

BAB II DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Cangkang kerang (*Amusium pleuronectes*) berfungsi sebagai sumber daya alam untuk produksi hidroksiapatit. Penelitian ini berupaya untuk mensintesis hidroksiapatit dari cangkang kerang dan menganalisis karakteristik material yang dihasilkan. Proses yang dilakukan meliputi pembakaran cangkang pada berbagai suhu (700°C, 800°C, dan 900°C) dan durasi (6 jam, 4,5 jam, dan 3 jam), diikuti dengan sintesis hidroksiapatit menggunakan amonium dihidrogen fosfat. Hasil HAp optimal dicapai pada suhu pembakaran 800°C selama durasi 4,5 jam, dengan laju perendaman 75,20%. Hidroksiapatit hasil sintesis menunjukkan kandungan kalsium dan fosfor masing-masing sebesar 59,09% dan 40,91%, menghasilkan rasio kalsium terhadap fosfor sebesar 1,44, dengan diameter partikel rata-rata sebesar 396,88 nm. HAp menunjukkan morfologi yang ditandai dengan bentuk aglomerat tanpa permukaan yang jelas, dengan tepi yang tajam dan runcing, sehingga aman untuk diaplikasikan pada jaringan lunak manusia. (Sari et al., 2022).

Di Kabupaten Brebes, cangkang kerang berfungsi sebagai elemen dasar untuk kerajinan tangan, khususnya dalam pembuatan hiasan dinding. Cangkang kerang dapat berfungsi sebagai prekursor kapur, sehingga memudahkan pembentukan bahan biokeramik kalsium fosfat melalui metode presipitasi, sehingga meningkatkan nilai tambah. Prosedur sintesis dilakukan melalui metode presipitasi basah, dengan pengaturan pH 6-7, 7-8, dan 8-9, diikuti dengan kalsinasi pada suhu berkisar 800 hingga 900°C. Hasil mineralogi yang diperoleh melalui analisis XRD tidak menunjukkan adanya variasi yang berarti dalam bentuk kristal pada berbagai suhu kalsinasi; namun, pengaturan pH menunjukkan pengaruh yang substansial terhadap perkembangan fase mineral. Khususnya, fase mineral hidroksiapatit muncul pada tingkat pH berkisar antara 8 hingga 9. Analisis yang dilakukan menggunakan FTIR pada kisaran pH 8-9 dan suhu kalsinasi 900°C menunjukkan spektrum yang menampilkan pita serapan yang berbeda pada bilangan gelombang 555,50 dan 609,51 cm⁻¹. Selain itu, getaran gugus OH diamati pada panjang gelombang antara 3650-3000 cm⁻¹, yang menandakan pembentukan fase mineral hidroksiapatit (HAp) (Rachman et al., 2019).

Hidroksiapatit, suatu bentuk kalsium fosfat, menonjol sebagai biokeramik terkemuka yang diteliti secara ekstensif karena aplikasinya dalam mengatasi kerusakan tulang dan berfungsi sebagai bahan pelapis untuk implan. Signifikansinya terletak pada kemiripannya dengan morfologi dan komposisi kimia jaringan keras yang ditemukan dalam tubuh manusia. Metode sintesis gelombang mikro (*microwave*) menonjol sebagai pendekatan yang efektif, meningkatkan kinetika reaksi dan secara signifikan mengurangi waktu reaksi dibandingkan dengan teknik pemanasan tungku tradisional (*furnace*). Hasil optimal dicapai melalui sintesis hidrotermal, menghasilkan kemurnian 97,46% dan ukuran kristal berukuran 141,44 nm, dengan durasi 16 jam pada suhu 160°C. Penelitian ini meneliti HAp yang diproduksi melalui metode gelombang mikro dibandingkan dengan HAp yang disintesis melalui metode hidrotermal yang dikembangkan oleh CBIOM3S, bersama dengan HAp yang tersedia secara komersial. Penelitian ini menunjukkan bahwa hidroksiapatit yang berasal dari cangkang kepiting menggunakan metode gelombang mikro (*microwave*) mencapai kristalinitas 79,9% dan ukuran kristal berukuran 8,73 nm (Perwiranegara et al., 2021).

Penelitian ini berbasiskan dasar dari cangkang kerang darah yang menggunakan metode *microwave-assisted* dan dikompositkan dengan senyawa kamper. HAp telah terbentuk pada suhu klasifikasi 900°C dan waktu penahanan selama 8 jam, namun masih terdapat pengotor CaCO_3 . Hasil morfologi HAp menunjukkan partikel berbentuk poligona, morfologi SEM HAp/kamper mengkonfirmasi adanya kamper dengan bentuk seperti benang. Kemurnian senyawa dibuktikan dengan munculnya satu spot produk pada hasil uji KLT dengan rendemen tertinggi 86,15%. Spektrum FTIR senyawa spirooksindol mengkonfirmasi adanya gugus OH, C=C, C-C, NH_2 , Nitril, dan C=O. Penggunaan katalis HAp/kamper untuk sintesis senyawa spirooksindol-kromen hanya efektif untuk dua kali penggunaan (Nuraini, 2024).

2.2 Biomaterial

Biomaterial mencakup zat buatan dan alami yang dirancang untuk menjalankan fungsi tubuh dan memfasilitasi regenerasi bagian atau jaringan tubuh. Biomaterial memiliki struktur yang memungkinkannya untuk berinteraksi dengan sistem biologis tubuh. Biomaterial harus memiliki karakteristik biokompatibel, yang menandakan kemampuannya untuk berintegrasi dengan mulus dengan sistem biologis tubuh tanpa

menyebabkan kerusakan, baik pada tingkat seluler maupun sistemik. Biomaterial berfungsi untuk meningkatkan, memulihkan, atau meregenerasi jaringan, organ, atau fungsi tubuh apa pun yang telah terganggu karena trauma, penyakit, atau cedera (Han et al., 2022). Sejumlah kriteria harus dipenuhi agar biomaterial dapat digunakan sebagai implan dalam tubuh manusia, sebagaimana diuraikan oleh Muhamadin et al. (2023):

1. Kompatibilitas dengan organ atau jaringan yang ditentukan
2. Kriteria untuk penerimaan farmakologis mencakup karakteristik seperti tidak beracun, hipoalergenik, nonimunogenik, dan nonkarsinogenik, antara lain.
3. Menunjukkan kelembaman dan stabilitas kimia.
4. Ketahanan material yang sesuai.
5. Daya tahan yang cukup dari waktu ke waktu.
6. Seni desain rekayasa yang baik.
7. Mencapai berat dan kepadatan yang sesuai.
8. Relatif terjangkau, mudah ditiru, dan mudah diproduksi dalam skala besar.

Biokompatibilitas mengacu pada kapasitas suatu bahan untuk berinteraksi dengan sel, jaringan, atau sistem metabolisme hidup tanpa menimbulkan toksisitas, cedera, atau respons imun saat beroperasi di lingkungan yang ditentukan. Biokompatibilitas berfungsi sebagai kriteria penting untuk menilai kesesuaian suatu bahan untuk digunakan dalam tubuh, di samping pertimbangan sifat fisik dan kimianya, kemudahan pemrosesan, daya tarik estetika, dan efektivitas biaya. Biokompatibilitas biasanya dinilai melalui evaluasi sitotoksitas lokal dan sistemik, di samping potensi untuk menimbulkan alergi dan efek karsinogenik. Uji biokompatibilitas bertujuan untuk menjelaskan hubungan antara bahan dan jaringan tubuh. Respons inflamasi bermanifestasi sebagai peningkatan jumlah sel neutrofil, terutama di bagian tepi jaringan yang mengalami reaksi toksik. Sebaliknya, respons imun dipicu jika terjadi penolakan bahan implan, yang ditandai dengan reaksi hipersensitivitas (Ma'ruf, 2018).

Pilihan logam untuk implan dapat ditentukan oleh aplikasi yang dimaksudkan. Baja tahan karat tipe 316L (SS316L) tetap menjadi pilihan logam utama untuk berbagai implan, mulai dari ortopedi hingga kedokteran gigi. Meskipun demikian, paduan Co-Cr muncul sebagai pilihan optimal untuk implan yang memerlukan

ketahanan aus yang luar biasa, khususnya dalam konteks sendi buatan. Polimer berfungsi sebagai biomaterial penting dalam aplikasi biomedis, menawarkan keunggulan tersendiri dibandingkan implan logam. Kemudahan fabrikasi, sifat fisik dan mekanis yang dapat disesuaikan, dan efektivitas biaya menjadikannya pilihan yang lebih disukai di bidang ini. Biopolimer dapat dikategorikan menjadi dua kelompok berbeda:

- 1) Bahan yang tidak menyerap (*Non-absorbabel*), antara lain akrilik, nilon (*nylon*), polietilena, dan lain-lain.
- 2) Bahan yang dapat diserap (*Absorbabel*), antara lain asam poliglikolat dan asam polilaktat.

Strukturnya dapat berupa padatan atau gelatin, atau sebagai lapisan halus pada permukaan implan logam, yang memiliki karakteristik mekanis dan fisik yang dapat disesuaikan. Kemajuan terkini telah memperlihatkan penerapan polimer yang dapat diserap (polimer absorbabel) sebagai lapisan pembawa penghantaran obat (*drug delivery carrier*) pada cincin jantung (*drug eluting stent*), yang umumnya dikenal sebagai stent yang mengeluarkan obat (Hendra Hermawan, 2019).

