MASALIQ
Jurnal Pendidikan dan Sains

e-ISSN: 2808-8115
p-ISSN: 2809-1051

Terindeks: Sinta 5, Copernicus, Dimensions, Scilit, Lens, Crossref, Garuda, Google Scholar, Base, etc

https://doi.org/10.58578/masaliq.v5i6.7604

BATU KAPUR SEBAGAI PREKURSOR HIDROKSIAPATIT: TINJAUAN METODE SINTESIS, TANTANGAN, DAN PROSPEKNYA

Limestone as a Precursor of Hydroxyapatite: A Review of Synthesis Methods, Challenges, and Prospects

Nisa'atin Barkah & Romy Dwipa Yamesa Away
Universitas Negeri Padang
nisaatinbarkah15@gmail.com; romydwipa@fmipa.unp.ac.id

Article Info:

Submitted:	Revised:	Accepted:	Published:
Sep 3, 2025	Sep 23, 2025	Oct 5, 2025	Oct 10, 2025

Abstract

Hydroxyapatite (HAp) is a calcium phosphate biomaterial with high biocompatibility, widely utilized in biomedical, cosmetic, and photocatalytic applications. The high production cost of synthetic HAp has driven the search for abundant and environmentally friendly natural alternatives, such as limestone ($CaCO_3$), as a potential precursor. This article aims to review various limestone-based HAp synthesis methods, including wet precipitation, sol-gel, hydrothermal, and sintering techniques, and to evaluate the influence of process parameters on the Ca/P ratio, phase purity, and crystal morphology. The review is conducted through an analysis of recent literature comparing the performance of each method. Findings indicate that limestone with $CaCO_3$ content exceeding 95% can produce HAp with a Ca/P ratio approaching the stoichiometric value of 1.67; however, the presence of natural impurities such as Si, Al, Mg, and Fe may lead to the formation of secondary phases, such as *β-tricalcium phosphate* (*β-TCP*). Optimization of process parameters, including calcination temperature, pH, and reaction time, is shown to be crucial for enhancing crystallinity and approximating the

Masaliq Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

structure of natural bone. Furthermore, green synthesis approaches employing bio-extracts such as gelatin or leaf extracts contribute to improved homogeneity and particle size control. This review concludes that limestone is an economical and sustainable local source for HAp production, with significant potential for the development of biomimetic materials based on Indonesian natural minerals that are efficient and globally competitive.

Keywords: Hydroxyapatite; Limestone; Green Synthesis; Ca/P Ratio; Nature-Based Biomaterials

Abstrak: Hidroksiapatit (*HAp*) merupakan biomaterial kalsium fosfat dengan tingkat biokompatibilitas tinggi yang banyak dimanfaatkan dalam bidang biomedis, kosmetik, dan fotokatalisis. Tingginya biaya produksi *HAp* sintetis mendorong pencarian alternatif sumber alami yang melimpah dan ramah lingkungan, seperti batu kapur ($CaCO_3$), sebagai prekursor potensial. Artikel ini bertujuan untuk mengulas berbagai metode sintesis *HAp* berbasis batu kapur, meliputi presipitasi basah, *sol-gel*, hidrotermal, dan *sintering*, serta mengevaluasi pengaruh parameter proses terhadap rasio *Ca/P*, kemurnian fasa, dan morfologi kristal. Kajian dilakukan melalui analisis literatur terkini yang membandingkan performa masing-masing metode. Hasil menunjukkan bahwa batu kapur dengan kandungan $CaCO_3$ lebih dari 95% dapat menghasilkan *HAp* dengan rasio *Ca/P* mendekati nilai stoikiometri 1,67, namun keberadaan pengotor alami seperti Si, Al, Mg, dan Fe berpotensi menyebabkan pembentukan fasa sekunder, seperti *β-tricalcium phosphate (β-TCP)*. Optimasi parameter proses seperti suhu kalsinasi, pH, dan waktu reaksi terbukti krusial dalam meningkatkan kristalinitas dan mendekati struktur tulang alami. Selain itu, pendekatan sintesis hijau dengan memanfaatkan *bio-extract* seperti gelatin atau ekstrak daun berkontribusi terhadap peningkatan homogenitas serta kontrol ukuran partikel. Simpulan dari kajian ini menegaskan bahwa batu kapur merupakan sumber lokal yang ekonomis dan berkelanjutan untuk produksi *HAp*, dengan potensi besar dalam pengembangan material biomimetik berbasis mineral alam Indonesia yang efisien dan kompetitif secara global.

