

HUBUNGAN POROSITAS DAN SIFAT MEKANIK PADA HIDROKSIAPATIT BIOGENIK SEBAGAI BIOMATERIAL TULANG: TINJAUAN NARATIF

Salsabila Fauziah Dhuha Nasution

Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan alam,
Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor

salsabilanasution1212@gmail.com

ABSTRACT

Bone defects caused by trauma, tumors, infections, and degenerative diseases continue to increase alongside the growing aging population, driving the development of safe and effective bone replacement biomaterials. Biogenic hydroxyapatite (HA), derived from biological sources such as mammalian bones, eggshells, mollusk shells, crustacean shells, fish scales, and squid bones, has emerged as a promising candidate due to its similarity to the mineral composition of natural bone. One of the major challenges in developing HA as a bone scaffold is balancing porosity and mechanical strength, two properties that are inherently inversely related. This narrative review aims to analyze the relationship between porosity and compressive strength of biogenic HA from various biological sources based on 30 articles published between 2014 and 2026. The review identified porosity values ranging from 28.6% to 89% and compressive strengths ranging from 0.51 to 171 MPa among the biogenic HA sources examined. In general, increasing porosity was associated with decreased compressive strength; however, pore morphology, fabrication methods, and the incorporation of composite phases, including polymers or other ceramics, were found to shift this balance. A porosity range of 50-70%, interconnected pore sizes of 100-300 μm , and compressive strength of 2-12 MPa were considered optimal for cancellous bone applications. Further standardization of porosity characterization methods and in vivo validation is required to facilitate the translation of these findings into clinical applications.

Keywords: *biogenic hydroxyapatite; porosity; compressive strength; bone biomaterial; bone scaffold*

Article History

Received: Juli 2026

Reviewed: Juli 2026

Published: Juli 2026

Plagirism Checker:

No 234.GT8.,35
.800

Copyright : Author

Publishby :

Trigonometri



This work is licensed under
a [Creative Commons
Attribution-
NonCommercial 4.0
International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

ABSTRAK

Kerusakan tulang akibat trauma, tumor, infeksi, dan penyakit degeneratif terus meningkat sejalan dengan pertumbuhan populasi lanjut usia, sehingga mendorong pengembangan biomaterial pengganti tulang yang aman dan efektif. Hidroksiapatit (HA) biogenik, yang diekstraksi dari sumber hayati seperti tulang mamalia, cangkang telur, cangkang moluska, cangkang krustasea, sisik ikan, dan tulang cumi, menjadi kandidat unggulan karena kemiripannya dengan mineral tulang alami. Salah satu tantangan utama dalam pengembangan HA sebagai scaffold tulang adalah menyeimbangkan porositas dan kekuatan mekanik, dua sifat yang secara inheren saling bertentangan. Tinjauan naratif ini bertujuan menganalisis hubungan antara porositas dan kekuatan tekan HA biogenik dari berbagai sumber hayati berdasarkan 30 artike yang dipublikasikan dari tahun 2014 hingga 2026. Hasil tinjauan menunjukkan rentang porositas 28,6-89% dan kekuatan tekan 0,51-171 MPa di antara sumber-sumber HA biogenik yang ditelaah. Secara umum, peningkatan porositas berbanding terbalik dengan kekuatan tekan, namun morfologi pori, metode fabrikasi, dan penambahan fase komposit (polimer atau keramik lain) terbukti mampu menggeser keseimbangan tersebut. Porositas 50-70% dengan ukuran pori interkonek 100-300 mikrometer dan kekuatan tekan 2-12 MPa dinilai optimal untuk aplikasi tulang cancellous. Diperlukan standarisasi metode karakterisasi porositas serta validasi in vivo lebih lanjut untuk menerjemahkan temuan-temuan ini ke aplikasi klinis.

Kata kunci: hidroksiapatit biogenik; porositas; kekuatan tekan; biomaterial tulang; scaffold tulang

1. PENDAHULUAN

Defek dan kerusakan jaringan tulang akibat trauma, tumor, infeksi, maupun kelainan kongenital merupakan salah satu tantangan besar dalam bidang ortopedi dan bedah rekonstruktif. Beban penyakit muskuloskeletal diproyeksikan terus meningkat seiring pertumbuhan populasi lanjut usia secara global, sehingga kebutuhan akan material pengganti tulang (bone graft substitute) yang efektif dan aman menjadi semakin mendesak. Cangkok tulang autolog selama ini dianggap sebagai standar emas (gold standard) karena sifat osteogenik, osteoinduktif, dan osteokonduktif yang

dimilikinya secara alami. Namun, penggunaan cangkok autolog memiliki sejumlah keterbatasan signifikan, di antaranya morbiditas pada lokasi donor, ketersediaan volume jaringan yang terbatas, risiko infeksi pasca-operasi, serta waktu operasi yang lebih lama. Keterbatasan ini mendorong pengembangan biomaterial sintetik maupun semisintetik sebagai alternatif pengganti tulang yang lebih aman dan mudah diakses.

Hidroksiapatit (HA), dengan rumus kimia $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, merupakan komponen mineral anorganik utama penyusun jaringan tulang dan gigi manusia, mencakup sekitar 60-70% dari berat kering tulang. Karena kemiripan struktur kristal dan komposisi kimianya dengan mineral tulang alami, HA memiliki biokompatibilitas tinggi, bersifat osteokonduktif, serta mampu membentuk ikatan langsung dengan jaringan tulang tanpa menimbulkan reaksi inflamasi atau penolakan imun yang signifikan. Sifat-sifat inilah yang menjadikan HA salah satu kandidat biomaterial paling banyak diteliti dan diaplikasikan dalam rekayasa jaringan tulang (bone tissue engineering), baik dalam bentuk granul, blok padat, maupun scaffold berpori.

