

ARTIKEL PENELITIAN

Karakterisasi *bovine tooth scaffold* dalam bentuk nanopartikel dengan uji x-ray diffraction (XRD) untuk terapi periodontitis

Anggi Salwa Adisty*, Desi Sandra Sari**, Melok Aris Wahyukundari**

*Program Studi Kedokteran Gigi, Fakultas Kedokteran Gigi, Universitas Jember, Jember, Jawa Timur, Indonesia

**Departemen Periodonsia, Fakultas Kedokteran Gigi, Universitas Jember, Jember, Jawa Timur, Indonesia

Perum Mastrap Blok F7, Sumber Sari, Jember, Jawa Timur, Indonesia; ✉ koresponden: salwaanggi95@gmail.com

Submit: 30 Januari 2025; Review: 26 Februari 2025; Diterima: 28 Agustus 2025

ABSTRAK

Kerusakan tulang alveolar akibat periodontitis memiliki prevalensi tertinggi di Indonesia. Pencegahan kerusakan tulang alveolar dapat dilakukan dengan terapi regenerasi periodontal. Desain *scaffold* telah menjadi fokus utama untuk regenerasi jaringan tulang. *Bovine teeth scaffold* berukuran nanopartikel saat ini sedang dikembangkan sebagai solusi untuk mengatasi keterbatasan *scaffold* berukuran mikro. *Scaffold* harus memiliki karakteristik tertentu yang mendukung pertumbuhan dan differensiasi sel untuk regenerasi jaringan periodontal yang dapat diketahui melalui uji karakterisasi X-ray diffraction. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakterisasi *bovine teeth scaffold* dalam bentuk nanopartikel melalui uji X-ray diffraction (XRD) untuk terapi periodontitis. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian deskriptif kuantitatif untuk mendeskripsikan karakterisasi *bovine teeth scaffold* dalam bentuk nanopartikel dan data dianalisis secara deskriptif dengan tabel, kurva, dan nilai persentase. Hasil uji XRD menunjukkan bahwa terdapat dua fasa yang terdeteksi, yaitu hidroksiapatit dan *whitlockite*. Puncak-puncak difraksi hidroksiapatit muncul pada sudut difraksi 2θ sebesar 25,82°; 31,67°; 33,91°; 49,33°; 50,30° dengan puncak tertinggi pada sudut difraksi 31,67°. Puncak-puncak difraksi *whitlockite* muncul pada sudut difraksi 2θ sebesar 28,86°; 32,72°; 39,58°; 46,56° dengan puncak tertinggi pada sudut difraksi 32,72°. Grafik menunjukkan pola difraksi sempit, tinggi, dan tajam yang mengindikasikan bahwa *bovine teeth scaffold* memiliki struktur kristal. *Bovine teeth scaffold* dalam bentuk nanopartikel mengandung 65% Hidroksiapatit ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_{6}\text{OH}$) dan 35% *Whitlockite* ($\text{Ca}_{10}\text{NaMg}(\text{PO}_4)_6(\text{CO}_3)(\text{OH})_3$). Karakterisasi *bovine teeth scaffold* dalam bentuk nanopartikel dengan menggunakan uji XRD diperoleh fasa hidroksiapatit sebesar 65% dan fasa *whitlockite* sebesar 35%.

Kata kunci: *bovine teeth scaffold*; nanopartikel; periodontitis; resorpsi tulang alveolar; x-ray diffraction

ABSTRACT: *Characterization of nanoparticulate bovine tooth scaffold via x-ray diffraction analysis for periodontal regeneration therapy.* Periodontitis, a highly prevalent disease in Indonesia, often leads to alveolar bone resorption. Periodontal regeneration therapy is a key approach to addressing this damage, with scaffold design being a critical focus. Nanoparticulate scaffolds are emerging to overcome the limitations of micro-sized alternatives. Bovine tooth-derived scaffold is a promising biomaterial, and its characterization is essential to confirm properties that support cellular growth and differentiation. This study aims to characterize the crystallographic structure and phase composition of a nanoparticulate bovine tooth scaffold using X-ray diffraction (XRD) analysis to assess its potential for periodontal regeneration therapy. This study employed a quantitative descriptive design. The scaffold material was processed into nanoparticles and analyzed using XRD. The resulting data were interpreted descriptively using tables, diffraction patterns, and phase percentage calculations to identify the present crystalline phases and their relative quantities. XRD analysis revealed two distinct crystalline phases: Hydroxyapatite (HA) and Whitlockite (WH). Characteristic diffraction peaks for hydroxyapatite were observed at 2θ angles of 25.82°, 31.67°, 33.91°, 49.33°, and 50.30°, with the highest peak at 31.67°. Whitlockite peaks were identified at 2θ angles of 28.86°, 32.72°, 39.58°, and 46.56°, with the highest peak at 32.72°. The diffraction patterns showed narrow, high, and sharp peaks, indicating a well-defined crystalline structure. Quantitative phase analysis determined the composition to be 65% Hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) and 35% Whitlockite ($\text{Ca}_{12}\text{Mg}_2(\text{HPO}_4)_2(\text{PO}_4)_{12}$). The nanoparticulate bovine tooth scaffold is predominantly composed of hydroxyapatite and whitlockite, exhibiting a highly crystalline structure. This specific mineral composition is highly promising for bone regeneration applications, suggesting the scaffold's strong potential for use in periodontal regenerative therapy.

