

Penambahan Magnesium Oksida (MgO) Terhadap Sifat Sintesis Hidroksiapatit Berpori

Firmansyah Sophian Putra*, Muhammad Jihad Abror Annaufal, Luluk Edahwati

Program Studi Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: fputra356@gmail.com

Diterima: 8 Oktober 2025

Disetujui: 15 Oktober 2025

Abstract

Hydroxyapatite (HAp) is a bioceramic material widely used in the medical field, especially as a bone filler for bone tissue regeneration. However, pure HAp has low mechanical strength so that material modification is required. This study aims to examine the effect of the addition of Magnesium Oxide (MgO) and Polyvinyl Alcohol (PVA) on the morphological characteristics, functional groups, pore size, porosity, and Ca/P content of porous hydroxyapatite synthesized by the precipitation method. Variations in the weight percentage of MgO (14–18% wt) and the ratio of distilled water and Polyvinyl Alcohol (PVA) solution (20–60%) were used in the preparation of porous hydroxyapatite. Characterization includes spectrophotometric tests to analyze Ca/P content, morphological tests using SEM, functional group analysis using FTIR, and surface area analysis using BET. Based on the results of the test analysis that has been carried out, it is known that the porous hydroxyapatite sample with a variation of 1,8% MgO addition and 40% PVA ratio has a Ca/P value of 1,67 and has good characteristics for biomaterial applications with a granular morphological structure surface area of 7.3849 m²/g with an average pore size of 2.0274 nm, and is not toxic to health.

Keywords: *hydroxyapatite, magnesium oxide, additives, biomedical application*

Abstrak

Hidroksiapatit (HAp) merupakan bahan biokeramik yang banyak digunakan dalam bidang medis, terutama sebagai bone filler untuk regenerasi jaringan tulang. Namun, HAp murni memiliki kekuatan mekanik yang rendah sehingga diperlukan modifikasi material. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh penambahan *Magnesium Oksida* (MgO) dan *Polivinil Alkohol* (PVA) terhadap karakteristik morfologi, gugus fungsi, ukuran pori, porositas, dan kadar Ca/P hidroksiapatit berpori yang disintesis melalui metode presipitasi. Variasi persen berat MgO (14–18% wt) serta rasio aquadest dan larutan *Polivinil Alkohol* (PVA) (20–60%) digunakan dalam pembuatan hidroksiapatit berpori. Karakterisasi meliputi uji spektrofotometri untuk menganalisis kadar Ca/P, uji morfologi menggunakan SEM, analisis gugus fungsi dengan FTIR, dan analisis permukaan area dengan BET. Berdasarkan hasil analisis uji yang telah dilakukan, diketahui bahwa sampel hidroksiapatit berpori dengan variasi penambahan 1,8 % MgO dan rasio PVA 40% memiliki nilai Ca/P sebesar 1,67 dan mempunyai karakteristik yang baik untuk aplikasi biomaterial dengan struktur morfologi granula, luas permukaan sebesar 7, 3849 m²/g dengan rata rata ukuran pori sebesar 2,0274 nm, dan tidak bersifat toksik bagi kesehatan.

Kata Kunci: *hidroksiapatit, magnesium oksida, zat aditif, aplikasi biomaterial*

1. Pendahuluan

Hidroksiapatit merupakan bentuk dari mineral kalsium apatit yang mengandung unsur kalsium dan fosfat. Hidroksiapatit dengan rumus molekul Ca₁₀(PO)₆(OH)₂. Hidroksiapatit bisa didapatkan dari sumber kalsium sintetik dan alami seperti batu kapur yang mana hidroksiapatit merupakan salah satu biokeramik sehingga dapat dimanfaatkan sebagai implan gigi dan penguat tulang atau *Bone Filler*. Penggunaan *bone filler* umumnya memiliki standard pemenuhan seperti ukuran pori suatu bahan. Menurut [1] berdasarkan standard ilmu kedokteran internasional, pada implant tulang dengan permukaan berpori akan optimum dengan ukuran pori sekitar 50 hingga 400 μm dengan porositas kurang lebih 65,26%. Sehingga, dibutuhkan perlakuan khusus untuk mendapatkan standard karakterisasi hidroksiapatit berpori sebagai *bone filler*. Pada penelitian lain [2], menyatakan bahwa untuk keseimbangan fungsi biologis dan mekanik, porositas hidroksiapatit cukup baik pada kisaran 30-60% sehingga implan berfungsi optimal. Magnesium oksida atau MgO merupakan salah satu kandidat zat aditif karena magnesium merupakan salah satu unsur yang terdapat dalam tulang dan karakteristik mekanik yang baik. MgO telah diperkenalkan sebagai zat aditif sintering

