

Sintesis dan Karakterisasi Hidroksiapatit dari Cangkang Kepiting dengan Metode Sol Gel

Juvita Retno Dwipayanti, Yuani Firanita, Srie Muljani*

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

*Koresponden email: sriemuljani@upnjatim.ac.id

Diterima: 10 April 2026

Disetujui: 17 April 2026

Abstract

This study aims to synthesize and characterize hydroxyapatite derived from crab shell waste using the sol-gel method, as well as to determine the effect of pH and sintering temperature on the resulting product. Crab shells were utilized as a calcium source due to their high CaCO_3 content and potential as an environmentally friendly raw material. The synthesis process was carried out using pH variations 7–11 and sintering temperatures 400–800°C. The results showed that the hydroxyapatite yield ranged from 51–65%. XRF analysis indicated that the best condition was achieved at pH 7 and a sintering temperature of 800°C with a Ca/P ratio of 2.67, which is higher than the standard value of 1.67, likely due to the high calcium content and the presence of Mg^{2+} ions in the sample. XRD analysis revealed that hydroxyapatite was formed but not completely pure, as a secondary phase of Calcium Magnesium Hydrogen Phosphate was still detected. However, several diffraction peaks were consistent with the standard hydroxyapatite pattern. This study demonstrates that crab shell waste has potential as a raw material for hydroxyapatite with proper process control.

Keywords: *hydroxyapatite, crab shell, sol gel, sintering temperature, ca/p ratio*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi hidroksiapatit dari limbah cangkang kepiting menggunakan metode sol-gel serta mengetahui pengaruh pH dan suhu sintering terhadap hasil yang diperoleh. Cangkang kepiting dimanfaatkan sebagai sumber kalsium karena memiliki kandungan CaCO_3 yang tinggi dan berpotensi sebagai bahan baku ramah lingkungan. Variasi pH 7–11 dan suhu sintering 400–800°C digunakan dalam proses sintesis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa yield hidroksiapatit berada pada rentang 51–65%. Analisis XRF menunjukkan kondisi terbaik pada pH 7 dan suhu sintering 800°C dengan rasio Ca/P sebesar 2,67, dimana nilai tersebut masih lebih tinggi dari standar 1,67 yang diduga disebabkan oleh tingginya kandungan kalsium dan adanya ion Mg^{2+} . Analisis XRD menunjukkan bahwa hidroksiapatit telah terbentuk namun belum sepenuhnya murni karena masih terdapat fase sekunder berupa Calcium Magnesium Hydrogen Phosphate, meskipun beberapa puncak difraksi telah sesuai dengan pola standar hidroksiapatit. Penelitian ini menunjukkan bahwa limbah cangkang kepiting berpotensi sebagai bahan baku hidroksiapatit dengan pengendalian kondisi proses yang tepat.

Kata Kunci: *hidroksiapatit, cangkang kepiting, sol gel, suhu sintering, rasio ca/p*

1. Pendahuluan

Limbah cangkang kepiting merupakan salah satu hasil samping dari industri dan konsumsi makanan laut yang jumlahnya cukup melimpah di Indonesia. Peningkatan jumlah limbah ini dapat menimbulkan permasalahan lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Di sisi lain, cangkang kepiting mengandung kalsium karbonat (CaCO_3) dalam jumlah tinggi, yaitu sekitar 40–70%, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku alternatif untuk sintesis material bernilai tambah [1]. Pemanfaatan limbah ini tidak hanya dapat mengurangi pencemaran lingkungan, tetapi juga mendukung konsep pemanfaatan sumber daya berkelanjutan.

Hidroksiapatit (HAp) merupakan senyawa kalsium fosfat dengan rumus kimia $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ yang banyak digunakan dalam bidang biomedis karena memiliki sifat biokompatibilitas yang tinggi dan kesamaan dengan mineral penyusun tulang [2]. Rasio Ca/P ideal pada hidroksiapatit adalah 1,67 yang berperan penting dalam menentukan sifat fisik dan kimia material [3]. Sintesis hidroksiapatit dapat dilakukan dengan berbagai metode, seperti metode kering, metode basah, hidrotermal, dan sol-gel [4]. Metode sol-gel memiliki keunggulan dalam menghasilkan material dengan homogenitas yang baik, ukuran partikel yang lebih terkontrol, serta kemurnian yang relatif tinggi pada suhu proses yang lebih rendah [5].

