

BIOAVAILABILITAS KALSIUM PADA KACANG-KACANGAN DAN PRODUK TURUNANNYA: NARATIF REVIEW

Bioavailability of Calcium in Legumes and Their Derivatives: A Narrative Review

**Felicia Novia Alverina^{1)*}, Betania Klarita Barimbing¹⁾, Made Grazielle Hillary Yadi¹⁾,
Nathania Angelica Kristiawan¹⁾**

¹⁾Program Studi Sarjana Teknologi Pangan, Sekolah Sains Teknologi dan Matematika,
Universitas Prasetya Mulya

Edutown Kavling Edu I No. 1, Jalan BSD Raya Barat 1, Serpong, Pagedangan, Kec. Pagedangan,
Kabupaten Tangerang, Banten 15339

*Korespondensi Penulis: alverinanovia10@gmail.com

ABSTRACT

Calcium is an essential mineral whose bioavailability is influenced not only by total calcium content, but also by food matrix characteristics, antinutritional compounds, and processing methods. Legumes and their derivative products are important sources of plant-based calcium; however, their calcium bioavailability is often limited due to the presence of compounds such as phytate and oxalate. This narrative review aimed to evaluate calcium bioavailability in legumes and their derivative products based on in vitro studies, as well as to identify factors affecting calcium absorption. The review was conducted using a narrative approach toward in vitro studies related to calcium bioavailability in legumes and their derivative products. A total of six relevant original research articles were selected and analyzed qualitatively. The findings showed that calcium bioavailability varied depending on the type of legume, food matrix, fortification agent, and processing treatment. Fermentation, germination, and the addition of compounds such as buttermilk and ascorbic acid were reported to improve calcium bioavailability through the reduction of antinutritional compounds and the enhancement of calcium solubility. In vitro methods, including the INFOGEST digestion model, dialysis methods, and Caco-2 cell models, were widely used to estimate calcium bioaccessibility and potential absorption. However, these methods still have limitations in fully representing human physiological conditions. Overall, calcium bioavailability in legumes is influenced by food matrix interactions and processing conditions, indicating that optimization of processing methods is important to improve calcium absorption from plant-based foods.

Keywords: *calcium bioavailability, in vitro digestion, legumes, plant-based foods, phytate*

PENDAHULUAN

Kalsium merupakan mineral esensial yang berperan penting dalam berbagai fungsi fisiologis tubuh. Sekitar 99% kalsium tersimpan dalam tulang dan gigi sebagai komponen struktural utama, sedangkan sisanya berperan dalam regulasi hormon, transmisi impuls saraf, kontraksi otot, dan fungsi pembuluh darah (Cormick & Belizán, 2019; Emkey & Emkey, 2012; Li *et al.*, 2018). Kebutuhan kalsium bervariasi sepanjang siklus kehidupan sesuai pertumbuhan, perkembangan, dan kondisi fisiologis, sehingga asupan yang

adekuat penting untuk menjaga fungsi tubuh secara optimal.

Meskipun demikian, kandungan kalsium total dalam suatu pangan tidak selalu mencerminkan jumlah kalsium yang dapat dimanfaatkan oleh tubuh. Pemanfaatan kalsium dipengaruhi oleh bioavailabilitasnya, yaitu fraksi kalsium yang berhasil dilepaskan selama proses pencernaan, diserap di saluran cerna, dan dimanfaatkan oleh jaringan tubuh (Tokarczyk *et al.*, 2025). Dalam penelitian, bioaksesibilitas kalsium umumnya

dievaluasi menggunakan metode pencernaan *in vitro*, yaitu pendekatan yang mensimulasikan proses pencernaan manusia secara terkontrol dengan enzim dan kondisi pH yang menyerupai saluran cerna. Metode ini memberikan estimasi awal mengenai fraksi kalsium yang dilepaskan dari matriks pangan dan berpotensi tersedia untuk absorpsi, sehingga banyak digunakan sebagai alternatif yang lebih praktis dan ekonomis dibandingkan pengujian *in vivo* (Shkembi & Huppertz, 2021). Nilai bioaksesibilitas ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti bentuk kimia kalsium, karakteristik fisik pangan, serta keberadaan komponen yang dapat meningkatkan maupun menghambat pelepasan dan kelarutan kalsium selama proses pencernaan (Wawrzyniak & Suliburska, 2020; Richards et al., 2025).

Pada pangan nabati, khususnya kacang-kacangan (*legumes*) dan produk turunannya, bioaksesibilitas kalsium dipengaruhi oleh matriks pangan dan senyawa antinutrisi seperti fitat, oksalat, dan serat yang dapat membentuk kompleks tidak larut dengan kalsium sehingga mengurangi pelepasannya selama pencernaan (Fleet, 2022; Nkhata et al., 2018). Meskipun beberapa *legumes*, seperti kedelai, memiliki kandungan kalsium yang relatif tinggi, bioaksesibilitasnya bervariasi antar jenis dan produk olahannya, serta dipengaruhi oleh jenis fortifikan yang digunakan (Silva et al., 2022; Wang et al., 2023; Zhao et al., 2005). Sebaliknya, proses pengolahan seperti perendaman, perkecambahan, dan fermentasi dapat menurunkan kadar fitat serta memodifikasi matriks pangan sehingga berpotensi meningkatkan pelepasan kalsium selama pencernaan *in vitro* (Nkhata et al., 2018). Oleh karena itu, evaluasi bioaksesibilitas menggunakan metode *in vitro* menjadi pendekatan yang penting untuk memahami potensi pemanfaatan kalsium dari legumes sebelum dilakukan pengujian *in vivo*.

