

**PENGARUH SUHU KALSINASI TERHADAP STRUKTUR
KRISTAL BIOKERAMIK BERBASIS *HYDROXYAPATITE* DARI
TULANG IKAN CAKALANG (*Katsuwonus pelamis*)**

TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh derajat Sarjana S1

Program Studi Fisika



Disusun oleh

Miftahul Khoir

21106020009

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UIN SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA**

2026



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1245/Un.02/DST/PP.00.9/06/2026

Tugas Akhir dengan judul : Pengaruh Suhu Kalsinasi Terhadap Struktur Kristal Biokeramik Berbasis Hydroxyapatite dari Tulang Ikan Cakalang (Katsuwonus pelamis)

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : MIFTAHUL KHOIR
Nomor Induk Mahasiswa : 21106020009
Telah diujikan pada : Rabu, 03 Juni 2026
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang
Dr. Widayanti, S.Si. M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a22f7170abcf



Penguji I
Asih Melati, S.Si., M.Sc., Ph.D.
SIGNED

Valid ID: 6a22cf7f2c21a



Penguji II
Andi, M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 6a22c4aa06634



Yogyakarta, 03 Juni 2026
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a26634c9733a

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Miftahul Khoir
NIM : 21106020009
Program Studi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Pengaruh Suhu Kalsinasi Terhadap Struktur Kristal Biokeramik Berbasis *Hydroxyapatite* dari Tulang Ikan Cakalang (*Katsuwonus pelamis*)” merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 26 Mei 2026

Penulis



Miftahul Khoir
NIM. 21106020009

HALAMAN PERSETUJUAN SKRIPSI



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/R0

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan skripsi

Lamp : -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : MIFTAHUL KHOIR
NIM : 21106020009
Judul Skripsi : Pengaruh Suhu Kalsinasi Terhadap Struktur Kristal Biokeramik Berbasis *Hydroxyapatite* dari Tulang Ikan Cakalang (*Katsuwonus pelamis*)

Sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Fisika.

Dengan ini kami mengharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 26 Mei 2026

Pembimbing

Dr. Widayanti, S.Si., M.Si
NIP. 19760526 200604 2 005

**PENGARUH SUHU KALSINASI TERHADAP STRUKTUR
KRISTAL BIOKERAMIK BERBASIS *HYDROXYAPATITE* DARI
TULANG IKAN CAKALANG (*Katsuwonus pelamis*)**

**Miftahul Khoir
21106020009**

INTISARI

Tulang ikan cakalang merupakan limbah perikanan yang berpotensi sebagai sumber *hydroxyapatite* (HAp) alami untuk aplikasi biomedis. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh suhu kalsinasi terhadap struktur kristal biokeramik berbasis *hydroxyapatite* dari tulang ikan cakalang, yang meliputi parameter kisi, ukuran kristalit, dan derajat kristalinitas, serta pengaruhnya terhadap gugus fungsi. Sampel tulang dikalsinasi pada variasi suhu 650°C, 850°C, dan 1050°C, kemudian dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dengan analisis *Rietveld* melalui perangkat lunak *Profex*, serta *Fourier Transform Infrared* (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada sampel non kalsinasi, *hydroxyapatite* telah terbentuk dengan parameter kisi $a = b = 9,43 \text{ \AA}$; $c = 6,86 \text{ \AA}$, dan ukuran kristalit 45,28 nm, namun derajat kristalinitas total sampel masih sangat rendah (9,43%) karena dominasi matriks organik dan fasa karbonat apatit. Pada suhu 650°C, terjadi relaksasi kisi yang ditandai dengan penurunan parameter kisi HAp $a = b = 9,41 \text{ \AA}$; $c = 6,86 \text{ \AA}$, dengan ukuran kristalit 44,34 nm, dan derajat kristalinitas meningkat menjadi 51,05%. Pada suhu 850°C, parameter kisi HAp menjadi $a = b = 9,43 \text{ \AA}$; $c = 6,88 \text{ \AA}$, ukuran kristalit meningkat menjadi 60,12 nm dan derajat kristalinitas mencapai nilai tertinggi yaitu 58,94%. Pada suhu 1050°C, parameter kisi HAp menjadi $a = b = 9,42 \text{ \AA}$; $c = 6,89$, yang mendekati nilai HAp standar ($a = b = 9,42 \text{ \AA}$; $c = 6,88$), ukuran kristalit meningkat drastis menjadi 107,8 nm, namun derajat kristalinitas sedikit menurun menjadi 55,73% akibat dekomposisi termal HAp menjadi β -TCP. Hasil ini mengonfirmasi bahwa suhu kalsinasi optimal untuk memperoleh *hydroxyapatite* dengan kemurnian tinggi, ukuran kristalit yang baik, dan distorsi kisi minimal adalah sekitar 850°C. Penelitian ini memberikan acuan suhu kalsinasi yang tepat dalam pengolahan limbah tulang ikan cakalang sebagai bahan baku biomaterial berbasis *hydroxyapatite*.

Kata kunci: tulang ikan cakalang, suhu kalsinasi, *hydroxyapatite*, struktur kristal, kemurnian.

**THE EFFECT OF CALCINATION TEMPERATURE ON THE
CRYSTAL STRUCTURE OF HYDROXYAPATITE-BIOCERAMICS FROM
SKIPJACK TUNA (*Katsuwonus pelamis*) BONES**

Miftahul Khoir
21106020009

ABSTRACT

Skipjack tuna bone is a fishery waste that has potential as a natural source of hydroxyapatite (HAp) for biomedical applications. This study aims to analyze the effect of calcination temperature on the crystal structure of hydroxyapatite-based bioceramics from skipjack tuna bone, including lattice parameters, crystallite size, and degree of crystallinity, as well as its effect on functional groups. Bone samples were calcined at varying temperatures of 650°C, 850°C, and 1050°C, then characterized using x-ray diffraction (XRD) with Rietveld analysis through Profex software, as well as Fourier Transform Infrared (FTIR) to identify functional groups. The results showed that in the non-calcined sample, hydroxyapatite had already formed with lattice parameter $a = b = 9,43 \text{ \AA}$; $c = 6,87 \text{ \AA}$ and crystallite size of 45,28 nm, however the total crystallinity of the sample was still very low (9,43%) due to the dominance of organic matrix and carbonate apatite phase. At 650°C lattice relaxation occurred as indicated by a decrease in HAp lattice parameters to $a = b = 9,41 \text{ \AA}$; $c = 6,86 \text{ \AA}$, with crystallite size of 44,34 nm and crystallinity increasing to 51,05%. At 850°C, the lattice parameters of HAp were $a = b = 9,43 \text{ \AA}$; $c = 6,88 \text{ \AA}$. The crystallite size increased to 60,12 nm, and the degree of crystallinity reached its highest value of 58,94%. At 1050°C, the HAp lattice parameters became $a = b = 9,42 \text{ \AA}$; $c = 6,89 \text{ \AA}$, approaching the standard HAp values ($a = b = 9,42 \text{ \AA}$; $c = 6,88 \text{ \AA}$), crystallite size increased dramatically to 107,8 nm, however crystallinity slightly decreased to 55,73% due to thermal decomposition of HAp into β -TCP. These results confirm that the optimal calcination temperature to obtain hydroxyapatite with high purity, good crystallite size, and minimal lattice distortion is approximately 850°C. This study provides a reference for the appropriate calcination temperature in processing skipjack tuna bone waste as a raw material for calcium phosphate-based biomaterials.