Kata Kunci: Hidroksiapatit; Batu Kapur; Sintesis Hijau; Rasio *Ca/P*; Biomaterial Berbasis Alam.

PENDAHULUAN

Biomaterial semakin popular karena banyak digunakan dalam bidang biomedis dimana banyak digunakan sebagai implan, jaringan dan tranplantasi organ serta penghantaran obat. Biomaterial berfungsi untuk memulihkan , memperbaiki dan mengganti jaringan yang rusak (Pu et al., 2019). Bukan hanya itu biomaterial juga merujuk pada zat yang berasal dari bahan alami atau sintesis yang dapat di subtitusikan kedalam tubuh manusia yang berperan sebagai bahan biologis menilai, mempertahankan dan menggantikan jaringan atau organ (Luddin et al., 2023). Salah satu biomaterial yang banyak dikenal ialah hidroksiapatit yang memiliki sifat biokompatibel dan bioaktivitasnya yang luar biasa dengan beragam kegunaan

(Mondal et al., 2023). Permintaan global terhadap biomaterial berbasis hidroksiapatit (HAp) terus meningkat seiring kebutuhan implantasi tulang dan teknologi ramah lingkungan. Di Indonesia, batu kapur ($CaCO_3$) tersedia melimpah, namun pemanfaatannya sebagai prekursor HAp masih sangat terbatas (Nhien et al., 2023).

Hidroksiapatit memiliki rumus Ca10(PO4)6(OH)2 yang secara termodinamiknya memiliki komposisi yang sangat mirip dengan mineral tulang (O'Hare et al., 2010). HAp dapat disintesis secara kimia maupun diekstrak dari sumber alami (Pu et al., 2019) seperti dari tulang mamalia, tulang dan sisik ikan, cangkang hewan (laut, darat dan telur), tanaman (batang, daun, bunga, dan biji buah), alga dan juga dari sumber mineral alami (Gautam et al., 2023). Penulis berpendapat bahwa dibanding sumber biologis, batu kapur memiliki prospek lebih besar karena ketersediaannya tinggi, biaya rendah, dan komposisinya relatif homogen. Meski demikian, pengotor mineral dan variasi parameter sintesis masih menjadi tantangan yang perlu diatasi (Saputra et al., 2024). Dengan melalui berbagai metode, termasuk metode kering (padatan dan mekanokimia), metode basah (presipitasi kimia, hidrolisis, sol-gel, hidrotermal, emulsi, dan sonokimia), dan proses suhu tinggi (pembakaran dan pirolisis) (Sadat-shojai et al., 2013). HAP yang bersumber dari sumber alami yang bersifat stoikiometris lebih mirip dengan struktur tulang alami seperti Na^+, Zn^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Si^{2+}, Ba^{2+}, F^-, CO_3^{2-} (Garbo, Carolina et al., 2020).

Hidroksiapatit tidak hanya diaplikasikan sebagai bahan implan tulang, tetapi juga dilaporkan berfungsi dalam penyisihan logam berat, imobilisasi limbah radioaktif, dan sebagai kandidat material katalis. Produksi hidroksiapatit komersial umumnya dilakukan dengan metode kimia basah (presipitasi), hidrotermal, hidrolisis kalsium fosfat, maupun reaksi sol-gel, yang diketahui membutuhkan biaya tinggi. Penelitian terkait batu kapur sebagai sumber kalsium masih relatif terbatas dibandingkan dengan sumber alami lainnya. Beberapa studi memang telah melaporkan sintesis HAp dari batu kapur dengan metode presipitasi, sol-gel, dan hidrotermal (Rahmah et al., 2025). Namun, sebagian besar hanya berfokus pada hasil karakterisasi tanpa membahas keterkaitan antara parameter sintesis, deviasi Ca/P, dan terbentuknya fasa sekunder.