untuk meningkatkan sifat mekanik hidroksiapatit. Penambahan zat aditif pada sintesis hidroksiapatit berpengaruh dalam mengontrol pertumbuhan ukuran pori dan mengatur keseragaman struktur kristal [3]. Selain itu, menurut penelitian [4], penambahan MgO dapat menstimulasi pertumbuhan osteoblast dalam melakukan regenerasi tulang. Penambahan MgO bertujuan untuk membantu meregenerasi tulang dan mengurangi pertumbuhan bakteri pada hidroksiapatit. Selain itu, juga dapat membentuk struktur granula pada kristal hidroksiapatit [5].

Penelitian tentang hidroksiapatit dengan zat aditif telah dilakukan sebelumnya. Kurniasari melakukan penelitian menggunakan zat aditif MgO dengan metode injeksi dan komposisi MgO pada 8-14 wt%. Proses pemanasan dilakukan 3 tahap. Tahap pengeringan dengan suhu 80 selama 2 jam, tahap kedua pada suhu 650 selama 1 jam dan tahap terakhir pada suhu 1200 selama 3 jam [6]. Penelitian yang dilakukan oleh Kurniasari tersebut menunjukkan variasi terbaik penambahan zat aditif MgO nanopartikel terdapat pada penambahan terbesar yaitu 14 wt% MgO dengan porositas 68,60% dan ukuran pori 100,3-314,3 μm , namun belum mengkaji pengaruh kadar polyvinyl alkohol dan zat aditif MgO yang lebih besar.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan MgO yang lebih besar serta rasio aquadest dan larutan polivinil alkohol (PVA) terhadap karakteristik hidroksiapatit berpori. Penambahan MgO dapat meningkatkan sifat biokompatibilitas, degradasi dan antimikroba dari hidroksiapatit berpori. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap bidang kesehatan terutama pada implan gigi, tulang dan penggunaan lain

2. Metode Penelitian

Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini berupa serbuk CaO, larutan H_3PO_4 85%, Aquadest, larutan NH_4OH 2M, serbuk MgO, busa polyurethane dan larutan polivinil alkohol (PVA). Peralatan yang digunakan antara lain beaker glass 500 ml, corong kaca, erlenmeyer 250 ml, gelas ukur 50 ml dan 200 ml, pipet tetes dan serangkaian alat magnetic stirrer



Gambar 1. Rangkaian Alat Magnetic Stirrer

Keterangan :

1. Klem
2. Statif
3. Kabel Thermocouple
4. Thermocouple
5. Beaker Glass
6. Magnetic Stirrer
7. Stop kontak
8. Kabel Magnetic Stirrer

Prosedur Penelitian

Prosedur kerja pada penelitian ini melalui tiga tahapan yaitu sintesis hidroksiapatit (HAp), pembuatan hidroksiapatit (HAp) berpori, dan melakukan karakterisasi pada hidroksiapatit berpori.

Sintesis Hidroksiapatit

Preparasi bahan dilakukan dengan menyiapkan serbuk kalsium oksida (CaO) dan ditimbang hingga diperoleh berat 10 gram. Selanjutnya adalah tahapan sintesis hidroksiapatit. Serbuk CaO dicampurkan