Biomaterial yang terdiri dari keramik atau biokeramik telah mengubah aplikasi biomedis, khususnya dalam bidang implan, karena biokompatibilitasnya yang luar biasa. Biomaterial keramik, yang sering disebut sebagai biokeramik, dapat dikategorikan menjadi tiga kelompok berbeda:

- 1) Biokeramik inert meliputi bahan-bahan seperti zirkonia, alumina, aluminium nitrida, dan karbon;
- 2) Biokeramik aktif meliputi zat-zat seperti hidroksiapatit dan bioglass, dsb.
- 3) Biokeramik biodegradable, meliputi kalsium aluminat dan kalsium fosfat, dsb.

Sifat-sifat yang melekat (*inert*), kekuatan tekan yang luar biasa, dan daya tarik visual menjadikan biokeramik sebagai pilihan yang menarik untuk pembuatan mahkota gigi tiruan. Berbagai biokeramik dapat diaplikasikan sebagai pelapis pada implan logam, seperti nitrida (*nitride*), karbon seperti berlian (*diamond like carbon*), dan yang lebih baru, bioglass dan hidroksiapatit. Biomaterial komposit, yang sering disebut sebagai biokomposit, adalah material rumit yang terbentuk dari kombinasi dua atau lebih zat atau proses yang berbeda, baik yang diamati pada skala

mikro maupun makro. Biokomposit dapat dibuat dengan cermat untuk mencapai berbagai sifat mekanis dan biologis; namun, produksinya menimbulkan tantangan karena pertimbangan desain yang rumit dan kebutuhan untuk memperhitungkan variabel desain tambahan. Mengenai karakteristik material yang memungkinkan pencapaian kekakuan, kekuatan, ketangguhan, dan keringanan secara bersamaan. Contoh biomaterial komposit meliputi implan ortopedi berpori, tambalan gigi, dan semen tulang, yang terdiri dari resin polietilen yang diperkuat dengan akrilik (Hendra Hermawan, 2019).

2.3 Hidroksiapatit

Hidroksiapatit merupakan biomaterial terkemuka yang sering digunakan dalam aplikasi kontemporer. Eksplorasi hidroksiapatit telah melonjak, didorong oleh beragam aplikasinya di bidang biomedis, termasuk perannya sebagai pengisi tulang, pelapis implan bioaktif, sistem perbaikan jaringan tulang, dan pembawa untuk distribusi obat. Hap dikenal karena biokompatibilitas dan karakteristik konduktifnya. Hidroksiapatit menunjukkan karakteristik serbaguna, ditoleransi dengan baik dalam jaringan tulang (imunogenisitas), dapat meningkatkan perbaikan struktur tulang yang cedera, tidak beracun, tidak meradang, dan memiliki komposisi kimia yang mirip dengan tulang. Hidroksiapatit memainkan peran penting dalam susunan anorganik jaringan tulang, yang mencakup 60-70% fase mineral dalam tulang manusia. Senyawa ini terutama terdiri dari fosfor dan kalsium dan termasuk dalam kategori senyawa kalsium fosfat. Hidroksiapatit digunakan dalam bidang medis karena kemampuannya yang luar biasa untuk menyatu dengan jaringan keras di tulang, memfasilitasi regenerasi struktur tulang yang rusak, dan sifatnya yang tidak beracun, tidak meradang, dan tidak imunogenik, serta memiliki komposisi kimia yang sangat mirip dengan tulang.

Sifat mekanis dan biologis hidroksiapatit adalah sebagai berikut. Hidroksiapatit menunjukkan biokompatibilitas, bioaktivitas, dan *osteokonduktivitas* yang luar biasa, sehingga menjadikannya pilihan yang umum di bidang medis. Hidroksiapatit dianggap sebagai pilihan yang aman untuk bahan implan karena sifatnya yang tidak beracun (*non toxic*), integrasi yang cepat dengan tulang, ketahanan terhadap korosi, dan kemampuan untuk mendorong pembentukan tulang baru melalui arsitekturnya yang berpori. Mengingat karakteristik ini,

hidroksiapatit cenderung tidak menimbulkan kerusakan pada jaringan tubuh yang berdekatan atau memicu respons penolakan dari sistem kekebalan tubuh manusia. Hidroksiapatit menunjukkan sifat mekanis yang sangat mirip dengan tulang (Saikaew et al., 2014) (Watson et al., 2016).

2.4 Metode Sintesis Hidroksiapatit

Berbagai teknik sintesis dapat digunakan untuk menghasilkan hidroksiapatit, termasuk metode *sol-gel*, mekanokimia (*mechanochemical*), gelombang mikro (*microwave*), *precipitation*, hidrotermal, emulsi (*emulsion*), dan metode kering padatan (*dry methods solid state*). Berbagai metodologi menghasilkan karakteristik yang berbeda dalam morfologi, stoikiometri, ukuran butiran, dan bentuk kristal hidroksiapatit (“*Comprehensive Review of Preparation Methodologies of Nano Hydroxyapatite*,” 2014). Tabel 2.1 menyajikan analisis komprehensif tentang manfaat dan kekurangan yang terkait dengan berbagai metode sintesis hidroksiapatit.

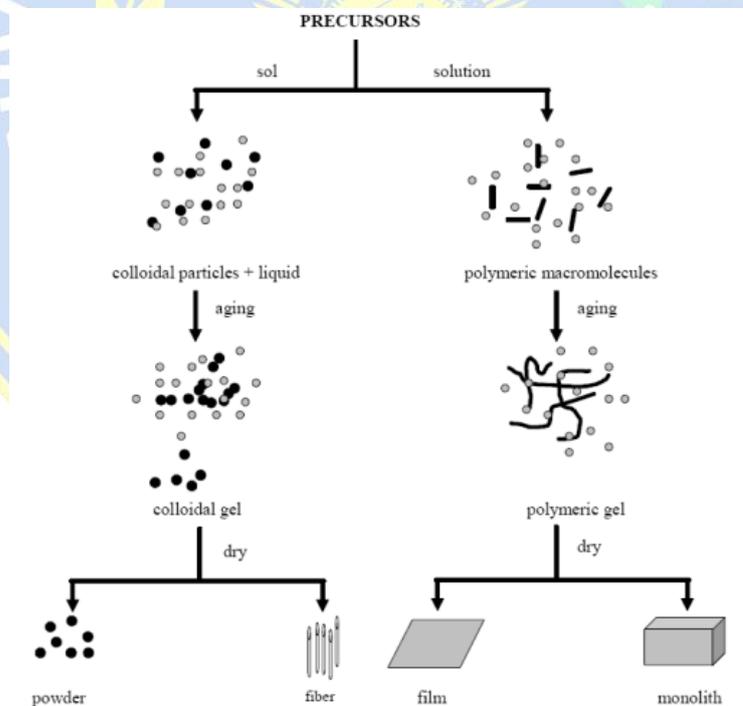
Tabel 2.1 Perbandingan Metode Sintesis Hidroksiapatit (“*Comprehensive Review of Preparation Methodologies of Nano Hydroxyapatite*,” 2014).

Metode	General remarks	Kelebihan	Kekurangan
<i>Precipitation</i>	-Ukuran butir meningkat dengan naiknya suhu sintering -Ukuran butir 7.7-59.0 nm	-Murah -Ukuran Hap nano -Sedikit bahan kimia	-Morfologi Hap beragam -kristalinitas rendah
<i>Emulson</i>	-kristalinitas meningkat dengan naiknya suhu pemanasan -ukuran partikel 200-1300 μm -Rasio Ca/P 1.5-1.2	-Fasa kemurnian Hap tinggi	-Biaya mahal -Banyak bahan kimia -Non-stoikiometri -Kristalinitas rendah
Hidrotermal	-Morfologi Hap <i>rod-like</i> , bentuk heksagonal -Rasio Ca/P 1.67	-kristalinitas HAp tinggi -HAp stoikiometri	-Biaya mahal
<i>Sol-gel</i>	-Rasio Ca/P	-Ukuran Hap	-Morfologi HAp



2.4.1. Metode Sol-gel

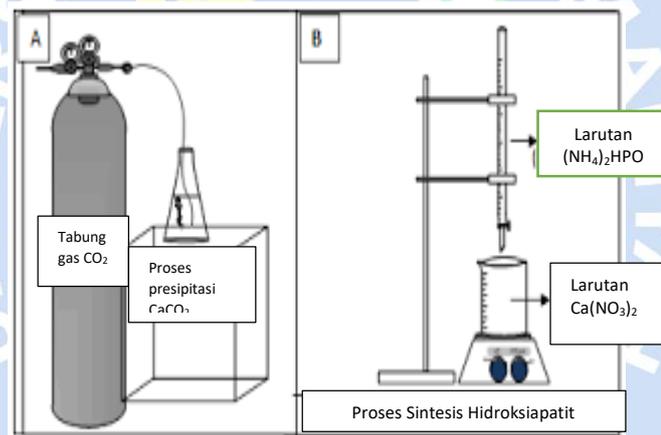
Metode *sol-gel* menonjol sebagai pendekatan yang efektif untuk persiapan bahan oksida logam berukuran nano, karena memungkinkan kontrol yang tepat atas parameter selama proses sintesis. Pendekatan ini melibatkan pencampuran molekul kalsium dan fosfor, meningkatkan karakteristik kimia dari hidroksiapatit yang dihasilkan (Lett et al., 2019). Gambar 2.1 menggambarkan metodologi yang digunakan dalam sintesis oksida logam melalui teknik sol-gel, seperti yang dilakukan oleh Slamet et al. Inisiasi melibatkan alkoksida logam dan klorida logam, yang kemudian terlibat dalam reaksi hidrolisis dan polikondensasi, yang mengarah pada pembentukan koloid. Koloid ini terdiri dari partikel padat, dengan ukuran mulai dari 1 nm hingga 1 μm , yang terdispersi dalam pelarut. Zat awal atau *precursor* dapat diendapkan ke substrat untuk membuat film, dengan memanfaatkan metode seperti pelapisan celup (*dip-coating*) atau pelapisan putar (*spin-coating*). Film ini kemudian ditempatkan dalam wadah yang sesuai dengan bentuk yang diinginkan, memfasilitasi produksi keramik monolitik, kaca, serat, membran, aerogel, atau sintesis bubuk, yang mencakup butiran mikro dan nano (Widodo, 2010).