Batu kapur memiliki kandungan $CaCO_3$ tinggi serta ketersediaan melimpah yang menjadikannya prekursor potensial. Namun, tantangan utama seperti keberadaan pengotor mineral dan pengendalian kondisi sintesis perlu ditinjau lebih mendalam agar batu kapur dapat dioptimalkan sebagai sumber hidroksiapatit. Namun, belum banyak review yang secara

khusus membandingkan efektivitas batu kapur sebagai sumber HAp dengan berbagai metode sintesis, termasuk implikasi terhadap rasio Ca/P dan morfologi. Kajian ini menawarkan kebaruan dengan menyoroti isu deviasi rasio Ca/P, pengaruh pengotor mineral, serta prospek metode ramah lingkungan berbasis biomolekul. Selain itu, strategi doping logam (Ag, Zn, Mg, Fe) juga dibahas karena dapat meningkatkan sifat biologis dan fungsional HAp (Hardian et al., 2023).

Tujuan review ini adalah untuk membahas potensi batu kapur sebagai sumber alami hidroksiapatit, menganalisis perbedaan hasil dari berbagai metode sintesis, serta menyoroti implikasinya bagi aplikasi biomedis maupun lingkungan. Artikel ini bertujuan meninjau metode sintesis HAp berbasis batu kapur, menganalisis pengaruh parameter sintesis terhadap rasio Ca/P, morfologi, dan fasa, serta mengevaluasi tantangan dan prospek pengembangannya untuk aplikasi biomedis maupun lingkungan.

METODE

Artikel ini disusun dengan menggunkan pendekatan literature review untuk meninjau batu kapur ($CaCO_3$) sebagai prekursor hidroksiapatit (Hap).Telaah pustaka dilakukan dengan sistematis dengan beberapa tahap. Pertama, pencarian literatur dilakukan secara daring seperti jurnal internasional bereputasi diantaranya Google Scholar (pintu gerbang utama pencarian literatur), ScienceDirect (Elsevier), SpringerLink, Wiley Online Library, MDPI, RSC dan ACS Publications. Serta jurnal nasional seperti melalui jurnal Sinta. Dimana kata kunci yang digunakan adalah Hidroksiapatit, biomaterial, metode sintesis dari batu kapur, aplikasi. Artikel dengan publikasi primer digunakan dalam pemilihan literatu dalam rentang tahun 2013-2025, baik berupa penelitian eksperimental maupun artikel review yang relevan dengan topik ini.

Dari sekitar 40 artikel yang berhasil diidentifikasi melalui pencarian awal, sebanyak 20 artikel dipilih sebagai referensi utama berdasarkan kriteria relevansi dengan topik, keterbaruan publikasi (2015–2025), serta kelengkapan data karakterisasi (rasio Ca/P, morfologi, rendemen, dan fasa kristal). Selanjutnya, data dari literatur tersebut dianalisis secara naratif dan komparatif untuk mengidentifikasi tren umum, kelebihan dan kekurangan tiap metode sintesis, prospek pengembangan hidroksiapatit berbasis batu kapur juga kesesuaian dengan topik yang diangkat.

Metode telaah ini mengacu pada prinsip transparansi dalam pencarian dan seleksi literatur yang memudahkan pembaca eksternal mencapai temuan serupa (Snyder, 2019), serta mengikuti praktik telaah biomaterial pada penelitian (Sadat-shojai et al., 2013).

HASIL

Batu kapur yang melimpah di berbagai daerah Indonesia menunjukkan potensi tinggi sebagai sumber kalsium untuk sintesis hidroksiapatit (HAp). Data geologi menunjukkan cadangan batu kapur terbesar terdapat di Sumatera Barat sebesar 23,23 miliar ton dari total 81,02% cadangan nasional (Habibie et al., 2017). Kandungan utama batu kapur berupa $CaCO_3$ menjadikannya kandidat utama dalam pembentukan HAp setelah melalui proses kalsinasi.