Secara garis besar, HA dapat diperoleh melalui dua jalur utama: sintesis kimiawi (HA sintetik) dan ekstraksi dari sumber hayati alami (HA biogenik). HA sintetik umumnya diproduksi melalui reaksi presipitasi, sol-gel, atau hidrotermal menggunakan prekursor kimia murni sehingga komposisi dan morfologinya dapat dikontrol secara presisi. Namun proses ini cenderung membutuhkan biaya produksi tinggi dan bahan kimia yang tidak selalu ramah lingkungan. Sebagai alternatif, HA biogenik diekstraksi dari berbagai limbah organik yang kaya kalsium, seperti tulang mamalia, sisik dan tulang ikan, cangkang telur, cangkang moluska, cangkang krustasea, serta tulang cumi (cuttlebone). Pendekatan ini menawarkan sejumlah keunggulan: komposisi mineral yang secara alami menyerupai apatit tulang manusia (termasuk kandungan trace element seperti Mg, Na, dan Sr yang berperan dalam bioaktivitas), proses ekstraksi yang relatif sederhana dan berbiaya rendah, serta nilai tambah ekologis karena memanfaatkan limbah biologis yang sebelumnya terbuang.

Meskipun HA biogenik menawarkan berbagai keunggulan tersebut, salah satu tantangan mendasar dalam pengembangannya sebagai scaffold tulang adalah menyeimbangkan dua sifat yang secara inheren saling bertentangan, yaitu porositas dan kekuatan mekanik. Porositas, baik dalam skala makro (>100 mikrometer) maupun mikro (<10 mikrometer), memainkan peran krusial dalam keberhasilan integrasi scaffold dengan jaringan tulang inang. Pori makro memfasilitasi migrasi sel osteoprogenitor, vaskularisasi, dan pertumbuhan tulang baru ke dalam struktur scaffold, sementara pori mikro mendukung adsorpsi protein, pertukaran nutrisi, dan aktivitas resorpsi oleh

osteoklas. Di sisi lain, peningkatan porositas secara konsisten menurunkan kekuatan mekanik material, mengikuti prinsip umum material seluler berpori (cellular solids). Trade-off inilah yang menjadi inti permasalahan dalam desain scaffold HA: porositas yang terlalu rendah akan menghambat proses osteointegrasi, sedangkan porositas yang terlalu tinggi berisiko menyebabkan kegagalan mekanik saat scaffold menanggung beban fisiologis, terutama pada aplikasi tulang yang menahan beban (load-bearing bone).

Berbagai penelitian telah melaporkan karakteristik porositas dan kekuatan tekan HA biogenik dari sumber-sumber hayati yang berbeda, namun temuan-temuan tersebut umumnya tersebar dalam studi-studi individual dengan metode karakterisasi, sumber bahan baku, dan teknik fabrikasi yang beragam. Variasi ini menyulitkan penarikan kesimpulan yang komprehensif mengenai pola hubungan antara porositas dan sifat mekanik HA biogenik secara lintas sumber. Sejauh penelusuran penulis, belum tersedia tinjauan naratif yang secara khusus mensintesis dan membandingkan data porositas-kekuatan mekanik dari berbagai jenis HA biogenik dalam satu kerangka analisis yang terintegrasi.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, tinjauan naratif ini bertujuan untuk menganalisis dan mensintesis hubungan antara porositas dan sifat mekanik, khususnya kekuatan tekan, pada hidroksiapatit biogenik dari berbagai sumber hayati, sebagaimana dilaporkan dalam literatur ilmiah. Tinjauan ini diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai karakteristik masing-masing sumber HA biogenik, mengidentifikasi pola umum hubungan porositas-mekanik yang berlaku lintas sumber, serta memberikan rekomendasi awal mengenai rentang porositas dan kekuatan tekan yang optimal untuk pengembangan biomaterial tulang berbasis HA biogenik di masa mendatang.

2. METODE TINJAUAN

Desain dan Strategi Pencarian

Tinjauan ini disusun menggunakan pendekatan narrative review, yang bertujuan mensintesis dan menginterpretasikan temuan dari berbagai studi terkait hubungan porositas dan sifat mekanik hidroksiapatit (HA) biogenik, tanpa menerapkan protokol sistematis seketat systematic review atau meta-analysis. Penelusuran literatur dilakukan pada basis data PubMed Central (PMC), MDPI, dan Google Scholar menggunakan kombinasi kata kunci: "biogenic hydroxyapatite", "natural hydroxyapatite", "porosity", "compressive strength", "bone scaffold", "mechanical properties", yang

dikombinasikan dengan nama sumber biogenik spesifik seperti "bovine bone", "eggshell", "fish scale", "mussel shell", "crab shell", "cuttlebone", dan "camel bone".

Kriteria Inklusi

Artikel yang dimasukkan ke dalam tinjauan memenuhi kriteria berikut: (1) merupakan artikel penelitian orisinal atau tinjauan yang membahas ekstraksi maupun sintesis HA dari sumber biogenik; (2) melaporkan setidaknya salah satu dari data porositas atau kekuatan tekan/mekanik; dan (3) dipublikasikan dalam bahasa Inggris.

Kriteria Eksklusi

Artikel dikeluarkan dari tinjauan apabila: (1) hanya tersedia di balik paywall atau hanya tersedia dalam bentuk abstrak; (2) merupakan studi yang murni membahas HA sintetik tanpa komponen biogenik sama sekali, kecuali digunakan sebagai kelompok pembanding; atau (3) tidak melaporkan data karakterisasi fisik maupun mekanik yang jelas.

Seleksi dan Sintesis Data

Berdasarkan kriteria di atas, diperoleh 30 artikel yang relevan dan dirangkum pada Tabel 1. Setiap artikel dikategorikan berdasarkan sumber biogenik HA, yaitu tulang mamalia, sisik/tulang ikan, cangkang telur, cangkang moluska, cangkang krustasea, tulang cumi, dan tulang unggas, ditambah kelompok pembanding berupa HA sintetik/bionik serta artikel tinjauan umum. Data porositas dan kekuatan tekan dari setiap artikel diekstraksi dan disusun ke dalam tabel sintesis untuk memudahkan analisis komparatif dan identifikasi pola hubungan porositas-mekanik lintas kategori sumber.