Keywords: *bovine teeth scaffold*; nanoparticle; periodontitis; alveolar bone resorption; x-ray diffraction

PENDAHULUAN

Periodontitis merupakan penyakit yang ditandai dengan kehilangan tulang alveolar, kehilangan perlekatan membran periodontal, serta terbentuknya poket.¹ Kehilangan perlekatan menyebabkan kegoyangan gigi yang terjadi akibat resorpsi tulang alveolar. Pencegahan kerusakan tulang alveolar yang lebih parah dapat dilakukan dengan terapi regenerasi periodontal. Keberhasilan perawatan diharapkan menghasilkan pembentukan tulang baru, sementum, dan perlekatan ligamen periodontal untuk menggantikan tulang yang hilang akibat resorpsi. Desain *scaffold* telah menjadi fokus utama dalam regenerasi jaringan tulang dalam beberapa tahun terakhir. *Scaffold* merupakan media atau kerangka yang berperan dalam menyediakan lingkungan untuk membantu sel punca yang akan melakukan adhesi, proliferasi dan diferensiasi yang akan menghasilkan jaringan yang diharapkan. Desain *scaffold* ini harus memenuhi beberapa persyaratan, yaitu osteokonduktif, osteoinduktif, osteogenik, *biodegradable*, mikrostruktur yang baik, dan sifat mekanik yang baik. *Scaffold* juga harus dapat mempertahankan fungsi jaringan dan merangsang adhesi sel.²

Scaffold dapat dibuat dari bahan alami maupun bahan sintetis. *Scaffold* alami memiliki karakteristik matriks ekstraseluler yang menyerupai jaringan tulang dan menunjukkan bioaktivitas yang baik. Sementara itu, *scaffold* sintetis dapat dimodifikasi sesuai kebutuhan, memiliki konsistensi yang stabil, mudah direproduksi, serta menggunakan bahan yang relatif murah dan mudah diperoleh.³ *Scaffold* sintetis yang tersedia saat ini kurang sesuai dengan struktur anatomi dan struktur fisiologis tulang normal. *Scaffold* sintetis yang berbahan dasar kolagen tidak memiliki komponen mineral hidroksiapatit (HA) yang terdapat pada tulang. Ketiadaan tersebut dapat mengurangi biosimiliaritasnya dengan tulang normal.⁴ Sebagian besar bahan sintetis mudah untuk dimanipulasi dalam hal struktur makroskopis dan mikroskopisnya, tetapi secara biologis bahan sintetis memiliki lebih sedikit interaksi dengan jaringan di sekitarnya dan dapat berpotensi beracun dalam tubuh.⁵

Salah satu material alami yang dapat dikembangkan menjadi *scaffold* adalah gigi sapi (*bovine teeth*). Selama 30 tahun terakhir, *bovine teeth* telah menjadi material pengganti gigi manusia yang paling banyak digunakan pada penelitian kedokteran gigi.⁶ Manusia dan sapi memiliki struktur gigi yang kompleks dan serupa, terdiri dari tiga lapisan utama. Lapisan pertama adalah enamel, yang mengandung 90–96% hidroksiapatit, 1–2% bahan organik, dan 3–4% air. Lapisan kedua, yaitu dentin, tersusun atas 70% hidroksiapatit, 18% bahan organik, dan 12% air. Sementara itu, lapisan terakhir adalah sementum yang juga mengandung hidroksiapatit.⁷ *Bovine teeth* memiliki sifat osteoinduktif, yaitu memiliki kemampuan yang dapat merangsang sel-sel untuk melakukan diferensiasi menjadi sel osteoblas yang matang. Selain itu, *bovine teeth* juga memiliki sifat osteokonduktif, yaitu kemampuan untuk membantu sel melakukan adhesi, proliferasi, dan membentuk matriks ekstraseluler.^{6,8}