Beberapa penelitian sebelumnya telah memanfaatkan sumber kalsium alami seperti cangkang telur dan cangkang keong untuk sintesis hidroksiapatit, dengan menunjukkan bahwa parameter proses seperti pH dan suhu sintering sangat mempengaruhi karakteristik produk yang dihasilkan [6], [7]. pH berperan dalam menentukan mekanisme reaksi dan pembentukan fase, sedangkan suhu sintering mempengaruhi kristalinitas, komposisi fase, dan stabilitas material [8], [9]. Namun, penelitian mengenai pemanfaatan limbah cangkang kepiting dengan metode sol-gel serta variasi pH dan suhu sintering masih terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi hidroksiapatit dari limbah cangkang kepiting menggunakan metode sol-gel. Variasi pH (7, 8, 9, 10, dan 11) dan suhu sintering (400, 500, 600, 700, dan 800°C) digunakan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap karakteristik hidroksiapatit yang dihasilkan. Karakterisasi dilakukan menggunakan analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui komposisi unsur dan fase kristal [10], [11]. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan biomaterial yang berkelanjutan serta pemanfaatan limbah cangkang kepiting secara lebih optimal.

2. Metode Penelitian

Alat dan Bahan

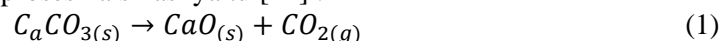
Bahan utama yang digunakan adalah cangkang kepiting yang didapatkan dari Rumah Makan Sari Laut Kapasan, Surabaya. Bahan pelarutnya yaitu asam nitrat yang akan digunakan sebagai zat pelarut kalsium, ammonium dihidrogen fosfat sebagai pembentukan hidroksiapatit, aquadest dan NaOH sebagai pengatur pH. Alat yang digunakan pada percobaan ini meliputi beaker glass 200 ml, pipet tetes, corong kaca, gelas ukur 10 ml dan 100 ml, serangkaian alat magnetic stirrer, furnace, dan oven.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini melalui beberapa tahapan diantaranya isolasi kalsium dari cangkang kepiting, preparasi larutan kalsium, sintesis hidroksiapatit menggunakan metode sol gel dan karakterisasi hidroksiapatit.

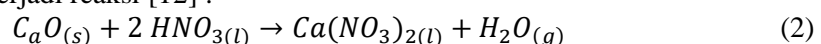
Isolasi Kalsium dari Cangkang Kepiting

Cangkang kepiting yang telah diambil dari Rumah Makan Sari Laut Kapasan, Surabaya dibersihkan terlebih dahulu dari kotoran yang menempel, kemudian dikeringkan dengan sinar matahari selama 2 hari. Cangkang kepiting kemudian dihaluskan menggunakan chopper dan diayak menggunakan ayakan 50 mesh. Selanjutnya, cangkang kepiting dikalsinasi menggunakan furnace pada temperatur 800°C selama 4 jam untuk mendekomposisi kandungan kalsium karbonat (CaCO_3) pada cangkang kepiting menjadi kalsium oksida (CaO). Reaksi yang terjadi pada proses kalsinasi yaitu [12] :



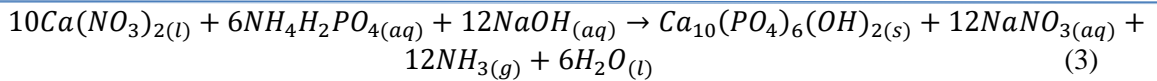
Preparasi Larutan Kalsium

Kalsium oksida (CaO) yang dihasilkan dari proses kalsinasi cangkang kepiting diambil sebanyak 13,78 gram kemudian dilarutkan dengan 10 ml asam nitrat konsentrasi 65% dan ditambahkan aquadest hingga 100 ml, untuk mendapatkan larutan kalsium nitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) yang digunakan untuk sintesis hidroksiapatit. Pada proses ini terjadi reaksi [12] :