Untuk mengevaluasi bioavailabilitas gizi tanpa uji klinis yang mahal dan

kompleks, berbagai metode *in vitro* dikembangkan untuk mensimulasikan pencernaan dan absorpsi manusia dalam kondisi laboratorium terkontrol. Metode simulasi pencernaan gastrointestinal statis, seperti protokol INFOGEST, meniru fase oral, gastrik, dan intestinal melalui pengaturan pH serta penggunaan enzim pencernaan (Brodkorb et al., 2019), yang hasilnya digunakan untuk menghitung bioaksesibilitas atau fraksi zat gizi yang larut dan berpotensi diserap (Costa-Santos et al., 2024). Untuk mendekati estimasi bioavailabilitas yang sesungguhnya, metode ini kerap dikombinasikan dengan teknik dialisis menggunakan membran semipermeabel, yang memisahkan molekul kecil berpotensi terabsorpsi dari molekul besar berdasarkan ukuran (Osko et al., 2024; González et al., 2020), maupun dengan model sel Caco-2 yang merepresentasikan epitel usus manusia untuk mengevaluasi transportasi aktif dan pasif zat gizi pada tingkat seluler (Patil et al., 2025; Teixeira et al., 2022; Solomando et al., 2024). Ketiga pendekatan ini banyak digunakan untuk mengkaji pengaruh matriks pangan, senyawa antinutrisi, maupun komponen probiotik/sinbiotik terhadap bioavailabilitas mineral, termasuk pada pangan nabati seperti kacang-kacangan (Wang et al., 2023).

Meskipun berbagai metode *in vitro* tersebut telah banyak diterapkan, hasil penelitian mengenai bioavailabilitas kalsium pada kacang-kacangan dan produk turunannya masih menunjukkan variasi dan keterbatasan yang cukup besar. Perbedaan protokol pencernaan, teknik dialisis, maupun model sel Caco-2 yang digunakan antar penelitian dapat menghasilkan estimasi bioavailabilitas yang berbeda-beda, sehingga menyulitkan interpretasi dan perbandingan hasil antar studi. Oleh karena itu, diperlukan tinjauan yang merangkum temuan-temuan tersebut secara sistematis untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif.

Penelitian ini bertujuan untuk mengulas secara naratif hasil-hasil penelitian mengenai bioavailabilitas kalsium dari berbagai jenis kacang-kacangan dan produk turunannya berdasarkan studi *in vitro*, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang dapat memengaruhi bioavailabilitasnya, termasuk peran senyawa antinutrisi, matriks pangan, proses pengolahan, dan interaksi dengan komponen pangan lainnya. Review ini penting dilakukan karena masih terdapat variasi dan keterbatasan hasil penelitian terkait bioavailabilitas kalsium pada pangan nabati, khususnya kacang-kacangan, yang dipengaruhi oleh variasi metode analisis *in vitro*, jenis matriks pangan, serta kondisi pengolahan yang digunakan. Perbedaan pendekatan metodologis, seperti penggunaan protokol pencernaan yang berbeda, teknik dialisis, maupun model sel Caco-2, dapat menghasilkan estimasi bioavailabilitas yang bervariasi sehingga menyulitkan interpretasi dan perbandingan antar studi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan deskriptif melalui metode ulasan naratif untuk mengkaji bioavailabilitas kalsium pada kacang-kacangan dan produk turunannya berdasarkan hasil penelitian *in vitro*. Sumber literatur berupa *original research* dikumpulkan dari basis data ilmiah yaitu ScienceDirect, MDPI, dan Google Scholar yang diterbitkan 10 tahun yaitu rentang tahun 2016 hingga 2026. Proses pencarian artikel dilakukan menggunakan kata kunci “kacang” dan “produk turunan kacang” dan “*in vitro* kalsium”.

Artikel yang dipilih merupakan penelitian yang membahas absorpsi kalsium dari kacang dan produk turunannya dengan pendekatan *in vitro*, khususnya yang melaporkan bioavailabilitas kalsium. Proses seleksi menghasilkan 6 artikel yang

relevan, memuat informasi mengenai jenis kacang-kacangan dan produk olahannya, metode pengolahan, model dan teknik *in vitro* yang digunakan, serta data bioavailabilitas kalsium. Seluruh artikel terpilih kemudian ditelaah secara kualitatif dan disintesis secara naratif guna mengidentifikasi kecenderungan hasil penelitian, dan menjelaskan faktor utama yang menyebabkan perbedaan estimasi bioavailabilitas kalsium pada kacang-kacangan dan produk turunannya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kacang-kacangan dan produk turunannya merupakan salah satu sumber kalsium nabati yang umum dikonsumsi. Tetapi, kandungan kalsium total dalam bahan pangan tidak selalu mencerminkan jumlah kalsium yang dapat diserap oleh tubuh (Friling *et al.*, 2023). Hal ini disebabkan oleh bioavailabilitas kalsium yang rendah pada pangan nabati yang umumnya dipengaruhi oleh senyawa antinutrisi yang membentuk kompleks tidak larut dengan kalsium, sehingga menghambat absorpsinya (Barbosa-Nuñez *et al.*, 2025). Selain itu, interaksi antara kalsium dengan komponen lain dalam matriks pangan juga berperan penting dalam menentukan ketersediaan kalsium untuk diserap oleh tubuh (Friling *et al.*, 2023). Oleh karena itu, evaluasi bioavailabilitas kalsium penting dilakukan untuk menilai kontribusi kacang-kacangan dalam memenuhi kebutuhan kalsium harian. Untuk mengetahui tingkat kalsium dalam pangan nabati yang dapat diserap oleh tubuh, diperlukan pendekatan yang dapat mengevaluasi bioavailabilitas yaitu pengukuran berdasarkan pendekatan *in vitro* dan *in vivo*.

Pengertian dan Prinsip Metode In Vitro

Pengukuran bioavailabilitas kalsium pada kacang-kacangan umumnya dilakukan dengan pendekatan *in vitro*. Istilah *in vitro* berasal dari bahasa latin yang diartikan sebagai “di dalam kaca”

atau eksperimen yang dilakukan di luar organisme hidup dalam lingkungan laboratorium yang terkontrol seperti tabung reaksi atau cawan petri (Pastorino *et al.*, 2024). Pendekatan ini telah banyak digunakan dalam berbagai bidang ilmu, termasuk bioteknologi dan biomedis.