Keywords: skipjack tuna bone, calcination temperature, hydroxyapatite, crystal structure, purity.

MOTTO

“Sometimes I do wonder about my other lives. But I’m still grateful for this one. Even with its tribulations.”

- Wong, Doctor Strange in the Multiverse of Madness



HALAMAN PERSEMBAHAN

Karya ini penulis persembahkan untuk keluarga tercinta

Bapak Bayuski, Ibu Sri Kusri,

Pak Fadlurrahman, dan Mbak Nurriyah Rizki Amalia



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah *robbil 'alamin*, puji syukur tiada hentinya penulis ucapkan kepada Allah SWT, atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga tugas akhir ini dapat penulis selesaikan dengan baik. Skripsi atau tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi S1. Penulis berharap karya ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan menjadi langkah awal bagi penelitian selanjutnya.

Penulis menyadari bahwa proses penyusunan tugas akhir ini tidak luput dari bantuan berbagai pihak di belakangnya. Oleh karena itu, penulis ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si. selaku Ketua Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sekaligus Dosen Pembimbing atas arahan, bimbingan serta dukungan yang telah diberikan selama proses pelaksanaan penelitian ini.
2. Bapak Frida Agung Rakhmadi, S.Si., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing Akademik atas arahan yang telah diberikan kepada penulis.
3. Seluruh dosen fisika UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta atas segala ilmu yang telah diberikan kepada penulis sehingga sangat membantu dalam penyusunan tugas akhir ini.
4. Bapak Prof. Dr. H. Zuhri, S.Ag., M.Ag. selaku pengasuh pondok pesantren *Al-Risalah Institute for Islamic Studies* (tempat penulis bernaung dan menimba ilmu) atas segala ilmu dan bimbingannya.

5. Keluarga (kedua orang tua dan kedua kakak), atas segala doa dan bantuannya sehingga penulis dapat selesaikan studi S1 ini dengan baik.
6. Warga Desa Penanggungan, Sumenep, Madura, atas bantuan dan keramahan selama proses pengambilan sampel limbah tulang ikan cakalang.
7. Teman-teman *study club* fisika material, terutama Priyo Prasetyo, Azka Hidayatus Sholihin, Estifany Diah Saputri, Ayu Risna dan Dian Kusuma Latif atas bantuan dan dukungannya selama proses perkuliahan hingga pelaksanaan penelitian ini.
8. Kawanku Avin Annabil, Muhammad Ainul Yaqin, dan Muhammad Ridwan, Teman-teman fisika angkatan 2021, teman-teman pondok Al-Risalah dan teman-teman lainnya yang tidak dapat disebutkan satu-persatu, terima kasih atas segala dukungannya.

Demikian kata pengantar ini dibuat, penulis menyadari masih banyaknya kekurangan yang termuat dalam laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu penulis berharap adanya kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan skripsi ini di masa mendatang. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat yang berarti bagi penulis, dan bagi pembaca pada umumnya.

Yogyakarta, 14 Mei 2026

Penulis

Miftahul Khoir

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN	iii
HALAMAN PERSETUJUAN SKRIPSI	iv
INTISARI	v
ABSTRACT	vi
MOTTO	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR ISTILAH	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	8
1.3 Tujuan Penelitian	8
1.4 Batasan Penelitian	9
1.5 Manfaat Penelitian	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	11
2.1 Studi Pustaka	12

2.2 Landasan Teori	17
2.2.1 Biomaterial	17
2.2.2 Biokeramik	19
2.2.3 <i>Hydroxyapatite</i> (HAp)	21
2.2.4 Metode Kalsinasi	25
2.2.5 Ikan Cakalang (<i>Katsuwonus pelamis</i>).....	28
2.2.6 Struktur Kristal dan Kristalinitas	31
2.2.7 Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	35
2.2.8 Karakterisasi <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR)	38
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	43
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	43
3.1.1 Waktu penelitian.....	43
3.1.2 Tempat penelitian	43
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	43
3.2.1 Alat-alat Penelitian	43
3.2.2 Bahan-bahan Penelitian	45
3.2.3 Perangkat lunak Penelitian	46
3.3 Prosedur Penelitian	47
3.3.1 Persiapan Alat dan Bahan.....	48
3.3.2 Preparasi Sampel	49
3.3.3 Proses Kalsinasi.....	51

3.3.4 Menghitung % Rendemen	52
3.3.5 Karakterisasi dengan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	52
3.3.6 Karakterisasi dengan <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR)	55
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	57
4.1 Hasil Penelitian	57
4.1.1 Hasil Sintesis dan Perhitungan Rendemen <i>Hydroxyapatite</i>	57
4.1.2 Hasil Karakterisasi XRD	58
4.1.3 Hasil Karakterisasi FTIR	60
4.2 Pembahasan	61
4.2.1 Sintesis dan Rendemen Sampel <i>Hydroxyapatite</i>	61
4.2.2 Karakterisasi XRD	63
4.2.3 Karakterisasi FTIR	69
BAB V KESIMPULAN	76
DAFTAR PUSTAKA	79

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter kisi ketujuh sistem kristal.....	31
Tabel 2.2 Daftar gugus fungsi khas <i>hydroxyapatite</i>	42
Tabel 3.1 Alat-alat penelitian.....	44
Tabel 3.2 Bahan-bahan Penelitian	46
Tabel 3.3 Perangkat lunak penelitian.....	46
Tabel 4.1 Hasil rendemen dan warna masing-masing sampel	58
Tabel 4.2 Hasil olah data XRD dari setiap sampel.....	59
Tabel 4.3 Hasil analisis gugus fungsi dari berbagai sampel tulang ikan cakalang	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur kristal <i>hydroxyapatite</i> (a) heksagonal (b) monoklinik.....	23
Gambar 2.2 Ikan Cakalang.....	28
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	48
Gambar 4.1 Sampel serbuk tulang ikan cakalang tanpa kalsinasi, dan dengan kalsinasi pada suhu 650°C, 850°C, dan 1050°C.....	57
Gambar 4.2 Grafik XRD dari setiap variasi sampel	59
Gambar 4.3 Spektrum FTIR sampel tulang ikan cakalang	60

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Proses Pembuatan <i>hydroxyapatite</i>	86
Lampiran 2 Perhitungan rendemen	89
Lampiran 3 Perhitungan ukuran kristal	91
Lampiran 4. Parameter statistik hasil <i>fitting Rietveld</i> sampel	92
Lampiran 5. Parameter statistik hasil <i>fitting Rietveld</i> sampel	94



