

**PENGARUH KECEPATAN PENGADUKAN TERHADAP SIFAT FISIKOKIMIA
HIDROKSIAPTIT CANGKANG KERANG HIJAU (*PERNA VIRIDIS*) SEBAGAI
BAHAN DASAR BIOMATERIAL**

**THE EFFECT OF STIRRING SPEED ON THE PHYSICOCHEMICAL
PROPERTIES OF HYDROXYAPATITE DERIVED FROM GREEN MUSSEL
SHELLS (*PERNA VIRIDIS*) AS A BIOMATERIAL BASE**

Siti Khotimah*, Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia
Supardi, Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

*e-mail: sitikhotimah.2021@student.uny.ac.id

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk (1) mensintesis hidroksiapatit berbahan dasar cangkang kerang hijau (*perna viridis*) menggunakan metode presipitasi, (2) menentukan pengaruh variasi kecepatan pengadukan terhadap sifat fisikokimia hidroksiapatit (HAp) dari cangkang kerang hijau (*Perna viridis*) berdasarkan uji FTIR, XRD, dan SEM. Sintesis hidroksiapatit berhasil dilakukan dengan menggunakan metode presipitasi dengan bahan dasar alami berupa cangkang kerang hijau. Cangkang tersebut dikalsinasi dengan suhu 900°C untuk menghasilkan senyawa kalsium oksida (CaO), yang kemudian direaksikan dengan ammonium hidrogen fosfat $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ pada pH sekitar 9 yang diatur menggunakan larutan ammonium hidroksida (NH_4OH) . Variasi kecepatan pengadukan yang digunakan adalah 250 rpm, 350 rpm, dan 450 rpm. Karakterisasi FTIR mengidentifikasi keberadaan gugus fungsional OH^- , PO_4^{3-} , dan CO_3^{2-} yang menandakan terbentuknya hidroksiapatit terkarbonasi. Hasil XRD mengonfirmasi fasa kristalin HAp dengan ukuran kristalit nanoskopis dan kristalinitas tinggi, di mana kecepatan 350 rpm menghasilkan struktur kristal paling stabil dengan mikroregangan terendah. Uji SEM menunjukkan morfologi partikel bersifat polidispersi dengan ukuran dominan 0,20–0,25 μm . Dengan demikian, kecepatan 350 rpm merupakan kondisi optimal untuk menghasilkan HAp berkualitas tinggi yang berpotensi sebagai bahan dasar biomaterial.

Kata Kunci: *Hidroksiapatit, Cangkang Kerang Hijau, Metode Presipitasi, Sifat Fisikokimia, Biomaterial.*

Abstrak. This study aims to (1) synthesize hydroxyapatite derived from green mussel shells (*Perna viridis*) using the precipitation method, and (2) determine the effect of stirring speed variations on the physicochemical properties of hydroxyapatite (HAp) from green mussel shells based on FTIR, XRD, and SEM analyses. The synthesis of hydroxyapatite was successfully carried out using a precipitation method with natural raw materials in the form of green mussel shells. The shells were calcined at 900°C to produce calcium oxide (CaO), which was then reacted with ammonium hydrogen phosphate at a pH of around 9, adjusted using ammonium hydroxide solution. Stirring speeds of 250 rpm, 350 rpm, and 450 rpm were applied. FTIR characterization identified the presence of OH^- , PO_4^{3-} , and CO_3^{2-} functional groups, indicating the formation of carbonated hydroxyapatite. XRD results confirmed the

crystalline phase of HAp with nanoscale crystallite size and high crystallinity, where the 350 rpm condition produced the most stable crystal structure with the lowest microstrain. SEM analysis showed a polydisperse particle morphology with a dominant size range of 0.20–0.25 μm . Therefore, a stirring speed of 350 rpm is considered the optimal condition for producing high-quality HAp with potential as a biomaterial base.

Keywords: *Hydroxyapatite, Green Mussel Shell, Precipitation Method, Physicochemical Properties, Biomaterial.*

PENDAHULUAN

Kebutuhan akan biomaterial untuk aplikasi medis, terutama dalam perbaikan dan penggantian jaringan tulang, terus meningkat seiring bertambahnya kasus trauma, penyakit degeneratif, dan kelainan kongenital. Menurut WHO, lebih dari 50 juta orang mengalami cedera setiap tahun, dengan 20–30% di antaranya mengalami fraktur tulang yang membutuhkan rekonstruksi atau implan (Prasad et al., 2020). Selain itu, lebih dari 3,9 miliar orang mengalami penyakit periodontal dan karies gigi, yang menyebabkan kerusakan tulang rahang dan kehilangan gigi permanen (Wijaya et al., 2021).

Biomaterial berperan penting dalam rekayasa jaringan dan regenerasi tulang. Hidroksiapatit (HAp) dengan rumus $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, merupakan salah satu biomaterial berbasis kalsium fosfat yang paling banyak diteliti karena kemiripannya dengan mineral utama penyusun tulang dan gigi (Mondal et al., 2021). Dengan demikian, mineral hidroksiapatit tidak hanya berperan penting dalam struktur dan fungsi tulang, tetapi juga memiliki potensi besar dalam aplikasi klinis untuk perbaikan dan regenerasi tulang. Salah satu sumber kalsium alami yang potensial untuk sintesis HAp adalah cangkang kerang hijau (*Perna viridis*), yang mengandung kalsium karbonat tinggi (Sari et al., 2019).