dengan aquadest 100 ml, sehingga diperoleh suspensi kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 0,5 M dan dipanaskan pada suhu 40°C pada magnetic stirrer. Larutan suspensi kemudian ditambahkan asam fosfat (H_3PO_4) 85% 0,3 M sebanyak 100 ml. Penambahan dilakukan tetes demi tetes dengan 17 sampai 18 tetes per menit hingga habis sambil diaduk magnetic stirrer pada suhu ruang dengan kecepatan pengadukan 250 rpm. Selama penambahan asam fosfat, terjadi penurunan pH suspensi sehingga pH diatur dengan bantuan amonium hidroksida (NH_4OH) tetes demi tetes hingga diperoleh pH 11 sambil diaduk dengan kecepatan 250 rpm selama 30 menit. Suspensi didiamkan atau *aging* pada suhu ruang selama 24 jam untuk penumbuhan kristal hidroksiapatit (HAp). Endapan yang terbentuk disaring dengan kertas saring kemudian dicuci dengan aquadest hingga mencapai pH 7. Endapan kemudian dikeringkan di oven pada suhu 110°C selama 2 jam. Setelah itu dilakukan penimbangan kristal hidroksiapatit (HAp).

Pembuatan Hidroksiapatit Berpori

Pembuatan Hidroksiapatit berpori dilakukan dengan penambahan serbuk magnesium oksida (MgO) dengan variasi penambahan berat 14%wt, 15%wt, 16%wt, 17%wt, 18%wt. Kemudian, campuran serbuk ditambahkan aquadest dan larutan Polivinil alkohol (PVA) hingga diperoleh hidroksiapatit slurry dengan rasio penambahan aquadest dan larutan Polivinil alkohol (PVA) 20%v, 40%v, 50%v, 60%v, dan 80%v. Setelah itu, memasukkan hidroksiapatit slurry ke busa *polyurethane*. Selanjutnya, sampel dilakukan pengeringan dengan oven pada suhu 80°C selama 2 jam. Tahap akhir dilakukan proses sintering pada suhu 900°C selama 3 jam untuk menghilangkan busa *polyurethane* dan kandungan Polivinil alkohol (PVA).

Karakterisasi Hidroksiapatit Berpori

Hasil sintesis hidroksiapatit kemudian dilakukan 4 uji yaitu identifikasi kadar Ca/P pada sampel hidroksiapatit menggunakan spektrofotometri, identifikasi senyawa yang terkandung dalam sampel hidroksiapatit dengan uji FTIR (*Fourier Transform Infra Red*), identifikasi struktur morfologi hidroksiapatit dengan menggunakan alat uji SEM (*Scanning Electron Microscope*), dan identifikasi luas permukaan dan ukuran pori menggunakan alat uji BET (*Brunnauer-Emmet-Teller*).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis Sampel Hidroksiapatit Dengan Spektrofotometri

Berdasarkan dari **Tabel 1**, dapat dilihat bahwa hidroksiapatit (HAp) pada proses sintesis yang telah ditambahkan zat aditif Magnesium Oksida (MgO) diperoleh nilai rasio Ca/P pada sampel pada berbagai variasi penambahan MgO dan konsentrasi larutan PVA. Pada hasil uji spektrofotometri, didapati bahwa kadar polyvinyl alkohol tidak terlalu berpengaruh pada kadar Ca/P. Menurut [7], penambahan PVA tidak terlalu mempengaruhi kadar Ca/P pada hidroksiapatit, namun dapat mendekatkan Ca/P pada kadar 1,67.

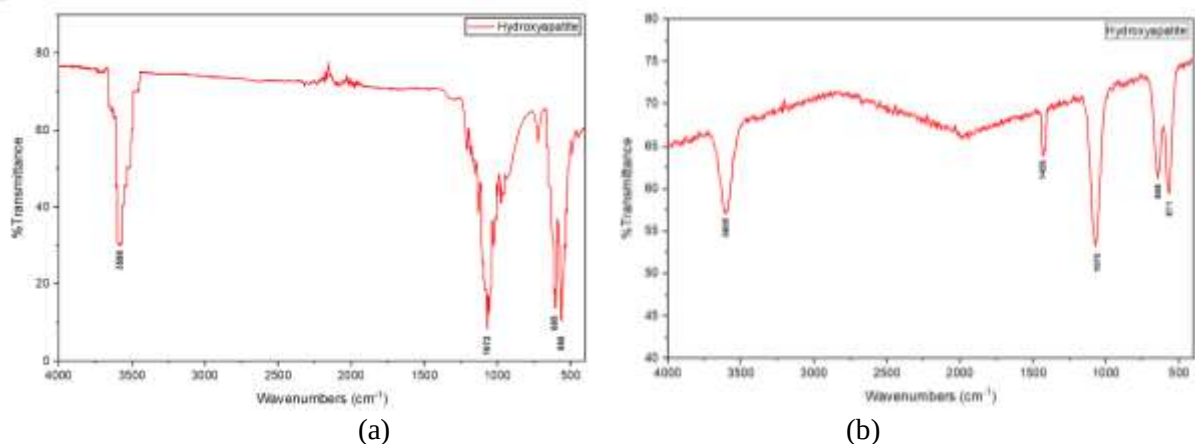
Tabel 1. Kadar Ca/P Hasil Spektrofotometri Hidroksiapatit-Magnesium Oksida