DAFTAR ISTILAH

- Apatit Karbonat (CO_3^{2-}) : Variasi mineral apatit yang mengandung ion karbonat (CO_3^{2-}) menggantikan sebagian ion fosfat (PO_4^{3-}) atau hidroksil dalam kisi kristal
- β -Tricalcium phosphate (β -TCP) : Fase kalsium fosfat dengan rumus kimia $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$
- B1 : Parameter lebar puncak yang dihasilkan oleh perangkat lunak *profex*, digunakan sebagai nilai awal untuk menghitung FWHM (β) dalam persamaan *scherrer*.
- Bilangan Gelombang : Jumlah gelombang per satuan panjang, biasanya dinyatakan dengan cm^{-1} . Berbanding terbalik dengan panjang gelombang dan sebanding dengan energi foton
- Bioaktif : Kemampuan suatu material untuk berinteraksi secara biologis dengan jaringan hidup, misalnya membentuk lapisan apatit di permukaannya ketika terkena cairan tubuh.
- Biokompatibel : Sifat suatu material yang aman bagi tubuh manusia, tidak memicu reaksi penolakan, toksisitas, atau peradangan kronis
- Bioresorbable* : Kemampuan material untuk terdegradasi secara bertahap di dalam tubuh dan digantikan oleh jaringan alami seiring waktu.
- Dekomposisi termal : Penguraian suatu senyawa kimia menjadi senyawa yang lebih sederhana akibat pemanasan pada suhu tinggi.
- Difraksi sinar-X (XRD) : Teknik karakterisasi material yang memanfaatkan interaksi sinar X dengan bidang kristal untuk menentukan struktur kristal, parameter kisi, ukuran kristalit, dan kristalinitas.
- Difusi atom : Proses perpindahan atom atau ion dalam suatu material akibat adanya energi termal, yang mendorong perubahan struktur mikro seperti pertumbuhan kristalit dan sintering.
- Energi aktivasi : Energi minimum yang diperlukan untuk memulai suatu reaksi kimia atau proses difusi.
- Fase amorf : Daerah dalam suatu material yang susunan atomnya tidak teratur secara periodik (tidak memiliki struktur kristal jangka panjang).
- Fourier Transform Infrared* (FTIR) : Teknik spektroskopi yang menggunakan interferometer dan transformasi *Fourier* untuk mengidentifikasi gugus fungsi dalam suatu material berdasarkan serapan radiasi inframerah.
- Full Width at Half Maximum* (FWHM) : Lebar suatu puncak difraksi pada setengah dari intensitas maksimumnya. Digunakan dalam persamaan *Scherrer* untuk menghitung ukuran kristalit.
- GoF* (*Goodness of Fit*) : Parameter statistik dalam *Rietveld refinement* yang mengukur kualitas kecocokan antara model struktur dengan data eksperimen. Nilai ideal mendekati 1. $\text{GoF} = R_{\text{wp}}/R_{\text{exp}}$.
- Gugus Fungsi : Kelompok atom dalam suatu molekul yang bertanggung

	jawab terhadap karakteristik serapan inframerah dan sifat kimia tertentu.
<i>Hydroxyapatite</i> (HAp)	: Senyawa kalsium fosfat dengan rumus kimia $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, merupakan komponen mineral utama penyusun tulang dan gigi manusia.
Hukum <i>Bragg</i>	: Hukum fisika yang menjelaskan difraksi sinar-X oleh bidang kristal : $n\lambda = 2d \sin \theta$, dimana n adalah orde difraksi, λ panjang gelombang sinar-X, d jarak antar bidang, dan θ sudut difraksi.
Interferometer <i>Michelson</i>	: Perangkat dalam spektrometer FTIR yang membagi berkas cahaya menjadi dua jalur (cermin tetap dan cermin bergerak) untuk menciptakan pola interferensi (Interferogram).
Kalsinasi	: Salah satu metode sintesis <i>hydroxyapatite</i> yang memanfaatkan pemanasan sampel pada suhu tinggi.
Kolagen	: Protein struktural utama dalam jaringan ikat hewan termasuk tulang, yang berfungsi sebagai matriks bagi deposisi mineral <i>hydroxyapatite</i> .
Kristalinitas	: Tingkat keteraturan susunan atom atau molekul dalam suatu material, biasanya dinyatakan dalam persen (%) relatif terhadap fase kristalin total.
Kristalit	: Domain kristal tunggal dalam suatu material polikristalin. Ukuran kristalit dapat dihitung dari lebar puncak XRD menggunakan persamaan <i>Scherrer</i> .
Osteokonduktif	: Kemampuan suatu material untuk menyediakan <i>scaffold</i> bagi sel-sel tulang baru agar dapat menempel, bermigrasi, dan membentuk tulang baru di permukaannya.
Parameter kisi	: Besaran yang mendefinisikan ukuran dan bentuk sel satuan kristal (<i>unit cell</i>), terdiri dari panjang sisi (a,b,c) dan sudut antar sisi (α, β, γ).
Persamaan <i>Scherrer</i>	: Rumus yang digunakan untuk menghitung ukuran kristalit dari lebar puncak difraksi XRD: $D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$, dengan D ukuran kristalit, K konstanta bentuk (0,9), λ panjang gelombang, β lebar puncak (FWHM), dan θ sudut <i>Bragg</i> .
Rendemen	: Perbandingan antara massa akhir suatu produk setelah proses dengan massa awal bahan baku, dinyatakan dalam persen (%).
R_{exp} (<i>Expected R-Factor</i>)	: Parameter statistik dalam <i>Rietveld refinement</i> yang merupakan nilai R-Faktor yang diharapkan secara teoritis berdasarkan kualitas data dan statistik pencacahan (<i>counting statistics</i>).
<i>Rietveld refinement</i>	: Metode pencocokan (<i>fitting</i>) seluruh pola difraksi XRD eksperimental dengan model teoritis untuk menentukan parameter kisi, ukuran kristalit, dan kuantifikasi fase secara akurat.

- R_{wp} (*Weighted Profile R-Factor*) : Parameter statistik dalam *Rietveld refinement* yang mengukur selisih tertimbang antara pola difraksi eksperimen dengan model perhitungan. Nilai ideal umumnya di bawah 10% untuk menandakan bahwa model akurat mewakili sampel.
- Sintering* : Proses penyatuan partikel-partikel padat melalui pemanasan yang didorong oleh difusi atom, menyebabkan pertumbuhan kristalit dan peningkatan densitas material.
- Substitusi ion : Penggantian satu jenis ion dengan ion lain yang ukuran atau muatannya berbeda dalam kisi kristal, yang dapat mengubah parameter kisi dan sifat material.
- Transformasi *Fourier* : Operasi matematika yang mengubah suatu sinyal dari domain waktu atau ruang (Interferogram) ke domain frekuensi (spektrum bilangan gelombang)
- χ^2 (*Chi-squared*) : Parameter statistik dalam *Rietveld refinement* yang merupakan kuadrat dari GoF ($\chi^2 = \text{GoF}$). Nilainya mendekati 1 menunjukkan model yang baik.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ilmu pengetahuan dan teknologi khususnya di bidang kesehatan dalam beberapa dekade belakangan ini terjadi perkembangan yang sangat pesat. Hal ini sejalan dengan meningkatnya kebutuhan masyarakat terhadap layanan kesehatan yang lebih efektif dan terjangkau. Kashte dkk. (2017) menyebutkan bahwa terdapat lebih dari 2,2 juta tindakan pencangkakan tulang di setiap tahunnya di seluruh dunia, serta beberapa kondisi yang juga menjadi penyebab utama dari cacat tulang seperti reseksi tumor, kelainan bawaan, cedera, patah tulang, pembedahan, atau penyakit seperti artritis, yang turut menjadi faktor pendorong atas tingginya permintaan terhadap material implan.