Prinsip utama metode *in vitro* adalah mensimulasikan kondisi fisiologis saluran pencernaan dengan mengendalikan parameter-parameter penting, seperti pH, komposisi enzim pencernaan, waktu inkubasi, suhu, serta komposisi medium, sehingga proses pelepasan dan ketersediaan mineral dari matriks pangan dapat diamati secara terkontrol (Urzi *et al.*, 2023). Pendekatan ini memungkinkan peneliti mengevaluasi bioaksesibilitas maupun potensi absorpsi kalsium tanpa dipengaruhi oleh kompleksitas sistem biologis pada organisme tubuh. Oleh karena itu, metode *in vitro* banyak dimanfaatkan untuk membandingkan pengaruh jenis bahan pangan, proses pengolahan, maupun formulasi produk terhadap bioavailabilitas kalsium.

Pendekatan *in vitro* ini juga dipilih untuk mengukur bioavailabilitas kalsium pada kacang-kacangan karena dianggap

lebih sederhana, cepat, dan ekonomis dibandingkan dengan metode *in vivo* (Kiran *et al.*, 2025). Metode yang paling umum digunakan merupakan simulasi pencernaan gastrointestinal terstandarisasi INFOGEST, metode dialisis membran, dan model sel Caco-2 (Brodkorb *et al.*, 2019). INFOGEST digunakan untuk mengevaluasi bioaksesibilitas kalsium setelah melalui fase oral, gastrik, dan intestinal (Zhou *et al.*, 2022). Metode dialisis membran mengestimasi fraksi kalsium yang berpotensi diserap berdasarkan difusi ion kalsium melalui membran semipermeabel (Silva *et al.*, 2022). Sementara itu, model sel Caco-2 digunakan untuk mensimulasikan proses absorpsi pada epitel usus manusia (Teixeira *et al.*, 2022). Meskipun metode-metode tersebut banyak digunakan dalam penelitian bioavailabilitas mineral, masing-masing memiliki keterbatasan dalam mempresentasikan kondisi fisiologis manusia secara menyeluruh sehingga hasilnya perlu diinterpretasikan secara hati-hati (Zhou *et al.*, 2022). Perbandingan ketiga metode tersebut telah disajikan secara lengkap pada **Tabel 1.** di bawah ini.

Metode	Prinsip	Kelebihan	Keterbatasan
INFOGEST	Simulasi pencernaan oral, gastrik, dan intestinal secara terstandarisasi	Standar internasional, reproduktibilitas tinggi, memudahkan perbandingan antar penelitian	Tidak menggambarkan absorpsi aktual pada epitel usus dan belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi fisiologis manusia
Dialisis	Mengukur fraksi kalsium yang mampu berdifusi melalui membran semipermeabel setelah proses pencernaan	Sederhana, murah, cepat, dan mudah diaplikasikan	Mengestimasi bioavailabilitas lebih tinggi karena tidak mempertimbangkan transport aktif maupun

			pasif pada sel usus
Caco-2	Menggunakan sel epitel usus manusia yang berdiferensiasi menyerupai eritrosit	Lebih mendekati proses absorpsi fisiologis dan dapat mengevaluasi transport seluler	Membutuhkan biaya yang lebih mahal, kultur sel yang kompleks, serta belum merepresentasikan regulasi sistemik tubuh secara utuh

Tabel 1. Perbandingan Metode In Vitro dalam Evaluasi Bioavailabilitas Kalsium
Disusun berdasarkan Brodkorb *et al* (2019). Silva *et al.* (2020), dan Zhou *et al.* (2022)

Ketiga pendekatan In Vitro tersebut merepresentasikan tahapan yang berbeda dalam evaluasi dari matriks pangan selama proses pencernaan, sedangkan metode dialisis mengestimasi fraksi kalsium yang berpotensi mendekati proses absorpsi intestinal karena mampu mengevaluasi transport kalsium melalui epitel usus. Oleh karena itu, setiap metode menghasilkan informasi yang berbeda mengenai bioavailabilitas kalsium, sehingga pemilihan metode harus disesuaikan dengan tujuan penelitian dan hasil antar metode tidak dapat dibandingkan secara langsung (Brodkorb *et al.*, 2019; Kiran *et al.*, 2025).

Bioavailabilitas Kalsium pada Kacang-kacangan dan Produk Turunannya secara In Vitro

Ulasan literatur dilakukan secara naratif dengan memperoleh 6 jurnal yang membahas tentang bioavailabilitas kalsium secara *in vitro* pada kacang-kacangan dan produk turunannya. Jurnal-jurnal ini diperoleh dari *database* berupa

ScienceDirect, MDPI, dan Google Scholar yang diterbitkan 10 tahun yaitu rentang tahun 2016 hingga 2026. Keenam studi tersebut mencakup berbagai jenis bahan pangan berbasis kacang-kacangan mulai dari kacang hijau, kacang tunggak, kedelai, *chickpea*, kacang merah, hingga minuman nabati komersial berbasis kedelai, almond, beras, dan oat. Metode pengujian yang digunakan bervariasi, meliputi dialisis membran sederhana, model INFOGEST, hingga kultur sel Caco-2 dan Saos-2, dengan analisis mineral menggunakan *atomic absorption spectrophotometer* (ASS) (Singh & Prasad, 2018; Harahap *et al.*, 2024; Zvěřina *et al.*, 2025; Sanjiwani *et al.*, 2026) maupun *inductively coupled plasma mass spectrometry* (ICP-MS) (Varshanath *et al.*, 2026). Meskipun terdapat modifikasi prosedur yang berbeda, prinsip dasar dari penentuan bioavailabilitas kalsium tetap sama yaitu dengan melakukan simulasi pencernaan untuk memperkirakan jumlah kalsium yang diserap oleh tubuh. Berikut ini disajikan ringkasan isi jurnal yang terdapat dalam **Tabel 2.**