Tabel 1. Ringkasan 30 Artikel Hidroksiapatit Biogenik yang Ditinjau

No	Penulis (Tahun)	Judul	Jenis HA	Sumber HA	Porositas (%)	Kekuatan Tekan (MPa)	Hasil Utama / Hubungan Porositas-Mekanik
1	Pramono et al. (2022)	Synthesis of Spinel-Hydroxyapatite Composite Utilizing Bovine Bone and Beverage Can	HA biogenik komposit	Tulang sapi + Al dari kaleng minuman (penguat komposit)	28,6-29,5	171	Porositas rendah -> kuat tekan sangat tinggi
2	Mkhitaryan et al. (2026)	Valorization of Bone Waste: Effect of Animal Bone Origin on Hydroxyapatite Structure and Properties	HA biogenik	Tulang sapi/babi/ostrich	n/a	17 (sapi tertinggi)	Sumber sapi -> kuat tekan tertinggi dibanding babi/ostrich
3	Hosseinzadeh et al. (2014)	Fabrication of a Hard Tissue Replacement Using Natural Hydroxyapatite Derived from Bovine Bones by Thermal Decomposition Method	HA biogenik	Tulang sapi (femur)	n/a	2-12	Metode dekomposisi termal pengaruhi struktur pori-kuat tekan
4	Qiao et al. (2017)	Changes in Physicochemical and Biological Properties of Porcine Bone Derived Hydroxyapatite Induced by the Incorporation of Fluoride	HA biogenik	Tulang babi	n/a (MIP)	bervariasi	Fluorida ubah distribusi pori & kuat tekan
5	Abdelmoneim et al. (2022)	The Effect of Low-Processing Temperature on the Physicochemical and Mechanical Properties of Bovine Hydroxyapatite Bone Substitutes	HA biogenik	Tulang sapi	n/a	bervariasi (suhu 100-220°C)	Suhu proses rendah pengaruhi kristalinitas-kuat tekan

No	Penulis (Tahun)	Judul	Jenis HA	Sumber HA	Porositas (%)	Kekuatan Tekan (MPa)	Hasil Utama / Hubungan Porositas-Mekanik
6	Kartikasari et al. (2016)	Compressive Strength and Porosity Tests on Bovine Hydroxyapatite-Gelatin-Chitosan Scaffolds	HA biogenik komposit	Tulang sapi	bervariasi	bervariasi	Korelasi porositas-kuat tekan scaffold BHA-GEL-Ks
7	Gani et al. (2022)	Fabrication and Characterization of Submicron-Scale Bovine Hydroxyapatite: A Top-Down Approach for a Natural Biomaterial	HA biogenik	Tulang sapi	n/a	tinggi	Ukuran partikel submikron tingkatan kuat tekan
8	Agung et al. (2018)	Effect of Polymethylmethacrylate-Hydroxyapatite Composites on Callus Formation and Compressive Strength in Goat Vertebral Body	HA biogenik komposit	Tulang kambing	n/a	n/a	Proporsi HA naik -> porositas naik, densitas turun
9	Khursid et al. (2022)	Extraction of Hydroxyapatite from Camel Bone for Bone Tissue Engineering Application	HA biogenik	Tulang unta (femur)	73,93	n/a (struktur interkonek 50-600 μ m)	Porositas tinggi (~74%) dengan arsitektur pori interkonek mendukung BTE
10	Kodali et al. (2022)	Influence of Fish Scale-Based Hydroxyapatite on Forcespun Polycaprolactone Fiber Scaffolds	HA biogenik	Sisik ikan (Labeo rohita)	n/a	4,93	HA sisik ikan tingkatan performa mekanik fiber PCL
11	Oladipupo et al. (2024)	Eggshell Derived Scaffold of Hydroxyapatite-Ammonium Bicarbonate Nano-	HA biogenik	Kulit telur	55	42 N/mm ²	Kuat tekan naik seiring kadar

No	Penulis (Tahun)	Judul	Jenis HA	Sumber HA	Porositas (%)	Kekuatan Tekan (MPa)	Hasil Utama / Hubungan Porositas-Mekanik
		Composite: Bioactivity and Cytotoxicity Studies					pore-forming agent
12	Kareem et al. (2026)	Eggshell Waste Derived Nano-Hydroxyapatite/Metakaolin Composites for Bone Scaffold Applications	HA biogenik komposit	Kulit telur	55-63	16,4	Cold pressing turunkan porositas -> naikan kuat tekan
13	Apalangya et al. (2019)	Eggshell Based Nano-Engineered Hydroxyapatite and Poly(lactic) Acid Electrospun Fibers as Potential Tissue Scaffold	HA biogenik komposit	Kulit telur	tinggi	n/a	Struktur fiber porus tinggi mendukung pertumbuhan sel
14	Yasmin et al. (2015)	Naturally Derived Porous Hydroxyapatite/Polymer Biocomposite of Cuttlebone and Eggshell for Dental and Orthopedic Applications	HA biogenik komposit	Kulit telur + cuttlebone	80-85	2,84	Porositas tinggi (85%) tetap memadai sebagai filler tulang
15	Muntean et al. (2024)	Hydroxyapatite from Mollusk Shells: Characteristics, Production, and Potential Applications in Dentistry	HA biogenik (review)	Kerang/tiram/siput	bervariasi	bervariasi	Waktu rendam & komposisi slurry pengaruhi porositas-kekuatan
16	Fonseca et al. (2024)	3D Scaffold of Hydroxyapatite/ β -Tricalcium Phosphate from Mussel Shells: Synthesis, Characterization and Cytotoxicity	HA biogenik komposit	Cangkang kerang	bervariasi (pelet)	n/a	Massa pelet pengaruhi porositas permukaan & morfologi