Sintesis Hidroksiapatit dengan Metode Sol Gel

Larutan kalsium nitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) yang telah diperoleh dari proses sebelumnya direaksikan dengan 16,97 gram ammonium dihidrogen fosfat ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) yang telah dilarutkan hingga 100 ml setetes demi setetes, dengan pengadukan. Proses sintesis hidroksiapatit ini dilakukan pada suhu 40°C dengan kecepatan pengadukan 300 rpm selama 3 jam, dan lakukan pengukuran pH dengan variasi (7; 8; 9; 10; 11) menggunakan NaOH dengan konsentrasi 2 M. Selanjutnya dilakukan pendiaman selama 24 jam sehingga terbentuk gel. Pendiaman selama 24 jam merupakan waktu optimal dalam pembuatan hidroksiapatit yang murni dan tidak mengalami dekomposisi menjadi fasa tidak murni lainnya [13]. Selanjutnya lakukan penyaringan untuk memisahkan antara gel dengan impuritis. Gel yang dihasilkan kemudian dikeringkan menggunakan oven dengan suhu 100°C hingga kering. Padatan yang dihasilkan kemudian di sintering pada variasi suhu (400; 500; 600; 700; 800) °C selama 5 jam. Proses sintesis hidroksiapatit ini terjadi reaksi :



Karakterisasi Hidroksiapatit

Hasil sintesis hidroksiapatit kemudian dilakukan pengujian XRF dan XRD. Pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) digunakan untuk menganalisis komposisi unsur hidroksiapatit berdasarkan sinar-X karakteristik yang dihasilkan akibat efek fotolistrik. Ketika sampel disinari sinar-X berenergi tinggi, terjadi pelepasan elektron yang kemudian diisi oleh elektron dari orbital lebih tinggi, sehingga memancarkan energi dalam bentuk sinar-X. Sinar-X tersebut dideteksi untuk menentukan jenis dan kadar unsur dalam sampel. [10]. Uji X-Ray Diffraction (XRD) merupakan teknik analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi material kristalin, termasuk struktur kristal dan fase pada hidroksiapatit, dengan memanfaatkan radiasi sinar-X. Metode ini bekerja berdasarkan pola difraksi yang dihasilkan dari interaksi sinar-X dengan struktur kristal material [11].

3. Hasil dan Pembahasan

XRF (*X-Ray Fluorescence*)

Analisa XRF (*X-Ray Fluorescence*) dilakukan untuk mengetahui pengaruh pH dan suhu sintering terhadap rasio Ca/P pada produk hidroksiapatit. Pada variasi pH dilakukan uji suhu sintering 800°C, sedangkan pada variasi suhu sintering dilakukan uji pada pH 10.

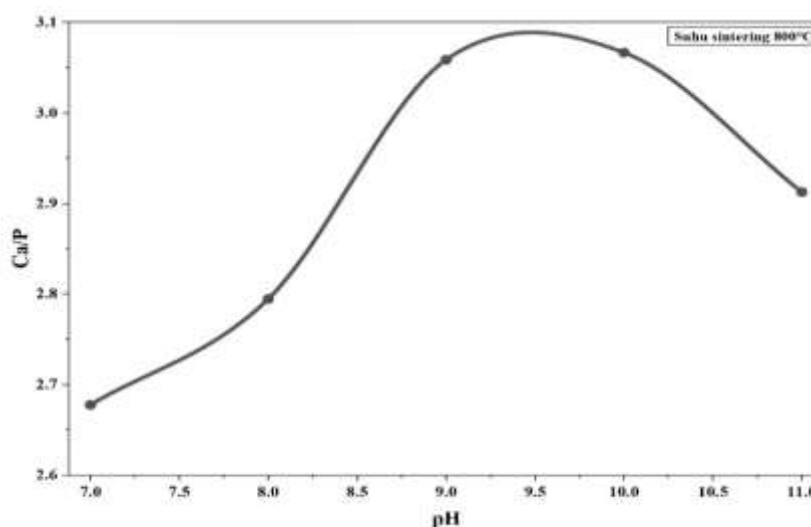
Tabel 1. Data Rasio Ca/P Variasi pH pada Suhu Sintering 800°C

Suhu Sintering (°C)	pH	Rasio Ca/P
800	7	2,6775
	8	2,7944
	9	3,0586
	10	3,0666
	11	2,9126