Tabel 1. Cadangan batu kapur di Indonesia berdasarkan provinsi

No.	Provinsi	Jumlah (Juta Ton)	Informasi
1	NAD	100.857	Jumlah (juta ton) Seluruh cadangan batu kapur diklasifikasikan sebagai sumber daya mineral tereka (termasuk hipotetis dan spekulatif), kecuali cadangan di Nusa Tenggara Timur, sejumlah 61,376 juta ton sebagai cadangan (terduga) terindikasi
2	Sumaterra Utara	5.709	
3	Sumatera Barat	23.273.300	
4	Riau	6.875	
5	Sumatera Selatan	48.631	
6	Bengkulu	2.730	
7	Lampung	2.961	
8	Jawa Barat	672.820	
9	Jawa Tengah dan DIY	125.000	
10	Jawa Timur	416.400	
11	Kalimantan Selatan	1.006.800	
12	Kalimantan Tengah	543.000	
13	NTB	1.917.386	
14	NTT	229.784	
15	Sulawesi Utara dan Gorontalo	66.300	
16	Sulawesi Selatan	19.946	
17	Papua	240.000	

(Habibie et al., 2017).

Proses kalsinasi berperan penting dalam mengonversi $CaCO_3$ menjadi CaO. Penelitian Klinkaewnarong & Utara (2018) dan Jamarun et al., (2018) menunjukkan bahwa suhu di atas 800 °C selama 4–5 jam telah mengubah $CaCO_3$ secara sempurna menjadi CaO. Klinkaewnarong & Utara (2018) menggunakan rentang suhu 800–1100 °C selama 5 jam, sedangkan Habibie et al., (2017). melaporkan suhu optimum 900 °C selama 4 jam untuk memperoleh CaO murni.

Penelitian Jamarun et al., (2018) menggunakan metode presipitasi menunjukkan bahwa peningkatan suhu hingga 90 °C menghasilkan partikel HAp berukuran nanometer dengan morfologi bulat dan rasio Ca/P lebih dari 1,67. Kondisi optimum pada suhu ini memberikan permukaan spesifik lebih luas. Penelitian Darwis, et al., (2024) dengan variasi kecepatan pengadukan menemukan bahwa kecepatan 300 rpm memberikan rendemen tertinggi (55,35s%) dan kemurnian HAp yang baik dengan partikel berbentuk bulat berdiameter sekitar 431 nm serta rasio Ca/P sebesar 3,13.

Melalui metode sol-gel, Sutiyonoa, et.al., (2024) memperoleh rendemen maksimum 93,95% pada pH 10 dan konsentrasi gelatin 30%. Hasil ini sejalan dengan penelitian Rahmah et al., (2025) yang menemukan kondisi optimum pada pH 12 dengan konsentrasi gelatin 30%, menghasilkan HAp dengan morfologi granular berpori dan ukuran partikel sekitar 600 nm serta rasio Ca/P 1,65–1,82.

Pendekatan berbeda dilakukan Sinulingga et al., (2021) dengan menambahkan ion logam Ag, Cu, Zn, dan Mg pada proses kalsinasi-presipitasi. HAp yang dihasilkan memiliki ukuran kristal 38–58 nm. Sampel dengan doping Ag menunjukkan pembentukan fasa β-TCP dan Ag logam, sedangkan doping Cu, Zn, dan Mg menghasilkan HAp murni dengan rasio Ca/P mendekati nilai stoikiometris. Ukuran kristalit menurun menjadi 11–13 nm, menunjukkan peningkatan luas permukaan.

Pada metode ultrasonik, Klinkaewnarong & Utara (2018) melaporkan pembentukan nanopartikel HAp berbentuk jarum dengan ukuran lebar 7,4 nm dan panjang 62,5 nm setelah iradiasi selama 3 jam. Morfologi tersebut memiliki luas permukaan tinggi yang berpotensi untuk aplikasi adsorpsi dan fotokatalisis.