Pemanfaatan limbah ini tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga mendukung prinsip keberlanjutan dalam pengembangan biomaterial. Melalui proses kalsinasi, cangkang dapat diubah menjadi CaO, kemudian disintesis menjadi HAp menggunakan metode presipitasi, yang mampu menghasilkan material dengan struktur dan sifat menyerupai jaringan tulang dan gigi (Ganesan et al., 2019). Sifat fisikokimia HAp melalui metode presipitasi sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter terutama kecepatan pengadukan (Chen et al., 2023).

Penelitian ini mengkaji karakterisasi hidroksiapatit (HAp) menggunakan FTIR, XRD, dan SEM untuk mengetahui gugus fungsi, ukuran kristalit, kristalinitas, serta morfologi partikel. Melalui pemanfaatan cangkang kerang hijau sebagai sumber kalsium, penelitian ini juga mendukung pengolahan limbah menjadi biomaterial ramah lingkungan. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh kecepatan pengadukan terhadap sifat fisikokimia HAp dan potensinya sebagai bahan biomaterial untuk rekayasa tulang dan enamel gigi.

METODE

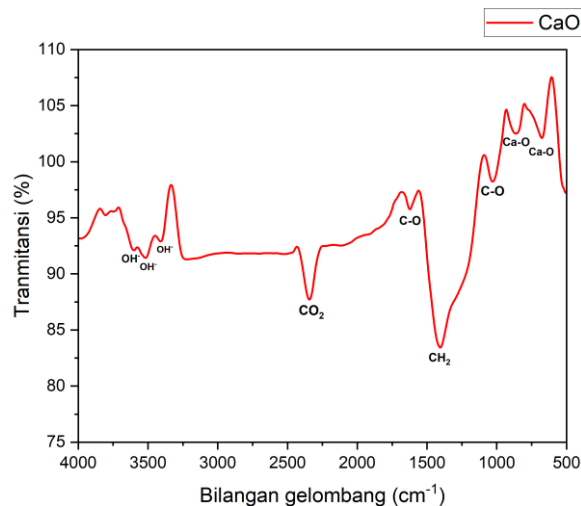
Penelitian ini dilaksanakan mulai bulan November 2024 hingga Juni 2025. Selama periode tersebut, berbagai tahapan penelitian dilakukan, mulai dari persiapan bahan sintesis HAp berbasis cangkang kerang hijau, hingga analisis sifat fisikokimia menggunakan berbagai metode karakterisasi (FTIR, XRD, dan SEM). Penelitian ini menggunakan metode presipitasi. Sintesis HAp dilakukan di Laboratorium Biomaterial Lantai dua Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta. Karakterisasi FTIR dan SEM variasi pertama dilakukan di Laboratorium Islamic Development Bank (IDB). Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta. Karakterisasi XRD dilakukan di Laboratorium Pengujian dan Penelitian

Terpadu (LPPT), Universitas Gadjah Mada. Karakterisasi SEM pada variasi HAp kedua dan ketiga dilakukan di Laboratorium Material Maju dan Fungsional, Direktorat Inovasi dan Hilirisasi, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Jenis penelitian yang dilakukan pada skripsi ini termasuk dalam jenis penelitian eksperimen. Langkah pengambilan data pada penelitian melalui 2 tahap yaitu preparasi CaO cangkang kerang hijau, yaitu membersihkan dan merebus cangkang kerang hijau untuk menghilangkan sisa-sisa kotoran. Lalu, merendam cangkang kerang hijau dengan etanol. Selanjutnya, cangkang dibilas menggunakan aquades dan dijemur di bawah sinar matahari selama 24 jam, lalu dikeringkan menggunakan oven selama 4 jam pada suhu 100°C. Kemudian, menghaluskan cangkang kerang hijau dengan mortar. Lalu, proses kalsinasi terhadap bubuk cangkang selama 6 jam pada suhu 900°C. Selanjutnya, mengayak bubuk CaO menggunakan alat sieve shaker agar mendapatkan serbuk yang lebih halus. Kemudian, hasil CaO di karakterisasi uji FTIR, XRD, dan SEM. Tahap sintesis HAp, yaitu, menimbang CaO dan $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$. Lalu, pengadukan larutan CaO dan $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$. Selanjutnya, proses titrasi larutan CaO dan $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$. Kemudian, Pengadukan kembali larutan CaO yang telah dititrasi dengan variasi kecepatan pengadukan 250, 350, dan 450 rpm. Lalu, mengecek pH. Selanjutnya, menyaring larutan $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$. Selanjutnya, mengeringkan hasil endapan dengan oven. Kemudian, melakukan kalsinasi dengan suhu 900 °C selama 6 jam. Lalu, dihasilkan HAp dengan kecepatan pengadukan 250 rpm, 350 rpm, dan 450 rpm. Tahap karakterisasi dilakukan dengan uji FTIR, XRD, dan SEM. Karakterisasi pada sampel HAp dalam bentuk serbuk.

