić, A.-M., Perković, G., & Bucić-Kojić, A. (2024). Microencapsulation of grape pomace extracts with alginate-based coatings by freeze-drying: Release kinetics and in vitro bioaccessibility assessment of phenolic compounds. *Gels*, *10*(6), 353.

Mishra, A. K., Singh, R., Rawat, H., Kumar, V., Jagtap, C., & Jain, A. (2024). The influence of food matrix on the stability and bioavailability of phytochemicals: A comprehensive review. *Food and Humanity*, *2*, 100202.

Molteni, C., La Motta, C., & Valoppi, F. (2022). Improving the bioaccessibility and bioavailability of carotenoids by means of nanostructured delivery systems: A comprehensive review. *Antioxidants*, *11*(10), 1931.

Mulet-Cabero, A.-I., Torres-Gonzalez, M., Geurts, J., Rosales, A., Farhang, B., Marmonier, C., … Gandolfi, I. (2024). The dairy matrix: Its importance, definition, and current application in the context of nutrition and health. *Nutrients*, *16*(17), 2908.

Mylvaganam, H., Nurkolis, F., & Tsopmo, A. (2025). Plant protein-dietary polyphenol interactions: implications for protein structural and functional properties and digestibility. *Food Chemistry International*, *1*(2), 110–125.

Narra, F., Piragine, E., Benedetti, G., Ceccanti, C., Florio, M., Spezzini, J., … Guidi, L. (2024).

Impact of thermal processing on polyphenols, carotenoids, glucosinolates, and ascorbic acid in fruit and vegetables and their cardiovascular benefits. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *23*(6), e13426.

Natalia, G. M. A., López-Giraldo, L. J., Erika, S. G., & Yaiza, M. C. (2025). Evaluation of the Efficiency of Encapsulation and Bioaccessibility of Polyphenol Microcapsules from Cocoa Pod Husks Using Different Techniques and Encapsulating Agents. *Processes*, *13*(10), 3094.

Nicolescu, A., Babotă, M., Barros, L., Rocchetti, G., Lucini, L., Tanase, C., … Crișan, G. (2023). Bioaccessibility and bioactive potential of different phytochemical classes from nutraceuticals and functional foods. *Frontiers in Nutrition*, *10*, 1184535.

Núñez-Gómez, V., Gonzalez-Barrio, R., & Periago, M. J. (2023). Interaction between dietary fibre and bioactive compounds in plant by-products: Impact on bioaccessibility and bioavailability. *Antioxidants*, *12*(4), 976.

Oancea, A.-M., Hasan, M., Vasile, A. M., Barbu, V., Enachi, E., Bahrim, G., … Stănciuc, N. (2018). Functional evaluation of microencapsulated anthocyanins from sour cherries skins extract in whey proteins isolate. *Lwt*, *95*, 129–134.

Ozkan, G., Kamiloglu, S., Demir, N., & Capanoglu, E. (2025). Impact of high pressure processing on the in vitro bioaccessibility of polyphenols in sour cherry (Prunus cerasus L.) juice. *ACS Omega*, *10*(19), 20038.

Pei, Y., Ai, T., Deng, Z., Wu, D., Liang, H., McClements, D. J., & Li, B. (2019). Impact of plant extract on the gastrointestinal fate of nutraceutical-loaded nanoemulsions: Phytic acid inhibits lipid digestion but enhances curcumin bioaccessibility. *Food & Function*, *10*(6), 3344–3355.

Qazi, H. J., Ye, A., Acevedo-Fani, A., & Singh, H. (2022). Impact of recombined milk systems on gastrointestinal fate of curcumin nanoemulsion. *Frontiers in Nutrition*, *9*, 890876.

Qazi, H. J., Ye, A., Acevedo-Fani, A., & Singh, H. (2023). The impact of differently structured starch gels on the gastrointestinal fate of a curcumin-containing nanoemulsion. *Food & Function*, *14*(17), 7924–7937.

Rashidinejad, A. (2024). The road ahead for functional foods: Promising opportunities amidst industry challenges. *Future Postharvest and Food*, *1*(2), 266–273.

Reboul, E. (2019). Mechanisms of carotenoid intestinal absorption: where do we stand? *Nutrients*, *11*(4), 838.

Ruan, Z., Sun, F., Xia, X., & Zhang, G. (2022). Interactions Between Bioactive Food Ingredients and Intestinal Microbiota. *Frontiers in Microbiology*, Vol. 13, p. 902962. Frontiers Media SA.