Tabel 2. *In vitro* Bioavailabilitas Kalsium Kacang-kacangan dan Produk Turunannya

Zat Gizi	Produk	Teknik Pengujian	Hasil	Studi
Kalsium, Zat Besi, Seng	Kacang Hijau / Green gram (<i>Vigna radiata</i> L.)	INFOGEST <i>in vitro</i> <i>digestion</i> dan analisis serapan sel Caco-2 menggunakan ICP-MS	Penggunaan <i>buttermilk</i> meningkatkan bioaksesibilitas Ca (48%) dan bioavailabilitas Ca (57%). Konsentrasi kalsium yang dapat diserap pada campuran kacang hijau dan <i>buttermilk</i> mencapai 698,68 mg/kg, jauh lebih	(Varshanath <i>et al.</i> , 2026)

Zat Gizi	Produk	Teknik Pengujian	Hasil	Studi
			tinggi dibandingkan kacang hijau masak biasa sekitar 300,31 mg/kg	
Kalsium, Magnesium, Zat Besi, Seng	Minuman nabati komersial seperti <i>soy drink, almond drink, rice drink, oat drink</i>	<i>Static digestion model</i> dan metode membran dialisis untuk mengukur fraksi kalsium yang berdifusi (sebagai estimasi bioavailabilitas <i>in vitro</i>)	Jumlah kalsium secara keseluruhan yang terkandung dalam produk bervariasi antara 10 hingga 1697,33 mg/L. Fraksi kalsium yang berhasil melewati membran dan berpotensi diserap oleh usus memiliki nilai 8,2 hingga 306,6 mg/L.	(Silva <i>et al.</i> , 2020)
Zat Besi, Seng, dan Kalsium	Kacang hijau, kacang tunggak	Kadar fitat dianalisis dengan metode spektrofotometri, pengujian bioavailabilitas mineral secara <i>in vitro</i> dengan metode dialisis menggunakan enzim pepsin, pankreatin, dan empedu. Kandungan total dan fraksi terlarut mineral dianalisis menggunakan <i>Atomic Absorption Spectrophotometer</i> (AAS).	Perkecambahan menurunkan kadar fitat pada kacang hijau dan kacang tunggak serta meningkatkan bioavailabilitas kalsium pada kacang hijau. Namun, pada kacang tunggak, bioavailabilitas kalsium belum optimal meskipun fitat menurun, menunjukkan adanya faktor lain seperti zat anti nutrisi lain dan interaksi antar mineral yang memengaruhi ketersediaan kalsium.	(Sanjiwani <i>et al.</i> , 2026)
Kalsium	Kedelai, tempe, probiotik	<i>In vitro</i> menggunakan model sel yang melibatkan Caco-2 mensimulasikan enterosit manusia dan sel Saos-2 mensimulasikan osteoblas.	Tempe memiliki bioavailabilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan kedelai tanpa fermentasi, namun fermentasi tidak meningkatkan deposisi kalsium pada sel osteoblas.	(Harahap <i>et al.</i> , 2024)
Zat besi, seng, dan kalsium	<i>Chickpea</i> , <i>Chickpea</i> dengan tambahan asam askorbat (AA), kacang merah, kacang merah dengan tambahan AA, kacang hijau, kacang hijau dengan tambahan AA	<i>In vitro</i> menggunakan <i>flame atomic absorption spectrophotometer</i> (AAS).	Kandungan AA dalam buncis mengurangi bioavailabilitas Fe, namun meningkat pada kacang hijau dan kacang merah. Sedangkan bioavailabilitas Zn dan Ca meningkat sejalan dengan penambahan AA.	(Singh & Prasad, 2018)
Kalsium	Beragam produk nabati (25 jenis) yang mencakup: legum (seperti kacang-kacangan dan tahu), sayuran hijau, sereal, buah kering, serta minuman nabati berbasis kedelai, almond, dan sereal.	Metode INFOGEST static in-vitro digestion model menggunakan isotop ⁴³ Ca sebagai tracer untuk meningkatkan akurasi pengukuran bioaksesibilitas kalsium.	Bioaksesibilitas dan bioavailabilitas kalsium pada produk nabati bervariasi antara 0,1–50% dan tidak selalu sebanding dengan kandungan kalsium total. Bioaksesibilitas rendah ditemukan pada minuman nabati dan tahu akibat kandungan antinutrisi seperti fitat dan oksalat serta bentuk kalsium yang kurang larut.	(Muleya <i>et al.</i> , 2024)

Penelitian pertama yang dilakukan oleh Varshanath *et al.* (2026) secara khusus meneliti bagaimana modifikasi matriks pangan dapat meningkatkan bioaksesibilitas dan bioavailabilitas kalsium pada kacang hijau (*Vigna radiata*), dengan menambahkan *buttermilk* selama proses pencernaan. Hal tersebut dilakukan agar dapat mengatasi hambatan absorpsi akibat kandungan fitat yang tinggi pada produk kacang-kacangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *buttermilk* meningkatkan bioaksesibilitas Ca menjadi $749,98 \pm 0,32$ mg/kg, setara dengan 48% lebih tinggi. Hal ini dapat dikaitkan dengan aktivitas enzim dan komponen *buttermilk* yang membantu menurunkan kadar fitat. Uji lanjutan menggunakan model sel Caco-2 sebagai representasi epitel usus manusia memperlihatkan adanya peningkatan bioavailabilitas Ca dari $300,31 \pm 0,27$ mg/kg menjadi $698,68 \pm 0,29$ mg/kg yang berarti terjadi peningkatan 57%. Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi kacang hijau dengan *buttermilk* meningkatkan kelarutan dan transport kalsium melalui sel Caco-2, yang menunjukkan interaksi matriks pangan memodulasi pelepasan dan absorpsi mineral. Namun penelitian ini belum mempertimbangkan peran anti nutrisi lain seperti oksalat dan tanin yang juga dapat menghambat absorpsi mineral. Selain itu, penggunaan *buttermilk* berpotensi menambah kalsium dari sumber eksternal, sehingga peningkatan bioaksesibilitas tidak sepenuhnya mencerminkan pelepasan kalsium dari kacang hijau itu sendiri. Di sisi lain, model *in vitro* dan sel Caco-2 yang digunakan belum mampu merepresentasikan kompleksitas sistem fisiologis manusia, seperti regulasi hormonal, status vitamin D, dan kondisi individu yang tidak terdeteksi. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan secara *in vivo* untuk memvalidasi hasil yang telah didapatkan.