HASIL DAN PEMBAHASAN

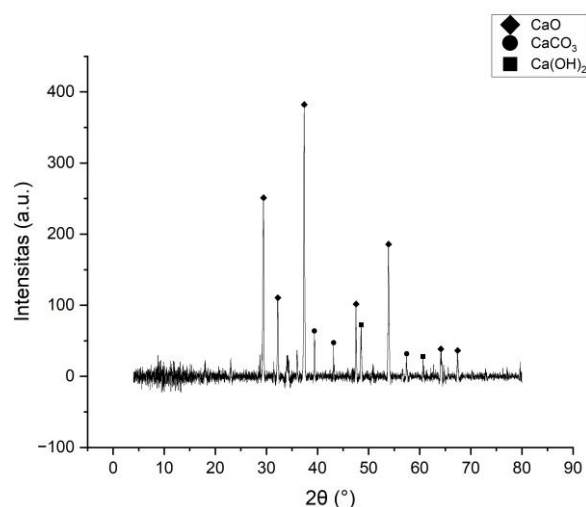
Penelitian ini dilakukan dengan membersihkan dan merebus cangkang kerang hijau untuk menghilangkan sisa-sisa kotoran. Lalu, merendam cangkang kerang hijau dengan etanol. Selanjutnya, cangkang dibilas menggunakan aquades dan dijemur di bawah sinar matahari selama 24 jam, lalu dikeringkan menggunakan oven selama 4 jam pada suhu 100°C. Kemudian, menghaluskan cangkang kerang hijau dengan mortar. Lalu, proses kalsinasi terhadap bubuk cangkang selama 6 jam pada suhu 900°C. Selanjutnya, mengayak bubuk CaO menggunakan alat sieve shaker agar mendapatkan serbuk yang lebih halus. Kemudian, hasil CaO di karakterisasi uji FTIR. Hasil karakterisasi FTIR terhadap sampel CaO disajikan pada Gambar 1 yang menunjukkan adanya gugus OH^- pada 3642 cm^{-1} yang menandakan terbentuknya $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$. akibat reaksi dengan uap air. Pita serapan CO_2 di sekitar 2350 cm^{-1} merupakan artefak dari gas atmosfer. Adanya tiga puncak khas karbonat pada 1450, 874, dan 712 cm^{-1} mengindikasikan terbentuknya CaCO_3 akibat karbonasi. Sementara itu, pita serapan Ca-O pada 500 cm^{-1} mengonfirmasi keberadaan fasa utama CaO. Secara keseluruhan, sampel terdiri dari campuran CaO, $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$, dan CaCO_3 akibat sifat higroskopis dan reaktif dari CaO terhadap udara lingkungan.



Gambar 1. Hasil Uji FTIR CaO Cangkang Kerang Hijau

Gambar 2 menyajikan hasil uji XRD CaO Cangkang Kerang Hijau bahwa Analisis XRD dilakukan untuk mengetahui jenis kristal yang terbentuk dari serbuk cangkang kerang hijau setelah dikalsinasi. Hasil pengujian menunjukkan adanya puncak-puncak tajam pada difraktogram yang menandakan terbentuknya kalsium oksida (CaO) sebagai fasa utama. Dari perhitungan menggunakan rumus Scherrer, didapatkan ukuran kristalit sekitar $31,16 \pm 17,08$ nm, serta nilai mikrotegangan $1,6 \times 10^{-3}$ yang menunjukkan adanya sedikit perubahan atau tegangan dalam struktur kristalnya.

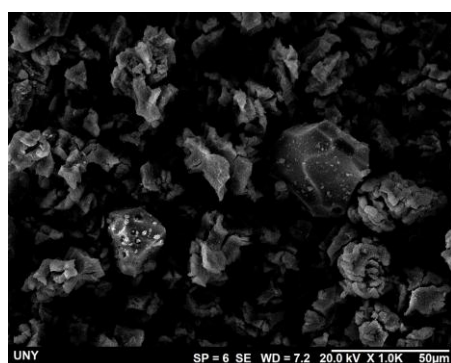
Meskipun suhu kalsinasi 900°C sudah cukup efektif, masih ditemukan sisa senyawa CaCO_3 dan juga terbentuknya Ca(OH)_2 . Hal ini bisa terjadi karena proses pemanasan belum merata atau sempurna, atau karena CaO yang sudah terbentuk bereaksi kembali dengan uap air dan CO_2 dari udara. CaO memang dikenal sangat mudah menyerap air dan karbon dioksida, sehingga jika tidak disimpan dengan baik bisa berubah menjadi senyawa lain. Oleh karena itu, penting untuk mengatur suhu, lama pemanasan, dan cara penyimpanan dengan lebih optimal agar CaO yang dihasilkan tetap murni dan tidak tercampur dengan fasa lain.