Salvia-Trujillo, L., Verkempinck, S. H. E., Sun, L., Van Loey, A. M., Grauwet, T., & Hendrickx, M. E. (2017). Lipid digestion, micelle formation and carotenoid bioaccessibility kinetics: Influence of emulsion droplet size. *Food Chemistry*, *229*, 653–662.

Shahidi, F., & Athiyappan, K. D. (2025). Polyphenol-polysaccharide interactions: molecular mechanisms and potential applications in food systems–a comprehensive review. *Food Production, Processing and Nutrition*, *7*(1), 42.

Shahidi, F., & Pan, Y. (2022). Influence of food matrix and food processing on the chemical interaction and bioaccessibility of dietary phytochemicals: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *62*(23), 6421–6445.

Stinco, C. M., Benítez-González, A. M., Hernanz, D., & Vicario, I. M. (2022). Assessment of in vitro bioaccessibility of carotenoids and phenolic compounds in a model milk–mandarine beverage. *Food & Function*, *13*(20), 10535–10545.

Tazeddinova, D., Rahman, M. R., Hamdan, S. Bin, Matin, M. M., Bakri, M. K. Bin, & Rahman,

doi: 10.25047/nacia.v4i1.704

M. M. (2022). Plant based polyphenol associations with protein: A prospective review. *BioResources*, *17*(4), 7110.

Vareltzis, P., Kyroglou, S., Pasidi, E., Oikonomou, G., Gkogkou, T., Govari, M., … Gortzi, O. (2026). Food matrix effects on plant-derived bioactive compounds and micronutrients: Implications for functional food development. *International Journal of Molecular Sciences*, *27*(12), 5503.

Wang, Q., Huang, H., Yang, Y., Yang, X., Li, X., Zhong, W., … Li, J. (2024). Reinventing gut health: leveraging dietary bioactive compounds for the prevention and treatment of diseases. *Frontiers in Nutrition*, *11*, 1491821.

Weaver, C. M., & Givens, D. I. (2025). Overview: the food matrix and its role in the diet. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *65*(30), 6880–6897.

Wu, Yingying, Liu, Y., Jia, Y., Feng, C.-H., Zhang, H., Ren, F., & Zhao, G. (2024). Effects of thermal processing on natural antioxidants in fruits and vegetables. *Food Research International*, *192*, 114797.

Wu, Yumeng, Wu, H., & Hu, L. (2024). Recent advances of proteins, polysaccharides and lipids-based edible films/coatings for food packaging applications: a review. *Food Biophysics*, *19*(1), 29–45.

Xiao, Y., Ahmad, T., Belwal, T., Aadil, R. M., Siddique, M., Pang, L., & Xu, Y. (2023). A review on protein based nanocarriers for polyphenols: Interaction and stabilization mechanisms. *Food Innovation and Advances*, *2*(3), 193–202.

Xue, H., Feng, J., Tang, Y., Wang, X., Tang, J., Cai, X., & Zhong, H. (2024). Research progress on the interaction of the polyphenol–protein–polysaccharide ternary systems. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, *11*(1), 95.

Yuan, M., Gao, K., Peng, K., Bi, S., Cui, X., & Liu, Y. (2025). A review of nutritional regulation of intestinal butyrate synthesis: Interactions between dietary polysaccharides and proteins. *Foods*, *14*(21), 3649.

Zhang, K., Huang, J., Wang, D., Wan, X., & Wang, Y. (2024). Covalent polyphenols-proteins interactions in food processing: Formation mechanisms, quantification methods, bioactive effects, and applications. *Frontiers in Nutrition*, *11*, 1371401.

Zhang, Y. Y., Stockmann, R., Ng, K., & Ajlouni, S. (2021). The role of legume peptides released during different digestion stages in modulating the bioaccessibility of exogenous iron and zinc: An in-vitro study. *Current Research in Food Science*, *4*, 737–745.

Zhao, Y.-S., Eweys, A. S., Zhang, J.-Y., Zhu, Y., Bai, J., Darwesh, O. M., … Xiao, X. (2021). Fermentation affects the antioxidant activity of plant-based food material through the release and production of bioactive components. *Antioxidants*, *10*(12), 2004.

Zheng, Y., Qin, C., Wen, M., Zhang, L., & Wang, W. (2024). The effects of food nutrients and bioactive compounds on the gut microbiota: a comprehensive review. *Foods*, *13*(9), 1345.