Penggunaan biomaterial merupakan salah satu solusi yang dapat digunakan untuk menyelaraskan dengan perkembangan yang sangat pesat dalam kebutuhan bidang medis akan material yang dapat menggantikan jaringan tubuh. Biomaterial itu sendiri dapat dijelaskan sebagai material yang didesain untuk dapat berintegrasi dengan sistem biologis, sehingga dapat digunakan untuk berbagai keperluan seperti memperbaiki, menggantikan, menunjang, ataupun memulihkan fungsi organ atau bagian tubuh manusia (Sukmana dkk., 2022). Dalam bidang medis, biomaterial memiliki peran penting dalam teknik rekayasa jaringan, medium penghantar obat, hingga dalam pembuatan komponen alat kesehatan seperti alat bantu prostetik dan implan medis (Erzen dkk., 2025). Selain itu, penggunaan biomaterial juga diketahui merupakan salah satu cara yang cukup

efektif dalam upaya untuk meningkatkan aktivitas sel dalam pengobatan regeneratif (Nii & Katayama, 2021).

Diantara berbagai jenis biomaterial yang telah dikembangkan, biokeramik merupakan material yang memiliki kemampuan dapat berintegrasi dengan jaringan keras tubuh manusia, sehingga umum digunakan dalam aplikasi ortopedi dan kedokteran gigi. Aplikasi biokeramik dalam ortopedi seperti dalam pembuatan kerangka pendukung (*scaffold*) untuk memperbaiki tulang, yang mendukung secara mekanis, kemudian juga membantu migrasi sel, dan distribusi nutrisi (Zhao dkk., 2022), begitu juga dalam aplikasi implan gigi, dimana material biokeramik memperlihatkan biokompatibilitas yang luar biasa, ketahanan terhadap korosi, serta sifat-sifat mekanis yang cocok untuk menggantikan gigi yang hilang, serta memberikan dasar yang baik untuk prostetik gigi yang dapat berintegrasi dengan baik dengan tulang rahang (Surana dkk., 2024).

Diantara berbagai jenis biokeramik, *hydroxyapatite* ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) menjadi salah satu yang paling banyak diteliti karena kemiripannya dengan komponen mineral utama penyusun tulang manusia. *Hydroxyapatite* merupakan salah satu dari material-material penguat (*reinforcing materials*) dengan proporsi kalsium fosfat yang sangat mirip dengan mineral alami dalam tulang dan gigi manusia (Hapsari & Wardani, 2023). Sifatnya yang biokompatibel (aman bagi tubuh tanpa reaksi penolakan), bioaktif (mampu berinteraksi secara biologis dengan jaringan sekitar), osteokonduktif (mendukung pertumbuhan tulang baru di permukaannya), serta sifat-sifat mekanisnya yang baik seperti dalam beberapa penelitian yang menunjukkan kekuatan tekannya mampu melebihi 100 MPa

(Shoraka, 2024), menjadikan *hydroxyapatite* sebagai salah satu bahan unggulan dalam pengembangan implan tulang dan rekayasa jaringan keras. Selain itu, *hydroxyapatite* juga mampu berikatan langsung dengan jaringan tulang tanpa menimbulkan reaksi penolakan tubuh, yang membuatnya sangat menjanjikan untuk aplikasi klinis.

Tantangan utama dalam pemanfaatan *hydroxyapatite* adalah memperoleh struktur kristal dan kemurnian yang optimal, karena sifat biologis dan mekanisnya sangat dipengaruhi oleh cara sintesis serta parameter proses seperti suhu dan waktu perlakuan termal. Kawsar dkk., (2024) menyampaikan bahwa pembentukan *hydroxyapatite* dinyatakan berhasil ketika struktur kristalnya menunjukkan pola difraksi dominan pada bidang (002) dan (112), sesuai dengan struktur heksagonal khas *hydroxyapatite*. Struktur kristal yang optimal ditandai dengan ukuran kristalit di bawah 100 nm, distribusi puncak XRD yang tajam, serta nilai regangan kristal (*strain*) yang rendah (antara -0,0006 hingga +0,0062), yang mencerminkan kestabilan internal dan kristalinitas tinggi. Keadaan tersebut dinilai ideal untuk meningkatkan bioaktivitas dan mendukung performa *hydroxyapatite* dalam berbagai aplikasi biomedis seperti rekayasa jaringan tulang dan pelapis implan.

Oleh karena peranan biomaterial seperti halnya biokeramik *hydroxyapatite* yang begitu penting dalam bidang medis, maka dalam merancang biomaterial, disamping perlunya untuk mempertimbangkan karakteristik kimia, fisik, dan mekaniknya, biokompatibilitas juga merupakan faktor yang tidak bisa diabaikan (Bharadwaj, 2021). Dalam menentukan biokompatibilitas, kemurnian kristal memiliki peran strategis, dimana struktur kristalin yang murni dari kontaminan,

batas butir, atau area amorf yang minim, menyediakan permukaan yang lebih homogen dan stabil secara kimiawi maupun mekanik. Kondisi ini mengurangi pembentukan lokal galvanik mikro-sel, progres korosi, serta pelepasan ion berbahaya, yang secara langsung dapat memicu respon inflamasi atau aktivasi sel imun (Gomes dkk., 2025). *Hydroxyapatite* dengan kemurnian tinggi (tanpa fase impuritas seperti *tricalcium phosphate* atau fase amorf) menghasilkan struktur kristal yang teratur dan kristalinitas tinggi. Keadaan ini, umumnya dicapai melalui pemilihan metode sintesis dan parameter kendali kualitas zat awal (Kareem dkk., 2024).

Pengembangan metode sintesis yang efektif dan ramah lingkungan menjadi fokus banyak penelitian di bidang biomaterial saat ini. Pemanfaatan sumber daya alternatif yang dihasilkan dari limbah biologis dalam proses sintesis biomaterial diperlukan, seiring dengan meningkatnya kesadaran terhadap keberlanjutan, efisiensi sumber daya, dan juga seperti yang dijelaskan oleh Panahi (2025), bahwa proses produksi yang memanfaatkan sumber material implan konvensional seringkali memerlukan konsumsi energi yang tinggi serta tidak mudah terurai. *Hydroxyapatite* tidak hanya dapat disintesis dari bahan sintetis, namun juga dapat dibuat menggunakan bahan alami sebagai sumber kalsium, bahan tersebut ialah bahan alam seperti cangkang tiram, cangkang siput, cangkang telur, (Dinatha dkk., 2023), koral, tulang ikan (Permatasari dkk., 2020), dan berbagai sumber alam lain yang memiliki kandungan kalsium dapat digunakan dalam proses sintesis *hydroxyapatite*.

Tulang ikan merupakan salah satu sumber alam yang sangat menjanjikan. Secara alami, tulang ikan tersusun dari sekitar 70% bahan mineral anorganik seperti bioapatit termasuk *hydroxyapatite*, kemudian 20% berupa bahan organik seperti protein kolagen, dan 10% air (Riyanto & Maddu, 2013). Tulang ikan, merupakan limbah industri perikanan yang jumlahnya melimpah seiring dengan meningkatnya produksi makanan kemasan berbahan dasar ikan (Wardani dkk., 2020), namun limbah tersebut belum dimanfaatkan secara optimal. Diantara berbagai limbah tulang ikan, tulang ikan cakalang (*Katsuwonus pelamis*) diketahui merupakan sumber alami dari pembuatan *hydroxyapatite* dengan prospek yang bagus di masa depan karena kandungan mineralnya yang tinggi hingga mencapai 84,22% (Hapsari dkk., 2020). Dengan memanfaatkan tulang ikan sebagai bahan dasar pembuatan *hydroxyapatite*, tidak hanya dapat mengurangi pencemaran lingkungan, tetapi juga menghasilkan bahan biokeramik yang lebih ekonomis dan berpotensi tinggi untuk aplikasi medis. Maka dalam hal ini, prinsip pemanfaatan sumber daya alam secara bijak juga sejalan dengan firman Allah SWT dalam QS. Shad ayat 27:

وَمَا خَلَقْنَا السَّمَاءَ وَالْأَرْضَ وَمَا بَيْنَهُمَا بَاطِلًا ذَلِكَ ظَنُّ الَّذِينَ كَفَرُوا فَوَيْلٌ لِلَّذِينَ كَفَرُوا مِنَ النَّارِ

“Dan kami tidak menciptakan langit dan bumi dan apa yang ada diantara keduanya dengan sia-sia. Yang demikian adalah anggapan orang-orang kafir. Maka celakalah orang-orang kafir itu karena mereka akan masuk neraka.”