Gram MgO	PVA %	Ca, %	P, %	Ca/P
1,4	20	32,8	15,88	2,06549
1,4	40	30,55	15	2,03667
1,4	60	32,2	15,89	2,02643
1,5	20	33,29	16,45	2,02371
1,5	40	29,58	14,7	2,01224
1,5	60	31,24	15,61	2,00128
1,6	20	27,56	14,1	1,95461
1,6	40	26,1	13,42	1,94486
1,6	60	23,8	12,12	1,9637
1,7	20	28,51	14,8	1,92635
1,7	40	27,33	14,35	1,90453
1,7	60	29,37	16,2	1,81296
1,8	20	29,8	17,35	1,71758
1,8	40	24,35	14,57	1,67124
1,8	60	25,47	16,52	1,54177

Penambahan PVA berfungsi sebagai perekat partikel HAp-MgO dan pengatur ukuran butir, struktur kristal, dan bentuk partikel setelah kalsinasi. Sedangkan, pada peningkatan kadar MgO cenderung menurunkan nilai Ca/P. Menurut [3], kadar Ca/P yang menurun disebabkan oleh penambahan MgO. MgO yang mensubstitusi ion Ca^{2+} dapat menyebabkan rasio Ca/P berkurang. Diperoleh kadar Ca/P 1,67 pada sampel dengan variasi penambahan MgO 1,8 gram dan kadar PVA 40% sehingga menjadi komposisi terbaik yang didapat sebagai aplikasi *bone filler*. Variasi ini menunjukkan komposisi yang seimbang antara ion Ca^{2+} dan PO_4^{3-} . Komposisi dengan rasio Ca/P mendekati 1,67 berpotensi memiliki biokompatibilitas dan bioaktivitas yang lebih baik, sehingga cocok digunakan sebagai bone filler dan pada kadar tersebut paling menyerupai komposisi mineral tulang sehingga memfasilitasi osteointegrasi [8]. Kadar Ca/P yang terlalu tinggi menunjukkan kelebihan kalsium, sedangkan kadar yang terlalu rendah menunjukkan kekurangan kalsium atau kelebihan fosfat [9].

3.2 Analisis Sampel Hidroksiapatit Menggunakan FTIR

Pada penelitian ini analisis FTIR bertujuan untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada PVA dan Polyurethane. Setelah bahan difurnace diharapkan PVA dan polyurethane menghilang. Uji FTIR difokuskan pada sampel yang memiliki kadar Ca/P mendekati 1,67 yaitu menggunakan sampel hidroksiapatit dengan variasi zat aditif MgO 1,8 gram dan kadar PVA 20% serta 40%.



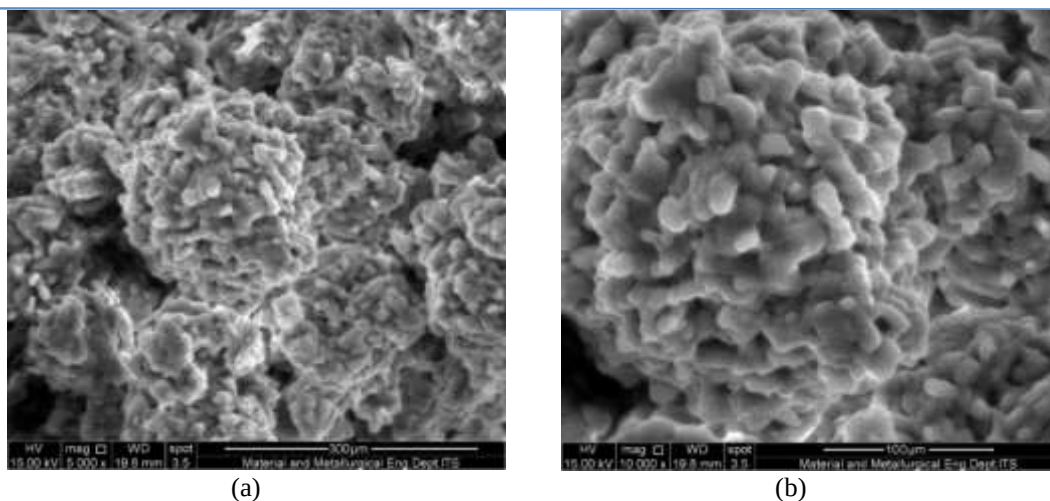
Gambar 2. Hasil Pengujian FTIR Sampel Hidroksiapatit Variasi (a) 1,8 Gram MgO 40% PVA, (b) 1,8 Gram MgO 20% PVA.

