

# KANDIDAT IMPLAN TULANG DARI LIMBAH TULANG AYAM DAN AMPAS KOPI ARABIKA KERINCI MENGGUNAKAN METODE *HEAT TREATMENT*

Meisa Rohania, Lamria Br Galinggng, Rahmah Dhani Fitri, Aulia Putri Berliana, Ria Anjelina, Rista Mutia Anggraini\*

Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Mendalo Darat, Jambi 36361, Indonesia

email: ristamutia@unja.ac.id

## ABSTRAK

Peningkatan jumlah kasus patah tulang akibat kecelakaan menuntut pengembangan material pengganti tulang yang efektif. Salah satu alternatif yang potensial adalah hidroksiapatit (HAp), karena memiliki sifat biocompatibility yang sangat mirip dengan jaringan tulang manusia. Tulang ayam diketahui mengandung senyawa kalsium karbonat dan kalsium fosfat yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan dasar HAp. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaraktirisasi HAp yang disintesis dari tulang ayam dan dikombinasikan dengan ampas kopi serta PVA sebagai bahan pengikat. Proses sintesis HAp dilakukan melalui kalsinasi tulang ayam pada suhu 700°C selama 3 jam, diikuti dengan proses ekstraksi kafein dari ampas kopi dan pencampuran bersama larutan HAp dan PVA. Spektrum FTIR menunjukkan keberadaan gugus  $PO_4^{3-}$ ,  $CO_3^{2-}$ , dan  $OH^-$ . Pola difraksi XRD sesuai dengan standar HAp JCPDS 09-0432, yang menegaskan terbentuknya fase HAp dan ukuran kristal pada masing-masing sampel yaitu 30,88 nm, 27,02 nm, 37,64 nm, 29,86 nm dan 21,61 nm. Hasil SEM menunjukkan adanya pori-pori pada permukaan sampel dengan ukuran berkisar antara 29  $\mu m$  hingga 401  $\mu m$  setelah penambahan ampas kopi dan ukuran pori dapat mendukung pertumbuhan sel.

**Kata Kunci:** Fraktur; Hidroksiapatit; Tulang Ayam; Heat Treatment; Ampas Kopi

## ABSTRACT

**[Title: Bone Implant Candidates From Chicken Bone Waste And Kerinci Arabica Coffee Grounds Using Heat Treatment Method]** The increasing number of bone fracture cases due to accidents has driven the need for the development of effective bone substitute materials. One potential alternative is hydroxyapatite (HAp), owing to its biocompatibility properties that closely resemble human bone tissue. Chicken bones are known to contain calcium carbonate and calcium phosphate compounds, which can be utilized as raw materials for HAp synthesis. This study aims to characterize HAp synthesized from chicken bones, combined with coffee grounds and PVA as a binder. The synthesis of HAp was carried out by calcining the chicken bones at 700°C for 3 hours, followed by caffeine extraction from the coffee grounds and mixing with the HAp solution and PVA. FTIR spectra confirmed the presence of  $PO_4^{3-}$ ,  $CO_3^{2-}$ , and  $OH^-$  functional groups. The XRD diffraction patterns matched the HAp standard (JCPDS 09-0432), confirming the formation of the HAp phase, with crystal sizes of 30.88 nm, 27.02 nm, 37.64 nm, 29.86 nm, and 21.61 nm for each sample. SEM analysis revealed the presence of pores on the sample surface, ranging in size from 29  $\mu m$  to 401  $\mu m$  after the addition of coffee grounds, which are suitable for supporting cell growth.