Ayat ini mengingatkan bahwa tidak ada satu pun ciptaan Allah yang sia-sia, termasuk limbah tulang ikan yang dapat diolah menjadi sesuatu yang bernilai bagi kehidupan manusia. Selain itu, *hydroxyapatite* dari sumber alami ini seringkali menunjukkan biokompatibilitas yang baik karena struktur dan kandungannya

yang menyerupai jaringan tulang manusia. Oleh karena itu, eksplorasi terhadap proses sintesis dan optimasi karakteristik *hydroxyapatite* dari tulang ikan menjadi topik yang relevan dalam pengembangan biomaterial berkelanjutan.

Dalam proses sintesis *hydroxyapatite* dari sumber alami seperti tulang ikan, terdapat beberapa metode sintesis yang umum digunakan, yaitu metode kering (*dry method*), metode basah (*wet chemical*), dan perlakuan panas (*heat treatment*). Metode kering mencakup *mechanochemical method* dan *solid state reaction*, sedangkan metode basah meliputi *hydrothermal method*, *precipitation*, dan *sol-gel method*. Selain itu, terdapat metode kalsinasi (*heat treatment*), yang memicu reaksi pembakaran (*combustion reactions*) dan dekomposisi termal (Kareem dkk., 2024), terutama pada bahan yang mengandung senyawa organik seperti tulang ikan.

Dibandingkan dengan metode sintesis yang lain, metode kalsinasi (*heat treatment*) memiliki beberapa keunggulan, diantaranya seperti biaya yang digunakan lebih rendah dan juga ramah lingkungan karena memanfaatkan limbah biologis (seperti tulang ikan) sebagai prekursor alami, kemudian proses pembuatan dan kontrol kristalinitas juga lebih mudah (Bahraminasab dkk., 2021) yang dapat dilakukan dengan memvariasikan suhu atau waktu kalsinasi. Namun, metode kalsinasi juga memiliki suatu tantangan tersendiri, dimana pada suhu kalsinasi yang terlalu rendah dapat menyebabkan *hydroxyapatite* yang terbentuk memiliki kristalinitas yang rendah atau masih mengandung fase amorf dan sisa organik. Sebaliknya, suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan dekomposisi *hydroxyapatite* atau terbentuknya fase lain seperti *tricalcium phosphate* (TCP),

sebagaimana yang dilaporkan oleh Böhme dkk., (2022) bahwa pada suhu sekitar 1000°C atau bahkan di atas 1200°C, terjadi pelepasan ion OH⁻ secara bertahap yang menandakan perubahan fase dari *hydroxyapatite* (HAp) menjadi *tricalcium phosphate* (TCP). Secara sederhana dapat dijelaskan bahwa proses perlakuan panas dengan suhu tinggi dapat berpengaruh terhadap peningkatan tingkat kristalinitas *hydroxyapatite* yang rendah dalam tulang ikan, bahkan uji in vitro menunjukkan bahwa ukuran kristalit yang dihasilkan menjadikannya bersifat non-sitotoksik atau tidak mengganggu fungsi sel (Permatasari dkk., 2020).

Peningkatan suhu kalsinasi juga mendorong peningkatan ukuran partikel, sebagaimana penelitian yang dilakukan oleh Mohamad Dom dkk., (2024) bahwa diameter rata-rata partikel yang dihasilkan sebesar $(0,272 \pm 0,128)$ μm pada suhu kalsinasi 700°C, dan terjadi peningkatan menjadi sebesar $(0,783 \pm 0,268)$ μm ketika telah dikalsinasi dengan suhu 1000°C. Oleh karena itu, pengaruh suhu kalsinasi terhadap struktur kristal *hydroxyapatite* sangat penting untuk menghasilkan biokeramik dengan kualitas optimum, khususnya untuk aplikasi sebagai bahan implan tulang. Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji lebih lanjut bagaimana variasi suhu kalsinasi dapat mempengaruhi karakteristik kristal *hydroxyapatite* yang disintesis dari tulang ikan cakalang. Karakterisasi dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi struktur kristal dan tingkat kristalinitas, serta *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengetahui perubahan gugus fungsi yang berkaitan dengan komposisi kimia dari *hydroxyapatite* hasil sintesis.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, berikut merupakan rumusan masalah dalam penelitian ini :

1. Bagaimana pengaruh variasi suhu kalsinasi terhadap nilai rendemen (penurunan massa) dan perubahan karakteristik fisik (warna dan tekstur) serbuk tulang ikan cakalang?
2. Bagaimana fenomena transformasi fase kristal kalsium fosfat yang terjadi seiring dengan kenaikan suhu kalsinasi?
3. Bagaimana pengaruh peningkatan suhu kalsinasi terhadap parameter kisi, ukuran kristal, dan derajat kristalinitas *hydroxyapatite* yang dihasilkan?
4. Bagaimana pengaruh variasi suhu kalsinasi terhadap perubahan gugus fungsi mineral pada tulang ikan cakalang?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan-tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis korelasi antara suhu kalsinasi terhadap persentase rendemen yang dihasilkan, serta perubahan sifat fisik serbuk sebagai indikator tingkat kemurnian fase anorganik.
2. Mengidentifikasi kemunculan fase-fase kristal kalsium fosfat dan proses transformasi fase yang terjadi pada setiap tingkatan suhu kalsinasi.
3. Menghitung dan menganalisis secara kuantitatif nilai parameter kisi, ukuran kristal, dan derajat kristalinitas *hydroxyapatite* menggunakan metode analisis difraksi sinar-x.

4. Menganalisis perubahan gugus fungsi kimia (terutama fosfat, karbonat, dan hidroksil) pada mineral tulang ikan cakalang akibat perlakuan panas pada berbagai variasi suhu.

1.4 Batasan Penelitian

Berikut ini merupakan batasan-batasan dalam penelitian ini yang bertujuan untuk menspesifikasi penelitian yang akan dilaksanakan:

1. Bahan baku yang digunakan adalah tulang ikan cakalang (*Katsuwonus pelamis*).
2. Proses sintesis *hydroxyapatite* dilakukan dengan memvariasikan suhu kalsinasi.
3. Waktu proses *milling* diatur 10 menit.
4. Variasi suhu kalsinasi yang digunakan terbatas pada 650°C, 850°C, dan 1050°C dengan kenaikan 10°C/menit, dan dalam durasi waktu 5 jam pada setiap variasi suhu.
5. Karakterisasi struktur kristal *hydroxyapatite* dilakukan menggunakan metode *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR).
6. Parameter yang dianalisis meliputi tingkat kristalinitas dan ukuran kristalit berdasarkan data hasil XRD, karakteristik gugus fungsi dari masing-masing variasi suhu yang digunakan berdasarkan data hasil FTIR, perubahan nilai persentase rendemen serta perubahan sifat fisik dari ketiga variasi suhu sampel.