Tabel 2. Ringkasan hasil sintesis hidroksiapatit (HAp) berbasis batu kapur menggunakan berbagai metode dan aplikasinya

Metode ekstraksi	**Rasio Ca/P**	**Phasa kristal**	**Ukuran Partikel**	**Bentuk**	**Referensi**	**aplikasi**
Kalsinasi + Presipitasi	>1.67	HAp + CaO	22.5–68.5 nm	Spherical	(Jamarun et al., 2015).	aplikasi mekanik dan komposit (bone filler, scaffold padat).
Kalsinasi + hidrotermal	1.293 (160^{o}C) 1.296 (200^{o}C)	HAp + CaP (160 C) HAp (200 C)	32–46 nm (160^{o}C) 34–60 nm (200^{o}C)	Spherical	(Jamarun et al., 2018).	aplikasi mekanik dan komposit (bone filler, scaffold padat).
Kalsinasi + Ultrasonik irradiasi	Tidak disebutkan	HAp + $CaHPO_4$	7.4 nm width and 62.5 nm length	Needle-like	(Klinkaewnarong & Utara, 2018)	aplikasi bioaktif, adsorpsi, dan fotokatalisis karena luas permukaan yang besar.
Kalsinasi + presipitasi	Ag-HAp (1,5) Cu-,Zn-,Mg-HAp (1,67)	Ag-HAp (HAp + β-TCP) Cu-,Zn-,Mg-HAp (HAp)	Ag-HAp (40,57 ± 14,63 nm) Cu-HAp (42,80 ± 13,46 nm) ,Zn-HAp (38,85 ± 13,82 nm),Mg-HAp (40,40 ± 14,91 nm)	-	(Sinulingga et al., 2021)	Antibakteri
Sol-Gel	-	HAp-gelatin	443-578 nm	Granular	(Sutiyonoa, et.al., 2024).	Biomedis
Sol-Gel	1,65-1,82	HAp-gelatin	Rata-rata >600 nm	Granular dengan struktur berpori	(Rahmah, dkk., 2025)	Biomedis (perancah gigi)
Presipitasi	3,13	HAp	Rata-rata 431 nm	bulat (spherical)	(Darwis, et al., 2024).	-

Secara umum, kombinasi antara metode kalsinasi dengan presipitasi, hidrotermal, sol-gel, dan ultrasonik menghasilkan variasi ukuran partikel dari 7–600 nm dengan rasio Ca/P antara 1,29–3,13. Setiap metode memiliki karakter khas: presipitasi menghasilkan partikel bulat, hidrotermal lebih seragam, sol-gel berpori granular, dan ultrasonik membentuk morfologi jarum.

PEMBAHASAN

Hidroksiapatit dari Batu Kapur

Sumber biologis seperti tulang mamalia, sumber laut atau akuatik (misalnya tulang ikan, sisik ikan), cangkang hewan serta tumbuhan dan alga biasanya diekstrak untuk dijadikan sumber alami hidroksiapatit (Prakash et al., 2024). Saat ini HAp juga dapat diupgrate dengan penambahan bio-eksttrak untuk membantuk mengendalikan ukuran partikel dan mencegah aglomerasi HAp selama proses sintesisi yang lebih dikenal dengan *green synthesis*. Dengan ini dapat meningkatkan efisiensi dari fungsi HAp sendiri (Adhitiyan et al., 2024). HAp yang diekstrak dari sumber alami merupakan proses yang ramah lingkungan, berkelanjutan, dan ekonomis karena bahannya yang tersedia dalam jumlah besar yang memberikan dampak positif bagi perekonomian, lingkungan dan kesehatan secara umum (Pu et al., 2019). Kalsium dan posfor merupakan penyusun hidroksiapatit dengan perbandingan rasio Ca/P sekitar 1,67, yang sering digunakan dalam studi sebagai rasio stoikiometrik standar (Prakash et al., 2024). Tingginya biaya produksi membuat banyak peneliti berupaya membuat hidroksiapatit dari sumber alami dengan biaya yang lebih murah salah satunya menggunakan batu kapur.

Baru kapur ($CaCO_3$) banyak dipilih sebagai prekursor untuk sintesis HAp karena kelimpahan dan sumber daya dan biaya yang rendah juga memiliki tantangan yang perlu diperhatikan agar kualitas dari HAp yang dihasilkan optimal. Batu kapur memiliki kandungan $CaCO_3$ yang tinggi yang menunjukkan potensi yang besar untuk sintesis HAp. Namun kualitas HAp juga dipengaruhi oleh proses sintesisnya seperti kalsinasi, *sintering* dan *milling*. Stidi pada batu kapur lampung dengan kandungan $CaCO_3$ sekitar 97,43% menunjukkan morfologi dan kristal yang mendekati HAp komersial dengan pengontrolan suhu, waktu *sintering* dan ukuran partikel yang dikendalikan dengan baik (Sukmana et al., 2018). Perlakuan panas (*sintering)* yang tidak tepat juga dapat membentuk fasa baru seperti β-trikalsium fosfat (Ca3(PO4)2), atau β-TCP, yang sering disebut dengan *whitlockite* atau bisa juga dikaitkan dengan pH yang tidak terkontrol selama proses sintesis. Ketika pH menjadi asam (pH < 4,2),