**Keywords:** Fracture; Hydroxyapatite; Chicken Bone; Heat Treatment; Coffe Grounds

## PENDAHULUAN

Kecelakaan lalu lintas di Indonesia mengalami peningkatan setiap tahunnya. Pada tahun 2018, jumlah kecelakaan lalu lintas mencapai 103.672 kasus, dan meningkat menjadi 107.500 kasus pada tahun 2019. Kecelakaan tersebut dapat menyebabkan cedera pada anggota gerak, salah satunya adalah fraktur (BPS, 2020). Fraktur atau

patah tulang merupakan salah satu bentuk cedera yang ditandai dengan terputusnya kontinuitas tulang dan dapat menimbulkan nyeri yang cukup hebat (Hutama & Nugroho, 2020). Berdasarkan data Kementerian Kesehatan, pada tahun 2019, jumlah kasus fraktur di Indonesia mencapai 5,57%, sementara pada tahun 2018, kejadian fraktur di Provinsi Jambi tercatat sebesar 5,13% (Kemenkes, 2019). Penanganan fraktur umumnya dilakukan

melalui metode *autograft* (Khalil & Zawam, 2025), *allograft* (Shang et al., 2024), dan *xenograft* (Miura et al., 2025).

Seiring dengan perkembangan teknologi, biomaterial menjadi salah satu solusi alternatif dalam penanganan fraktur (Bai et al., 2025). Biomaterial adalah material rekayasa yang memiliki kemampuan untuk berinteraksi secara biologis dengan jaringan dan cairan tubuh, untuk mendukung proses penyembuhan perbaikan, atau substitusi bagian tubuh yang rusak (Yusuf et al., 2019a). Salah satu jenis biomaterial yang banyak diteliti adalah hidroksiapatit (HAp) karena memiliki sifat *biocompatibility* yang sangat mirip dengan jaringan tulang manusia, bisa menyatu pada tulang, dan dapat meningkatkan proses regenerasi tulang (Adhikara et al., 2024; S. L. Bee & Hamid, 2020; Chocholata et al., 2020; El-Bahrawy et al., 2024; Eliaz & Metoki, 2017; B. Y. S. Kumar et al., 2023; Liandi et al., 2024; Mutmainnah et al., 2017; Paneer Selvam et al., 2024; Susanto, 2021). HAp juga mempunyai bentuk struktur kristal yang serupa dengan tulang, serta mempunyai sifat *biokompatibel* (Budiati et al., 2020), *bioaktif* (Syafira et al., 2023), dan *biodegradable* (Yusuf et al., 2019b). Dalam beberapa tahun terakhir, HAp banyak dimanfaatkan sebagai bahan dasar implan/fraktur dengan sumber bahan baku alami seperti tulang sapi (Afifah & Cahyaningrum, 2020), cangkang kepiting (Wibisono et al., 2024), cangkang kerang (Wibisono et al., 2024), dan tulang ayam (Vijayaraghavan et al., 2022).

Dalam penelitian ini, bahan baku yang digunakan adalah tulang ayam. Tulang ayam sering dianggap limbah oleh masyarakat, padahal memiliki potensi besar sebagai sumber bahan baku pembuatan implan tulang yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan (Vijayaraghavan et al., 2022). Tulang ayam mengandung sekitar 85% kalsium fosfat, 14% kalsium karbonat, dan 1% zat lain komposisi yang dapat digunakan untuk membentuk senyawa HAp (Syukur et al., 2024). Berbagai metode telah dikembangkan untuk mensintesis HAp antara lain metode hidrolisis (Mahdy et al., 2025), *hydrothermal* (Szterner & Biernat, 2022), *solid state* (Ezerskyte-Miseviciene & Kareiva, 2019), *sol gel* (Dong et al., 2018), *heat treatment* (Hussain & Sabiruddin, 2021) dan lainnya. Metode pembuatan HAp pada penelitian ini adalah metode *heat treatment* dikarenakan pada metode ini tidak memerlukan bahan tambahan (Purba et al., 2024).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk memanfaatkan tulang ayam sebagai sumber bahan HAp dengan metode *heat treatment*. Selain itu penelitian ini juga mengoptimalkan