Gigi sapi (*bovine teeth*) merupakan bagian tubuh hewan yang jumlahnya melimpah dan sering dianggap sebagai limbah. Gigi sapi memiliki kesamaan dalam komposisi kimia dengan gigi manusia, terutama kandungan hidroksiapatit. Meskipun terdapat perbedaan pada struktur morfologi makroskopis, gigi sapi tetap banyak digunakan sebagai model alternatif dalam penelitian kedokteran gigi karena kemiripan sifat kimianya. Hidroksiapatit mampu menstimulasi osteoprogenitor yang dapat mendukung metabolisme tulang. Gigi manusia dan *bovine teeth* memiliki jumlah tubulus dentin dan komposisi asam amino protein matriks enamel yang sama. *Bovine teeth scaffold* dalam bentuk mikro saat ini telah banyak digunakan dalam rekayasa jaringan. Struktur mikro dari *Scaffold* dapat mendukung diferensiasi osteogenik, tetapi struktur *scaffold* berukuran mikro tidak menyediakan luas permukaan yang cukup besar untuk adsorpsi protein dan growth factor yang optimal. Akibatnya, distribusi nutrisi dan oksigen menjadi tidak optimal yang menghambat proses regenerasi jaringan. *Bovine teeth scaffold* yang berukuran nanopartikel saat ini mulai

dikembangkan sebagai solusi untuk mengatasi keterbatasan dari *scaffold* dalam ukuran mikro. *Scaffold* nanopartikel dengan struktur nano-pori dapat menyediakan luas permukaan yang lebih besar, sehingga meningkatkan efisiensi adsorpsi protein dan growth factor. *Scaffold* berukuran nano dapat memengaruhi morfologi dari makrofag yang akan menciptakan lingkungan imun yang mendukung pembentukan dan diferensiasi osteoblas pada tahap awal pembentukan tulang.⁹

Penelitian oleh Webster et. al. menunjukkan bahwa *scaffold* keramik berbasis nanophase dapat menghasilkan proliferasi dan adhesi osteoblas yang lebih tinggi dibandingkan dengan *Scaffold* ceramic berukuran mikro.¹⁰ Hal tersebut menunjukkan bahwa ukuran nanopartikel memiliki dampak yang signifikan dalam meningkatkan fungsi sel pada *scaffold*. Penelitian selanjutnya oleh Harini et. al. menunjukkan bahwa nano-TCP (nano-tricalcium phosphate) yang terdapat dalam *scaffold* chitosan memberikan kekuatan mekanis yang lebih baik dibandingkan dengan mikro-TCP.¹¹ Nanopartikel memiliki rentang ukuran 1-100 nanometer. Karakteristik kimia dan fisik dari material berukuran nanopartikel akan bergantung pada ukuran permukaannya. Material berukuran nano memiliki luas permukaan yang jauh lebih besar, sehingga cenderung lebih reaktif dibandingkan material berukuran mikron atau makro. Pengembangan nanopartikel ini memiliki keunggulan, yaitu mempunyai sifat adhesi, proliferasi, dan diferensiasi yang lebih baik dibandingkan dengan *scaffold* dalam bentuk mikropartikel.¹² Nanopartikel dapat meningkatkan osseointegrasi, osteokonduksi, dan osteoinduksi.¹³ Karakterisasi dari *scaffold* dalam bentuk nanopartikel dapat dilakukan dengan melihat perubahan pada fase kristalitasnya, yaitu dengan deteksi perubahan strukturnya dengan menggunakan pengujian X-ray diffraction (XRD).

Uji X-ray diffraction merupakan teknik karakterisasi material yang penting dan banyak digunakan. Uji X-ray diffraction dapat mengidentifikasi struktur, ukuran kristal, unsur, dan parameter kisi dari suatu Kristal.¹⁴ Teknik X-ray diffraction merupakan teknik non-

destruktif yang artinya tidak merusak, sehingga sampel masih dapat digunakan untuk analisis menggunakan teknik lainnya.¹⁵ Pengujian X-ray diffraction (XRD) pada *bovine teeth scaffold* dalam bentuk nanopartikel untuk regenerasi periodontal sangat penting karena dengan teknik ini mampu mengkarakterisasi sifat struktural bahan *Scaffold*. *Scaffold* harus memiliki karakteristik tertentu yang memungkinkan terjadinya pertumbuhan dan diferensiasi sel periodontal untuk regenerasi periodontal.