Tabel 2. Data Rasio Ca/P Variasi Suhu Sintering pada pH 10

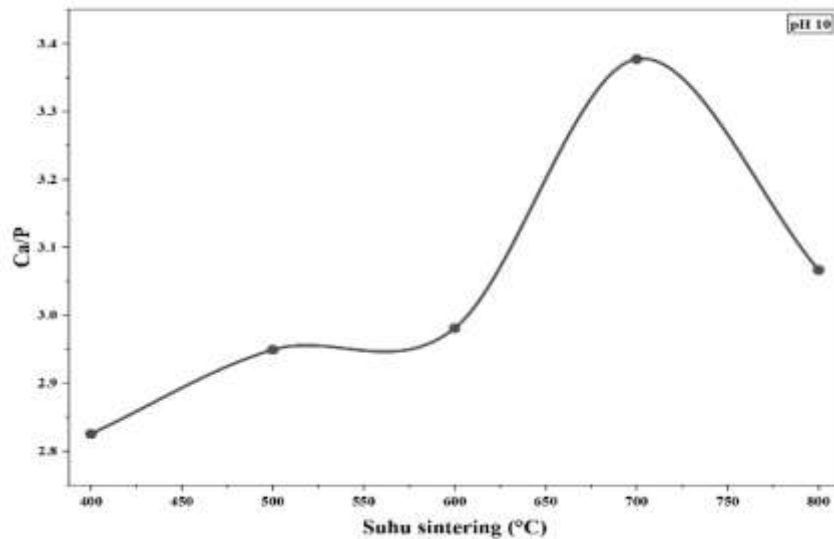
pH	Suhu Sintering (°C)	Rasio Ca/P
10	400	2,8251
	500	2,9490
	600	2,9809
	700	3,3772
	800	3,0666

Berdasarkan data **Tabel 1** dan **Tabel 2** diperoleh hubungan antara pH dan suhu sintering dengan rasio Ca/P yang disajikan pada gambar berikut.



Gambar 1. Grafik Hubungan Variasi pH dan Variasi Suhu Sintering dengan Rasio Ca/P

Berdasarkan **Gambar 1**, variasi pH menunjukkan pengaruh terhadap rasio Ca/P hidroksiapatit yang dihasilkan, di mana secara umum peningkatan pH diikuti oleh kenaikan nilai rasio Ca/P. Namun, pada pH 11 terjadi penurunan rasio Ca/P dibandingkan kondisi lainnya. Meskipun terdapat fluktuasi, seluruh nilai rasio Ca/P yang diperoleh masih lebih tinggi dari standar SNI sebesar 1,67. Hal ini mengindikasikan bahwa hidroksiapatit yang terbentuk belum memenuhi komposisi stoikiometrik yang diharapkan. Ketidaksesuaian ini diduga disebabkan oleh kalsium yang tidak sepenuhnya bereaksi, sehingga memungkinkan terbentuknya senyawa lain yang kaya kalsium dan menyebabkan rasio Ca/P menjadi lebih tinggi [14].

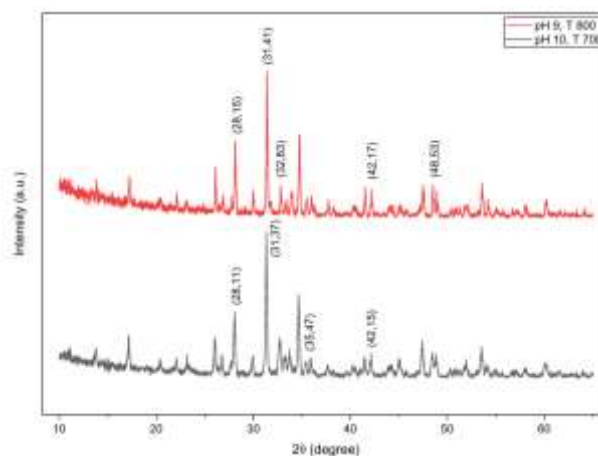


Gambar 2. Grafik Hubungan Variasi Suho Sintering dengan Rasio Ca/P

Gambar 2 juga menunjukkan variasi suhu sintering terhadap rasio Ca/P yang dihasilkan. Rasio Ca/P tidak meningkat secara linear terhadap kenaikan suhu, melainkan mengalami penurunan pada suhu 800°C. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi sintering yang digunakan belum mencapai kondisi optimum untuk menghasilkan rasio Ca/P yang stabil dan mendekati nilai stoikiometri. Jika dibandingkan dengan penelitian [15], pada suhu kalsinasi 900°C diperoleh rasio Ca/P sebesar 1,65 yang mendekati nilai ideal 1,67. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengaturan suhu yang tepat sangat berpengaruh dalam mencapai rasio Ca/P yang sesuai, sehingga kondisi proses pada penelitian ini masih perlu dioptimasi [15].