hal ini dapat memfasilitasi pembentukan *whitlockite* (Malau, 2024). Suhu *sintering* dan sumber CaO juga mempengaruhi dari rasio Ca/P HAp (Anayo et al., 2021) dan juga metode ekstraksi yang digunakan dapat mempengaruhi karakterisasi HAp (Division, 2022).

Karena itu, penelitian HAp dari batu kapur idealnya harus mencakup tahap pra-pengolahan (pembersihan mineral asing), pengontrolan kalsinasi (suhu, laju pemanasan), dan analisis impuritas mendetail. Di samping itu, penelitian masa depan perlu mengeksplorasi kombinasi doping (misalnya Sr–Mg) dan sintesis hijau agar keunggulan biologis tetap terjaga tanpa mengorbankan kemurnian fasa kristalin HAp. Oleh karena itu, disimpulkan bahwa dengan kombinasi yang cermat dari parameter-parameter utama seperti tekanan pemadatan, suhu sintering, dan waktu tinggal sintering untuk produksi HAp alami (NHAp), sifat mekanik dapat ditingkatkan.

Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa batu kapur dari berbagai daerah memiliki potensi berbeda tergantung pada kemurnian $CaCO_3$ dan kondisi kalsinasi. Studi Sukmana et al., (2018) dan Saputra et al., (2024) menunjukkan tren serupa bahwa peningkatan suhu dan waktu sintering menghasilkan kristalinitas tinggi, konsisten dengan hasil Malau (2024) yang menemukan pembentukan β-TCP pada pH rendah. Kesamaan ini memperkuat pemahaman bahwa kontrol suhu dan pH menjadi kunci keberhasilan sintesis HAp berbasis batu kapur.

Tantangan dan Prospek Batu Kapur Untuk Hidroksiapatit

Batu kapur ($CaCO_3$) memiliki potensi besar sebagai prekursor hidroksiapatit (HAp) karena kelimpahan dan biaya rendah. Akan tetapi, ada beberapa tantangan yang perlu diatasi supaya kualitas HAp yang dihasilkan optimal seperti, rasio Ca/P sering kali menyimpang dari nilai stoikiometri (1,67) akibat ketidaksempurnaan kalsinasi atau rasio reaktan yang tidak seimbang, sebagaimana dilaporkan pada sintesis Fe-doped HAp/ZnO berbasis batu kapur yang menghasilkan variasi Ca/P dan munculnya fasa sekunder β-TCP dan $CaCO_3$ (Sukmana et al., 2018). Batu kapur alami umumnya mengandung pengotor mineral seperti Si, Al, Mg, dan Fe yang dapat memicu terbentuknya fasa samping (CaO, β-TCP), sehingga menurunkan kemurnian HAp, fenomena ini juga ditemukan pada studi Lampung limestone yang menunjukkan pengaruh kuat milling dan suhu sintering terhadap kristalinitas dan kemurnian fasa (Saputra et al., 2024). Parameter sintesis (suhu, waktu sintering, metode ekstraksi, dll.) juga perlu diperhatikan dapat mempengaruhi morfologi / ukuran partikel HAp (Sukmana et al., 2018). Meskipun demikian, batu kapur menawarkan prospek industri yang lebih baik dibanding sumber biologis karena ketersediaannya dalam jumlah besar dan relatif homogen.

Penelitian lanjutan perlu diarahkan pada optimasi pra-pengolahan, kontrol kondisi sintesis, serta pengembangan metode hijau berbasis biomolekul seperti gelatin (Rahmah et al., 2025). ekaligus eksplorasi strategi doping logam (Fe, Zn, Mg, Ag) pada limestone-derived HAp yang terbukti memengaruhi rasio Ca/P, fasa sekunder, dan sifat fungsional material (Hardian et al., 2023). Hal ini sejalan dengan potensi industri yang ditunjukkan oleh studi sintering HAp berbasis limestone Lampung dengan karakteristik mendekati HAp komersial (Saputra et al., 2024).