7. Penelitian tidak membahas secara rinci sifat mekanik, bioaktivitas, atau uji biokompatibilitas dari *hydroxyapatite* yang dihasilkan.

1.5 Manfaat Penelitian

Beberapa manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini, baik bagi mahasiswa maupun bagi masyarakat umum diantaranya adalah :

1. Bagi mahasiswa
 - a. Memberikan referensi praktis mengenai metode sintesis *hydroxyapatite* dari sumber alami.
 - b. Menambah wawasan tentang pemanfaatan limbah biologis dalam pengembangan material fungsional.
 - c. Menjadi acuan dalam penyusunan tugas akhir atau penelitian lanjutan di bidang biomaterial khususnya biokeramik.
 - d. Meningkatkan pemahaman tentang pengaruh suhu kalsinasi terhadap struktur kristal, gugus fungsi, dan persentase rendemen pada masing-masing variasi suhu biokeramik yang dihasilkan.
 - e. Menambah wawasan tentang profil stabilitas termal material biokeramik yang dihasilkan dari sintesis.
2. Bagi masyarakat
 - a. Mendorong pemanfaatan limbah tulang ikan sebagai bahan bernilai tambah, sehingga mengurangi pencemaran lingkungan.
 - b. Menawarkan potensi produksi bahan implan yang lebih ekonomis dan berbasis sumber daya lokal.

- c. Mendukung inovasi dalam bidang kesehatan dengan material implan yang lebih ramah lingkungan.
- d. Menjadi inspirasi dalam pengembangan industri berbasis biomaterial di daerah pesisir.



BAB V

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Perlakuan panas pada penelitian ini menimbulkan perubahan massa akhir dari masing-masing sampel kalsinasi yang memicu terjadinya perubahan nilai rendemen dimana pada sampel suhu 650°C, rendemen sebesar 56,15%, kemudian sampel suhu 850° menurun menjadi 54,58%, sedangkan pada suhu 1050°C sedikit menurun menjadi 54,15%. Nilai-nilai ini menandakan bahwa energi termal berpengaruh terhadap massa masing-masing sampel. Kemudian secara kualitatif, sampel juga terjadi perubahan warna dimana pada sampel non kalsinasi warna sampel berwarna kuning yang menandakan masih banyaknya kandungan organik sampel, kemudian sampel suhu 650°C berwarna abu-abu gelap yang menandakan bahwa kandungan organik tersebut mulai terbakar, sedangkan pada suhu 850 °C dan 1050°C sampel telah berubah putih, yang menandakan bahwa kedua suhu tersebut telah mampu membakar kandungan organik, hingga menyisakan kandungan anorganik yang berwarna putih.
2. Pada penelitian ini, telah teridentifikasi terjadinya transformasi fase seiring dengan peningkatan suhu kalsinasi. Pada sampel non kalsinasi, fase yang terdeteksi berupa *carbonate apatite* dan *hydroxyapatite* yang menandakan karakteristik mineral tulang alami. Namun pada sampel

yang dikalsinasi pada suhu 650°C, 850°C, dan 1050°C, sampel tulang ikan cakalang terdeteksi fase *hydroxyapatite* yang disertai kemunculan fase sekunder β -*tricalcium phosphate*, dengan persentase β -*tricalcium phosphate* yang cenderung meningkat seiring peningkatan suhu akibat dekomposisi termal fase *hydroxyapatite*.

3. Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil penelitian, diperoleh parameter kisi, ukuran kristalit, dan kristalinitas fase *hydroxyapatite* dari masing-masing sampel ialah sebagaimana tertera pada Tabel berikut.

Sampel	Parameter kisi (Å)		Ukuran kristalit (nm)	Derajat kristalinitas (%)
	a = b	c		
Non kalsinasi	9.43	6.86	44.56	9.43
650°C	9.41	6.86	46.94	51.05
850°C	9.43	6.88	60.12	58.94
1050°C	9.42	6.89	107.8	55,73

berdasarkan analisis XRD, parameter kisi *hydroxyapatite* sampel tulang ikan cakalang menunjukkan nilai yang relatif stabil mendekati standar HAp, mengindikasikan struktur kristal tetap terjaga selama kalsinasi. Ukuran kristalit terjadi peningkatan secara signifikan seiring kenaikan suhu, yang menunjukkan terjadinya pertumbuhan kristal akibat proses sintering. Dan kristalinitas juga terjadi peningkatan dari sampel non-kalsinasi hingga sampel 850°C, kemudian terjadi sedikit penurunan pada sampel 1050°C. Penurunan kristalinitas ini kemungkinan disebabkan oleh mulai terjadinya dekomposisi *hydroxyapatite* menjadi fase lain yaitu β -*tricalcium phosphate* pada suhu yang sangat tinggi.

4. Dari keempat sampel, terlihat tren bahwa peningkatan suhu kalsinasi menyebabkan hilangnya gugus organik (C-H) dan air secara bertahap. Kemudian gugus karbonat dan Amida II masih terdeteksi pada suhu 650°C tetapi sudah tidak terdeteksi pada suhu 850°C dan 1050°C, ini menunjukkan bahwa kalsinasi pada suhu diatas 850°C menghasilkan *hydroxyapatite* dengan kemurnian lebih tinggi. Dengan demikian, suhu 850°C merupakan suhu optimal untuk memperoleh *hydroxyapatite* murni tanpa kontaminasi senyawa organik maupun anorganik

DAFTAR PUSTAKA

- Agbeboh, N. I., Oladele, I. O., Daramola, O. O., Adediran, A. A., Olasukanmi, O. O., & Tanimola, M. O. (2020). *Environmentally sustainable processes for the synthesis of hydroxyapatite*. *Heliyon*, 6(February), e03765. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03765>
- Al-kelani, M., & Buthelezi, N. (2024). *Advancements in medical research: Exploring Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy for tissue , cell , and hair sample analysis*. (April), 1–13. <https://doi.org/10.1111/srt.13733>
- Al-shalawi, F. D., Hanim, A., Ariff, M., & Jung, D. (2023). *Biomaterials as Implants in the Orthopedic Field for Regenerative Medicine: Metal versus Synthetic Polymers*.
- Bahraminasab, M., Doostmohammadi, N., & Alizadeh, A. (2021). *Low-cost synthesis of nano-hydroxyapatite from carp bone waste: Effect of calcination time and temperature*. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 18(3), 573–582. <https://doi.org/10.1111/ijac.13678>
- Benjakul, S., Mad, S., & Theeraphol, A. (2017). Characteristics of Bio calcium from Pre-cooked Skipjack Tuna Bone as Affected by Different Treatments. *Waste and Biomass Valorization*, 0(0), 0. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9927-8>
- Bharadwaj, A. (2021). An Overview on Biomaterials and Its Applications in Medical Science. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1116(1), 012178. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1116/1/012178>
- Böhme, N., Hauke, K., Dohrn, M., Neuroth, M., & Geisler, T. (2022). High-temperature phase transformations of hydroxylapatite and the formation of silicocarnotite in the hydroxylapatite–quartz–lime system studied in situ and in operando by Raman spectroscopy. *Journal of Materials Science*, 57(32), 15239–15266. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07570-5>
- Chang, P., Chen, J., Cheng, C., Aoki, K., Su, C., & Lin, C. (2025). Effect of Calcination Temperature and Strontium Addition on the Properties of Sol-Gelled Bioactive Glass Powder. *gels*, 1–17.
- Chong, E. T. J., Ng, J. W., & Lee, P. (2023). *Classification and Medical Applications of Biomaterials – A Mini Review*. 4(2), 54–61. <https://doi.org/10.15212/bioi-2022-0009>