METODE PENELITIAN

Penelitian deskriptif kuantitatif ini ditujukan untuk mendeskripsikan karakterisasi *bovine teeth scaffold* dalam bentuk nanopartikel. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Perlakuan dan Pengujian Bahan Teknik Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang untuk sintesis *bovine teeth scaffold* dalam bentuk nanopartikel dengan metode *ball mill* dan Laboratorium XRD Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) untuk karakterisasi *bovine teeth scaffold* dalam bentuk nanopartikel dengan uji XRD. Gigi sapi yang digunakan dalam pembuatan *scaffold* diperoleh dari limbah yang diproses menggunakan metode *ball mill*. Gigi sapi dibersihkan dengan menggunakan hidrogen peroksida 3%. Selanjutnya, jaringan dentin dan sementum dimasukkan ke dalam *bone miller* dan dihancurkan sehingga berbentuk partikel. Gigi sapi yang telah berbentuk partikel diayak sesuai dengan ukuran yang diinginkan.

Prosedur sintesis *bovine teeth scaffold* dalam bentuk nanopartikel dimulai dengan menimbang massa *bovine teeth scaffold* sebanyak 1 gram. *Bovine teeth scaffold* dan bola keramik dimasukkan ke dalam *milling chamber*, kemudian *chamber* tersebut ditutup dan diletakkan pada motor penggerak sebelum mesin dinyalakan. Proses penggerusan dilakukan selama 32 jam, setelah itu hasil penggerusan dikeluarkan dan dilakukan pengayakan. Setelah pengayakan, massa *bovine teeth scaffold* ditimbang kembali untuk memastikan jumlah yang tepat. Proses

sintesis ini diakhiri dengan melakukan uji XRD untuk karakterisasi kristal hidroksiapatit yang terbentuk dari *bovine teeth scaffold*.

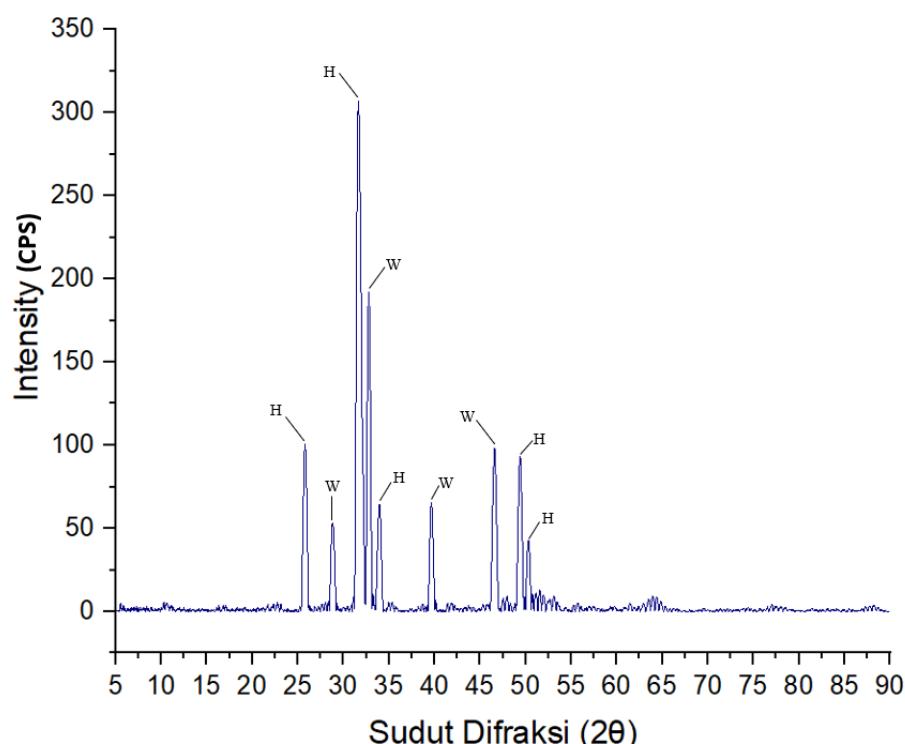
Alat XRD beroperasi pada tegangan 40kV dengan arus sebesar 30mA, menggunakan sumber radiasi sinar X dari Copper (Cu) dengan panjang gelombang elektromagnetik λ sebesar 1,54060 Å. Untuk memulai uji, sampel yang telah berbentuk nanopartikel disiapkan dan diletakkan pada *sample holder*. *Sample holder* kemudian ditempatkan pada mesin XRD, dan sampel dianalisis menggunakan sinar-X untuk memperoleh pola difraksi kristal. Proporsi kandungan hidroksiapatit (HaP) dan *whitlockite* (WH) ditentukan berdasarkan intensitas puncak-puncak difraksi khas dari masing-masing senyawa, yang kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak pendukung seperti Match! atau HighScore Plus.