Kemudian, terdapat penelitian lain yang dilakukan oleh Silva *et al.* (2020) yang dilakukan untuk mengevaluasi kandungan kalsium yang tercantum pada berbagai minuman nabati komersial berbasis kacang-kacangan benar-benar tersedia untuk diserap setelah proses pencernaan. Proses ini dilakukan dengan membandingkan kadar kalsium total dan fraksi bioaksesibilitas serta menilai pengaruh fortifikasi dan matriks pangan terhadap kelarutan kalsium. Analisis awal menunjukkan kadar kalsium total yang sangat bervariasi sekitar 10 hingga 1697,33 mg/L, dimana produk non-fortifikasi cenderung rendah sedangkan produk fortifikasi jauh lebih tinggi. Simulasi pencernaan *in vitro* yang diikuti dengan proses dialisis menunjukkan bahwa fraksi kalsium yang terdialisis hanya berkisar 8,2 hingga 306,6 mg/L yang jauh lebih rendah dibandingkan kadar totalnya. Hal ini menandakan bahwa tidak seluruh kalsium dalam produk tersedia dalam bentuk larut yang potensial untuk diserap, sehingga belum dapat menggambarkan proses transport kalsium secara aktif maupun pasif pada epitel usus seperti yang terjadi secara fisiologis. Selain itu, penelitian ini lebih menitikberatkan pada pengaruh fortifikasi dan jenis garam kalsium, namun belum secara spesifik mengevaluasi peran komponen matriks minuman seperti protein, serat, dan anti nutrisi secara kuantitatif dalam mempengaruhi kelarutan kalsium pada fase intestinal. Variasi komposisi antar produk komersial yang digunakan juga berpotensi mempengaruhi hasil, sehingga sulit untuk mendapatkan faktor utama yang menentukan bioaksesibilitas kalsium.

Penelitian yang dilakukan oleh Sanjawani *et al.* (2026) memberikan kontribusi yang penting dalam pengujian berbagai pangan lokal seperti kacang hijau dan kacang tunggak di daerah rawan stunting dengan mengevaluasi bioavailabilitas zat gizi berupa Fe, Zn, dan Ca melalui pendekatan *in vitro*. Temuan

pada penelitian ini memperkuat bahwa pengolahan pangan seperti perkecambahan dapat meningkatkan bioavailabilitas kalsium dengan menurunkan kadar asam fitat pada kacang hijau. Namun, penelitian ini juga mencatat bahwa penurunan asam fitat pada kacang tunggak tidak diikuti dengan peningkatan optimal bioavailabilitas kalsium. Hal ini mengindikasikan bahwa fokus pada asam fitat tanpa mempertimbangkan antinutrisi lain merupakan hal yang kurang tepat karena anti nutrisi lain seperti tanin atau oksalat juga dapat menjadi zat yang menghambat absorpsi kalsium. Dengan demikian, pendekatan yang lebih komprehensif diperlukan dalam mengevaluasi faktor-faktor yang memengaruhi bioavailabilitas mineral. Selain itu, penggunaan model *in vitro* menimbulkan keterbatasan dalam interpretasi hasil, terutama karena tidak mempertimbangkan sistem hormonal, aktivitas mikrobiota usus, dan adaptasi fisiologis terhadap asupan mineral. Hal ini menjadi penting karena target populasi penelitian merupakan kelompok rentan yaitu anak-anak dengan risiko stunting, yang memiliki kondisi fisiologis yang berbeda dengan model eksperimental. Oleh karena itu, validitas dari temuan ini perlu dikaji melalui pendekatan *in vivo*.

Selain perkecambahan, Harahap *et al.* (2024) juga mengeksplorasi dampak pengolahan kacang kedelai menjadi fermentasi (tempe) dan probiotik terhadap bioavailabilitas kalsium menggunakan model sel Caco-2 dan Saos-2. Hasil penelitian ini menunjukkan adanya peningkatan absorpsi kalsium pada model Caco-2 yang diinterpretasikan sebagai peningkatan bioavailabilitas akibat perubahan matrik pangan dan penurunan senyawa penghambat selama fermentasi. Namun, interpretasi ini perlu ditinjau secara kritis karena peningkatan absorpsi pada tingkat sel usus tidak secara langsung mencerminkan pemanfaatan kalsium pada jaringan target. Hal ini terlihat dari tidak ditemukannya peningkatan deposisi

kalsium pada sel osteoblas (Saos-2), yang menyiratkan adanya kesenjangan antara peningkatan absorpsi dengan utilisasi kalsium secara biologis. Selain itu, penggunaan dua model sel yang terpisah tanpa integrasi sistemik menjadi keterbatasan metodologis, karena tidak mampu merepresentasikan sistem metabolisme kalsium secara menyeluruh, termasuk peran faktor hormonal dan interaksi antar jaringan. Dengan demikian, meskipun fermentasi menunjukkan potensi dalam meningkatkan ketersediaan kalsium pada tahap absorpsi, temuan ini masih berisiko overestimasi jika langsung dikaitkan dengan peningkatan status kalsium dalam tubuh tanpa didukung bukti *in vivo*.