- Crawford, L., Wyatt, M., Bryers, J., & Ratner, B. (2022). *HHS Public Access*. 10(11), 1–37. <https://doi.org/10.1002/adhm.202002153>. Biocompatibility
- Dermawan, S. K. (2022). Effect of the Calcination Temperature on the Properties of Hydroxyapatite from Black Tilapia Fish Bone. *Journal of Physics: Conference Series*, 0–6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2169/1/012034>
- Dinatha, I. K. H., Jamilludin, M. A., Supii, A. I., Wihadmadyatami, H., Partini, J., & Yusuf, Y. (2023). Characteristics of Bioceramic Hydroxyapatite Based on Sand Lobster Shells (*Panulirus homarus*) as Sources of Calcium with Optimal Calcination Temperature. *Materials Science Forum*, 1090, 39–44. <https://doi.org/10.4028/p-c1qrat>
- Eknapakul, T., Jiamprasertboon, A., & Amonpattaratkit, P. (2024). Unraveling the structural complexity of and the effect of calcination temperature on calcium phosphates derived from *Oreochromis niloticus* bones. *Heliyon*, 10(8), e29665. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29665>
- Erzen, B., Karataş, M., Orhan, R., & Aydoğmuş, E. (2025). Advancements and Challenges in Biomaterials: Innovations, Sustainability, and Future Prospects. *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, 0(0), 1–27. <https://doi.org/10.1080/00222348.2025.2476852>
- Fiore, T., & Pellerito, C. (2021). Infrared Absorption Spectroscopy. *Spectroscopy for Materials Characterization*, 129–167.
- Gomes, Y. V. R., Tavares, A. A., Barbosa, R. C., Tomaz, A. F., Sousa, W. J. B., Oliveira, L. C. C., Silva, S. M. L., & Fook, M. V. L. (2025). Biological responses to biomaterials: A review. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 58, 1–11. <https://doi.org/10.1590/1414-431X2025e14599>
- Hapsari, D. N., & Wardani, S. C. (2023). Evaluation of Transverse Strength and Impact Strength of Heat Cured Acrylic Resin With Addition of Skipjack Tuna Bone Nano-Hydroxyapatite. *Malaysian Journal of Medicine and Health Sciences*, 19(April), 66–70.
- Hapsari, D. N., Wardani, S. C., Firdausya, W. A., Amaturrohan, K., & Wiratama, H. P. (2020). The effect of addition of hydroxyapatite from skipjack tuna (*katsuwonus pelamis*) fish bone flour to the transverse, impact, and tensile strength of heat cured acrylic resin. *Journal of Dentomaxillofacial Science*, 5(2), 94–97. <https://doi.org/10.15562/jdmfs.v5i2.1016>
- Hou, X., Zhang, L., Zhou, Z., Luo, X., Wang, T., Zhao, X., Lu, B., Chen, F., & Zheng, L. (2022). Calcium Phosphate-Based Biomaterials for Bone

Repair. *Journal of Functional Biomaterials*, 13(4).
<https://doi.org/10.3390/jfb13040187>

- Hy, L. H. K., Ha, D. V., Ky, P. X., Anh, N. P., & Thiet, D. T. (2021). *Preparation of nanohydroxyapatite from skipjack tuna bone (Katsuwonus pelamis) by alkaline hydrolysis and thermal calcination methods*. 21(4), 67–80.
- Kareem, R. O., Bulut, N., & Kaygili, O. (2024). *Hydroxyapatite Biomaterials: A Comprehensive Review of their Properties, Structures, Medical Applications, and Fabrication Methods*. 6(1), 1–26.
- Kashte, S., Jaiswal, A. K., & Kadam, S. (2017). Artificial Bone via Bone Tissue Engineering: Current Scenario and Challenges. *Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 14(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s13770-016-0001-6>
- Kawsar, M., Hossain, Md. S., Tabassum, S., Islam, D., Bahadur, N. M., & Ahmed, S. (2024). *Crystal structure modification of nanohydroxyapatite using organic modifiers and hydrothermal technique*. 29665–29674. <https://doi.org/10.1039/D4RA03111C>
- Kumar, K. C. V., Subha, T. J., Ahila, K. G., Ravindran, B., Chang, S. W., Hossain, A., Mohammed, O. B., & Rathi, M. A. (2021). Spectral characterization of hydroxyapatite extracted from Black Sumatra and Fighting cock bone samples: A comparative analysis. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(1), 840–846. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.11.020>
- Kurzyk, A., Georgiou, A. S., Pagacz, J., Antosik, A., Grzyb, P. T., Gerle, A., Szterner, P., Włodarczyk, M., Płociński, P., Urbaniak, M. M., Rudnicka, K., & Biernat, M. (2023). Calcination and ion substitution improve physicochemical and biological properties of nanohydroxyapatite for bone tissue engineering applications. *Scientific Reports*, 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42271-2>
- Lele, M., Kapur, S., Hargett, S., Sureshbabu, N. M., & Gaharwar, A. K. (2024). Global trends in clinical trials involving engineered biomaterials. *Science Advances*, 10(29), 1–17. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abq0997>
- Mavrych, V., Bolgova, O., & Abuzubida, A. (2025). *Comparative X-ray Diffraction Analysis of the Hydroxyapatite Crystal Structure in Developing and Mature Lumbar Vertebrae*. 17(5). <https://doi.org/10.7759/cureus.84669>

- Mohamad Dom, A. H., Rezadin, S., Rahim, T. A., & Shamsudin, Z. (2024). *Influence of Calcination Temperature on the Physicochemical Properties of Synthesized Hydroxyapatite from Cow Bone Waste*. 1(1), 115–127.
- Nii, T., & Katayama, Y. (2021). Biomaterial-Assisted Regenerative Medicine. *International Journal of Molecular Sciences*.
- Nurjanah, S.H, S., T, H., P.S, P., Y, E., & T.B, A. (2015). *Changes in nutritional composition of skipjack (Katsuwonus pelamis) due to frying process*. 22(June 2013), 2093–2102.
- Ortega, M. A., Rios, L., Fraile-martinez, O., Boaru, D. L., & De, D. (2023). *Bioceramic versus traditional biomaterials for endodontic sealers according to the ideal properties*. (September 2024). <https://doi.org/10.14670/HH-18-664>
- Panahi, O. (2025). Innovative Biomaterials for Sustainable Medical Implants: A Circular Economy Approach. *European Journal of Innovative Studies and Sustainability*, 1(2), 20–29. [https://doi.org/10.59324/ejiss.2025.1\(2\).03](https://doi.org/10.59324/ejiss.2025.1(2).03)
- Parker, T., Zhang, D., Bugallo, D., Shevchuk, K., Downes, M., Valurouthu, G., Inman, A., Chacon, B., Zhang, T., Shuck, C. E., & Hu, Y. (2024). Fourier-Transform Infrared Spectral Library of MXenes. *chemistry of materials*, 36, 8437–8446. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.4c01536>
- Pasieczna-patkowska, S., & Cichy, M. (2025). Application of Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy in Characterization of Green Synthesized Nanoparticles. *molecules*, 1–36.
- Permatasari, H. A., Wati, R., Anggraini, R. M., Almukarramah, A., & Yusuf, Y. (2020). Hydroxyapatite extracted from fish bone wastes by heat treatment. *Key Engineering Materials*, 840 *KEM*(April 2024), 318–323. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.840.318>
- Prasad Kumara, P. A. A. S., Cooper, P. R., Cathro, P., Gould, M., Dias, G., & Ratnayake, J. (2025). *Bioceramics in Endodontics: Limitations and Future Innovations—A Review*. 1–30.
- Purba, R. A. P., Deswardani, F., Anggraini, R. M., Fendriani, Y., & Restianingsih, T. (2024). Ekstraksi dan Karakterisasi Hidroksiapatit (HAp) dari Tulang Ikan Tenggiri (*Scomberomorus commersoni*) dengan Metode Heat Treatment. *Jurnal Fisika Unand (JFU)*, 13(2), 247–253. <https://doi.org/https://doi.org/10.25077/jfu.13.2.247-253.2024>