No	Penulis (Tahun)	Judul	Jenis HA	Sumber HA	Porositas (%)	Kekuatan Tekan (MPa)	Hasil Utama / Hubungan Porositas-Mekanik
17	Dugaich et al. (2025)	Sustainable Valorization of Mussel Shell Waste: Processing for Calcium Carbonate Recovery and Hydroxyapatite Production	HA biogenik	Cangkang kerang	n/a	n/a	Potensi osteogenik tinggi, viabilitas sel >70%
18	Scialla et al. (2020)	Mussel Shell-Derived Macroporous 3D Scaffold: Characterization and Optimization Study of a Bioceramic from the Circular Economy	HA biogenik	Cangkang kerang hijau	87-89	0,51 ± 0,14	Porositas sangat tinggi tetap sesuai standar bone graft
19	Ismail et al. (2022)	Characterization of PLA/PCL/Green Mussel Shells Hydroxyapatite (HA) Biocomposites Prepared by Chemical Blending Methods	HA biogenik komposit	Cangkang kerang hijau	n/a	82,72 ± 1,76 (15% HA)	Penambahan HA tingkatan kuat tekan filamen biokomposit
20	Devi et al. (2024)	Turning Portunus pelagicus Shells into Biocompatible Scaffolds for Bone Regeneration	HA biogenik komposit	Kitosan cangkang kepiting	~60	n/a	Porositas ~60% & pori 100-200µm mendukung adhesi osteoblas
21	Hoang et al. (2026)	Simultaneous Synthesis of Hydroxyapatite/Chitosan Composite from Crab Shells and its Polycaprolactone-Blended Scaffolds for Enhanced Bone Regeneration	HA biogenik komposit	Cangkang kepiting	lebih rendah dari foam (cast plate-like)	2,83-8,41	Kandungan mineral HA-CS naik -> kuat tekan naik, porositas turun

No	Penulis (Tahun)	Judul	Jenis HA	Sumber HA	Porositas (%)	Kekuatan Tekan (MPa)	Hasil Utama / Hubungan Porositas-Mekanik
22	Habiburrohman et al. (2025)	Fabrication and In Vitro Cytocompatibility Evaluation of Porous Bone Scaffold Based on Cuttlefish Bone-Derived Nano-Carbonated Hydroxyapatite Reinforced with Polyethylene Oxide/Chitosan Fibrous Structure	HA biogenik komposit	Tulang cumi (cuttlebone)	~60 (makro & mikro)	2,83-8,41	Konsentrasi PEO/CS naik -> kuat tekan turun, porositas makro stabil ~60%
23	Kumar et al. (2020)	Spectral Characterization of Hydroxyapatite Extracted from Black Sumatra and Fighting Cock Bone Samples: A Comparative Analysis	HA biogenik	Tulang ayam	n/a	n/a	Suhu kalsinasi (700-1100°C) pengaruhi ukuran kristal & morfologi pori
24	Zhang et al. (2024)	Three-Dimensionally Printed Bionic Hydroxyapatite (HAp) Ceramic Scaffolds with Different Structures and Porosities: Strength, Biocompatibility, and Biomedical Application Potential	Sintetik bionik	n/a (3D print)	40/60/80	bervariasi per struktur	Porositas 80% TPMS = kombinasi terbaik kuat tekan & biokompatibilitas
25	Liang et al. (2022)	Nano-Hydroxyapatite Bone Scaffolds with Different Porous Structures Processed by Digital Light Processing 3D Printing	Sintetik bionik	n/a (DLP print)	~70	~22,5	Bentuk pori (CPS) pengaruhi kuat tekan tertinggi

No	Penulis (Tahun)	Judul	Jenis HA	Sumber HA	Porositas (%)	Kekuatan Tekan (MPa)	Hasil Utama / Hubungan Porositas-Mekanik
26	Tanaka et al. (2017)	Physico-Chemical, In Vitro, and In Vivo Evaluation of a 3D Unidirectional Porous Hydroxyapatite Scaffold for Bone Regeneration	Sintetik	n/a (pori searah)	n/a	7,89 (vs 1,92 acak)	Pori searah tingkatkan kuat tekan dibanding pori acak
27	Jang et al. (2014)	Fabrication of Porous Hydroxyapatite Scaffolds as Artificial Bone Preform and its Biocompatibility Evaluation	Sintetik	n/a (ekstrusi multipass)	n/a	stabil mekanis	Mikrokanal searah jaga stabilitas mekanik walau porus
28	Kazimierczak et al. (2025)	Macroporous Hydroxyapatite-Based Bone Scaffolds Loaded with CAPE Derivatives: A Strategy to Reduce Oxidative Stress and Biofilm Formation	HA biogenik komposit	n/a (nHA komposit)	49-60	1,2-1,8	Porositas tinggi tetap capai kuat tekan setara cancellous bone
29	Hassan et al. (2022)	Biomimetic PLGA/Strontium-Zinc Nano Hydroxyapatite Composite Scaffolds for Bone Regeneration	HA biogenik komposit	n/a (nHA komposit)	n/a	0,4-19,8	Rentang kuat tekan luas tergantung struktur pori 189-406µm
30	Hussin et al. (2022)	Extraction of Natural Hydroxyapatite for Biomedical Applications: A Review	HA biogenik (review)	Tulang sapi + cangkang udang + diopside	n/a	meningkat (komposit)	Kombinasi multi-sumber HA biogenik tingkatkan kekuatan mekanik scaffold

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambaran Umum Temuan

Tabel 1 merangkum 30 artikel yang memenuhi kriteria tinjauan, mencakup delapan kategori sumber HA biogenik dengan rentang porositas 28,6-89% dan kekuatan tekan 0,51-171 MPa. Rentang yang sangat lebar ini mengonfirmasi bahwa karakteristik mekanik HA biogenik sangat bergantung pada sumber bahan baku, metode ekstraksi, teknik fabrikasi scaffold, serta ada tidaknya penguatan komposit. Secara umum, pola yang konsisten muncul di hampir seluruh kategori: kenaikan porositas cenderung diikuti penurunan kekuatan tekan, sejalan dengan prinsip material seluler (cellular solids) di mana kekuatan material berpori berbanding terbalik secara non-linear terhadap fraksi porositasnya. Namun, sejumlah studi menunjukkan bahwa dengan optimasi metode fabrikasi seperti pencetakan 3D, freeze-casting, atau electrospinning, material dengan porositas tinggi (>70%) masih dapat mempertahankan kekuatan tekan yang memadai untuk aplikasi tulang cancellous.