XRD (X-Ray Diffraction)

Analisa XRD (*X-Ray Diffraction*) dilakukan untuk mengidentifikasi fase kristal yang terbentuk serta mengevaluasi tingkat kristalinitas material hasil sintesis pada pH 9 dengan suhu kalsinasi 800°C dan pH 10 dengan suhu kalsinasi 700°C.



Gambar 3. Grafik Hasil Analisa XRD Hidroksiapatit dari Cangkang Kepiting pada pH 9 dengan suhu sintering 800°C dan pH 10 dengan suhu sintering 700°C

Analisis XRD ditunjukkan pada **Gambar 1**, pada sampel pH 9 dengan suhu sintering 800°C menunjukkan bahwa fase dominan yang terbentuk adalah *Calcium Magnesium Hydrogen Phosphate*, yang ditandai dengan puncak difraksi pada 2θ sebesar 17,23°; 26,11°; 28,15°; 31,41°; 32,83°; 34,77°; 41,53°; 42,17°; 47,51°; dan 48,53°. Meskipun demikian, beberapa puncak memiliki kemiripan dengan pola standar hidroksiapatit (HAP) berdasarkan data JCPDS No. 09-0432, seperti pada 28,15°, 31,41°, 32,83°, 42,17°, dan 48,53°. Hal ini menunjukkan bahwa struktur dasar apatite tetap terbentuk, namun belum dalam bentuk hidroksiapatit murni. Terbentuknya fase non-HAP ini diduga disebabkan oleh rasio Ca/P yang tidak mencapai nilai stoikiometri 1,67 serta adanya ion Mg^{2+} dalam sampel. Rasio yang tidak ideal dapat mengarahkan terbentuknya fase kalsium fosfat lain yang lebih stabil, sementara keberadaan magnesium dapat menghambat pertumbuhan kristal hidroksiapatit. Selain itu, suhu sintering 800°C juga berpotensi menyebabkan rekristalisasi atau transformasi parsial fase selama pemanasan, sehingga mempengaruhi kemurnian fase yang dihasilkan [16].

Sementara itu, hasil analisis XRD pada Gambar 1, pada sampel pH 10 dengan suhu sintering 700°C juga menunjukkan adanya fase sekunder berupa *Calcium Magnesium Hydrogen Phosphate*, yang muncul pada sudut 2θ sekitar 17,15°; 26,05°; dan 28,11°. Namun, beberapa puncak utama masih sesuai dengan pola standar hidroksiapatit, terutama pada 31,37°, 35,47°, dan 42,15°, yang menunjukkan bahwa fase hidroksiapatit tetap terbentuk dengan tingkat kristalinitas yang cukup baik, terutama pada rentang 31–33°. Meskipun demikian, hidroksiapatit yang terbentuk belum sepenuhnya murni karena masih dipengaruhi oleh rasio Ca/P yang belum sesuai dengan nilai stoikiometri. Selain itu, keberadaan ion Mg^{2+} juga berperan dalam mengganggu kestabilan kisi kristal dan menghambat pertumbuhan hidroksiapatit secara optimal. Variasi pH dan suhu sintering turut mempengaruhi kestabilan fase yang terbentuk selama proses sintesis. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa keberadaan magnesium dalam sistem kalsium fosfat dapat mendorong terbentuknya fase selain hidroksiapatit, terutama pada kondisi yang tidak stoikiometri [16].

Berdasarkan hasil analisa XRD, kristanilitas dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [17]:

$$Kristanilitas = \frac{\text{Fraksi luas kristalin}}{\text{Fraksi luas kristalin} + \text{fraksi luas amorf}} \times 100\% \quad (4)$$

dari perhitungan diperoleh hasil sebagai berikut :

Tabel 3. Data % Kristanilitas Hidroksiapatit

Kondisi	%Kristanilitas (%)
pH 9, Suhu Sintering 800°C	54,9043
pH 10, Suhu Sintering 700°C	58,6190

Berdasarkan **Tabel 3**, pH dan suhu sintering berpengaruh terhadap tingkat kristalinitas hidroksiapatit. Peningkatan pH menunjukkan kecenderungan meningkatnya persen kristalinitas yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi basa lebih mendukung pembentukan struktur kristal yang lebih teratur. Hasil ini sejalan dengan penelitian [18], yang menyatakan bahwa peningkatan pH menghasilkan puncak difraksi yang lebih tajam dan intens. Sementara itu, peningkatan suhu sintering dalam penelitian ini justru menunjukkan kecenderungan penurunan kristalinitas. Hal ini mengindikasikan bahwa suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan perubahan struktur atau pembentukan fase lain. Namun, menurut [19], peningkatan suhu sintering umumnya dapat meningkatkan kristalinitas melalui proses difusi ion dan penyusunan ulang atom. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperlukan optimasi kondisi pH dan suhu sintering untuk memperoleh hidroksiapatit dengan tingkat kristalinitas yang optimal.