Dari **Gambar 2** diatas diperoleh hasil serapan radiasi inframerah sampel hidroksiapatit menunjukan bahwa adanya gugus fungsi fosfat (PO_4^{3-}) pada nilai gelombang 1072 cm^{-1} , 1075 cm^{-1} dan 571 cm^{-1} . Gugus fosfat pada serapan inframerah pada rentang yang mendekati 1037 cm^{-1} , 560 cm^{-1} dan 1075 cm^{-1} . Menandakan adanya gugus fungsi fosfat ditandai dengan ikatan senyawa $\text{O} - \text{P} - \text{O}$ yang simetris[10]. Serapan inframerah pada kisaran 603 cm^{-1} menunjukkan adanya *asymmetric stretching mode* dan *symmetric bending mode* dari $\text{P} - \text{O}$ pada gugus fungsi PO_4^{3-} [11]. Pada sampel 1,8 gram MgO, 20% PVA ditemukan gugus karbonat (CO_3^{2-}) pada serapan inframerah bilangan gelombang 1426 cm^{-1} . Puncak yang lebar pada $1400\text{-}1550\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya kuantitas yang besar dari ion karbonat [12]. Adanya puncak pada $1455\text{-}1410\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya CaCO_3 pada permukaan [13].

Pada uji FTIR ditemukan ada gugus hidroksil (OH^-) pada nilai gelombang 3580 cm^{-1} dan 3605 cm^{-1} . Gugus fungsi hidroksil ditandai dengan adanya vibrasi gugus fungsi $\text{H} - \text{O} - \text{H}$ [14]. Hasil FTIR pada sampel hidroksiapatit menunjukkan bahwa terlihat sinar inframerah oleh alat uji FTIR berupa gugus fungsi pada senyawa hidroksiapatit dan membuktikan tidak adanya senyawa yang berbahaya bagi tubuh, sehingga dapat dikatakan sampel dapat digunakan sebagai *bone filler*.

3.3 Analisis Sampel Hidroksiapatit Menggunakan SEM

Pada porositas hidroksiapatit, menurut [2], tinjauan parameter desain dan hubungan dengan osteogenesis yang relevan untuk memilih porositas menengah 30–60% agar hidroksiapatit seimbang pada fungsi biologis dan mekanis. Penambahan zat aditif MgO dapat menyebabkan penurunan ukuran pori seiring penambahan komposisi zat aditif MgO nanopartikel. Hal tersebut disebabkan penambahan zat aditif yang berukuran nanopartikel akan mengisi hidroksiapatit di ruang ruang yang kosong sehingga dapat memperkecil ukuran pori.



Gambar 3. Hasil Uji *Scanning Electron Microscopic* (SEM) Hidroksiapatit dengan Perbesaran (a) 500x, (b) 1000x

Pada hasil SEM, diperoleh struktur morfologi dari kristal hidroksiapatit berupa agregat granula berpori. Hal tersebut menunjukkan sampel hidroksiapatit sangat baik digunakan sebagai aplikasi biomedis baik implan gigi maupun implan tulang. Menurut [15], mikrostruktur dengan banyak micropore, serta permukaan yang sangat kasar dapat meningkatkan bioaktivitas, adsorpsi ion, dan kemampuan pembentukan tulang baru (*osseintegration*). Berdasarkan hasil analisis, ukuran pori pada sampel hidroksiapatit berpori dengan penambahan MgO nanopartikel telah memenuhi kriteria ideal sebagai material *bone filler*.