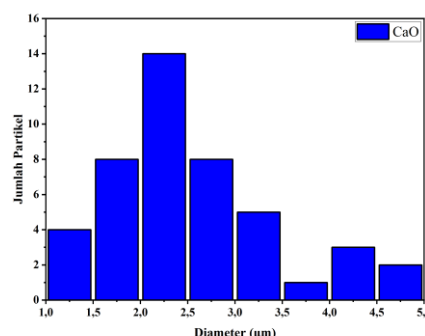
Gambar 2. Hasil Uji XRD CaO Cangkang Kerang Hijau

Gambar 3(a) menyajikan morfologi hasil SEM yang telah dikalsinasi pada suhu 900

°C. Hasil observasi mikroskopik pada perbesaran 1.000 kali. Pada perbesaran ini, skala pengukuran yang digunakan 50 μm . Histogram pada Gambar 3 (b) menunjukkan analisis distribusi ukuran partikel menunjukkan bahwa sampel CaO yang dihasilkan memiliki ukuran rata-rata dalam skala mikrometer, dengan populasi terbanyak berada di sekitar 2,0-2,5 μm . Pada rentang ini, terdeteksi sebanyak 14 partikel, menjadikannya populasi ukuran yang paling dominan dalam sampel. Adanya partikel-partikel dengan ukuran yang bervariasi ini dapat dijelaskan oleh beberapa faktor selama proses sintesis dan preparasi. Keberadaan partikel berukuran mikrometer dengan distribusi yang polidispersi ini akan memengaruhi sifat-sifat makroskopik serbuk, seperti luas permukaan, reaktivitas, dan kelarutannya dalam aplikasi selanjutnya (Fahmi et al., 2020).



(a)



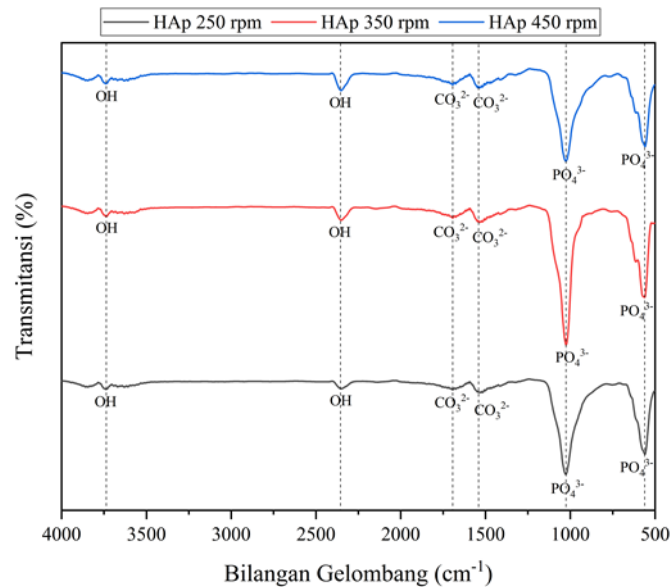
(b)

Gambar 3. Hasil karakterisasi SEM cangkang kerang hijau (a) morfologi CaO dan (b) distribusi ukuran partikel

Gambar 4 menyajikan hasil uji FTIR HAp cangkang kerang hijau bahwa pada kecepatan pengadukan 250 rpm, spektrum FTIR menunjukkan adanya pita serapan lebar pada daerah 3700–3200 cm^{-1} yang menandakan keberadaan gugus OH^- dari air teradsorpsi. Namun, intensitas puncak tajam pada 3570 cm^{-1} (OH^- struktural) terlihat lemah, yang mengindikasikan bahwa pengadukan belum cukup optimal untuk menghasilkan kristal HAp dengan keterikatan gugus hidroksil yang kuat. Gugus fosfat (PO_4^{3-}) terdeteksi, namun dengan intensitas sedang, menandakan kristalinitas HAp belum maksimal. Sementara itu, gugus karbonat (CO_3^{2-}) muncul dengan intensitas relatif tinggi, mengindikasikan adanya substitusi karbonat yang signifikan, kemungkinan akibat reaksi dengan CO_2 selama sintesis lambat. Pada kecepatan pengadukan 350 rpm, pita serapan OH^- teradsorpsi masih terlihat di 3700–3200 cm^{-1} , namun puncak OH^- struktural pada 3570 cm^{-1} muncul lebih tajam dibandingkan 250 rpm, yang menunjukkan pembentukan gugus hidroksil dalam kisi kristal HAp yang lebih baik. Pita PO_4^{3-} pada 1100–1000 cm^{-1} , 603 cm^{-1} , dan 565 cm^{-1} juga terlihat paling intens dan tajam di antara ketiga sampel, menunjukkan kristalinitas terbaik dan keberhasilan inkorporasi gugus fosfat dalam struktur apatit. Karbonat (CO_3^{2-}) terdeteksi, namun intensitasnya seimbang, menandakan terbentuknya CHA dengan struktur stabil dan menyerupai mineral tulang. Hasil ini menunjukkan bahwa kecepatan 350 rpm adalah kondisi optimal untuk sintesis HAp dengan sifat kimia terbaik.