HA Biogenik dari Tulang Mamalia

Tulang mamalia, terutama sapi (bovine), merupakan sumber HA biogenik yang paling banyak diteliti karena ketersediaannya melimpah sebagai limbah rumah potong hewan serta komposisi mineralnya yang mendekati apatit tulang manusia. Pada kelompok ini ditemukan rentang porositas dan kekuatan tekan paling luas dibanding kategori lain. Pramono et al. (2022) melaporkan bahwa komposit HA tulang sapi dengan spinel alumina, yang berasal dari daur ulang kaleng minuman, menghasilkan kekuatan tekan sangat tinggi (171 MPa) pada porositas rendah (28,6-29,5%), menjadikannya berpotensi untuk aplikasi tulang kortikal yang menahan beban tinggi. Sebaliknya, Khursid et al. (2022) menunjukkan bahwa HA dari tulang unta (camel bone) memiliki porositas alami yang jauh lebih tinggi (73,93%) dengan arsitektur pori interkonek berdiameter 50-600 mikrometer, karakteristik yang lebih sesuai untuk aplikasi tulang cancellous yang mengutamakan osteokonduktivitas dibanding kekuatan mekanik murni. Studi komparatif oleh Mkhitarian et al. (2026) turut mengonfirmasi bahwa asal spesies hewan memengaruhi karakteristik akhir HA, dengan tulang sapi menghasilkan kekuatan tekan tertinggi (17 MPa) dibanding tulang babi maupun ostrich.

Variasi hasil pada HA tulang babi yang diteliti oleh Qiao et al. (2017) menunjukkan bahwa penambahan fluorida dapat memodifikasi distribusi ukuran pori dan secara langsung memengaruhi kekuatan tekan akhir material. Demikian pula, Abdelmoneim et al. (2022) melaporkan bahwa suhu

pemrosesan rendah (100-220°C) pada HA tulang sapi memengaruhi kristalinitas dan kekuatan mekanik akhir, mengindikasikan bahwa parameter proses termal, bukan hanya sumber bahan baku, turut berkontribusi signifikan. Hosseinzadeh et al. (2014) menambahkan bahwa metode dekomposisi termal pada ekstraksi HA dari femur sapi berpengaruh langsung terhadap struktur pori dan kekuatan tekan yang dihasilkan (2-12 MPa), sementara Gani et al. (2022) menunjukkan bahwa pendekatan top-down untuk menghasilkan partikel HA berskala submikron mampu meningkatkan kekuatan tekan secara signifikan. Pada aplikasi komposit, Kartikasari et al. (2016) melaporkan korelasi porositas-kekuatan tekan pada scaffold HA tulang sapi-gelatin-kitosan, sedangkan Agung et al. (2018) menemukan bahwa peningkatan proporsi HA pada komposit PMMA-HA untuk vertebra kambing diikuti oleh kenaikan porositas dan penurunan densitas material. Temuan-temuan ini secara kolektif menegaskan bahwa sumber hewan, metode ekstraksi, dan parameter pemrosesan berinteraksi secara kompleks dalam menentukan keseimbangan akhir porositas-mekanik HA biogenik dari tulang mamalia.

HA Biogenik dari Sisik dan Tulang Ikan

Sisik ikan merupakan limbah industri perikanan yang melimpah namun relatif belum banyak dieksplorasi sebagai sumber HA dibanding tulang mamalia. Kodali et al. (2022) melaporkan bahwa HA dari sisik ikan *Labeo rohita* yang diintegrasikan ke dalam scaffold serat polikaprolakton (PCL) melalui teknik forcespun menunjukkan peningkatan kekuatan tekan hingga 4,93 MPa, meskipun data porositas eksplisit dalam satuan persentase tidak dilaporkan. Nilai kekuatan tekan ini tergolong sesuai untuk aplikasi tulang cancellous. Keterbatasan literatur pada kategori ini menunjukkan bahwa potensi sisik dan tulang ikan sebagai sumber HA biogenik masih memerlukan eksplorasi lebih lanjut, khususnya terkait karakterisasi porositas yang lebih komprehensif dan standar.

HA Biogenik dari Cangkang Telur

Cangkang telur mengandung lebih dari 90% kalsium karbonat (CaCO_3) yang dapat dikonversi menjadi HA melalui reaksi hidrotermal maupun metode presipitasi. Oladipupo et al. (2024) melaporkan scaffold HA-amonium bikarbonat berbasis cangkang telur dengan porositas 55% dan kekuatan tekan hingga 42 N/mm², menunjukkan bahwa kuat tekan meningkat seiring kadar agen pembentuk pori (pore-forming agent). Kareem et al. (2026) menegaskan hubungan porositas-mekanik yang lebih langsung: penggunaan teknik cold pressing pada komposit nano-HA cangkang telur dengan metakaolin menurunkan porositas (55-63%) sekaligus meningkatkan kekuatan tekan

hingga 16,4 MPa. Apalangka et al. (2019) mengembangkan serat elektrospon HA cangkang telur-asam polilaktat (PLA) dengan porositas tinggi yang mendukung pertumbuhan sel, meskipun data kekuatan tekan kuantitatif tidak dilaporkan secara eksplisit. Yasmin et al. (2015) menunjukkan bahwa biokomposit HA dari kombinasi cuttlebone dan cangkang telur dengan porositas sangat tinggi (80-85%) tetap dapat mencapai kekuatan tekan 2,84 MPa, memadai sebagai filler tulang non-load-bearing. Secara umum, temuan pada kategori cangkang telur menunjukkan bahwa morfologi dan distribusi pori, bukan sekadar angka porositas total, memainkan peran penting dalam menentukan kekuatan tekan akhir material.