4. Kesimpulan

Hidroksiapatit dapat disintesis dari limbah cangkang kepiting dengan metode sol gel, namun pada penelitian ini belum diperoleh rasio hidroksiapatit yang sesuai standart pada variabel pH 7 suhu sintering 800°C yaitu sebesar 2,67. Hidroksiapatit yang dihasilkan pada penelitian memiliki rasio Ca/P lebih tinggi dari nilai standart 1,67 dapat disebabkan oleh kandungan kalsium yang lebih tinggi pada bahan baku dan adanya kandungan Mg^{2+} pada sampel. pH dan suhu sintering berpengaruh terhadap rasio Ca/P hidroksiapatit yang dihasilkan. Semakin besar nilai pH, rasio Ca/P cenderung meningkat, dengan nilai tertinggi diperoleh pada kondisi basa, kemudian rasio Ca/P mulai menurun kembali. Selain itu, peningkatan suhu sintering juga menunjukkan kecenderungan meningkatnya rasio Ca/P. Hasil analisa XRD

menunjukkan terbentuknya fase sekunder berupa Calcium Magnesium Hydrogen Phosphate akibat rasio Ca/P yang tidak ideal serta adanya kandungan Mg^{2+} dalam sampel sehingga menghambat pembentukan hidroksiapatit murni.