Pada kecepatan pengadukan 450 rpm, pita OH^- teradsorpsi masih terlihat kuat, namun puncak 3570 cm^{-1} mulai melemah dibandingkan sampel 350 rpm. Ini menunjukkan kemungkinan adanya disrupsi dalam pembentukan OH^- struktural akibat pengadukan yang terlalu cepat. Pita PO_4^{3-} tetap muncul, namun sedikit melebar, mengindikasikan terjadinya

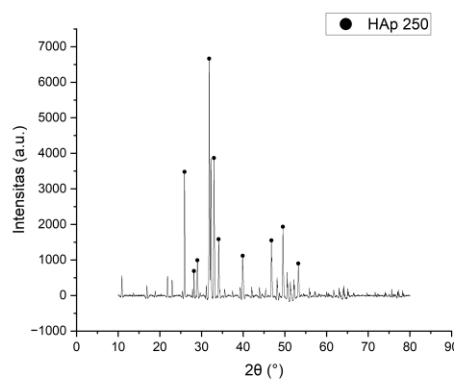
ketidakteraturan struktur kristal. Intensitas karbonat (CO_3^{2-}) juga meningkat kembali, yang menunjukkan peningkatan CHA namun dengan kristalinitas lebih rendah dibandingkan 350 rpm. Hal ini dapat disebabkan oleh turbulensi tinggi yang memengaruhi pertumbuhan kristal secara optimal.



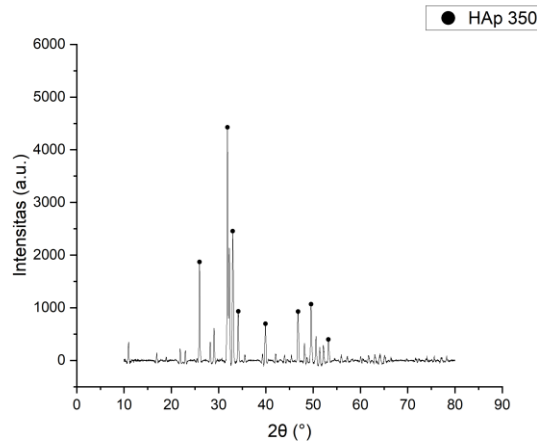
Gambar 4. Hasil Uji FTIR HAp 1). Uji FTIR kecepatan pengadukan 250 rpm, 2). Uji FTIR kecepatan pengadukan 350 rpm, 3). Uji FTIR kecepatan pengadukan 450 rpm

Karakterisasi menggunakan XRD untuk mengetahui struktur kristal yang disajikan pada Gambar 15 yang mengidentifikasi keberadaan fase hidroksiapatit (HAp) pada sampel tersebut. telah dilakukan pada sampel HAp dengan kecepatan pengadukan 250 rpm terdeteksi puncak-puncak difraksi pada sudut 25.9° , 31.8° , 32.2° , 33.0° , 34.1° , 39.8° , 46.7° , 49.5° , dan 53.2° . Karakteristik semua puncak HAp ini, tanpa adanya puncak dari fasa lain seperti kalsium fosfat lainnya atau prekursor sisa (CaO), mengonfirmasi bahwa proses sintesis pada 250 rpm telah berhasil menghasilkan fasa tunggal Hidroksiapatit yang sangat kristalin. Kecepatan pengadukan ditingkatkan menjadi 350 rpm pada gambar menghasilkan pola difraksi puncak-puncak pada sudut 25.9° , 31.8° , 32.2° , 33.0° , 34.1° , 39.9° , 46.7° , 49.5° , dan 53.2° . Selanjutnya pada kecepatan pengadukan 450 rpm pada gambar diperoleh pola difraksi pada sudut 25.9° , 31.8° , 32.2° , 33.0° , 34.1° , 39.8° , 46.7° , 49.5° , dan 53.2° .

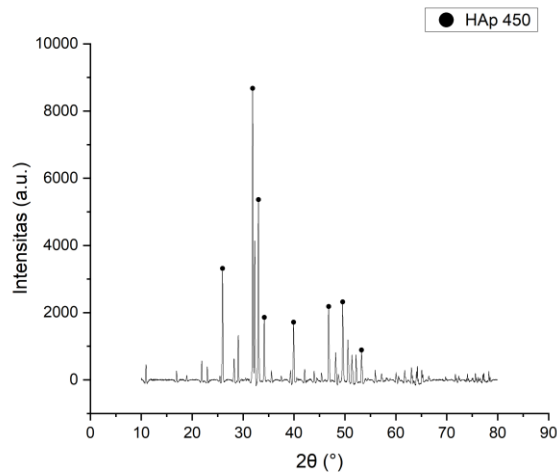
1.



2.



3.