Gambar 2. 1 Skema umum proses pembuatan sol gel (Widodo 2010)

2.4.2. Metode *Precipitation*

Metode presipitasi merupakan teknik yang paling umum digunakan untuk sintesis hidroksiapatit. Metode ini memerlukan biaya yang relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan pendekatan alternatif. Penelitian yang dilakukan oleh Tiffani dan rekan-rekannya menggunakan kulit telur ayam sebagai sumber kalsium, bersama dengan HNO_3 dari Merck, 33% NH_4OH dari Merck, gas CO_2 , kertas pH, air suling, dan $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ yang juga bersumber dari Merck. Dan diperoleh HAP terbaik pada kondisi konsentrasi pelarut HNO_3 0,5 M dan rasio mol Ca/P reaktan 1,77. Pada kondisi ini memiliki ukuran partikel sebesar 40,38 nm, luas permukaan 3,606 m^2/g , dan morfologi HAP berbentuk agglomerat. Gambar 2.2 mengilustrasikan representasi skematik produksi hidroksiapatit dengan menggunakan metode presipitasi yang telah dilakukan. Tingkat pH dipertahankan pada 10-1, dengan suhu 30°C , sedangkan stoikiometri Ca/P ditetapkan pada 1,57, 1,67, dan 1,77 (Tiffani Qalbi, Yelmida Azis, 2018).



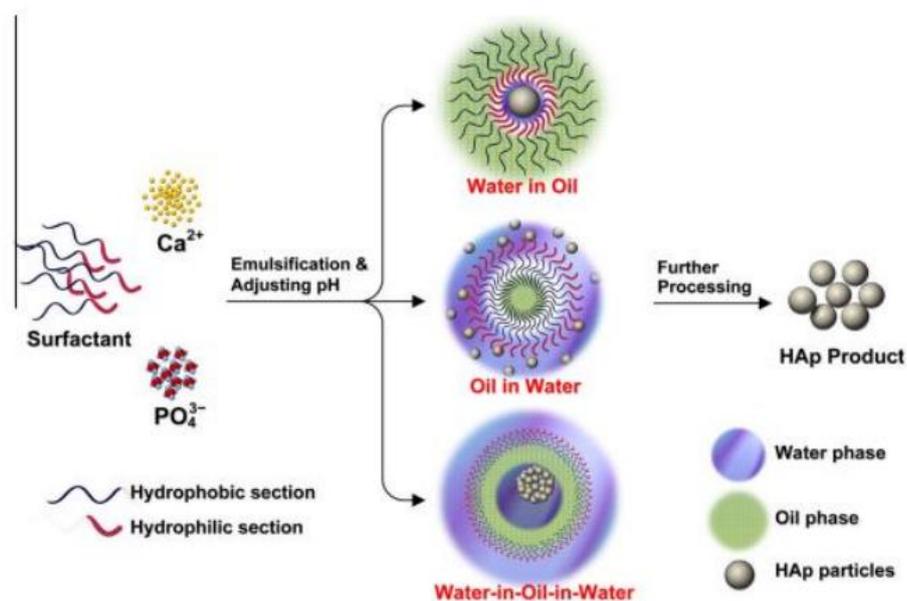
Gambar 2. 2 Skema sintesis hidroksiapatit metode precipitation (Tiffani Qalbi, Yelmida Azis 2018)

2.4.3 Metode Emulsi

Metode emulsi melibatkan pembuatan campuran heterogen di mana setidaknya satu cairan yang tidak bercampur didispersikan dalam bentuk tetesan. Sistem ini biasanya dicirikan sebagai *water-in-oil* (W/O) atau *oil-in-water* (O/W). Fase awal yang disebutkan adalah fase terdispersi, dan sistem O/W umum digunakan untuk produksi HA. Klasifikasi teknik ini bergantung pada dimensi tetesan air, khususnya skala domain reaksi, yang dapat mengategorikannya sebagai emulsi atau mikroemulsi. Interaksi terjadi ketika dua tetesan berbeda, yang

masing-masing mengandung reaktan, bersentuhan satu sama lain. Partikel nano dan mikro HA dihasilkan melalui proses mikroemulsi dan emulsi.

Sejumlah penelitian, termasuk yang dilakukan oleh Chen et al. dan Sadat-shojai et al., telah mengeksplorasi metode emulsi, yang menyoroti perlunya suhu kalsinasi dan tahap sintering tertentu dalam proses sintesis HAp. Bahan kimia yang diperlukan untuk sintesis jauh lebih banyak jumlahnya dibandingkan dengan metode alternatif, karena pendekatan sintesis khusus ini sangat bergantung pada zat-zat tertentu, termasuk minyak dan surfaktan. Akibatnya, biaya yang terkait dengan upaya ini cukup besar. Lebih jauh, HAp yang dihasilkan menunjukkan karakteristik non-stoikiometris dan menunjukkan kristalinitas rendah. Gambar 2.3 mengilustrasikan proses pembentukan hidroksiapatit melalui metode emulsi, seperti yang dijelaskan oleh B. Chen et al. (2009) dan Sadat-shojai et al. (2013).



Gambar 2. 3 Skema sintesis hidroksiapatit metode emulsi (Sadat-shojai et al. 2013).

2.4.4 Metode *Mechanochemical*

Sintesis *Mechanochemical* merupakan proses solid-state yang canggih di mana fenomena mekanik dan kimia saling terkait erat pada tingkat molekuler. Sintesis mekanokimia dapat dilakukan dalam berbagai kondisi, termasuk penggunaan atmosfer reaktif melalui ball milling reaktif (BM), dalam kondisi kriogenik melalui cryomilling, atau dengan adanya pelarut. Lebih jauh, berbagai

parameter eksperimen dapat diatur dengan cermat, yang memengaruhi atribut material yang dihasilkan: durasi milling, rasio berat serbuk terhadap bola, suhu milling, frekuensi milling, atmosfer milling yang dipilih, dan tekanan gas, antara lain. Berdasarkan parameter sintesis, seseorang dapat memperoleh berbagai produk, termasuk fase metastabil, fase bertekanan tinggi, dan fase amorf atau tidak teratur. Variabilitas ini memfasilitasi terciptanya senyawa berbutir sangat halus dan berstruktur nano yang dicirikan oleh komposisi yang homogen. Akibatnya, pemrosesan mekanokimia muncul sebagai pendekatan multifaset yang mampu memfasilitasi persiapan berbagai macam material. Gambar 2.4 mengilustrasikan representasi skematis dari proses persiapan hidroksiapatit yang memanfaatkan metode mekanokimia.

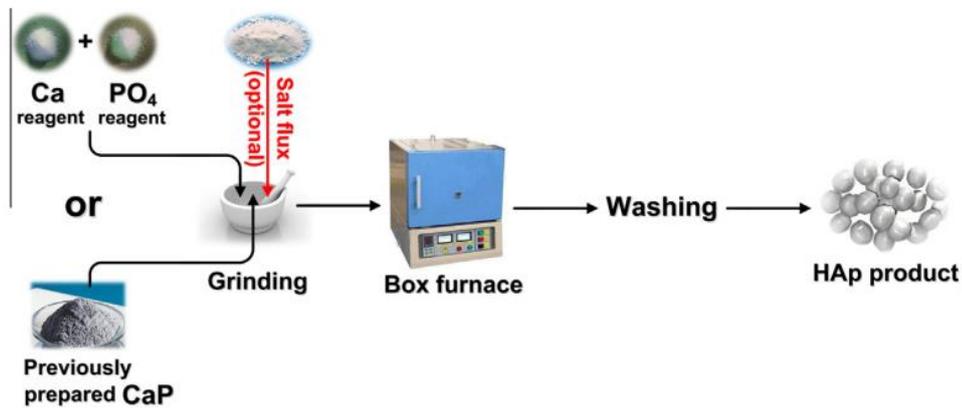


Gambar 2. 4 Skema pembuatan hidroksiapatit metode mechanochemical.