pemanfaatan ampas kopi arabika dari Kabupaten Kerinci, Provinsi Jambi. Ampas kopi sebagai bahan tambahan untuk membentuk pori-pori pada struktur HAp. Pori-pori yang dihasilkan dapat mendukung pertumbuhan sel dan jaringan tulang baru (Salcedo et al., 2008). Pada penelitian sebelumnya menggunakan ampas kopi juga sebagai pembentuk pori namun sumber bahan HAp menggunakan tulang sapi dan pengikat serbuk HAp menggunakan *shellac* (Triyono et al., 2020). Penelitian ini memfokuskan mengenai HAp dari sumber tulang ayam, ampas kopi, dan penggunaan Poly Vinyl Alcohol (PVA) sebagai pengikat serbuk HAp dan ampas kopi. PVA dipilih sebagai pengikat karena larut dalam air, tidak beracun, dan ramah lingkungan (Yusuf & Diputra, 2024). PVA sebelumnya juga telah banyak digunakan sebagai pengikat HAp (Babakhani et al., 2024; Cui et al., 2020; Darabi et al., 2024; Hartatiek et al., 2020; Li et al., 2023; Teixeira et al., 2020; Uma Maheshwari et al., 2014; Wadhwa et al., 2020).

## METODE

Bahan yang diperlukan pada penelitian ini adalah tulang ayam, ampas kopi arabika kerinci yang diperoleh dari daerah Kerinci, larutan *polyvinyl alcohol* (PVA) (pro analisis, MERCK), aquades (pro analisis, MERCK), aquabides (pro analisis, MERCK), aseton (pro analisis, MERCK), dan *diklorometana* (DCM) (pro analisis, MERCK). Alat yang diperlukan meliputi *grinder*, *furnace*, *hot plate*, *freeze dryer*, difraktometer sinar-X (Malven PANalytical), spektrofotometer FTIR, dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) (ThermoScientific Type Prisma E).

### Preparasi Tulang Ayam

Preparasi tulang ayam dimulai dengan tulang ayam yang telah dibersihkan menggunakan aquades direbus selama 3 jam. Tulang yang telah direbus kemudian dibersihkan dari daging dan sumsum didalam tulang yang masih tertinggal. Selanjutnya tulang yang telah bersih direndam menggunakan aseton selama 24 jam dan dijemur selama 4 hari dibawah sinar matahari. Setelah itu tulang dioven pada suhu 80°C selama 2 jam dan dilanjutkan dengan penghalusan tulang ayam menggunakan *grinder* hingga memperoleh serbuk putih. Selanjutnya dilakukan kalsinasi serbuk tulang ayam menggunakan metode *heat treatment* pada suhu 700°C selama 3 jam (K. C. V. Kumar et al., 2021). Hasil kalsinasi yang diperoleh dihaluskan kembali dan diayak.

### Pembuatan Larutan Ampas Kopi

Proses selanjutnya adalah pembuatan ampas kopi dengan menggunakan metode refluks (Afrilia et

al., 2022). Kopi terlebih dahulu diseduh dengan air hangat dan dilakukan pengendapan hingga diperoleh ampas. Ampas kopi dioven pada suhu 105°C selama 2 jam. Selanjutnya ampas kopi kering disaring menggunakan ayakan 40 mesh. Serbuk ampas kopi tersebut dilarutkan sebanyak 25 gram dengan aquades sebanyak 500 ml. Larutan yang dihasilkan kemudian diekstraksi dengan diklorometana sebanyak 250 ml. Pemisahan pelarut dengan ekstrak dilakukan menggunakan metode ekstraksi cair-cair dengan menggunakan corong pisah (Mirwan, 2013).

Ekstraksi yang telah diperoleh digunakan sebanyak 2 ml, 4 ml, dan 6 ml (Triyono et al., 2020).

**Pembuatan Larutan HAp dan Larutan PVA**

Larutan HAp dan PVA dipersiapkan dengan melarutkan 0,83 gram HAp dengan 3 ml aquades terlebih dahulu. Selanjutnya 1,95 gram PVA dilarutkan dengan 12 ml aquades. Masing-masing larutan diaduk menggunakan hot plate stirer dengan menggunakan suhu 120°C selama 2 jam.