5. Daftar Pustaka

- [1] I. Raya, E. Mayasari, A. Yahya, M. Syahrul, dan A. I. Latunra, "Synthesis and Characterizations of Calcium Hydroxyapatite Derived from Crabs Shells (*Portunus pelagicus*) and Its Potency in Safeguard against to Dental Demineralization," *Int. J. Biomater.*, vol. 2015, hlm. 1–8, 2015, doi: 10.1155/2015/469176.
- [2] N. A. S. Mohd Pu'ad, P. Koshy, H. Z. Abdullah, M. I. Idris, dan T. C. Lee, "Syntheses of Hydroxyapatite From Natural Sources," *Heliyon*, vol. 5, no. 5, hlm. 1–14, Mei 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01588.
- [3] T. Windarti *dkk.*, "Sintesis dan Karakterisasi Hidroksiapatit dengan Metode Sol-Gel Sebagai Bahan Dasar Adsorben," *Greensphere: Journal of Environmental Chemistry*, vol. 3, no. 2, hlm. 14–17, 2023.
- [4] D. S. Gomes, A. M. C. Santos, G. A. Neves, dan R. R. Menezes, "A Brief Review On Hydroxyapatite Production and Use in Biomedicine," *Ceramica*, vol. 65, no. 374, hlm. 282–302, 2019, doi: 10.1590/0366-69132019653742706.
- [5] A. F. Akbar, F. Q. Aini, B. Nugroho, dan S. E. Cahyaningrum, "Sintesis dan Karakterisasi Hidroksiapatit Tulang Ikan Baung (*Hemibagrus nemurus* sp.) Sebagai kandidat Implan Tulang," *Jurnal Kimia Riset*, vol. 6, no. 2, hlm. 93–101, 2021.
- [6] A. R. Noviyanti, H. Haryono, R. Pandu, dan D. R. Eddy, "Cangkang Telur Ayam sebagai Sumber Kalsium dalam Pembuatan Hidroksiapatit untuk Aplikasi Graft Tulang," *Chimica et Natura Acta*, vol. 5, no. 3, hlm. 107–111, Des 2017, doi: 10.24198/cna.v5.n3.16057.
- [7] Siregar, Robertinus Filustra, et al. "Sintesis Biomaterial Hidroksiapatit Porous dengan Prekursor Cangkang Keong Mas dan Porogen Pati Sukun (*Artocarpus altilis*)."
Prosiding SNTK Eco-SMART 1.1 (2018).
- [8] M. S. Haruda, A. Fadli, dan S. R. Yenti, "Pengaruh pH dan Waktu Reaksi Pada Sintesis Hidroksiapatit dari Tulang Sapi dengan Metode Presipitasi," *Jom FTEKNIK*, vol. 3, no. 1, hlm. 1, 2016.
- [9] B. Hadiwinata, F. R. Dewi, D. Fransiska, dan N. Dharmayanti, "Optimasi Waktu dan Suhu Kalsinasi Tepung Cangkang Rajungan (*Portunus* sp.) sebagai Bahan Baku Hidroksiapatit," *Jurnal Pascapanen dan Bioteknologi Kelautan dan Perikanan*, vol. 16, no. 2, hlm. 121–130, Des 2021, doi: 10.15578/jpbkp.v16i2.731.
- [10] M. Munasir, T. Triwikantoro, M. Zainuri, dan D. Darminto, "Uji XRD dan XRRF Pada Bahan Meneral (batuan dan Pasir) Sebagai Sumber Material Cerdas ($CaCO_3$ dan SiO_2)," *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, vol. 2, no. 1, hlm. 20–29, 2012, doi: 10.26740/jpfa.v2n1.p20-29.
- [11] R. Muttaqin *dkk.*, "Pengembangan Buku Panduan Teknik Karakterisasi Material: X-ray Diffractometer (XRD) Panalytical Xpert3 Powder," *Indonesian Journal Of Laboratory*, vol. 6, no. 1, hlm. 9–16, 2023.
- [12] Meilianti, "Isolasi Kalsium Oksida (CAO) Pada Cangkang Sotong (Cuttlefish) dengan Proses Kalsinasi Menggunakan Asam Nitrat dalam Pembuatan Presipitated Calcium Carbonat (PCC)," *Distilasi*, vol. 2, no. 1, hlm. 1–8, 2017.
- [13] Rasmiyanti, V. Amalia, dan S. Setiadji, "Sintesis dan Karakterisasi Komposit Hidroksiapatit/Kitosan/Alginat Sebagai Injectable Bone Substitute (IBS)," *Seminar Nasional Kimia 2022 UIN Sunan Gunung Djati Bandung*, vol. 15, hlm. 82–90, 2022.
- [14] P. Putri, A. Fadli, dan F. Akbar, "Pengaruh Rasio Ca/P dan pH pada Sintesa Hidroksiapatit dari Kulit Kerang Darah dengan Metode Hidrotermal Suhu Rendah," *Jom FTEKNIK*, vol. 2, no. 2, hlm. 1–11, 2015.
- [15] O. G. Agbabiaka *dkk.*, "Effect of Calcination Temperature on Hydroxyapatite Developed from Waste Poultry Eggshell," *Sci. Afr.*, vol. 8, hlm. 1–12, 2020, doi: 10.1016/j.sciaf.2020.e00452.
- [16] D. M. Hilger, J. G. Hamilton, dan D. Peak, "The Influences of Magnesium upon Calcium Phosphate Mineral Formation and Structure as Monitored by X-ray and Vibrational Spectroscopy," *Soil Syst.*, vol. 4, no. 8, hlm. 1–13, 2020, doi: 10.3390/soilsystems4010008.

-
- [17] R. A. P. Purba, F. Deswardani, R. M. Anggraini, Y. Fendriani, dan T. Restianingsih, “Ekstraksi dan Karakterisasi Hidroksiapatit (HAp) dari Tulang Ikan Tenggiri (*Scomberomorus commersoni*) dengan Metode Heat Treatment,” *Jurnal Fisika Unand (JFU)*, vol. 13, no. 2, hlm. 247–253, 2024, doi: 10.25077/jfu.13.2.247-253.2024.
- [18] F. S. Irwansyah, A. Yusuf, D. R. Eddy, R. Risdiana, dan A. R. Noviyanti, “Effect of Sensitive pH on Hydroxyapatite Properties Synthesized from Chicken Eggshell,” *Indonesian Journal of Chemistry*, vol. 22, no. 5, hlm. 1418–1426, 2022, doi: 10.22146/ijc.72959.
- [19] D. F. Fadli, Y. Azis, dan Yusnimar, “Pengaruh Suhu Dan pH Terhadap Bentuk Partikel Hidroksiapatit Dari Precipitated Calcium Carbonate (PCC) Kulit Telur Itik Melalui Metode Presipitasi,” *JOM FTEKNIK*, vol. 6, no. 1, hlm. 1–8, 2019.