2.4.5. Metode *Solid-State*

Metode *solid-state* merupakan pendekatan yang sudah lama dikenal di bidang ini. Prosedur ini bergantung pada difusi ion yang efektif di antara bahan baku bubuk, sehingga memerlukan proses yang beroperasi pada suhu tinggi, yang sering kali mengakibatkan berkurangnya efisiensi saat reaksi terjadi di bawah 1250°C . Meskipun demikian, teknik yang digunakan relatif mudah, tetapi mencakup beberapa proses. Untuk mencapai keseragaman dan ukuran partikel yang diinginkan, seseorang harus memulai dengan bahan yang dimaksudkan untuk penggilingan bola, dengan menggabungkan senyawa pelengkap seperti silikon dioksida, alumina, dan fluorida. Selain itu, pengikat seperti PVA dan media organik seperti aseton harus digunakan untuk membuat bubuk sebelum proses penggilingan. Bubuk tersebut selanjutnya harus menjalani proses pengeringan. Bubuk yang

dihasilkan selanjutnya dapat diubah menjadi pelet melalui proses pengepresan panas atau dingin, dengan menggunakan tekanan yang dapat mencapai hingga 135 MPa. Akhirnya, proses sintering dilakukan pada suhu yang mencapai 1.250°C untuk memfasilitasi kristalisasi produk. Ilustrasi 2.5 menyajikan representasi skematis dari proses produksi hidroksiapatit yang menggunakan metode solid-state, seperti yang dijelaskan oleh Cox et al. (2015) dan Sadat-shojai et al. (2013).



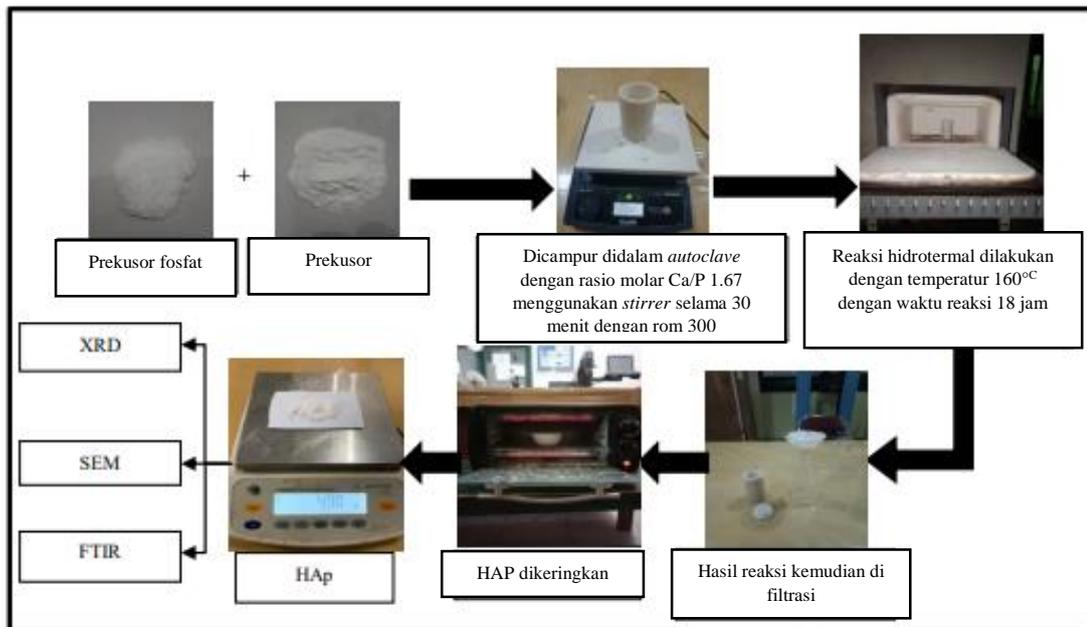
Gambar 2. 5 Skema pembuuatan hidroksiapatit metode *solid-state*.

2.4.6 Metode Hidrotermal

Metode Hidrotermal melibatkan penggunaan pelarut yang mengandung prekursor ion terlarut, yang dipanaskan dalam wadah tertutup. Dalam konteks sintesis hidrotermal, pelarut yang digunakan adalah air. Suhu pelarut melampaui titik didih karena tekanan autogenous di dalam wadah melebihi tekanan sekitar. Metode ini melibatkan pemanfaatan tekanan uap air bersamaan dengan tekanan untuk memfasilitasi sintesis bahan keramik. Perubahan karakteristik pelarut dan reaktan, seperti kelarutan, pada suhu tinggi memungkinkan kontrol yang lebih baik atas variabel eksperimen. Hal ini meningkatkan prediktabilitas reaksi, karena proses nukleasi kristal, pertumbuhan, dan penuaan dapat dikontrol secara efektif (Cox et al., 2015).

Metode hidrotermal untuk memproduksi hidroksiapatit dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk suhu hidrotermal, waktu reaksi, rasio kalsium terhadap fosfor, dan kadar pH (Ismail, Laroybafih, et al., 2021). Nilai pH berperan sebagai faktor utama dalam perkembangan kristal hidroksiapatit. Perkembangan kristal hidroksiapatit yang dihasilkan dari peningkatan kadar pH menunjukkan karakteristik isotropik, yang menghasilkan kristal yang berbentuk bulat atau

menyerupai batang pendek. Dalam berbagai penelitian, peningkatan kadar pH dan suhu sintering menyebabkan perkembangan dan penggabungan kristal yang menunjukkan struktur kapsul berpori. Ilustrasi 2.6 menyajikan representasi skematis sintesis hidrotermal hidroksiapatit, sebagaimana dijelaskan secara rinci oleh Ismail, Laroybafih, dkk. pada tahun 2021.

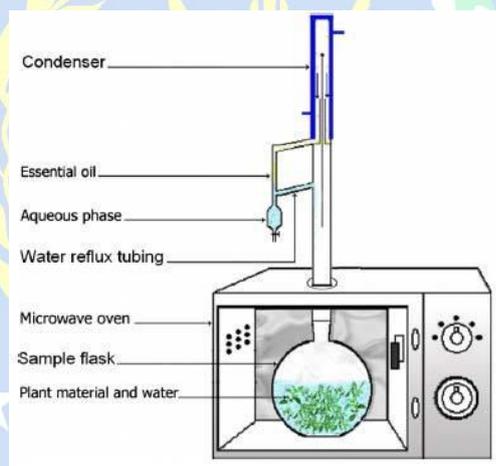


Gambar 2. 6 Skema pembuatan hidroksiapatit metode hidrotermal.

2.4.7 Metode Microwave

Metode gelombang mikro (*Microwave*) menyajikan pendekatan yang sangat efisien untuk mensintesis bubuk nano-kristal HAp dalam jangka waktu yang singkat. Teknik ini dicirikan oleh kesederhanaannya, efektivitas biaya, kemudahan replikasi, dan potensi untuk pengoptimalan dalam produksi skala besar. Bubuk HAp, yang dicirikan oleh ukuran partikel rata-rata 12nm, disintesis melalui teknik gelombang mikro (*Microwave*) (Kalita & Verma, 2010). Hidroksiapatit yang diproduksi melalui gelombang mikro (*Microwave*) menunjukkan permukaan serat yang terjalin jelas yang dihiasi dengan kristal hidroksiapatit, berbeda dengan permukaan serat hidroksiapatit yang dihasilkan melalui metode hidrotermal konvensional, di mana kristal hidroksiapatit yang dihasilkan tampak lebih tersebar dan berukuran lebih besar. Temuan yang disajikan menunjukkan bahwa proses nukleasi dan pertumbuhan dipengaruhi oleh metode sintesis yang digunakan.

Dimensi kristal yang berkembang bergantung pada keseimbangan antara nukleasi dan laju pertumbuhan kristal. Ketika laju nukleasi menang atas laju pertumbuhan kristal, kristal yang lebih kecil dihasilkan. Studi ini menyimpulkan bahwa laju pemanasan secara signifikan memengaruhi laju nukleasi yang diamati. Penelitian yang dilakukan oleh Alireza dan rekan-rekannya menjelaskan rincian yang disajikan pada Gambar 2.7 mengenai oven gelombang mikro (*Microwave*). Perangkat ini beroperasi pada frekuensi 2450 MHz dan merupakan gelombang mikro (*Microwave*) multimode, yang mampu menghasilkan daya keluaran maksimum 900 W. Dalam prosedur MHG standar yang dilakukan pada tekanan atmosfer, 100 gram rosemary dipanaskan selama 15 menit, disertai dengan penambahan 300 mililiter air. Hasil optimal dari daya gelombang mikro (*Microwave*) tertinggi adalah 40%. Durasi ekstraksi dan volume minyak atsiri yang diperoleh dalam contoh ini adalah sekitar 30 menit dan 1,5 cc (Fazlali et al., 2015).



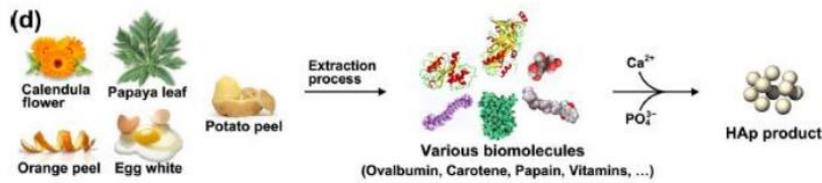
Gambar 2.7 Skema Hidroksiapatit Metode Microwave.