Gambar 15. Hasil Uji XRD 1). HAp kecepatan pengadukan 250 rpm, 2). HAp kecepatan pengadukan 350 rpm, 3). HAp kecepatan pengadukan 450 rpm

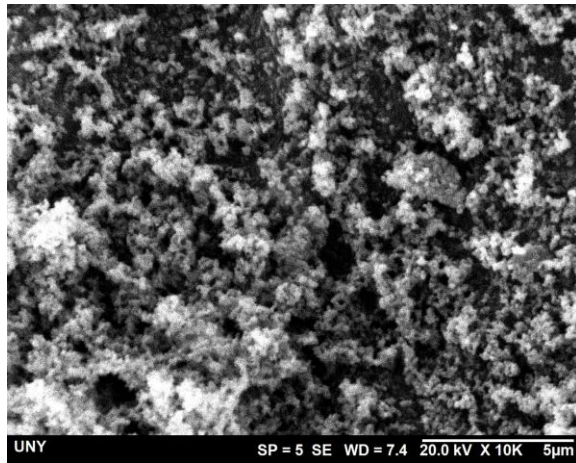
Analisis lanjutan dilakukan untuk mengevaluasi secara kuantitatif pengaruh kecepatan pengadukan terhadap struktur mikro Hidroksiapatit (HAp) hasil sintesis, meliputi parameter ukuran kristalit, mikroregangan, dan tingkat kristalinitas. Berdasarkan data yang diperoleh dari analisis difraktogram XRD (Tabel 1), terlihat adanya pola yang jelas di mana peningkatan kecepatan pengadukan dari 250 rpm ke 350 rpm menyebabkan penurunan signifikan pada ukuran kristalit, dari $38,4 \pm 0,1$ nm menjadi $30,7 \pm 0,2$ nm, dan kemudian relatif stabil pada 450 rpm. Temuan ini sejalan dengan laporan Al-Gaashani et al. (2019) yang menyatakan bahwa laju pengadukan yang lebih tinggi meningkatkan tingkat nukleasi dibandingkan pertumbuhan kristal, sehingga menghasilkan ukuran partikel yang lebih kecil.

No.	Variasi Kecepatan Pengadukan	Ukuran Kristalit (nm)	Mikrostrain	Kristalinitas
1.	250 rpm	38,4 ± 0,1	0,068	87,6 %
2.	350 rpm	30,7 ± 0,2	0,035	85,8 %
3.	450 rpm	30,7 ± 0,1	0,078	84,2 %

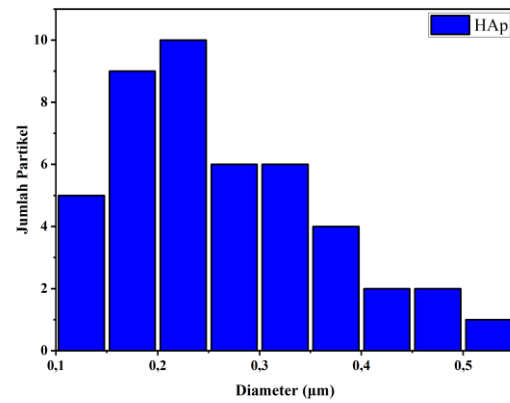
Tabel 1. Hasil Analisis XRD sampel Hap

Nilai mikroregangan yang menunjukkan tingkat ketidaksempurnaan kisi kristal, paling rendah tercatat pada 350 rpm (0,035), dibandingkan dengan 0,068 (250 rpm) dan 0,078 (450 rpm). Nilai-nilai ini mengindikasikan bahwa semua sampel memiliki struktur kisi yang cukup teratur dengan cacat yang minimal (Mondal et al., 2021), namun kondisi pada 350 rpm tampaknya memberikan keseimbangan terbaik antara agitasi larutan dan penyusunan atom yang stabil secara termodinamika (Santos et al., 2022). Sementara itu, kristalinitas yang terukur tetap tinggi di semua variasi, tetapi menunjukkan sedikit penurunan dari 87,6% pada 250 rpm menjadi 84,2% pada 450 rpm. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh proses nukleasi yang terlalu cepat pada kecepatan tinggi, yang menyebabkan waktu penyusunan atom ke dalam kisi kristal menjadi terbatas, sehingga meningkatkan proporsi domain amorf atau ketidakaturan batas butir (Kusrini et al., 2021). Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa kecepatan pengadukan memainkan peran penting dalam menentukan sifat kristal dari HAp. Kecepatan terendah, yaitu 250 rpm, menghasilkan kristalinitas tertinggi (87,6%), yang berada dalam kisaran optimal 60–90% untuk aplikasi biomaterial menurut Yusuf et al. (2019). Hal ini menunjukkan bahwa proses pengadukan yang lebih lambat memungkinkan pembentukan kristal yang lebih sempurna. Ukuran kristalit dalam kisaran 30,7–38,4 nm juga sangat sesuai untuk aplikasi medis seperti rekayasa jaringan tulang dan enamel gigi, karena partikel nanokristalin lebih mudah berinteraksi dengan sel tubuh (Rachmantio & Irfai, 2023; Rahim, 2020). Meskipun peningkatan kecepatan pengadukan sedikit menurunkan kristalinitas, nilai yang diperoleh masih tergolong tinggi dan dapat diterima dalam konteks aplikasi biomedis (Kusrini et al., 2021).