HASIL PENELITIAN

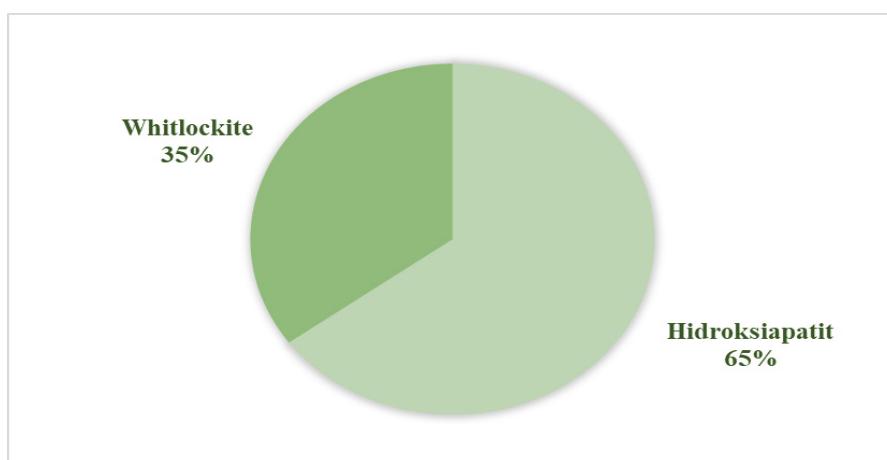
Hasil uji XRD pada Gambar 1 memberikan beberapa informasi penting mengenai karakteristik *bovine teeth scaffold*. Uji XRD mengidentifikasi dua

fase yang terdeteksi, yaitu hidroksiapatit (HA) dan *whitlockite* (WH). Hidroksiapatit adalah mineral kalsium fosfat yang secara alami ditemukan dalam tulang dan gigi manusia, sedangkan *whitlockite* merupakan mineral berbasis kalsium fosfat yang mengandung substitusi ionik dari magnesium, sodium, karbonat, dan hidroksida. Puncak difraksi untuk hidroksiapatit muncul pada sudut difraksi 2θ , yaitu $25,82^\circ$, $31,67^\circ$, $33,91^\circ$, $49,33^\circ$, dan $50,30^\circ$, dengan puncak tertinggi pada sudut difraksi $31,67^\circ$. Sementara itu, puncak difraksi untuk *whitlockite* terdeteksi pada sudut 2θ yaitu $28,86^\circ$, $32,72^\circ$, $39,58^\circ$, dan $46,56^\circ$, dengan puncak tertinggi pada sudut difraksi $32,72^\circ$. Puncak difraksi yang sempit, tinggi, dan tajam menunjukkan bahwa *bovine teeth scaffold* memiliki struktur kristalin yang sangat teratur.

Berdasarkan Gambar 1, fasa yang memiliki intensitas paling tinggi adalah hidroksiapatit dengan puncak berada pada $31,67^\circ$. Hal ini menunjukkan bahwa fasa hidroksiapatit merupakan fasa yang dominan dalam *bovine teeth scaffold* dibandingkan dengan *whitlockite*.



Gambar 1. Grafik Hasil Uji XRD

Gambar 2. Diagram pie kandungan kristal *bovine teeth scaffold*

Tabel 1. Komposisi senyawa yang diidentifikasi dari analisis XRD

Visible	Ref. code	Compound name	Per. (%)	Chemical formula
*	01-090-8034	Hidroksiapatit	65	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$
*	01-089-6450	Whitlockite	35	$\text{Ca}_{10}\text{NaMg}(\text{PO}_4)_6(\text{CO}_3)(\text{OH})_3$

PEMBAHASAN

Hasil uji XRD menunjukkan bahwa terdapat dua fasa yang terkandung dalam *bovine teeth scaffold*, yakni hidroksiapatit dengan rumus kimia $(\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH})$ dan *whitlockite* dengan rumus kimia $(\text{Ca}_{10}\text{NaMg}(\text{PO}_4)_6(\text{CO}_3)(\text{OH})_3)$. Kedua fasa tersebut dapat teridentifikasi melalui uji XRD yang ditunjukkan pada grafik pada Gambar 1. Identifikasi sudut difraksi pada grafik dicocokkan dengan database ICCD untuk mengetahui jenis senyawa yang terkandung. Berdasarkan database ICCD, puncak sudut difraksi $25,82^\circ$; $31,67^\circ$; $33,91^\circ$; $49,33^\circ$; $50,30^\circ$ memiliki pola difraksi yang mirip dengan pola difraksi standar untuk hidroksiapatit yang dapat ditemukan dalam ICCD 01-090-8034. Penelitian yang dilakukan oleh Julius¹⁶ menunjukkan bahwa puncak XRD hidroksiapatit pada sudut peninjaman 2θ memiliki pola yang serupa, yaitu $25,98^\circ$; $31,70^\circ$; $32,96^\circ$; dan $49,54^\circ$. Dengan demikian, pola difraksi XRD *bovine teeth scaffold* menunjukkan kesesuaian dengan pola difraksi hidroksiapatit yang standar dan dapat dipastikan *bovine teeth scaffold* hasil penelitian ini mengandung fasa hidroksiapatit.