2.5 Bahan Baku Alami Sintesis hidroksiapatit

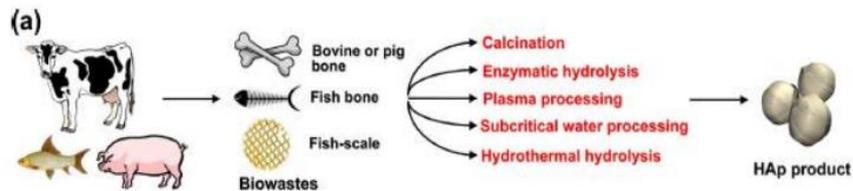
Organisme hidup menunjukkan kapasitas yang luar biasa untuk sintesis HAp, yang dikaitkan dengan sifat *physicochemical* yang sangat mirip dengan tulang apatit manusia. Gambar 2.8 – 2.12 menggambarkan lima kategori berbeda yang terkait dengan pemanfaatan sumber daya alam dalam sintesis hidroksiapatit. Kategori-kategori ini meliputi ekstraksi mineral dari limbah alam, sintesis yang berasal dari kulit telur, sintesis yang memanfaatkan tulang organisme laut, sintesis yang menggunakan biomolekul alami, dan sintesis melalui membran biologis

(jurnal) dan hidro biasa

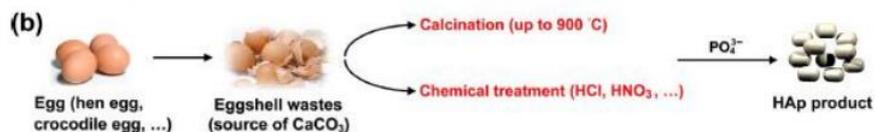
Electrolysis of biomaterials from waste in laboratory scale can be used to produce HAp product.



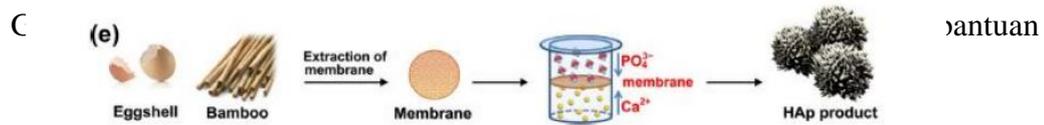
Sintesis Hap dari limbah alam biasanya memerlukan proses pemanasan ekstensif yang berlangsung beberapa jam, yang selama proses tersebut komponen organik tulang dihilangkan, sehingga menghasilkan Hap murni sebagai produk akhir. Sejumlah penelitian telah menunjukkan sintesis Hap yang memanfaatkan bubuk kulit kerang. Prosedur yang diuraikan memerlukan persiapan cangkang yang cermat, yang biasanya mengalami penghancuran atau penggilingan hingga mencapai bentuk bubuk (Castro et al., 2022) (Ferro & Guedes, 2019).



Gambar 2.8 Persiapan Hap Dari Sumber Biogenik: (a) ekstrasi mineral dari limbah alam (Sadat-shojai et al., 2013).



Gambar 2.11 Persiapan Hap Dari Sumber Biogenik: (d) sintesis dengan bantuan biomoleul (Sadat-shojai et al., 2013).



Di luar pemanfaatan jaringan keras yang berasal dari hewan, telah banyak upaya untuk mensintesis hidroksiapatit, khususnya hidroksiapatit berkarbonasi, melalui pemanfaatan kembali limbah kulit telur. Gambar 2.12 (b) menggambarkan bahwa kulit telur sebagian besar terdiri dari kalsium karbonat, yang terdiri dari sekitar 95-97%. Akibatnya, kulit telur berfungsi sebagai prekursor kalsium yang berharga dalam sintesis hidroksiapatit (HAp). Biasanya, kulit telur mengalami pemanasan pada suhu sekitar 900°C di dalam tungku untuk menguraikan senyawa organik dan mengubah kalsium karbonat menjadi kalsium oksida. Ketika zat ini berinteraksi dengan atmosfer, zat ini kemudian menghasilkan kalsium hidroksida, yang direpresentasikan sebagai Ca(OH)₂. Senyawa yang disintesis mengalami reaksi dengan prekursor fosfat, yang menghasilkan pembentukan kristal HAp (Sadat-shojai et al., 2013).

Berbagai pendekatan telah digunakan untuk mensintesis HAp dari kerang. Sebagian besar kerang tertentu tersusun atas kalsium karbonat, yang merupakan 95-99% dari beratnya. Kerang berfungsi sebagai sumber prekursor kalsium yang berharga dalam sintesis hidroksiapatit. Ni dan Ratner menjelaskan bahwa permukaan serpihan cangkang nacre dapat mengalami transformasi menjadi HAp dalam larutan penyangga fosfat pada suhu sekitar melalui proses reaksi permukaan. Komposisi mineral permukaan cangkang nacre diamati bertransisi dari fase aragonit CaCO₃ ke fase hidroksiapatit (HAp). Sejumlah kecil nacre diamati mengalami transformasi cepat menjadi hidroksiapatit setelah hanya satu hari perendaman dalam larutan penyangga. 41 Dalam rentang waktu 14 hari, lapisan HAp menyelimuti semua permukaan nacre. Diusulkan bahwa reaksi yang terjadi

pada permukaan nacre difasilitasi oleh mekanisme presipitasi yang melibatkan larutan penyangga (Ismail, Fitriyana, dkk., 2021).

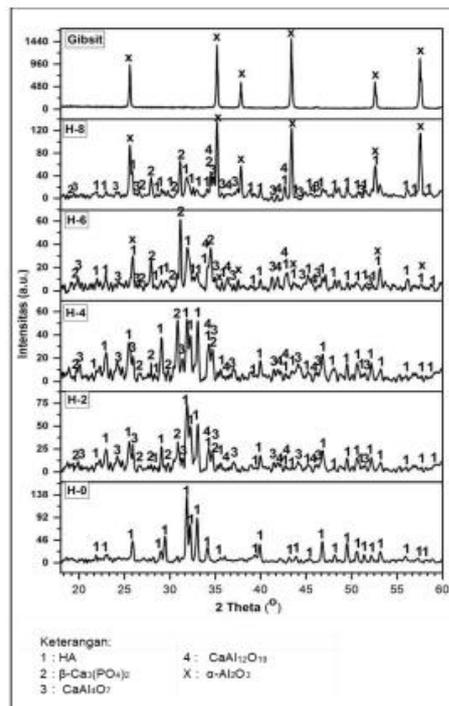
Sejumlah penelitian telah menjelaskan bahwa aplikasi membran alami dalam sintesis HAp berstruktur nano menggunakan mekanisme yang diatur oleh kontrol difusi nukleasi. Misalnya, membran kulit telur, struktur kompleks yang terdiri dari serat kolagen yang dijalin dengan pori-pori berskala nano, dapat digunakan untuk mengatur difusi ion fosfat dalam kaitannya dengan ion kalsium selama nukleasi hidroksiapatit (Zhang et al., 2011). Akibatnya, migrasi ion yang bertahap dan teratur melintasi membran memfasilitasi pembentukan struktur HAp yang menunjukkan karakteristik morfologi yang unik. Saat ini, Zhang dan rekan-rekannya telah mengembangkan struktur HAp seperti bunga dengan memanfaatkan membran kulit telur atau membran bambu. Telah diamati bahwa hidroksiapatit, yang menyerupai gugusan bunga yang menggumpal dengan kristalinitas yang menonjol, dapat disintesis pada permukaan atas atau bawah membran. Lebih jauh lagi, perbedaan yang melekat antara membran bambu, yang kaya akan selulosa, dan kulit telur, yang sebagian besar terdiri dari protein, mengakibatkan variasi dalam morfologi dan atribut lain dari struktur yang disiapkan. Lebih jauh lagi, ditunjukkan bahwa morfologi dan struktur kristal dari aglomerat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti suhu, nilai pH, dan waktu penahanan.

2.6 Aplikasi Hidroksiapatit dalam Biomedis

Hidroksiapatit berfungsi sebagai material berharga dalam aplikasi biomedis karena kemiripan kimia dan fisiknya dengan kandungan mineral yang ditemukan dalam tulang dan gigi manusia. Kesesuaian ini memberi hidroksiapatit biokompatibilitas, bioaktivitas, dan osteokonduktivitas yang sangat baik, bersama dengan afinitas yang menonjol terhadap biopolimer saat digunakan dalam tubuh manusia. Karena karakteristik ini, hidroksiapatit telah digunakan secara luas dalam pemulihan tulang yang cedera, pelapisan implan tulang, dan sebagai media untuk penghantaran obat (Arifiadi et al., 2022).