Uji karakterisasi SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi dan ukuran partikel sampel HAp pada variasi kecepatan pengadukan 350 rp. Hasil observasi mikroskopik pada perbesaran 10.000 kali. Pada perbesaran ini, skala pengukuran yang digunakan 5 µm, seperti yang disajikan pada Gambar 6 (a). Berdasarkan histogram pada Gambar 6 (b), serbuk Hap yang dihasilkan memiliki ukuran partikel yang bervariasi (tidak seragam), dengan ukuran mulai dari 0,1 µm hingga lebih dari 0,5 µm. Ukuran partikel yang paling banyak ditemukan berada pada kisaran 0,20–0,25 µm. Sebagian besar partikel berukuran di bawah 0,4 µm. Ukuran yang tidak merata ini merupakan hal yang umum pada proses sintesis dengan metode presipitasi, karena terjadi dua proses sekaligus, yaitu pembentukan inti dan pertumbuhan kristal, yang tidak selalu berlangsung seimbang. Partikel-partikel kecil juga cenderung saling menempel dan membentuk gumpalan (aglomerat), sehingga menghasilkan partikel berukuran lebih besar (Chen et al., 2023).



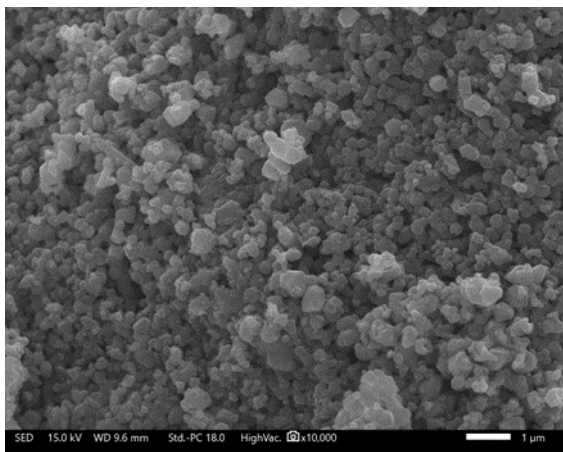
(a)



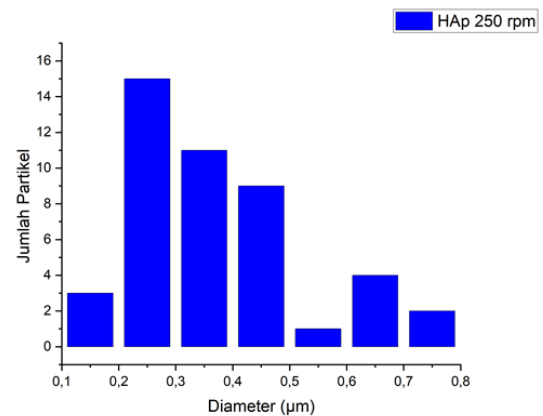
(b)

Gambar 6. Hasil karakterisasi SEM HAp 350 rpm (a) morfologi HAp dan (b) distribusi ukuran partikel

Uji karakterisasi SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi dan ukuran partikel sampel HAp pada variasi kecepatan pengadukan 250 rpm. Hasil observasi mikroskopik pada perbesaran 10.000 kali. Pada perbesaran ini, skala pengukuran yang digunakan 1 µm, seperti yang disajikan pada Gambar 7 (a). Histogram pada Gambar 19 menunjukkan bahwa ukuran partikel HAp pada kecepatan pengadukan 250 rpm memiliki distribusi polidispersi, yaitu ukuran partikel tidak seragam dan tersebar dari 0,1 µm hingga 0,8 µm. Ukuran partikel yang paling banyak ditemukan berada pada kisaran 0,2–0,3 µm dengan jumlah partikel tertinggi sebanyak 15. Sebagian besar partikel berada di bawah 0,5 µm, dan hanya sedikit yang berukuran lebih besar. Pola ini umum terjadi pada proses sintesis HAp dengan metode presipitasi basah, karena selama proses tersebut terjadi nukleasi dan pertumbuhan kristal secara bersamaan, terutama pada kecepatan pengadukan yang rendah (Chen et al., 2023).



(a)



(b)

Gambar 7. Hasil karakterisasi SEM HAp 250 rpm (a) morfologi HAp dan (b) distribusi ukuran partikel