Di sisi lain, Singh & Prasad (2018) mengevaluasi pengaruh asam askorbat (AA) terhadap bioavailabilitas mineral berupa Fe, Zn, dan Ca pada kacang *chickpea*, kacang merah dan kacang hijau. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan AA dapat meningkatkan bioavailabilitas kalsium. Namun, efek peningkatan ini dapat berbeda tergantung pada jenis kacang dan komposisi zat lain yang terdapat di dalamnya. Penelitian ini belum membahas mengenai interaksi antara kalsium dengan mineral lain sehingga masih perlu dilakukan pengujian tambahan untuk mengetahui pengaruh keberadaan mineral lain yang memungkinkan adanya interaksi kompetitif antara zat yang terdapat dalam bahan pangan. Namun penelitian ini hanya dilakukan menggunakan metode *in vitro* sederhana, yaitu AAS tanpa integrasi model fisiologis seperti Caco-2 atau INFOGEST, sehingga hanya didapatkan hasil kelarutan mineral dan bukan proses absorpsi biologis secara aktual. Hal ini dapat menyebabkan estimasi bioavailabilitas yang berlebih karena tidak mempertimbangkan mekanisme transport aktif di dalam usus. Penelitian ini juga belum mengevaluasi interaksi kompetitif antar mineral maupun peran antinutrisi secara mendalam, sehingga sulit

memastikan apakah peningkatan bioavailabilitas benar-benar disebabkan oleh asam askorbat atau faktor lain dalam matriks pangan. Oleh karena itu, interpretasi hasil dari penelitian ini dapat dikatakan terbatas dan memerlukan validasi lebih lanjut dengan menggunakan pendekatan *in vitro* yang lebih kompleks.

Selain dari keberadaan mineral lain seperti zat besi, terdapat komponen anti nutrisi lainnya yang dapat menghambat absorpsi kalsium. Muleya *et al.* (2024) melakukan evaluasi terhadap bioaksesibilitas kalsium pada 25 jenis produk nabati menggunakan model pencernaan *in vitro* terstandarisasi INFOGEST dengan isotop ^{43}Ca sebagai penanda, serta membandingkannya dengan susu skim sebagai referensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan kalsium total pada produk nabati tidak secara langsung mencerminkan fraksi kalsium yang tersedia untuk absorpsi, karena bioaksesibilitasnya bervariasi secara signifikan, yaitu berkisar antara 0,1 hingga 50%. Produk seperti minuman nabati dan tahu menunjukkan bioaksesibilitas yang relatif rendah, yang dikaitkan dengan keberadaan senyawa antinutrisi seperti fitat dan oksalat, serta penggunaan senyawa fortifikasi dengan kelarutan rendah, seperti trikalium fosfat. Sebaliknya, beberapa jenis legum, termasuk *chickpea*, *kidney beans*, dan *peas*, menunjukkan tingkat bioaksesibilitas yang lebih tinggi. Temuan ini menegaskan bahwa bioavailabilitas kalsium dipengaruhi oleh karakteristik matriks pangan dan bentuk kimia kalsium. Tetapi, terdapat beberapa keterbatasan dalam penelitian ini. Penelitian ini tidak mampu mempresentasikan dinamika fisiologis manusia seperti variasi pH secara bertahap, regulasi hormon, dan juga peran mikrobiota usus dalam meningkatkan atau menurunkan absorpsi mineral. Penelitian ini sudah mengidentifikasi peran antinutrisi, namun belum mengkaji secara kuantitatif kontribusi masing-masing faktor terhadap penurunan bioavailabilitas. Secara

keseluruhan, penelitian ini kuat dalam sisi metodologi, tetapi tetap memiliki keterbatasan dalam mempresentasikan kondisi fisiologis secara nyata.

Berdasarkan keenam jurnal yang telah dibahas, terdapat tiga pola umum yang disimpulkan dari setiap hasil penelitian. Pertama, pengolahan pangan secara konsisten cenderung meningkatkan bioavailabilitas kalsium. Namun, efeknya tidak bersifat universal dan bergantung pada jenis kacang serta mekanisme pengolahan yang terlibat. Fermentasi (Harahap *et al.*, 2024), perkecambahan (Sanjiwani *et al.*, 2026), dan modifikasi matriks pangan (Varshanath *et al.*, 2026) seluruhnya menunjukkan hasil yang positif pada kondisi tertentu, namun temuan pada kacang tunggak dan sel Saos-2 mengingatkan bahwa peningkatan absorpsi di tingkat sel usus belum tentu berbanding lurus dengan pemanfaatan kalsium di jaringan tubuh. Kedua, asam fitat secara konsisten menjadi inhibitor utama yang berulang kali diidentifikasi pada keenam jurnal. Meskipun demikian, antinutrisi lain seperti oksalat dan tanin, serta jenis senyawa fortifikasi, memainkan peran yang sangat penting dalam menentukan bioavailabilitas kalsium (Muleya *et al.*, 2024; Sanjiwani *et al.*, 2026). Oleh karena itu, evaluasi bioavailabilitas kalsium yang komprehensif seharusnya mempertimbangkan profil antinutrisi secara menyeluruh, bukan hanya berdasarkan fitat.