Arifiadi dan rekan-rekannya melakukan penelitian dengan memanfaatkan kapur alam Padalarang, menggunakan ukuran saringan 5 mm, diikuti dengan masa inkubasi selama 48 jam yang menghasilkan pembentukan *milk lime*. Pastikan

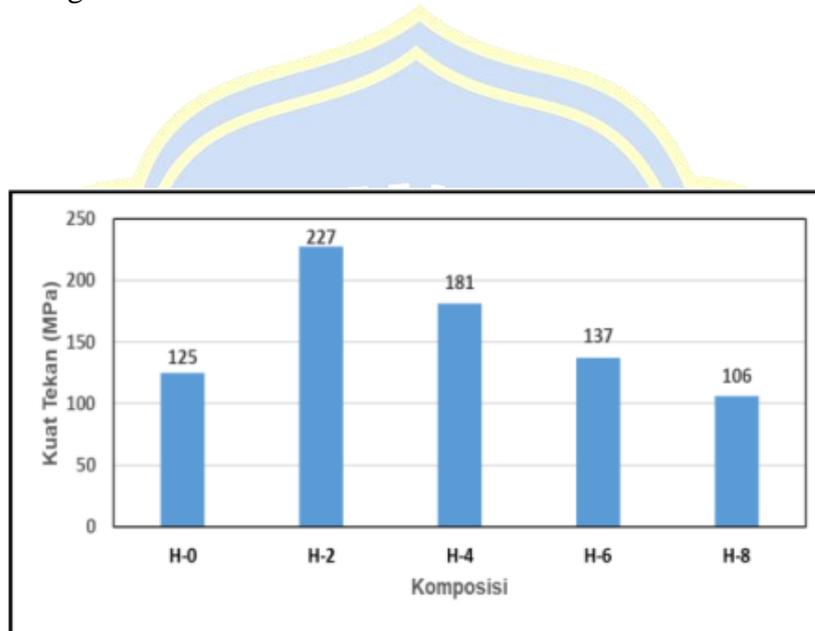
material yang digiling tetap lembap selama 24 jam, setelah itu material tersebut harus berhasil melewati saringan 100 mesh. Selain itu, sampel uji mengalami pembakaran pada suhu 1200°C selama 2 jam. Selanjutnya, produk kalsinasi disaring melalui saringan 200 mesh, setelah itu gibbsite dimasukkan dalam proporsi yang sesuai. Setelah gibbsite dimasukkan ke dalam sampel HAp yang dikalsinasi, diikuti oleh kalsinasi berikutnya pada suhu 1200°C, pola difraktogram XRD yang diilustrasikan dalam Gambar 2.13 menunjukkan munculnya beberapa fase mineral tambahan dalam sampel.



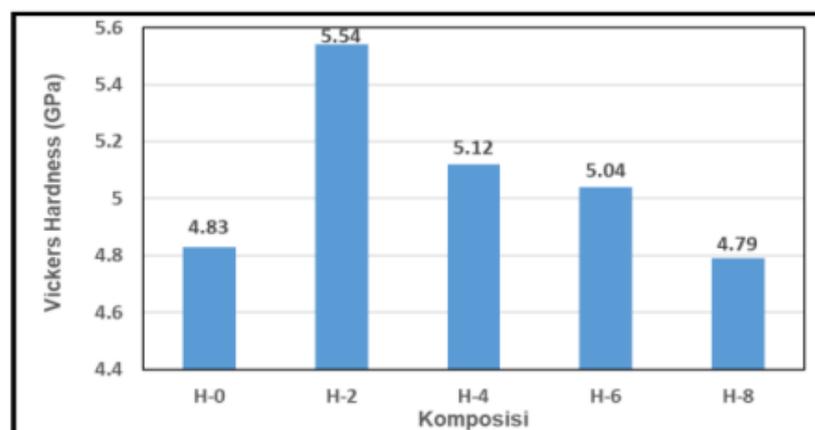
Gambar 2.13 Difraktogram sinar X sampel HAp dan HAp-Gibbsite yang telah dikalsinasi pada suhu 1200°C selama 2 jam

Data pola XRD yang disajikan pada Gambar 3 menunjukkan bahwa sampel H-2 hingga H-8 menunjukkan puncak pada sudut $2\theta = 24,3^\circ$, $25,9^\circ$, dan $34,74^\circ$, yang selaras dengan data referensi standar JCPDS no. 046-1475 untuk Grossite (CaAl₄O₇). Selain itu, puncak pada sudut $2\theta = 36,34^\circ$, $34,38^\circ$, dan $42,8^\circ$ sesuai dengan data JCPDS no. 038-0470 untuk Hibonite-5H (CaAl₁₂O₁₉). Meningkatnya proporsi gibbsite dalam sampel berkorelasi dengan penurunan intensitas kristal Grossite (CaAl₄O₇), yang berkurang dari 28,64 (H-2) menjadi 20,92 (H-4), 8,6 (H-6), dan 5,38 (H-8). Meskipun demikian, intensitas fase Hibonit-5H (CaAl₁₂O₁₉) menunjukkan peningkatan dari 3,01 (H-2), 4,47 (H-4), 9,69 (H-6), hingga 9,79 (H-

8). Karakteristik mekanis sampel HAp dan HAp-gibbsite diilustrasikan dalam Gambar 2.14, yang memperlihatkan (a) nilai kuat tekan dan (b) nilai kekerasan Vickers. Seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 4, kondisi optimal sampel dicapai dalam H-2, yang memperlihatkan kuat tekan sebesar 227 MPa dan kekerasan Vickers sebesar 5,54 GPa. Sebaliknya, sampel H-8, yang menggabungkan komposisi gibbsite yang melebihi 60%, memperlihatkan sifat yang berkurang.



a



b

Gambr

ai Kuat

Gambar 2.14 mengilustrasikan bahwa sifat mekanis sampel meningkat dengan penambahan gibbsite, mencapai puncak pada 60% berat. Kondisi optimal diamati dengan penambahan gibbsite 20%, menghasilkan kuat tekan 227 mPa dan

kekerasan Vickers 5,54 GPa. Penambahan gibbsite yang melebihi 60% berat umumnya menghasilkan penurunan sifat mekanis sampel. Fenomena ini disebabkan oleh peningkatan dekomposisi HAp menjadi β -TCP, bersamaan dengan efek kelebihan alumina yang berkontribusi pada peningkatan porositas sampel (Arifiadi et al., 2022).

2.7 Karakterisasi Hidroksiapatit

Karakterisasi sangat penting untuk menjelaskan kandungan, fase, dan struktur kristal bahan. Proses karakterisasi sangat penting untuk menjelaskan sifat-sifat bahan, khususnya dalam bidang biomaterial. Di sini, atribut bahan dapat secara signifikan memengaruhi mekanisme fisiologis tubuh, yang berpotensi menjadikannya bioaktif atau beracun. Pengujian meliputi *X-Ray Diffractometer* (XRD), *Fourier Transform Infra Red* (FTIR), dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM).

2.7.1 *X-Ray Diffractometer* (XRD)

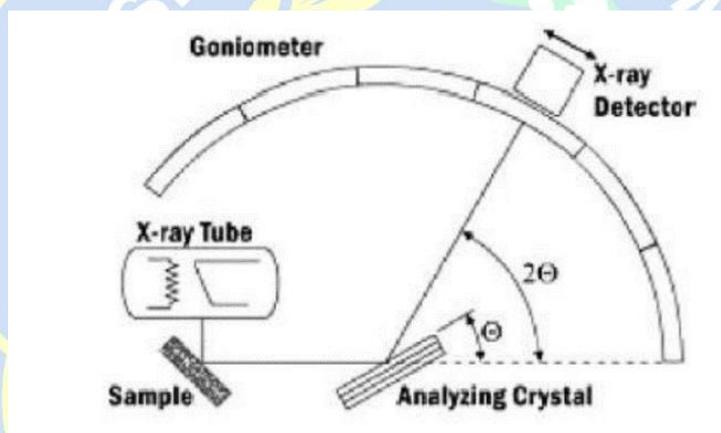
X-ray diffraction merupakan teknik yang sering digunakan untuk menyelidiki struktur kristal dan pemisahan atom. Difraksi sinar-X bergantung pada interferensi konstruktif yang terjadi antara sinar-X monokromatik dan sampel kristal. Sinar-X dihasilkan melalui tabung sinar katode, yang disaring dengan cermat untuk menghasilkan radiasi monokromatik. Radiasi ini kemudian dikumpulkan untuk meningkatkan konsentrasi dan selanjutnya diarahkan ke sampel, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.10 (Bunaciu et al., 2015).

Penggabungan sinar datang dengan sampel menghasilkan interferensi konstruktif, bersamaan dengan munculnya sinar terdifraksi, ketika kondisinya sesuai dengan *Bragg's law* (Jurnal).

$$n\lambda = 2d \sin \theta \dots\dots\dots(2.2)$$

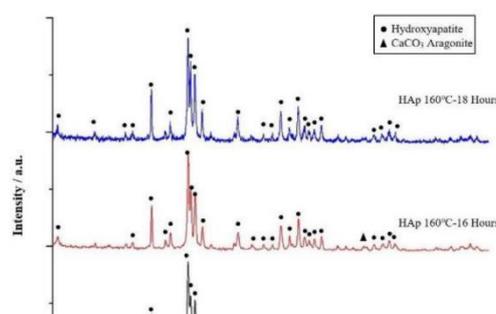
Dalam konteks ini, n merupakan bilangan bulat, λ menunjukkan panjang gelombang sinar-X, d menandakan jarak antarbidang yang muncul dari difraksi, dan θ menunjukkan sudut difraksi. Prinsip ini menghubungkan panjang gelombang radiasi elektromagnetik dengan sudut difraksi dan jarak kisi dalam sampel kristal. Sinar-X yang terdifraksi selanjutnya dideteksi, diproses, dan diukur. Untuk memastikan bahwa semua arah difraksi potensial kisi tercapai, sampel harus dipindai melintasi spektrum sudut 2θ , mengingat orientasi acak yang melekat pada

bahan bubuk. Transformasi puncak difraksi menjadi jarak-d memudahkan identifikasi senyawa, karena setiap senyawa memiliki susunan jarak-d yang berbeda. Hal ini biasanya dicapai melalui penjajaran jarak-d terhadap pola referensi standar. Fase kristal bahan sebagian besar dicirikan melalui difraksi sinar-X, khususnya untuk tujuan mengidentifikasi zat yang tidak diketahui dan mengeksplorasi komposisi mineralogi. Data dari difraksi serbuk pada dasarnya berasal dari susunan atom dan molekul sebagaimana dijelaskan oleh prinsip-prinsip kristalografi fisik. Memanfaatkan XRD menghadirkan banyak manfaat, seperti: Metode ini memungkinkan persiapan sampel yang tidak merusak, cepat, dan mudah, memastikan presisi tinggi dalam perhitungan jarak-d. Metode ini cocok untuk aplikasi in situ dan ahli dalam mengarakterisasi kristal tunggal, senyawa, atau bahan amorf. Lebih jauh, ada standar yang ditetapkan untuk ribuan bahan (Bunaciu et al., 2015).