**Pembuatan Larutan Campuran dan Proses Freeze Dryer**

Larutan HAp, larutan ampas kopi, dan larutan PVA yang telah disiapkan dicampurkan dan diaduk hingga homogen selama 1 jam. Selanjutnya setiap sampel diberi label HAp/PVA (sampel kontrol), HAp/PVA/KOPI 2 ml, HAp/PVA/KOPI 4 ml, HAp/PVA/KOPI 6 ml. Larutan campuran yang telah disiapkan dilakukan freeze dryer selama 3 jam.

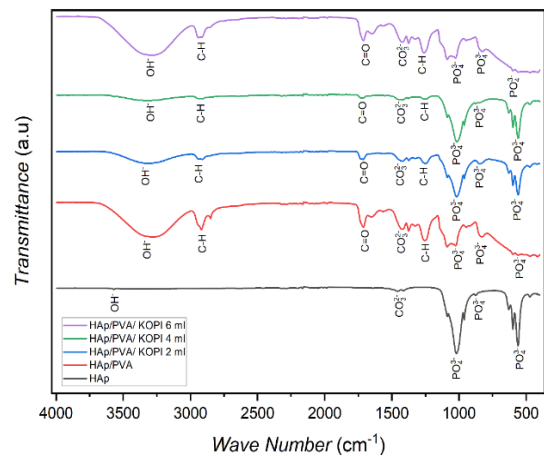
**Karakterisasi Sampel**

Hasil pengeringan dilakukan karakterisasi XRD untuk mengkonfirmasi keberadaan fasa HAp,

FTIR mengidentifikasi kelompok gugus fungsi, dan SEM untuk mengamati morfologi permukaan dan ukuran pori.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Uji karakterisasi FTIR dilakukan pada sampel HAp baik sebelum dan setelah penambahan PVA serta ampas kopi. Karakterisasi FTIR dilakukan pada rentang panjang gelombang 4000 cm<sup>-1</sup> – 500 cm<sup>-1</sup>. Berdasarkan gambar 1 menunjukkan bahwa pada seluruh sampel telah terbentuk gugus fungsi OH<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, dan CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> yang merupakan karakteristik dari gugus fungsi HAp (Cahyanto et al., 2016). Pada bilangan gelombang 558,44-560,49 cm<sup>-1</sup>, 841,77-876,67 cm<sup>-1</sup> dan 1024,49-1030,65 cm<sup>-1</sup> terdapat gugus fungsi PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> yang merupakan vibrasi stretching (Hanura et al., 2017; Gupta et al., 2025).