Terakhir, pilihan metode pengujian terbukti menghasilkan estimasi bioavailabilitas yang berbeda secara substansial. Metode dialisis membran sederhana hanya mengukur kelarutan kalsium sebagai proksi bioavailabilitas tanpa mempertimbangkan mekanisme transport aktif di usus, sehingga berpotensi menghasilkan estimasi yang kurang akurat. Model berbasis Caco-2 menghasilkan estimasi yang lebih mencerminkan proses absorpsi biologis, namun tetap tidak dapat merepresentasikan regulasi sistemik seperti

faktor hormonal, status vitamin D, dan aktivitas mikrobiota usus. Penggunaan isotop sebagai penanda dalam model INFOGEST oleh Muleya *et al.* (2024), menawarkan akurasi yang lebih tinggi dalam mengukur bioaksesibilitas, namun memiliki keterbatasan yang sama dalam mempresentasikan kondisi fisiologis manusia secara nyata. Perbedaan metodologi ini menjadi catatan penting dalam perbandingan antar studi, karena nilai bioavailabilitas yang dihasilkan oleh metode yang berbeda tidak dapat langsung dibandingkan secara setara. Secara keseluruhan, validasi hasil *in vitro* melalui studi *in vivo* tetap diperlukan untuk memperoleh gambaran yang lebih representatif mengenai bioavailabilitas kalsium pada kacang-kacangan dan produk turunannya dalam kondisi fisiologis manusia.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil *literature review*, dapat disimpulkan bahwa bioavailabilitas kalsium pada kacang-kacangan dan produk turunannya tidak hanya ditentukan oleh kandungan kalsium total pada produk, tetapi juga dipengaruhi oleh interaksi proses pengolahan, komponen antinutrisi, matriks pangan, serta metode evaluasi yang digunakan. Fermentasi, perkecambahan, dan modifikasi matriks pangan merupakan strategi yang paling konsisten dalam meningkatkan bioavailabilitas kalsium melalui penurunan senyawa penghambat dan peningkatan kelarutan kalsium, meskipun efektivitasnya dapat berbeda tergantung pada jenis kacang dan karakteristik produknya. Asam fitat juga teridentifikasi sebagai inhibitor utama yang paling dominan karena dapat membentuk kompleks tidak larut dengan kalsium, walaupun antinutrisi lain seperti oksalat dan tannin juga berkontribusi terhadap rendahnya absorpsi kalsium. Selain itu, metode *in vitro* berupa INFOGEST yang

dikombinasikan dengan model sel Caco-2, efektif untuk digunakan dalam mengevaluasi bioavailabilitas kalsium secara terkontrol. Namun, karena belum sepenuhnya dapat merepresentasikan kompleksitas kondisi fisiologis tubuh manusia, validasi hasil melalui studi *in vivo* tetap diperlukan untuk memastikan relevansi temuan terhadap kondisi biologis yang sebenarnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini tidak akan dapat terwujud tanpa dukungan dan kontribusi dari berbagai pihak. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses pelaksanaan *literature review* yang berjudul “Bioavailabilitas Kalsium pada Kacang-kacangan dan Produk Turunannya: Sebuah Naratif Review”. Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Universitas Prasetya Mulya atas dukungan pendanaan yang telah diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta masukan yang konstruktif selama seluruh proses penelitian, dan kepada seluruh pihak yang telah berkontribusi baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian penelitian ini. Demikianlah ucapan terima kasih ini disampaikan, semoga temuan dari penelitian ini dapat memberikan wawasan baru dan bermanfaat di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Barbosa-Nuñez, J. A., Espinosa-Andrews, H., Haro-González, J. N., Herrera-Rodríguez, S. E., & García-Márquez, E. (2025). Improving calcium Bioavailability: Strategies, challenges, and future perspectives. *Food Bioscience*, 68, 106718.

- https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106718
- Brodkorb, A., Egger, L., Alminger, M., Alvito, P., Assunção, R., Ballance, S., Bohn, T., Bourlieu-Lacanal, C., Boutrou, R., Carrière, F., Clemente, A., Corredig, M., Dupont, D., Dufour, C., Edwards, C., Golding, M., Karakaya, S., Kirkhus, B., Le Feunteun, S., ... Recio, I. (2019). INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion. *Nature Protocols*, 14(4), 991–1014. https://doi.org/10.1038/s41596-018-0119-1
- Cormick, G., & Belizán, J. M. (2019). Calcium intake and health. *Nutrients*, 11(7), 1606. https://doi.org/10.3390/nu11071606
- Costa-Santos, A. C., Rebellato, A. P., Orlando, E. A., & Pallone, J. A. L. (2024). Characterization and estimation of the bioaccessibility of essential elements in organic milk by INFOGEST protocol. *Food Chemistry*, 433(137327), 137327. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137327
- Emkey, R. D., & Emkey, G. R. (2012). Calcium metabolism and correcting calcium deficiencies. *Endocrinology and Metabolism Clinics of North America*, 41(3), 527–556. https://doi.org/10.1016/j.ecl.2012.04.019
- Fleet, J. C. (2022). Vitamin D-Mediated Regulation of intestinal calcium absorption. *Nutrients*, 14(16), 3351. https://doi.org/10.3390/nu14163351
- Fox, P. F., Uniacke-Lowe, T., McSweeney, P. L. H., & O'Mahony, J. A. (2015). Dairy chemistry and biochemistry. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14892-2
- Friling, M., Haber, A., Furman-Assaf, S., Israel, D., Harari, G., Evans, M., Crowley, D. C., Ouwehand, A. C., & Ivanir, E. (2023). Bioavailability of calcium in an enriched postbiotic system compared to calcium citrate in healthy postmenopausal females; A randomized, double-blind, comparator-controlled, crossover study. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1073622. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1073622
- Harahap, I. A., Olejnik, A., Kowalska, K., & Suliburska, J. (2024). Effects of daidzein, tempeh, and a probiotic digested in an artificial gastrointestinal tract on calcium deposition in human osteoblast-like Saos-2 Cells. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(2), 1008. https://doi.org/10.3390/ijms25021008
- Kiran, B. S., Bashir, O., Pawase, P. A., Dash, K. K., Amin, T., Shams, R., Shaikh, A. M., & Béla, K. (2025). A review of in-vitro digestibility models on diverse foods in various segments of human digestive tract. *Discover Food*, 5(1). https://doi.org/10.1007/s44187-025-00454-y
- Li, K., Wang, X., Li, D., Chen, Y., Zhao, L., Liu, X., Guo, Y., Shen, J., Lin, X., Deng, J., Zhou, R., & Deng, H. (2018). The good, the bad, and the ugly of calcium supplementation: a review of calcium intake on human health. *Clinical Interventions in Aging*, Volume 13, 2443–2452. https://doi.org/10.2147/cia.s157523
- Muleya, M., Bailey, E. F., Bailey, E. F., Bailey, E. H., & Bailey, E. H. (2023b). A comparison of the bioaccessible calcium supplies of various plant-based products relative to bovine milk. *Food Research International*, 175, 113795. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113795
- Nkhata, S. G., Ayua, E., Kamau, E. H., & Shingiro, J. (2018). Fermentation and germination improve nutritional value of cereals and legumes through activation of endogenous enzymes. *Food Science & Nutrition*, 6(8), 2446–2458. https://doi.org/10.1002/fsn3.846
- Pastorino, P., Prearo, M., & Barceló, D. (2024). Ethical principles and scientific advancements: In vitro, in silico, and non-vertebrate animal approaches for a green ecotoxicology. *Green Analytical Chemistry*, 8, 100096. https://doi.org/10.1016/j.greeac.2024.100096
- Patil, U., Saetang, J., Zhang, B., Kim, J. T., & Benjakul, S. (2025). Physicochemical properties, in vitro digestion and