HA Biogenik dari Cangkang Moluska

Cangkang kerang, tiram, dan siput merupakan sumber CaCO_3 berlimpah yang dapat dikonversi menjadi HA melalui proses hidrotermal. Tinjauan oleh Muntean et al. (2024) merangkum bahwa waktu perendaman dan komposisi slurry selama proses sintesis memengaruhi porositas dan kekuatan akhir HA dari cangkang moluska secara umum. Scialla et al. (2020) melaporkan scaffold makropori 3D dari cangkang kerang hijau dengan porositas sangat tinggi (87-89%) namun kekuatan tekan rendah ($0,51 \pm 0,14$ MPa), yang meski demikian masih memenuhi standar minimal untuk bone graft non-load-bearing. Fonseca et al. (2024) menunjukkan bahwa massa pelet pada sintesis scaffold HA/beta-trikalsium fosfat dari cangkang kerang memengaruhi porositas permukaan dan morfologi pasca-leaching, sementara Dugaich et al. (2025) melaporkan potensi osteogenik tinggi dengan viabilitas sel di atas 70% pada HA hasil valorisasi limbah cangkang kerang. Berbeda dengan pendekatan HA murni, Ismail et al. (2022) menunjukkan bahwa biokomposit PLA/PCL yang diperkuat HA cangkang kerang hijau justru menghasilkan kekuatan tekan yang sangat tinggi ($82,72 \pm 1,76$ MPa pada kadar HA 15%) karena rongga pori pada dasarnya terisi oleh matriks polimer, mengilustrasikan bagaimana strategi komposisi dapat membalikkan tren umum porositas tinggi-kekuatan rendah.

HA Biogenik dari Cangkang Krustasea

HA dari cangkang kepiting dan udang sering dikombinasikan dengan kitosan yang juga diekstraksi dari sumber yang sama, menghasilkan scaffold biogenik yang seluruhnya berasal dari limbah laut. Devi et al. (2024) melaporkan bahwa scaffold biokompatibel dari cangkang kepiting rajungan (*Portunus pelagicus*) dengan porositas sekitar 60% dan ukuran pori 100-200 mikrometer dinilai optimal untuk mendukung adhesi dan proliferasi osteoblas. Hoang et al. (2026) menemukan bahwa peningkatan kandungan mineral HA-kitosan pada scaffold cast plate-like meningkatkan kekuatan

tekan (2,83-8,41 MPa) namun diikuti oleh penurunan porositas relatif dibanding struktur foam. Temuan ini menegaskan bahwa pada scaffold berbasis krustasea, terdapat titik keseimbangan yang jelas antara kandungan mineral, porositas, dan kekuatan mekanik yang dapat dioptimalkan sesuai kebutuhan aplikasi.

HA Biogenik dari Tulang Cumi dan Tulang Unggas

Cuttlebone atau tulang cumi memiliki struktur makropori alami yang khas, sehingga sering dimanfaatkan langsung sebagai templat pori tanpa memerlukan fabrikasi tambahan yang rumit. Habiburrohman et al. (2025) melaporkan bahwa scaffold berbasis nano-HA karbonat dari cuttlebone yang diperkuat serat polietilen oksida/kitosan (PEO/CS) memiliki porositas makro dan mikro yang stabil di sekitar 60%, namun peningkatan konsentrasi PEO/CS justru menurunkan kekuatan tekan (2,83-8,41 MPa) meskipun porositas makro relatif tidak berubah. Hal ini mengindikasikan bahwa fase organik/polimer berperan penting dalam mendistribusikan beban mekanik pada scaffold komposit, terlepas dari porositas totalnya. Pada kategori tulang unggas, Kumar et al. (2020) melakukan karakterisasi spektral HA dari tulang ayam Black Sumatra dan Fighting Cock, menunjukkan bahwa suhu kalsinasi pada rentang 700-1100°C memengaruhi ukuran kristal dan morfologi pori, meskipun penelitian ini masih berfokus pada tahap karakterisasi awal tanpa pengujian kekuatan tekan secara langsung.

Perbandingan dengan HA Sintetik/Bionik sebagai Pembanding

Sebagai pembanding terhadap HA biogenik, beberapa scaffold HA sintetik yang difabrikasi melalui pencetakan 3D turut ditinjau untuk melihat sejauh mana kontrol geometri pori dapat memengaruhi hubungan porositas-mekanik. Zhang et al. (2024) menunjukkan bahwa scaffold keramik HA bionik dengan struktur triply periodic minimal surface (TPMS) pada porositas 80% memberikan kombinasi terbaik antara kekuatan tekan dan biokompatibilitas dibanding struktur body-centered cubic maupun face-centered cubic pada porositas yang sama. Liang et al. (2022) melaporkan bahwa scaffold nano-HA hasil digital light processing (DLP) dengan struktur cubic pore-shaped (CPS) mencapai kekuatan tekan hingga 22,5 MPa pada porositas sekitar 70%, jauh melampaui kebanyakan HA biogenik pada rentang porositas serupa. Tanaka et al. (2017) menunjukkan bahwa desain pori searah (unidirectional) pada scaffold HA menghasilkan kekuatan tekan yang jauh lebih tinggi (7,89 MPa) dibanding struktur pori acak (1,92 MPa), sementara Jang et al. (2014) mengonfirmasi bahwa mikrokanal searah pada scaffold hasil ekstrusi multipass mampu menjaga stabilitas mekanik meskipun struktur tetap berpori. Temuan-temuan pada kelompok pembanding ini menegaskan

bahwa keunggulan kekuatan mekanik pada porositas tinggi lebih banyak ditentukan oleh presisi kontrol geometri pori melalui teknologi fabrikasi, dibanding keunggulan material intrinsik semata, dan prinsip ini berpotensi diadaptasi untuk optimasi desain scaffold HA biogenik di masa depan.