Gambar 2.15 Diagram Skema XRD (Bunaciu et al., 2015)

Sintesis hidroksiapatit dari cangkang kerang hijau dikarakterisasi melalui analisis XRD menggunakan radiasi Cu K α ($\lambda = 0,154$ nm), seperti yang dilakukan oleh Rifky dkk. Analisis mencakup rentang 10° hingga 90° , menggunakan langkah pemindaian cermat 2° per menit. Fase tersebut dibedakan melalui analisis komparatif serbuk HAp yang dikenai suhu 160°C , dengan interval waktu 14, 16, dan 18 jam (Ismail, Laroybafih, dkk., 2021). Gambar 2.15 menyajikan ilustrasi hasil analisis XRD yang dilakukan pada HAp yang bersumber dari cangkang kerang hijau.



Gambar 2.16 Contoh Grafik Hasil Pengujian XRD pada Cangkang Kerang Hijau.
(Ismail, Laroybafih, et al., 2021)

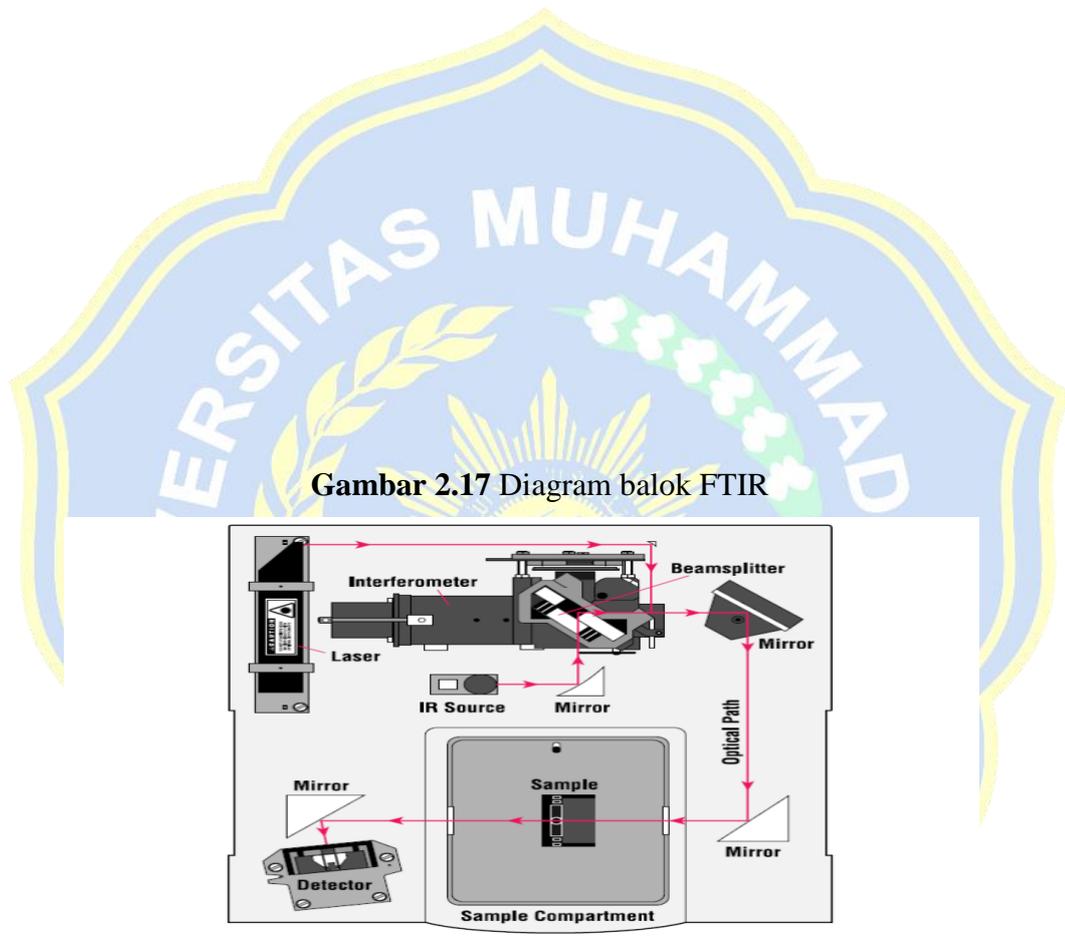
International Union of pure and Applied Chemistry (IUPAC) mendefinisikan biokompatibilitas (*biomedical therapy*) dalam konteks terapi biomedis sebagai kapasitas inang (*respons host*) untuk merespons aplikasi tertentu atau kemampuan untuk berinteraksi dengan jaringan inang tanpa menimbulkan efek samping (Gani, 2015). Osseointegrasi menunjukkan hubungan struktural dan fungsional langsung antara tulang hidup dan permukaan implan. Peristiwa ini mencakup mekanisme rumit pembentukan tulang baru dan proses penyembuhan jaringan tulang. Akibatnya, sangat penting bagi implan untuk memiliki permukaan yang sesuai yang memfasilitasi integrasi efektif dengan tulang yang berdekatan. Elemen penting yang berkontribusi pada osseointegrasi efektif meliputi kimia permukaan, kekerasannya, dan karakteristik topografinya.

2.7.2 Fourier Transform Infra Red Spectroscopy (FTIR)

Teknik *Fourier transform infra red* (FTIR) merupakan salah satu bentuk spektroskopi inframerah. Spektroskopi inframerah melibatkan transmisi radiasi IR melalui sampel. Sebagian radiasi inframerah diserap oleh sampel, sementara sebagian lainnya ditransmisikan melalui sampel tersebut. Spektrum yang dihasilkan berfungsi sebagai representasi bernuansa tentang bagaimana molekul menyerap dan mentransmisikan cahaya, yang secara efektif membentuk tanda molekuler yang unik untuk sampel yang dimaksud. Sama seperti sidik jari yang unik untuk setiap individu, demikian pula struktur molekuler menghasilkan spektrum inframerah yang berbeda. Spektroskopi inframerah terbukti menguntungkan untuk berbagai aplikasi analitis (Hulungo et al., 2022).

Spektrometer FTIR pada dasarnya terdiri dari dua elemen penting: interferometer dan komputer khusus. Akuisisi langsung informasi spektral

inframerah digital, yang difasilitasi oleh komputer mini khusus, menghadirkan beberapa keuntungan penting. Manfaat sebenarnya dari spektrometer FTIR terletak pada interferometranya, yang membedakannya dari spektrometer tradisional yang mengandalkan kisi-kisi atau prisma. Gambar 2.17 mengilustrasikan diagram blok spektrometer FTIR.



Gambar 2.18 Layout FTIR spektroskopi (“Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry,”2001)

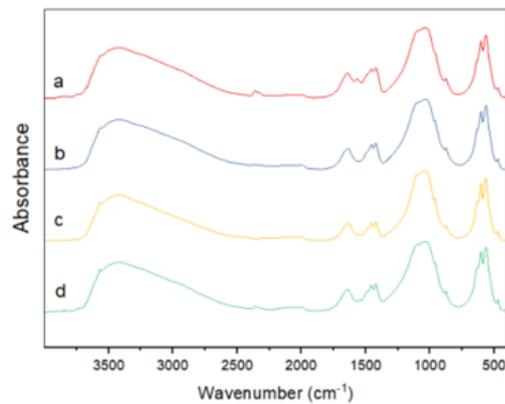
Gambar 2.18 menjelaskan bahwa manfaat penggunaan FTIR mencakup kecepatan pengukuran, karena frekuensi dinilai secara bersamaan. Sensitivitas detektor yang lebih tinggi meningkatkan laju optik, sehingga mengurangi noise pada hasil. Instrumen ini memiliki sistem mekanis yang mudah dipahami dan dirancang untuk kalibrasi mandiri, sehingga menghilangkan kebutuhan intervensi pengguna dalam proses kalibrasi (“Introduction to Fourier Transform Infrared

Spectrometry,” 2001). Spektroskopi inframerah transformasi Fourier (FTIR) menawarkan wawasan penting tentang arsitektur molekuler bahan organik dan anorganik. Metode ini menonjol sebagai metode analisis yang sangat adaptif untuk analisis kimia non-destruktif dari spesimen geologi, termasuk batu bara, serpih, inklusi cair dan lelehan, kaca silikat, mineral, dan mikrofosil. Prinsip dasar teknik FTIR berkaitan dengan transisi yang terjadi antara keadaan energi getaran terkuantisasi. Dalam analisis FTIR, penyerapan radiasi inframerah terjadi saat foton berinteraksi dengan molekul, meningkatkannya ke keadaan energi yang lebih tinggi. Keadaan tereksitasi menyebabkan getaran ikatan molekul, yang meliputi tindakan seperti peregangan, pembengkokan, pelintiran, pengayunan, goyangan, dan deformasi di luar bidang, yang semuanya terwujud pada bilangan gelombang atau frekuensi yang berbeda dalam wilayah inframerah spektrum cahaya. Bilangan gelombang yang sesuai dengan setiap puncak serapan IR ditentukan oleh karakteristik fisikokimia inheren molekul yang dianalisis, yang berfungsi sebagai alat diagnostik yang mirip dengan sidik jari untuk gugus fungsi tertentu (Y. Chen et al., 2015).