Gambar 1. Grafik Hasil Uji FTIR

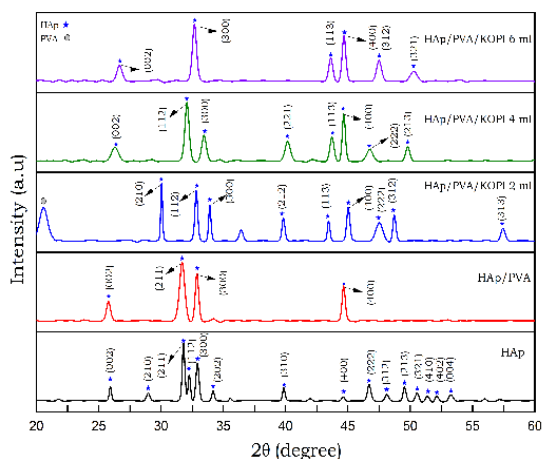
Pada bilangan gelombang 1258,55-1264,70

Tabel 1. Gugus Fungsi

Wave Number (cm <sup>-1</sup> )							
HAp	HAp/PVA	HAp/PVA/ Kopi 2 ml	HAp/PVA/ Kopi 4 ml	HAp/PVA/ Kopi 6 ml	Literatur	Gugus fungsi	Referensi
560,49	558,44	560,49	560,49	558,44	572	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Hanura et al., 2017
876,67	841,77	849,98	849,98	843,82	873		Gupta et al., 2025
1024,49	1028,60	1024,49	1024,49	1030,65	1026,5		Jiang et al., 2023; Kalidas dan Sumathi, 2025
-	1264,70	1258,55	1264,70	1264,70	1099	C-H	
1449,98	1433,06	1437,17	1439,22	1437,17	1405,3	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Gupta et al., 2025
-	1714,33	1714,33	1714,33	1714,33	1712	C=O	Rajan et al., 2022
-	2921,56	2921,56	2921,56	2921,56	2920,51	C-H	Najim et al., 2022
3584,71	3326,02	3326,02	3326,02	3326,02	3400	OH	Fonseca et al., 2025

cm<sup>-1</sup> terdapat gugus fungsi C-H yang merupakan vibrasi *stretching* dimana hanya terdapat pada sampel setelah penambahan PVA, gugus fungsi ini diduga berasal dari kandungan PVA pada sampel (Jiang et al., 2023; Kalidas dan Sumathi, 2025). Pada bilangan gelombang 1433,06-1449,98 cm<sup>-1</sup> terdapat gugus fungsi CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, pada bilangan gelombang 1712 cm<sup>-1</sup> terdapat gugus fungsi C=O yang merupakan vibrasi *stretching* berasal dari PVA (Rajan et al., 2022), pada bilangan gelombang 2921,56 cm<sup>-1</sup> terdapat gugus fungsi C-H yang merupakan vibrasi *stretching* yang juga berasal dari PVA pada sampel (Najim et al., 2022) dan pada bilangan gelombang 3326,02-3584,71 cm<sup>-1</sup> terdapat gugus fungsi OH. Selain itu pada hasil uji tersebut dapat dilihat, terdapat lembah paling intens pada bilangan gelombang 1024,49 cm<sup>-1</sup> yang merupakan lembah ikatan P-O (Gupta et al., 2025). Berdasarkan tabel 1 menunjukkan bahwa tidak terjadi perubahan yang signifikan pada setiap sampel. Penambahan gugus fungsi terjadi pada sampel setelah penambahan PVA yaitu gugus fungsi C-H dan C-O yang berasal dari kandungan PVA pada sampel.

Pada Gambar 2 menunjukkan pola XRD HAp dengan sumber tulang ayam memiliki karakteristik puncak HAp pada daerah sudut 2θ yaitu 25.93°, 28.97°, 31.80°, 32.27°, 32.93°, 34.18°, 39.86°, 44.62°, 46.70°, 48.12°, 49.54°, 50.55°, 51.38°, 52.14°, dan 53.26° mewakili bidang refleksi (002) (210) (211) (112) (300) (202) (310) (400) (222) (312) (213) (321) (410) (402) dan (004). Menunjukkan kesesuaian tulang ayam yang menghasilkan HAp sesuai dengan data JCPDS XRD HAp Kode 090432 (S. Bee et al., 2019).



**Gambar 2.** Hasil Grafik Analisis XRD

Pada gambar 2 masing-masing sampel lainnya juga menunjukkan fasa HAp seperti pada sampel HAp/PVA pada daerah puncak daerah sudut 2θ yaitu 25.78°, 31.69°, 32.88°, dan 44.66° mewakili bidang refleksi (002) (211) (300) dan (400). Sampel