HA Biogenik Komposit Campuran dan Artikel Tinjauan Pendukung

Beberapa penelitian mengembangkan komposit HA biogenik dengan penguat tambahan untuk mengoptimalkan sifat mekanik tanpa mengorbankan porositas secara signifikan. Kazimierczak et al. (2025) melaporkan scaffold HA makropori yang dimuati turunan CAPE (caffeic acid phenethyl ester) dengan porositas 49-60% mampu mencapai kekuatan tekan 1,2-1,8 MPa, setara dengan tulang cancellous, sekaligus memberikan manfaat tambahan berupa pengurangan stres oksidatif dan pembentukan biofilm. Hassan et al. (2022) menunjukkan bahwa scaffold biomimetik PLGA/nano-HA yang diperkaya stronsium-seng menghasilkan rentang kekuatan tekan yang sangat luas (0,4-19,8 MPa), bergantung pada struktur pori berukuran 189-406 mikrometer. Terakhir, tinjauan oleh Hussin et al. (2022) mengenai ekstraksi HA alami untuk aplikasi biomedis merangkum bahwa kombinasi multi-sumber, seperti gabungan tulang sapi, cangkang udang, dan diopside, dapat meningkatkan kekuatan mekanik scaffold dibanding penggunaan sumber tunggal, memberikan arah pengembangan lebih lanjut berupa strategi hibridisasi sumber HA biogenik.

Sintesis Hubungan Porositas-Kekuatan Tekan Lintas Sumber

Secara keseluruhan, tinjauan terhadap 30 artikel ini mengonfirmasi beberapa pola penting. Pertama, hubungan berbanding terbalik antara porositas dan kekuatan tekan berlaku secara umum pada HA biogenik murni tanpa penguatan tambahan, konsisten dengan prinsip material seluler berpori. Kedua, penambahan fase komposit, baik berupa polimer (PLA, PCL, kitosan, gelatin) maupun keramik lain (spinel, beta-trikalsium fosfat, metakaolin), terbukti mampu menggeser titik keseimbangan porositas-mekanik secara signifikan, bahkan pada beberapa kasus menghasilkan kekuatan tekan tinggi pada porositas yang relatif tinggi pula. Ketiga, morfologi dan orientasi pori (acak versus searah, mikro versus makro) memberikan pengaruh yang setara pentingnya dengan angka porositas total terhadap kekuatan tekan akhir. Keempat, metode fabrikasi berteknologi tinggi seperti pencetakan 3D memungkinkan kontrol presisi terhadap arsitektur pori sehingga dapat mencapai kombinasi porositas tinggi dan kekuatan tekan yang tetap memadai, sebuah pendekatan yang berpotensi diadaptasi pada pemrosesan HA biogenik di masa depan.

Tabel 2. Rentang Porositas dan Kekuatan Tekan per Kategori Sumber HA Biogenik

Kategori Sumber	Rentang Porositas (%)	Rentang Kekuatan Tekan (MPa)	Kesesuaian Aplikasi
Tulang mamalia (sapi, unta, babi, kambing)	28,6-74	2-171	Cancellous & kortikal
Sisik/tulang ikan	n/a	~4,93	Cancellous
Cangkang telur	55-85	2,84-16,4 (hingga 42 N/mm ²)	Cancellous & filler
Cangkang moluska (kerang, tiram)	87-89	0,51-82,72*	Filler / komposit
Cangkang krustasea (kepiting, udang)	~60	2,83-8,41	Cancellous
Tulang cumi (cuttlebone)	~60	2,83-8,41	Cancellous
HA sintetik/bionik (pembanding)	40-80	1,92-22,5	Cancellous (riset desain pori)

Temuan ini konsisten dengan rekomendasi umum dalam literatur rekayasa jaringan tulang bahwa porositas optimal untuk bone scaffold berada pada kisaran 50-80% dengan ukuran pori makro 100-500 mikrometer, dan target kekuatan tekan 2-12 MPa untuk aplikasi cancellous serta 100-200 MPa untuk aplikasi kortikal.

4. KETERBATASAN TINJAUAN

Tinjauan ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui. Pertama, heterogenitas metode pengukuran porositas antar studi (Archimedes, mikro-CT, mercury intrusion porosimetry, maupun estimasi dari citra SEM) menyulitkan perbandingan langsung yang sepenuhnya setara antar artikel. Kedua, sejumlah artikel tidak melaporkan data porositas dan kekuatan tekan secara bersamaan dalam satuan yang konsisten, sehingga beberapa sel pada Tabel 1 tidak dapat diisi secara lengkap (ditandai n/a). Ketiga, tinjauan ini dibatasi hanya pada artikel yang tersedia secara open access, sehingga sejumlah studi relevan yang berada di balik paywall tidak turut terwakili dan berpotensi menimbulkan bias seleksi. Keempat, sebagai tinjauan naratif, proses seleksi artikel tidak mengikuti protokol sistematis seperti PRISMA, sehingga hasil sintesis bersifat deskriptif-kualitatif dan belum dapat digeneralisasi secara statistik. Kelima, sebagian besar data yang ditinjau berasal dari studi karakterisasi in vitro; data uji in vivo maupun uji klinis pada manusia masih sangat terbatas, khususnya untuk HA biogenik dari sumber non-mamalia seperti cangkang moluska, krustasea, dan tulang cumi.

5. KESIMPULAN

Tinjauan naratif terhadap 30 artikel ini mengonfirmasi adanya hubungan berbanding terbalik antara porositas dan kekuatan tekan pada hidroksiapatit (HA) biogenik dari berbagai sumber hayati, konsisten dengan prinsip material seluler berpori secara umum. Namun demikian, terdapat variasi signifikan antar sumber: HA biogenik dari tulang mamalia, khususnya sapi, menghasilkan rentang kekuatan mekanik paling luas (2-171 MPa) sehingga tergolong paling serbaguna untuk berbagai aplikasi tulang, sementara HA dari cangkang telur dan moluska unggul dalam pembentukan porositas tinggi (>80%) yang mendukung osteokonduktivitas meski dengan kekuatan tekan yang umumnya lebih rendah.