- Rao, Z., Shi, H., Wang, J., & Xia, G. (2025). *Physicochemical and Functional Properties of Skipjack Tuna (*Katsuwonus pelamis*) Bone Gelatin Extracted at Different Temperatures*. 1–18.
- Raut, H. K., Das, R., Liu, Z., Liu, X., & Ramakrishna, S. (2020). Biocompatibility of Biomaterials for Tissue Regeneration or Replacement. *Biotechnology Journal*, 15(12), 1–14. <https://doi.org/10.1002/biot.202000160>
- Rheima, A. M., Abdul-Rasool, A. A., Al-Sharify, Z. T., Zaidan, H. K., Athair, D. M., Mohammed, S. H., & Kianfar, E. (2024). Nano bioceramics: Properties, applications, hydroxyapatite, nanohydroxyapatite and drug delivery. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10(July). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100869>
- Riyanto, B., & Maddu, A. (2013). *TULANG IKAN TUNA Material of Hydroxyapatite-Based Bioceramics from Tuna Fishbone*. 16.
- Rodvalho, A. J. R. L., Barbosa, W. T., Vieira, J. L., Oliva, C. A. de, Gonçalves, A. P. B., Cardoso, P. da S. M., Modolon, H. B., Montedo, O. R., Klegues, Arcaro, S., Hodel, K. V. S., Soares, M. B. P., Ajayan, P. M., & Barbosa, J. D. V. (2024). Influence of size and crystallinity of nanohydroxyapatite (nHA) particles on the properties of Polylactic Acid / nHA nanocomposite scaffolds produced by 3D printing. *Journal of Materials Research and Technology*, 30(April), 3101–3111. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.048>
- Salem, K. S., Kaseera, K., Rahman, A., Jameel, H., Habibi, Y., Eichhorn, S. J., French, A. D., & Lucia, L. A. (2023). *Comparison and assessment of methods for cellulose crystallinity determination*. (August), 6417–6446. <https://doi.org/10.1039/d2cs00569g>
- Scalera, F., Quarta, A., Tobaldi, D. M., Pullar, R. C., & Piccirillo, C. (2021). Cork-derived hierarchically porous hydroxyapatite with different stoichiometries for biomedical and environmental applications. *Materials Chemistry Frontiers*, 5(13), 5071–5081. <https://doi.org/10.1039/d1qm00584g>
- Shoraka, Z. B. (2024). Advanced Ceramic-Based Biomaterials for Bone Repair: Real-Time Biomechanical Assessments Using Wireless e-Health Solutions. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 16(4).
- Stuart, B. (2004). *Infrared spectroscopy: Fundamentals and applications*. J. Wiley.

- Sukmana, I., Eka Risano, A. Y., Arif Wicaksono, M., & Adi Saputra, R. (2022). Perkembangan dan Aplikasi Biomaterial dalam Bidang Kedokteran Modern: A Review. *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, 1(5), 635–646. <https://doi.org/10.55123/insologi.v1i5.1037>
- Surana, P., Dhull, K. S., Arya, A., Samreen, S., Rajan, M., & Singh, A. (2024). *Bio-ceramics application in Dentistry*. 20(2), 136–139. <https://doi.org/10.6026/973206300200136>
- Syam, S., Mattulada, I. K., Asmah, N., Aslan, S., & Surahman, A. (2024). *Kandungan Tulang Ikan Cakalang (Katsuwonus pelamis) sebagai Sumber Kalsium untuk Remineralisasi Gigi*. 06(02), 95–100.
- Trucillo, P. (2024). Biomaterials for Drug Delivery and Human Applications. *Materials*, 17(2). <https://doi.org/10.3390/ma17020456>
- Trzaskowska, M., Vivcharenko, V., & Przekora, A. (2023). The Impact of Hydroxyapatite Sintering Temperature on Its Microstructural , Mechanical , and Biological Properties. *International Journal of Molecular Sciences*, 1–21.
- Vaiani, L., Boccaccio, A., Uva, A. E., Palumbo, G., Piccininni, A., Guglielmi, P., Cantore, S., Santacroce, L., Charitos, I. A., & Ballini, A. (2023). Ceramic Materials for Biomedical Applications: An Overview on Properties and Fabrication Processes. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/jfb14030146>
- Veerasingam, S., Ranjani, M., Venkatachalapathy, R., Bagaev, A., Litvinyuk, D., Mugilarasan, M., Gurumoorthi, K., Gunganathan, L., Aboobacker, V. M., & Vethamony, P. (2021). Contributions of Fourier transform infrared spectroscopy in microplastic pollution research: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(22), 2681–2743. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1807450>
- Wang, B., & Zhang, Z. (2023). *Bone Apatite Nanocrystal: Crystalline Structure , Chemical Composition , and Architecture*.
- Wang, Z., Wang, Y., Yan, J., Zhang, K., Lin, F., Xiang, L., Deng, L., Guan, Z., Cui, W., & Zhang, H. (2021). Pharmaceutical electrospinning and 3D printing scaffold design for bone regeneration. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 174, 504–534. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.05.007>
- Wardani, S. C., Sujuti, H., Mustamsir, E., & Hapsari, D. N. (2020). Synthesis and potential of skipjack tuna bone hydroxyapatite as bone tissue engineering biomaterial Synthesis and potential of skipjack tuna bone hydroxyapatite

as bone tissue engineering biomaterial. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1665/1/012032>

West, A. R. (2014). *Solid State Chemistry* (2nd ed.). Department of Material Science and Engineering.

Zastulka, A., Clichici, S., Tomoaia-Cotisel, M., Mocanu, A., Roman, C., Olteanu, C. D., Culic, B., & Mocan, T. (2023). Recent Trends in Hydroxyapatite Supplementation for Osteoregenerative Purposes. *Materials*, *16*(3). <https://doi.org/10.3390/ma16031303>

Zhao, C., Liu, W., Zhu, M., Wu, C., & Zhu, Y. (2022). Bioceramic-based scaffolds with antibacterial function for bone tissue engineering: A review. *Bioactive Materials*, *18*(December 2021), 383–398. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2022.02.010>