3.4 Analisis Sampel Hidroksiapatit Menggunakan BET (*Brunnauer Emmet Teller*)

Pengujian BET adalah teknik fundamental yang digunakan untuk mengukur luas permukaan spesifik dari material berpori. Hasil pengujian tersebut memberikan besar luas permukaan dan total volume pori pada sampel hidroksiapatit. Berikut merupakan data hasil uji BET.

Tabel 2. Hasil Uji BET Pada Sampel Hidroksiapatit (*Surface Area*)

Luas Permukaan	Hasil Uji Sampel Hidroksiapatit
Multipoint BET	7.38497 m ² /g
BJH adsorption	2.05361 m ² /g
BJH desorption	2.08554 m ² /g

Berdasarkan data pada **Tabel 2**, diperoleh nilai luas permukaan sebesar 7,3489 m²/g. Hasil ini mengindikasikan bahwa hidroksiapatit yang berhasil disintesis memiliki karakteristik berpori, meskipun nilai luas permukaannya tergolong rendah [16], menemukan pada penelitiannya bahwa luas permukaan hidroksiapatit berpori umumnya berada dalam rentang 7,31–18,25 m²/g. Rendahnya luas permukaan pada sampel ini diduga dipengaruhi oleh penambahan aditif MgO. Hal ini terjadi karena partikel MgO yang berukuran nano dapat menempati ruang-ruang kosong pada struktur hidroksiapatit, sehingga menyebabkan berkurangnya luas permukaan pori.

Tabel 3. Hasil Uji BET Pada Sampel Hidroksiapatit (*Pore Volume*)

Ukuran Pori	Hasil Uji Sampel Hidroksiapatit
Total Pore Volume	0.00748629 cm ³ /g
Average Pore Size	2.02744 nm

Berdasarkan **Tabel 3**, hasil analisis menunjukkan volume pori sebesar 0,00748 cm³/g dengan rata-rata diameter pori 2,03 nm. Nilai ini termasuk dalam batas bawah kategori mesopori menurut klasifikasi IUPAC (2–50 nm) [17]. Temuan tersebut didukung oleh analisis BJH adsorption dan desorption yang menghasilkan radius pori masing-masing 2,04 nm dan 2,05 nm. Distribusi pori pada skala nanometer mengindikasikan bahwa hidroksiapatit yang dihasilkan memiliki karakteristik mikropori hingga mesopori halus. Namun, berdasarkan [1] ukuran pori ideal untuk implan tulang berkisar antara 50–400 µm. Dengan

demikian, ukuran pori hasil uji yang berada di bawah 10 nm masih belum sesuai untuk mendukung proses osteointegrasi. Walaupun begitu, material ini tetap berpotensi digunakan sebagai biomaterial, misalnya dalam aplikasi bone graft, mineralisasi apatite, adsorpsi protein, maupun penguatan jaringan tulang, karena struktur porinya serta sifat biokompatibilitas yang dimilikinya. [18].

4. Kesimpulan

Hidroksiapatit (HAp) dengan penambahan MgO dan PVA berhasil disintesis, menghasilkan morfologi granula berpori yang sesuai untuk aplikasi biomedis. Penambahan MgO meningkatkan bioaktivitas dan membantu dalam pembentukan granula pada struktur kristal. PVA membantu homogenisasi partikel, pengatur ukuran pori dan berfungsi sebagai perekat partikel HAp-MgO. Sampel hidroksiapatit variasi 1,8 gram MgO 40% PVA dengan rasio Ca/P mendekati 1,67 memiliki luas permukaan sebesar 7,3849 m²/g dengan rata rata ukuran pori sebesar 2,0274 nm menunjukkan sifat paling sesuai untuk aplikasi sebagai biomaterial dan tidak terdeteksi senyawa toksik.