Metode fabrikasi, termasuk pencetakan 3D, electrospinning, cold pressing, dan pembentukan komposit dengan polimer, terbukti mampu menggeser titik keseimbangan porositas-mekanik secara signifikan, bahkan pada HA biogenik yang secara intrinsik memiliki keterbatasan mekanik. Berdasarkan sintesis temuan ini, porositas 50-70% dengan pori interkonek berukuran 100-300 mikrometer dan kekuatan tekan 2-12 MPa direkomendasikan sebagai target desain scaffold HA biogenik untuk aplikasi tulang cancellous. Penelitian lanjutan diperlukan untuk menstandarisasi metode karakterisasi porositas dan kekuatan mekanik, serta memvalidasi temuan-temuan in vitro ini melalui studi in vivo dan uji klinis, khususnya pada sumber-sumber HA biogenik alternatif yang belum banyak dieksplorasi seperti sisik ikan, tulang unggas, dan cangkang krustasea.

DAFTAR PUSTAKA

1. Pramono AW, et al. Synthesis of Spinel-Hydroxyapatite Composite Utilizing Bovine Bone and Beverage Can. Crystals. 2022.
2. Mkhitarian L, et al. Valorization of Bone Waste: Effect of Animal Bone Origin on Hydroxyapatite Structure and Properties. 2026.
3. Hosseinzadeh E, et al. Fabrication of a Hard Tissue Replacement Using Natural Hydroxyapatite Derived from Bovine Bones by Thermal Decomposition Method. 2014.
4. Qiao W, et al. Changes in Physicochemical and Biological Properties of Porcine Bone Derived Hydroxyapatite Induced by the Incorporation of Fluoride. 2017.
5. Abdelmoneim D, et al. The Effect of Low-Processing Temperature on the Physicochemical and Mechanical Properties of Bovine Hydroxyapatite Bone Substitutes. 2022.
6. Kartikasari N, et al. Compressive Strength and Porosity Tests on Bovine Hydroxyapatite-Gelatin-Chitosan Scaffolds. 2016.

7. Gani ISS, et al. Fabrication and Characterization of Submicron-Scale Bovine Hydroxyapatite: A Top-Down Approach for a Natural Biomaterial. 2022.
8. Agung R, et al. Effect of Polymethylmethacrylate-Hydroxyapatite Composites on Callus Formation and Compressive Strength in Goat Vertebral Body. 2018.
9. Khurshid Z, et al. Extraction of Hydroxyapatite from Camel Bone for Bone Tissue Engineering Application. 2022.
10. Kodali D, et al. Influence of Fish Scale-Based Hydroxyapatite on Forcespun Polycaprolactone Fiber Scaffolds. 2022.
11. Oladipupo AR, et al. Eggshell Derived Scaffold of Hydroxyapatite-Ammonium Bicarbonate Nano-Composite: Bioactivity and Cytotoxicity Studies. 2024.
12. Kareem TA, et al. Eggshell Waste Derived Nano-Hydroxyapatite/Metakaolin Composites for Bone Scaffold Applications. 2026.
13. Apalangya V, et al. Eggshell Based Nano-Engineered Hydroxyapatite and Poly(lactic) Acid Electrospun Fibers as Potential Tissue Scaffold. 2019.
14. Yasmin A, et al. Naturally Derived Porous Hydroxyapatite/Polymer Biocomposite of Cuttlebone and Eggshell for Dental and Orthopedic Applications. 2015.
15. Muntean SG, et al. Hydroxyapatite from Mollusk Shells: Characteristics, Production, and Potential Applications in Dentistry. 2024.
16. Fonseca DR, et al. 3D Scaffold of Hydroxyapatite/B-Tricalcium Phosphate from Mussel Shells: Synthesis, Characterization and Cytotoxicity. 2024.
17. Dugaich AM, et al. Sustainable Valorization of Mussel Shell Waste: Processing for Calcium Carbonate Recovery and Hydroxyapatite Production. 2025.
18. Scialla S, et al. Mussel Shell-Derived Macroporous 3D Scaffold: Characterization and Optimization Study of a Bioceramic from the Circular Economy. 2020.
19. Ismail NI, et al. Characterization of PLA/PCL/Green Mussel Shells Hydroxyapatite (HA) Biocomposites Prepared by Chemical Blending Methods. 2022.
20. Devi TS, et al. Turning Portunus pelagicus Shells into Biocompatible Scaffolds for Bone Regeneration. 2024.
21. Hoang HT, et al. Simultaneous Synthesis of Hydroxyapatite/Chitosan Composite from Crab Shells and its Polycaprolactone-Blended Scaffolds for Enhanced Bone Regeneration. 2026.

22. Habiburrohman D, et al. Fabrication and In Vitro Cytocompatibility Evaluation of Porous Bone Scaffold Based on Cuttlefish Bone-Derived Nano-Carbonated Hydroxyapatite Reinforced with Polyethylene Oxide/Chitosan Fibrous Structure. 2025.
23. Kumar GS, et al. Spectral Characterization of Hydroxyapatite Extracted from Black Sumatra and Fighting Cock Bone Samples: A Comparative Analysis. 2020.
24. Zhang Y, et al. Three-Dimensionally Printed Bionic Hydroxyapatite (HAp) Ceramic Scaffolds with Different Structures and Porosities: Strength, Biocompatibility, and Biomedical Application Potential. 2024.
25. Liang H, et al. Nano-Hydroxyapatite Bone Scaffolds with Different Porous Structures Processed by Digital Light Processing 3D Printing. 2022.
26. Tanaka T, et al. Physico-Chemical, In Vitro, and In Vivo Evaluation of a 3D Unidirectional Porous Hydroxyapatite Scaffold for Bone Regeneration. 2017.
27. Jang DW, et al. Fabrication of Porous Hydroxyapatite Scaffolds as Artificial Bone Preform and its Biocompatibility Evaluation. 2014.
28. Kazimierczak P, et al. Macroporous Hydroxyapatite-Based Bone Scaffolds Loaded with CAPE Derivatives: A Strategy to Reduce Oxidative Stress and Biofilm Formation. 2025.
29. Hassan MN, et al. Biomimetic PLGA/Strontium-Zinc Nano Hydroxyapatite Composite Scaffolds for Bone Regeneration. 2022.
30. Hussin MSF, et al. Extraction of Natural Hydroxyapatite for Biomedical Applications: A Review. 2022.