Grafik hasil uji XRD (Gambar 1) menunjukkan bahwa terdapat fasa lain yang terkandung dalam *bovine teeth scaffold*. Puncak difraksi dengan sudut 2θ menunjukkan terdapat puncak pada $28,86^\circ$; $32,72^\circ$; $39,58^\circ$; $46,56^\circ$. Berdasarkan data dari ICCD 01-089-6450, puncak dengan sudut tersebut merupakan puncak dari fasa *whitlockite*. *Whitlockite* merupakan *ceramic* berbasis kalsium fosfat yang mengandung ion magnesium dan merupakan mineral kedua yang paling melimpah dalam tulang manusia.¹⁷ Dengan demikian, dapat dilihat pada Gambar 1 bahwa dalam *bovine teeth scaffold* nanopartikel dapat ditemukan kandungan dua fasa utama, yakni hidroksiapatit dan *whitlockite*.

Puncak-puncak dalam grafik hasil uji XRD pada Gambar 1 menunjukkan pola difraksi yang tampak sempit, tinggi, dan tajam. Hal ini menunjukkan bahwa *bovine teeth scaffold* memiliki struktur yang sangat teratur atau kristalin. Struktur kristal *scaffold* memiliki peran penting dalam regenerasi tulang karena kemiripannya dengan komposisi alami dalam tubuh, terutama hidroksiapatit. *scaffold* memiliki fungsi sebagai

tempat untuk mendukung pertumbuhan dan diferensiasi sel-sel tulang. Struktur kristal pada *scaffold* dapat memfasilitasi interaksi sel dengan matriks ekstraseluler, meningkatkan adhesi dan proliferasi sel-sel osteogenik. *Scaffold* dengan struktur kristal yang baik dapat meningkatkan sifat mekanik dan stabilitasnya yang penting untuk mendukung beban mekanis. Hidroksiapatit nanopartikel dalam bentuk kristal efektif dalam menyerap obat karena memiliki lebih banyak permukaan yang reaktif dan memungkinkan lebih banyak interaksi kimia. Luas permukaan nanopartikel hidroksiapatit juga berperan penting dalam penyerapan obat dan protein, karena nanopartikel dengan luas permukaan lebih tinggi dapat menyerap lebih banyak molekul. Nanopartikel hidroksiapatit dengan struktur kristal tidak hanya lebih baik dalam menyerap obat, tetapi juga memiliki kapasitas yang lebih besar untuk menampung obat.¹⁸ Gambar 1 menunjukkan bahwa fasa yang memiliki intensitas paling tinggi adalah hidroksiapatit dengan puncak berada pada 31,67°. Hal ini menunjukkan bahwa fasa hidroksiapatit merupakan fasa yang dominan dalam *bovine teeth scaffold* dibandingkan dengan *whitlockite*.

Scaffold nanopartikel gigi sapi berbasis hidroksiapatit dengan kandungan hidroksiapatit sebesar 65% memiliki potensi besar untuk regenerasi tulang. Kandungan hidroksiapatit sebesar 50% telah terbukti efektif untuk terapi regenerasi jaringan tulang karena sifatnya yang osteokonduktif dan osteoinduktif. Penelitian menunjukkan bahwa kandungan hidroksiapatit yang optimal dalam *scaffold* dapat meningkatkan aktivitas osteoblas dan mempercepat pembentukan tulang baru.¹⁹

Hidroksiapatit memiliki karakteristik dan struktur yang mirip dengan komponen anorganik pada gigi yang menjadikan hidroksiapatit sangat biokompatibel untuk aplikasi medis. Hidroksiapatit mampu meningkatkan adhesi dan proliferasi osteoblast.²⁰ Hidroksiapatit dan β-trikalsium fosfat (β-TCP) memiliki efek osteogenik yang baik karena memiliki kandungan kalsium dan fosfat yang tinggi.²¹ Hidroksiapatit dalam bentuk

n nanopartikel juga meningkatkan interaksi antara material dan sel yang mendorong proses osteokonduksi dan osteoinduksi. Hidroksiapatit juga mampu membentuk ikatan kimiawi dengan jaringan disekitarnya yang memiliki sifat *non-toxic*, *non-inflammatory*, dan *non-immunogenic*.⁷

Bovine teeth scaffold dalam bentuk nanopartikel dengan kandungan hidroksiapatit menunjukkan efek positif melalui pelepasan ion kalsium dan fosfat yang dapat merangsang pembentukan mineral tulang baru. Hidroksiapatit dan β-trikalsium fosfat (β-TCP) memiliki efek osteogenik yang baik karena memiliki kandungan kalsium dan fosfat yang tinggi.²¹ Ion kalsium memiliki peranan penting dalam membentuk dan pematangan tulang. Ion fosfat mempengaruhi diferensiasi dan pertumbuhan osteoblas dan meningkatkan faktor pertumbuhan tulang seperti BMPs.