5. References

- [1] A. Barfeie, J. Wilson, and J. Rees, "Implant surface characteristics and their effect on osseointegration," Mar. 13, 2015, *Nature Publishing Group*. doi: 10.1038/sj.bdj.2015.171.
- [2] Ghassemi, Toktam, et al. "Current concepts in scaffolding for bone tissue engineering." *Archives of bone and joint surgery* 6.2 (2018): 90.
- [3] V. S. Bystrov, E. V. Paramonova, L. A. Avakyan, N. V. Eremina, S. V. Makarova, and N. V. Bulina, "Effect of Magnesium Substitution on Structural Features and Properties of Hydroxyapatite," *Materials*, vol. 16, no. 17, Sep. 2023, doi: 10.3390/ma16175945.
- [4] S. K. Padmanabhan *et al.*, "Mechanical and biological properties of magnesium-and silicon-substituted hydroxyapatite scaffolds," *Materials*, vol. 14, no. 22, Nov. 2021, doi: 10.3390/ma14226942.
- [5] C. C. Coelho *et al.*, "The antibacterial and angiogenic effect of magnesium oxide in a hydroxyapatite bone substitute," *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-76063-9.
- [6] F. Kurniasari, "Pengaruh Penambahan Zat Aditif MgO Nanopartikel Terhadap Karakteristik Hidroksiapatit Berpori Sebagai Bone Filler.," Physycs, Universitas Airlangga, Surabaya, 2015.
- [7] P. Panyasiri, N. T. Lam, and P. Sukyai, "The Effect of Hydroxyapatite Prepared by In Situ Synthesis on the Properties of Poly (Vinyl Alcohol)/Cellulose Nanocrystals Biomaterial," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 28, pp. 141–151, 2019.
- [8] E. Fiume, G. Magnaterra, A. Rahdar, E. Verné, and F. Baino, "Hydroxyapatite for biomedical applications: A short overview," Dec. 01, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/ceramics4040039.
- [9] A. Forouzesh, F. Forouzesh, S. S. Foroushani, A. Forouzesh, and E. Zand, "A new method for calculating copper content and determining appropriate copper levels in foods," *Revista Chilena de Nutricion*, vol. 48, no. 6, pp. 862–873, Dec. 2021, doi: 10.4067/S0717-75182021000600862.
- [10] Pudjiastuti, Aida Rachman. "Preparasi hidroksiapatit dari tulang sapi dengan metode kombinasi ultrasonik dan spray drying." *Universitas Indonesia, Depok* (2014).
- [11] S. Hossain and S. Ahmed, "FTIR spectrum analysis to predict the crystalline and amorphous phases of hydroxyapatite: a comparison of vibrational motion to reflection," *RSC Adv*, vol. 13, no. 21, pp. 14625–14630, May 2023, doi: 10.1039/d3ra02580b.
- [12] C. C. Coelho, L. Grenho, P. S. Gomes, P. A. Quadros, and M. H. Fernandes, "Nano-hydroxyapatite in oral care cosmetics: characterization and cytotoxicity assessment," *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-47491-z.
- [13] S. Joschek, B. Nies, R. Krotz, and A. Göpferich, "Chemical and physicochemical characterization of porous hydroxyapatite ceramics made of natural bone," *Biomaterials*, vol. 21, no. 16, pp. 1645–1658, 2000.
- [14] Azkiyah, Fardatul. *Optimalisasi Variasi Komposisi Penambahan Zno Nanopartikel Terhadap Karakteristik Hidroksiapatit Berpori Sebagai Bone Filler*. Diss. Universitas Airlangga, 2015.
- [15] M. Trzaskowska *et al.*, "Biocompatible nanocomposite hydroxyapatite-based granules with increased specific surface area and bioresorbability for bone regenerative medicine applications," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-79822-0.
- [16] W. L. Xu *et al.*, "Effect of heat-treatment on microstructure of hydroxyapatite porous microspheres for enhanced biocompatibility," *Journal of Saudi Chemical Society*, vol. 29, no. 3, Jul. 2025, doi: 10.1007/s44442-025-00010-4.

-
- [17] McNaught, Alan D., and Alan D. McNaught. *Compendium of chemical terminology*. Vol. 1669. Oxford: Blackwell Science, 1997.
- [18] R. Rial, M. González-durruthy, Z. Liu, and J. M. Ruso, “Advanced materials based on nanosized hydroxyapatite,” Jun. 01, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/molecules26113190.