- absorption of bio-calcium powders derived from Asian seabass gills as affected by bleaching treatment. *Food Chemistry*, 497(147080), 147080. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.147080>
- Richards, J. D., Cori, H., Rahn, M., Finn, K., Bárcena, J., Kanellopoulos, A. K., Péter, S., & Spooren, A. (2025). Micronutrient bioavailability: concepts, influencing factors, and strategies for improvement. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1646750. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1646750>
- Sanjiwani, P. A., Fahmida, U., Santoso, M., Marliyati, S. A., & Mansyur, M. . (2026). Iron, zinc, and calcium bioavailability of nutrient-dense foods for designated complementary feeding of children under two in East Nusa Tenggara. *Media Gizi Indonesia*, 21(1), 52–64. <https://doi.org/10.20473/mgi.v21i1.52-64>
- Shkembi, B., & Huppertz, T. (2021). Calcium Absorption from Food Products: Food Matrix Effects. *Nutrients*, 14(1), 180. <https://doi.org/10.3390/nu14010180>
- Silva, J. G. S., Rebellato, A. P., Caramês, E. T. D. S., Greiner, R., & Pallone, J. A. L. (2020). In vitro digestion effect on mineral bioaccessibility and antioxidant bioactive compounds of plant-based beverages. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 130(108993), 108993. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.108993>
- Silva, J. G. S., Rebellato, A. P., De Abreu, J. S., Greiner, R., & Pallone, J. a. L. (2022). Impact of the fortification of a rice beverage with different calcium and iron sources on calcium and iron bioaccessibility. *Food Research International*, 161, 111830. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111830>
- Singh, P., & Prasad, S. (2018). Determination of ascorbic acid and its influence on the bioavailability of iron, zinc and calcium in Fijian food samples. *Microchemical Journal*, 139, 119-124. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.02.019>
- Solomando, J. C., Antequera, T., Estaras, M., González, A., & Perez-Palacios, T. (2024). In vitro digestion and culture in Caco-2 cells to assess the bioavailability of fatty acids: A case study in meat matrix enriched with ω -3 microcapsules. *Food Science & Nutrition*, 12(9), 6338–6352. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4241>
- Teixeira, J. L. da P., Pallone, J. A. L., Andrade, C. D., Mesías, M., & Seiquer, I. (2022). Bioavailability evaluation of calcium, magnesium and zinc in Brazilian cheese through a combined model of in vitro digestion and Caco-2 cells. *Journal of Food Composition and Analysis*, 107(104365), 104365. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104365>
- Tokarczyk, J., Jaworowska, A., Kowalczyk, D., Kasprzak, M., Jagielski, P., & Koch, W. (2025). Influence of diet on the bioaccessibility of Zn from dietary supplements: Findings from an in vitro digestion model and analytical determinations. *Nutrients*, 18(1), 94. <https://doi.org/10.3390/nu18010094>
- Urzi, O., Gasparro, R., Costanzo, E., De Luca, A., Giavaresi, G., Fontana, S., & Alessandro, R. (2023). Three-Dimensional Cell Cultures: The Bridge between In Vitro and In Vivo Models. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(15), 12046. <https://doi.org/10.3390/ijms241512046>
- Varshanath, B., Robin, D. T., Meera, S., Dileep, A., Archana, S., Chandran, N., & Vandana Rani, M. (2026). Enhancement of iron, zinc, and calcium bioaccessibility and bioavailability in green gram (*Vigna radiata* L.) supplemented with buttermilk through phytate reduction: An in vitro dietary evaluation. *Frontiers in Nutrition*, 13. <https://doi.org/10.3389/fnut.2026.1756171>
- Wang, J., Aalaei, K., Skibsted, L. H., & Ahrné, L. M. (2023). Calcium bioaccessibility increased during gastrointestinal digestion of α -lactalbumin and β -lactoglobulin. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 161, 111830. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111830>

- 164(112415), 112415.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112415>
- Wawrzyniak, N., & Suliburska, J. (2020). Nutritional and health factors affecting the bioavailability of calcium: a narrative review. *Nutrition Reviews*, 79(12), 1307–1320.
<https://doi.org/10.1093/nutrit/nuaa138>
- Zhao, Y., Martin, B. R., & Weaver, C. M. (2005). Calcium bioavailability of calcium carbonate fortified soymilk is equivalent to cow's milk in young women. *Journal of Nutrition*, 135(10), 2379–2382.
<https://doi.org/10.1093/jn/135.10.2379>
- Zhou, H., Tan, Y., & McClements, D. J. (2022). Applications of the INFOGEST In Vitro Digestion Model to foods: a review. *Annual Review of Food Science and Technology*, 14(1), 135–156.
<https://doi.org/10.1146/annurev-food-060721-012235>