Uji karakterisasi SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi dan ukuran partikel sampel HAp pada variasi kecepatan pengadukan 450 rpm. Hasil observasi mikroskopik pada perbesaran 10.000 kali. Pada perbesaran ini, skala pengukuran yang digunakan 1 μm , seperti yang disajikan pada Gambar 8 (a). Histogram pada Gambar 8 (b) menunjukkan bahwa partikel HAp hasil pengadukan 450 rpm memiliki ukuran yang bervariasi (polidispersi), mulai dari 0,1 μm hingga 0,9 μm , dengan ukuran paling sering muncul berada pada rentang 0,2–0,3 μm . Meskipun kecepatan pengadukan yang tinggi mempercepat proses nukleasi, namun juga meningkatkan kemungkinan aglomerasi, yang terlihat dari adanya puncak sekunder pada ukuran 0,5–0,6 μm . Hal ini umum terjadi pada metode presipitasi basah karena partikel nano yang terbentuk memiliki energi permukaan tinggi sehingga mudah saling menempel dan membentuk partikel lebih besar (Pramudita et al., 2023). Dibandingkan dengan 450 rpm, distribusi ukuran partikel pada sampel HAp 350 rpm lebih seragam dan terkonsentrasi di ukuran kecil, yang ideal untuk aplikasi biomaterial karena luas permukaan yang lebih besar dapat meningkatkan ikatan dengan sel dan mempercepat regenerasi tulang (Yusuf et al., 2019).

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa hidroksiapatit (HAp) dapat disintesis dari cangkang kerang hijau (*Perna viridis*) menggunakan metode presipitasi dengan variasi kecepatan pengadukan 250 rpm, 350 rpm, dan 450 rpm. Hasil pengujian menggunakan FTIR, XRD, dan SEM menunjukkan bahwa variasi kecepatan pengadukan berpengaruh terhadap sifat fisik dan kimia dari HAp yang dihasilkan. Dari ketiga variasi, kecepatan 350 rpm memberikan hasil paling optimal, ditandai dengan kristalinitas yang tinggi, nilai mikroregangan paling rendah, dan ukuran partikel yang lebih seragam. Spektrum FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus OH^- , PO_4^{3-} , dan CO_3^{2-} , yang menunjukkan bahwa HAp yang terbentuk merupakan tipe terkarbonasi, mirip dengan mineral penyusun tulang. Sementara itu, ukuran kristalit berada dalam skala nanometer, dan hasil pengamatan SEM menunjukkan ukuran partikel yang bervariasi dalam skala sub-mikrometer karena adanya aglomerasi. Berdasarkan hasil tersebut, kecepatan pengadukan 350 rpm dapat direkomendasikan sebagai kondisi terbaik untuk menghasilkan HAp dari limbah cangkang kerang hijau yang berpotensi digunakan sebagai bahan dasar biomaterial dalam aplikasi rekayasa tulang dan gigi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr. Supardi. S.Si., M.Si. atas dukungan dan pendanaan yang diberikan sehingga terlaksananya penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada semua pihak yang telah berkontribusi melalui saran dan pemikiran yang konstruktif selama proses penelitian berlangsung. Semoga hasil dari penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang berarti bagi perkembangan ilmu Fisika.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Gaashani, R., Radiman, S., Daud, A. R., Tabet, N., & Al-Douri, Y. (2019). X-ray diffraction: A powerful technique in the materials characterization. *Materials Science Forum*, 962, 1–16. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.962.1>
- Chen, W., Liu, Y., Li, X., & Zhang, Q. (2023). Influence of precipitation parameters on hydroxyapatite synthesis: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 563–577. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.045>
- Ganesan, K., Arul, K., & Ramesh, S. (2019). Preparation of hydroxyapatite using natural sources for biomedical applications – A review. *Materials Today: Proceedings*, 17, 454–461. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.387>

- Kusrini, E., Yulizar, Y., & Gunawan, C. (2021). The role of stirring speed in hydroxyapatite synthesis and its impact on physicochemical properties. *Indonesian Journal of Materials Science*, 14(2), 98–104. <https://doi.org/10.22146/ijms.123456>
- Mondal, S., Mondal, B., Dey, A., & Mukhopadhyay, S. S. (2021). Hydroxyapatite derived from waste materials: synthesis, properties, and biomedical applications. *Ceramics International*, 47(16), 23192–23206. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.077>
- Pramudita, R. A., Suwandi, A. A., & Nurhasanah, S. (2023). Synthesis of carbonated hydroxyapatite for biomedical application: Effect of CO₂ incorporation. *Journal of Biomaterials and Tissue Engineering*, 13(2), 135–142.
- Rachmantio, S. T., & Irfai, M. (2023). Ukuran partikel HAp terhadap aktivitas seluler dan potensi aplikasi biomaterial. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 19(1), 45–53.
- Rahim, F. (2020). Karakteristik hidroksiapatit dari bahan alami sebagai kandidat implan tulang. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 9(2), 122–129.
- Santos, T. A., Almeida, M. M., & Nascimento, F. C. (2022). Effect of process parameters on crystal formation in wet precipitation synthesis of hydroxyapatite. *Journal of Advanced Ceramics*, 11(1), 14–23. <https://doi.org/10.1007/s40145-021-0534-4>
- Sari, R., Anggraini, N. W., & Firmansyah, A. (2019). Pemanfaatan cangkang kerang hijau sebagai sumber kalsium karbonat untuk sintesis HAp. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 22(3), 133–138.
- Yusuf, M., Ramadhani, R., & Sugiharto, A. (2019). Analisis kristalinitas hidroksiapatit sintetis terhadap potensi biokompatibilitasnya. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 9(1), 51–58.