Kandungan *whitlockite* sebesar 35% dalam *bovine teeth scaffold* memberikan kontribusi terhadap peningkatan sifat mekanik dan biokompatibilitas material. *Whitlockite* memiliki kekuatan yang lebih tinggi dan memiliki tingkat stabilitas yang lebih baik dibandingkan dengan hidroksiapatit. *Whitlockite* memiliki permukaan yang dapat meningkatkan interaksi dengan sel yang penting dalam mendukung adhesi sel dan pembentukan tulang baru.¹⁷

Keberadaan ion magnesium dan fosfat yang dilepaskan oleh *whitlockite* dapat merangsang pertumbuhan tulang dengan mengatur diferensiasi osteogenik. Ion magnesium berperan penting dalam mengurangi aktivitas osteoklas yang menyebabkan peningkatan pembentukan tulang. Oleh karena itu, kandungan *whitlockite* dalam *bovine teeth scaffold* dapat meningkatkan aktivitas osteogenik dan mempercepat regenerasi tulang.¹⁷

Ion sodium (Na+) dan ion magnesium (Mg2+) dalam *whitlockite* sangat berpengaruh terhadap regenerasi tulang karena dapat meningkatkan pembentukan tulang (osteogenesis) dan memicu ekspresi gen penting seperti ALP yang mendukung pembentukan dan pertumbuhan tulang baru. Ion sodium membantu pembentukan struktur apatit biologis melalui penggantian ion karbonat pada hidroksiapatit, menjadikannya mirip dengan tulang

alami. Sodium juga berperan dalam menjaga lingkungan mikro yang mendukung regenerasi tulang. Penelitian menunjukkan bahwa kombinasi efek ini mempercepat proses penyembuhan tulang dengan mendukung pembentukan pembuluh darah (angiogenesis).²¹

Ion karbonat dalam *whitlockite* memiliki peran penting dalam regenerasi tulang, terutama karena kemampuannya untuk meningkatkan bioaktivitas material biominerale yang digunakan dalam *scaffold*. Ion karbonat dalam bentuk karbonat hidroksiapatit (*carbonated hydroxyapatite*, CAp) menyerupai komposisi mineral alami tulang manusia. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan ion karbonat dapat meningkatkan kemampuan material untuk merangsang proliferasi dan diferensiasi osteoblas, yang merupakan sel utama dalam pembentukan tulang. Selain itu, CAp membantu mempercepat regenerasi tulang dengan menyediakan lingkungan yang mendukung pertumbuhan sel tulang melalui bioaktivitas tinggi dan struktur mineral yang menyerupai tulang.²²

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian menggunakan uji XRD, dapat disimpulkan bahwa karakteristik *bovine teeth scaffold* dalam bentuk nanopartikel menunjukkan fasa hidroksiapatit sebesar 65% dan fasa *whitlockite* sebesar 35%.