Temuan ini menegaskan bahwa batu kapur lokal dapat menjadi sumber alternatif Ca yang murah dan berlimpah untuk produksi HAp skala industri maupun biomedis, menggantikan bahan impor. Pengembangan metode hijau berbasis biomolekul seperti gelatin membuka peluang menuju proses sintesis berkelanjutan. Meskipun demikian, penelitian lanjutan perlu menilai performa fungsional HAp batu kapur dalam aplikasi aktual seperti penyembuhan tulang atau fotokatalisis limbah organik.

KESIMPULAN

Artikel ini meninjau potensi batu kapur ($CaCO_3$) sebagai prekursor hidroksiapatit (HAp) melalui berbagai metode sintesis (presipitasi, sol-gel, hidrotermal, ultrasonik). Kualitas HAp sangat dipengaruhi oleh parameter sintesis, yang menentukan rasio Ca/P, morfologi, dan kemurnian fasa. Deviasi dari nilai stoikiometri umumnya disebabkan oleh ketidaksempurnaan kalsinasi, pengotor mineral, dan terbentuknya fasa sekunder. Kontribusi utama kajian ini adalah: (1) menjelaskan hubungan parameter sintesis dengan deviasi Ca/P, (2) menyoroti pengaruh pengotor mineral dan fasa sekunder, serta (3) menawarkan batu kapur sebagai sumber Ca kompetitif dengan prospek *green synthesis* dan doping logam. Rekomendasi penelitian selanjutnya mencakup optimasi pra-pengolahan batu kapur, penerapan sintesis ramah lingkungan, eksplorasi doping multi-logam (Ag, Zn, Mg, Fe), dan kajian skala industri untuk aplikasi lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

Adhitiyan, T., Dhanaraj, K., Gubendhiran, S., Suresh, G., Thenpandiyan, E., & Prasath, M. (2024). Green synthesized silver and zinc doped hydroxyapatite photocatalysts to remove methylene blue and Rhodamine B dyes from industrial wastewater. *Chemical Physics Impact, 9*(March), 100695. https://doi.org/10.1016/j.chphi.2024.100695

Anayo, O., Abdu, O., Ibrahim, S., & Bello, A. (2021). Synthesis techniques , characterization and mechanical properties of natural derived hydroxyapatite scaffolds for bone implants : a review. *SN Applied Sciences*. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04795-y

Darwis, D., Hardi, J., Abd. Rahman, L. M., Sesa, E., N. I. I., & Musdalifa, V. M. (2024). Synthesis and characterization of hydroxyapatite from limestone. *Journal of Chemical Science 19*(4), 56–63.

Division, E. M. (2022). Trends in the development of hydroxyapatite from natural sources for biomedical applications. *WIT Transactions on Ecology and the Environment 257*, 199–210. https://doi.org/10.2495/WMEI220171

Garbo, Carolina, J., Este, M. D., Demazeau, G., Mocanu, A., Roman, C., & Tomoaia-cotisel, M. (2020). Advanced Mg , Zn , Sr , Si multi-substituted hydroxyapatites for bone regeneration. *International Journal of Nanomedicine,* 1037–1058. doi: 10.2147/IJN.S226630

Gautam, D., Dolma, K. G., Khandelwal, B., Gupta, M., Singh, M., Mahboob, T., Teotia, A., Thota, P., Bhattacharya, J., Goyal, R., Oliveira, S. M. R., Pereira, M. de L., Wiart, C., Wilairatana, P., Eawsakul, K., Rahmatullah, M., Saravanabhavan, S. S., & Nissapatorn, V. (2023). Green synthesis of silver nanoparticles using Ocimum sanctum Linn. and its antibacterial activity against multidrug resistant *Acinetobacter baumannii*. *PeerJ*, *11*, 1–26. https://doi.org/10.7717/peerj.15590