Tabel 2.2 Perbandingan Gugus Ikatan Hidroksiapatit.

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)
	Standar*
$\nu_1\text{PO}_4^{3-}$	960
$\nu_2\text{PO}_4^{3-}$	460
$\nu_3\text{PO}_4^{3-}$	1156-1000
$\nu_4\text{PO}_4^{3-}$	600-560
$\nu_2\text{CO}_3^{2-}$	1640
	1460
	1450
	1418
	1384
$\nu_3\text{CO}_3^{2-}$	875
OH ⁻	3700-2600

*Berasal dari penelitian Salma, dkk, dan Berzina-Cimdina, dkk.



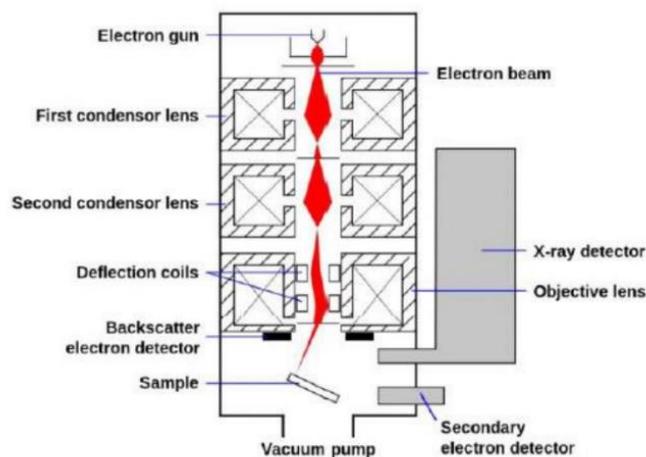
Gambar 2.19 Contoh hasil pengujian FTIR dari Hap (Sabrina et al., 2019)

2.7.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)

SEM berfungsi sebagai instrumen canggih yang menggunakan berkas elektron terkonsentrasi untuk mengumpulkan informasi yang mendalam. Mikroskop Elektron Pemindaian (SEM) menghasilkan gambar tiga dimensi beresolusi tinggi yang mengungkap detail rumit mengenai topografi, morfologi, dan komposisi. Mikroskop Elektron Pemindaian menawarkan informasi permukaan yang rumit mengenai sampel padat. Berkas elektron berenergi rendah diarahkan ke spesimen, menembus material dan menghasilkan emisi foton dan elektron dari atau di dekat permukaan sampel. Elektron yang tersebar dari permukaan setelah interaksi ini dapat diperiksa menggunakan berbagai detektor, yang menghasilkan wawasan tentang topografi, morfologi, dan komposisi permukaan sampel (Choudhary et al., 2017).

Meskipun ukuran dan biayanya cukup besar, SEM terus memikat para peneliti karena aplikasinya yang luas dan kemampuannya yang luar biasa, khususnya kemampuan untuk menghasilkan gambar beresolusi tinggi, tiga dimensi, dan sangat terperinci. Ilustrasi 2.20 menyajikan representasi skema mikroskop elektron pemindaian. Prosedur ini dimulai dengan pistol elektron yang menghasilkan aliran elektron berenergi tinggi dalam kolom, yang kemudian diarahkan melalui serangkaian lensa elektromagnetik. Lensa yang dimaksud pada dasarnya adalah tabung, yang dibungkus rumit dengan kumparan, dan umumnya dikenal sebagai solenoida. Kumparan dikalibrasi dengan cermat untuk mengarahkan berkas elektron yang masuk ke spesimen dengan presisi. Modifikasi ini menyebabkan variasi tegangan, sehingga mengubah laju interaksi elektron dengan permukaan

spesimen. Operator SEM, yang dipandu oleh komputer, memiliki kemampuan untuk menyempurnakan berkas, sehingga mengatur perbesaran dan memilih area permukaan tertentu untuk pemeriksaan. Berkas diarahkan ke platform, tempat sampel padat diposisikan. Banyak spesimen memerlukan tingkat persiapan sebelum dimasukkan ke dalam ruang vakum. Di antara berbagai metode persiapan, dua yang paling sering digunakan sebelum analisis SEM meliputi pelapisan sputter untuk sampel non-konduktif dan dehidrasi sebagian besar spesimen biologis (Choudhary et al., 2017).



Gambar 2.20 Skema diagram Scanning Electron Microscopy (SEM) (Choudhary et al., 2017)

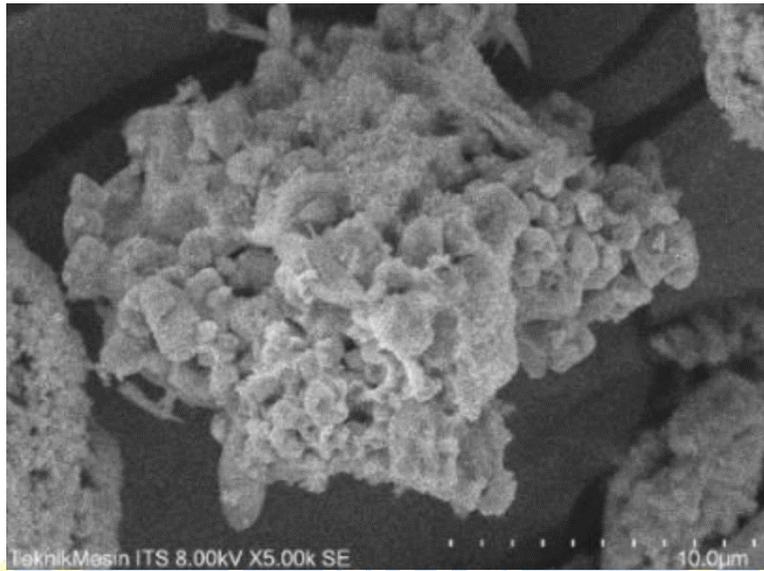
Lebih jauh, penting bahwa semua sampel mampu menahan tekanan rendah yang ada di dalam ruang vakum. Keterlibatan elektron insiden dengan permukaan sampel dipengaruhi oleh laju percepatan elektron ini, karena elektron-elektron ini memiliki sejumlah besar energi kinetik sebelum diarahkan ke sampel. Setelah berinteraksi dengan sampel, elektron-elektron yang berenergi dipancarkan dari permukaannya. Interaksi tersebut menghasilkan pola hamburan yang mengungkapkan wawasan tentang ukuran, bentuk, tekstur, dan komposisi sampel. Berbagai detektor digunakan untuk menangkap berbagai bentuk elektron yang tersebar, seperti elektron sekunder, elektron yang dihamburkan kembali, dan sinar-X. Elektron yang dihamburkan kembali mengacu pada elektron insidental yang dipantulkan kembali dari suatu permukaan. Gambar tersebut kemudian menawarkan wawasan komposisi yang berkaitan dengan pendeteksian unsur dan senyawa. Sementara data topografi dapat dikumpulkan melalui detektor hamburan

balik, presisi hasilnya tidak sesuai dengan Detektor Elektron Sekunder (SED). Elektron yang dihamburkan kembali yang terdifraksi mengungkapkan struktur kristal dan orientasi mineral dan kain mikro. Sinar-X, yang berasal dari bawah permukaan sampel, dapat menghasilkan wawasan berharga tentang komposisi unsur dan mineral (Choudhary et al., 2017).

Biasanya, SEM mencakup berbagai unsur, termasuk (jurnal):

1. Pistol elektron diposisikan di atas kolom, memancarkan aliran elektron. Elektron dinaikkan ke tingkat energi yang umumnya berkisar dari 0,1 hingga 30 keV.
2. Pistol jepit rambut tungsten yang menghasilkan diameter berkas elektron yang lebar, memfasilitasi pembuatan gambar beresolusi tinggi.
3. Lensa dan bukaan elektromagnetik secara cermat memfokuskan dan membentuk berkas elektron, menghasilkan titik elektron yang terkonsentrasi halus pada sampel.
4. Lingkungan vakum tinggi memfasilitasi pergerakan elektron tanpa hambatan, bebas dari hamburan atau penyerapan oleh partikel atmosfer.

Manfaat SEM meliputi citra tiga dimensi dan topografi yang rumit, banyaknya data serbaguna yang dikumpulkan dari berbagai detektor, pengoperasian yang mudah digunakan dengan pelatihan dan keahlian yang sesuai dalam teknologi komputer dan perangkat lunak terkait, serta fungsionalitas yang cepat. Gambar 2.21 menyajikan temuan SEM yang berkaitan dengan sintesis HAp.



Gambar 2.21 Contoh Hasil Uji SEM Sintesis Hidroksiapatit (Amrullah & Irfa'i, 2023)