DAFTAR PUSTAKA

- Desyaningrum H, Epsilawati L, Rusyandi Y. Karakteristik kerusakan tulang alveolar pada penderita periodontitis kronis dan agresif dengan pencitraan cone beam computed tomography. *Padjadjaran J Dent Res Students*. 2017; 1(1): 1–6. doi: 10.24198/pjdrs.v1i1.22116
- Rahmitasari F. Scaffold 3D kitosan dan kolagen sebagai graft pada kasus kerusakan tulang. *Jurnal Material Kedokteran Gigi*. 2018; 5(2): 1-7. doi: 10.32793/jmkg.v5i2.246
- Newman MG. Newman and Carranza's Clinical Periodontology. 13th ed. Vol. 4. United States: Elsevier Ltd; 2019. 1–23.
- Jolly J, Mohd Fozi NF, Chin KY, Wong S, Chua K, Alias E, et al. Skeletal microenvironment system utilising bovine bone scaffold co-cultured with human osteoblasts and osteoclast-like cells. *Exp Ther Med*. 2021; 22(1): 1–8. doi: 10.3892/etm.2021.10112
- Junaidi H, Pawitan JA. Advantages of selected natural and synthetic materials as *Scaffolds* in vascular tissue engineering. *Health Biotechnology and Biopharma*. 2022; 6(3): 11–22. doi: 10.22034/HBB.2022.20
- Sari DS, Maduratna E, Ferdiansyah, Latief FDE, Satuman, Nugraha AP, et al. Osteogenic differentiation and biocompatibility of bovine teeth scaffold with rat adipose-derived mesenchymal stem cells. *Eur J Dent*. 2019; 13(2): 206–212. doi: 10.1055/s-0039-1694305
- Setiawatie EM, Ulfah N, Wahjuningrum DA, Sari DS, Rubianto M. Vliability bovine tooth hydroxiapatite on bone marrow mesenchymal stem cells. *Int Med Device Technol Conf*. 2017: 78–81.
- Mahanani ES. The characteristics of scaffold design for bone regeneration: a literature review. *Odonto: Dental Journal*. 2022; 9(1): 16-23. doi: 10.30659/odj.9.0.16-23
- Percival KM, Paul V, Husseini GA. Recent advancements in bone tissue engineering: integrating smart scaffold technologies and bio-responsive systems for enhanced regeneration. *Int J Mol Sci*. 2024; 25(11): 6012. doi: 10.3390/ijms25116012
- Webster TJ, Ergun C, Doremus RH, Siegel RW, Bizios R. Enhanced functions of osteoblasts on nanophase ceramics. *Biomaterials*. 2000; 21(17): 1803–1810. doi: 10.1016/s0142-9612(00)00075-2
- Harini G, Bharathi R, Sankaranarayanan A, Shanmugavadivu A, Selvamurugan N. Nanoceramics-reinforced chitosan scaffolds in bone tissue engineering. *Mater Adv*. 2023; 4(18): 3907–3928. doi: 10.1039/D3MA00422H
- Habibzadeh F, Sadraei SM, Mansoori R, Singh Chauhan NP, Sargazi G. Nanomaterials supported by polymers for tissue engineering

- applications: a review. *Heliyon*. 2022; 8(12): e12193. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12193
13. Das A, Debnath A, Banerjee K, Bhattacharjee S, Deb A, Chatterjee S, et al. Nanoparticles in bone tissue engineering. *Nanostructured Mater Tissue Eng*. 2023; 427–56. doi: 10.1016/B978-0-323-95134-0.00012-2
14. Wahyuni MS, Hastuti E. Karakterisasi cangkang kerang menggunakan xrd dan x-ray physics basic unit. *J Neutrino*. 2010; 3(1): 32–43. doi: 10.18860/neu.v0i0.1622
15. Samik S, Kusumawati N, Sianita MM, Maharani DK, Purnamasari AP, Imduddin M, et al. Karakterisasi abu sekam padi dengan menggunakan XRD. *Unesa J Chem*. 2023; 11(3): 153–159.
16. Ngapa YD. Sintesis dan karakterisasi hidroksiapatit (HAp) dari limbah cangkang kerang lokan (*Batissa violecea* L) dengan metode basah presipitasi. *Jurnal Dinamika Sains*. 2018; 2(1): 67-72.
17. Jeong J, Kim JH, Shim JH, Hwang NS, Heo CY. Bioactive calcium phosphate materials and applications in bone regeneration. *Biomaterials Research*. 2019; 23(4): 1–11. doi: 10.1186/s40824-018-0149-3
18. Levingstone TJ, Herbaj S, Dunne NJ. Calcium phosphate nanoparticles for therapeutic applications in bone regeneration. *Nanomaterials*. 2019; 9(11): 1–22. doi: 10.3390/nano9111570
19. Arifin A, Mahyudin F, Edward M. The Clinical and radiological outcome of bovine hydroxyapatite (Bio Hydrox) as bone graft. *J Orthop Traumatol Surabaya*. 2020; 9(1): 9.
20. Lelo I, Calabrese G, De Luca G, Conoci S. Recent advances in hydroxyapatite-based biocomposites for bone tissue regeneration in orthopedics. *Int J Mol Sci*. 2022; 23(17): 9721. doi: 10.3390/ijms23179721
21. Liu Y, Li H, Xu J, TerBush J, Li W, Setty M, et al. Biodegradable metal-derived magnesium and sodium enhances bone regeneration by angiogenesis aided osteogenesis and regulated biological apatite formation. *Chem Eng J*. 2021; 410: 127616. doi: 10.1016/j.cej.2020.127616
22. Kim DH, Min KH, Pack SP. Efficient bioactive surface coatings with calcium minerals: step-wise biomimetic transformation of vaterite to carbonated apatite. *Biomimetics*. 2024; 9(7): 402. doi: 10.3390/biomimetics9070402