Habibie, S., Hadi, A., Wargadipura, S., Gustiono, D., Herdianto, N., Riswoko, A., Nikmatin, S., & Clarke, S. (2017). Production and characterization of hydroxyapatite bone substitute material performed from Indonesian limestone. *International Journal of Biomedical Engineering and Science,* *4*(1), 11–23. https://doi.org/10.5121/ijbes.2017.4102

Hardian, A., Dewi, R., Syarif, D. G., & Murniati, A. (2023). Synthesis and characterization of fe-doped hydroxyapatite / zno nanocomposites using the coprecipitation method from processed limestone. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi 26*(10), 404–410. https://doi.org/10.14710/jksa.26.10.404-410

Jamarun, N., Asril, A., Zilfa, Z., & Septiani, U. (2018). *Original* article effect of hydrothermal temperature on synthesis of hydroxyapatite from limestone via hydrothermal method. *International Journal of Applied Pharmaceutics, 10*(1), 8–11. DOI: http://dx.doi.org/10.22159/ijap.2018v10i1.23278 I

Klinkaewnarong, J., & Utara, S. (2018). Ultrasonic-assisted conversion of limestone into needle-like hydroxyapatite nanoparticles. *Ultrasonics - Sonochemistry*. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.04.002

Luddin, N., If, A. H., Nn, M. N., & Smasm, N. (2023). *A* Review on Natural Resources and Method of Hydroxyapatite Synthesis for Biomedical Application. *Materials Research and Development,* 8(1), 785–790. https://doi.org/10.31031/MRD.2023.08.000676

Malau, N. D. (2024). Synthesis and characterization of hydroxyapatite derived from limestone. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, *46*(1), 298–304. https://ijpsat.org/

Mondal, S., Park, S., Choi, J., Vu, T. T. H., Doan, V. H. M., Vo, T. T., Lee, B., & Oh, J. (2023). Hydroxyapatite: A journey from biomaterials to advanced functional

materials. *Advances in Colloid and Interface Science*, 321(October), 103013. https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.103013

Nhien, H., Thai, D., & Thi, T. (2023). Improving safety and efficiency in graphene oxide production technology. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 2238–7854. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.050 2238-7854/©

Prakash, M., Rajan, H. K., Chandraprabha, M. N., Shetty, S., Mukherjee, T., Kumar, S. G., Prakash, M. (2024). Recent developments in green synthesis of hydroxyapatite nanocomposites : relevance to biomedical and environmental applications. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 17(1), 1–26. https://doi.org/10.1080/17518253.2024.2422409

Pu, N. A. S. M., Koshy, P., Abdullah, H. Z., Idris, M. I., & Lee, T. C. (2019). Syntheses of hydroxyapatite from natural sources. *Heliyon*, *5*(April), e01588. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01588

Rahmah, N. A., Rafli, M., Wahyudi, A., & Edahwati, L. (2025). Effect of in situ gelatin addition on the synthesis and characteristics of limestone based hydroxyapatite using sol-gel method. *Jurnal Teknik*, *46*(3), 287–294. https://doi.org/10.14710/teknik.v46i3.67466

Saputra, R. A., Sukmana, I., Hendriyanto, A., Riszal, A., Hendronursito, Y., & Wicaksono, M. A. (2024). Sintering behavior of Lampung limestone-based hydroxyapatite. *Avian Journal of Engineering Research,* 6(2), 72–78. https://doi.org/10.47355/AVIA.V6I2.141

Sinulingga, K., Sirait, M., Siregar, N., & Abdullah, H. (2021). Antibacterial activity of metal-doped hydroxyapatite nanoparticles. *RSC Advances, 11,* 15896–15904. https://doi.org/10.1039/d1ra00308a

Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology : An overview and guidelines. *Journal of Business Research, 104*(March), 333–339. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039 Received

Sukmana, I., Hendriyanto, A., & Savetlana, S. (2018). The effect of sintering parameter on the properties of hydroxyapatite from local limestone for bone implant application. *AIP Conference Proceedings*, *030039*. https://doi.org/10.1063/1.5042959

Sutiyonoa, et.al., (2024). (n.d.). optimization of nano-hydroxyapatite production from limestone with effect of gelatin concentration and ph in sol-gel synthesis. *International Journal of Environmental and Industrial Science and Engineering.* https://ijeise.upnjatim.ac.id/