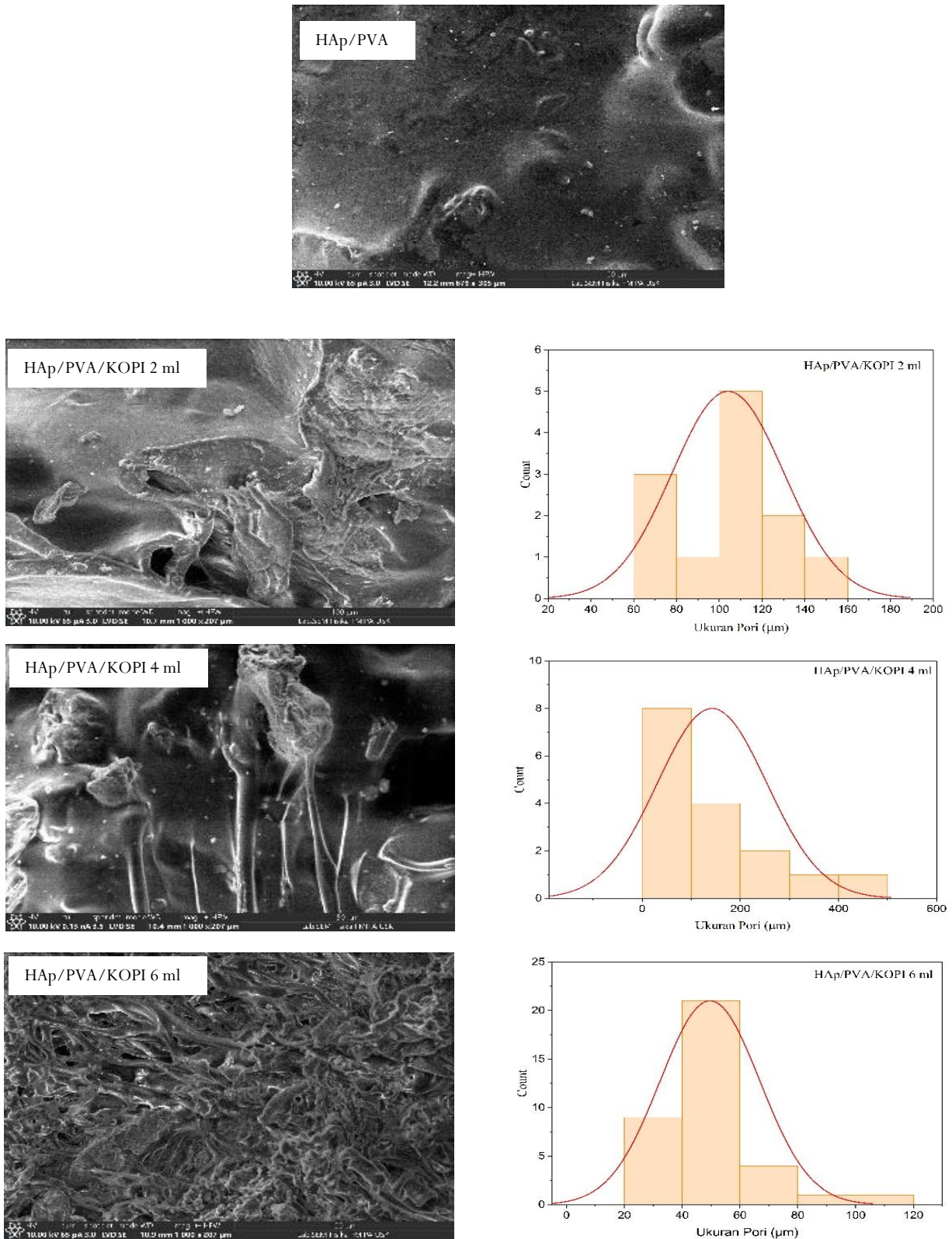
HAp/PVA/KOPI 2 ml menunjukkan puncak pada daerah sudut 2θ yaitu 29.30°, 32.15°, 33.26°, 39.32°, 43.04°, 44.65°, 47.21°, 48.45°, dan 57.38° mewakili bidang refleksi (210) (112) (300) (212) (113) (400) (222) (312) dan (213). Pada sampel HAp/PVA/KOPI 4 ml menunjukkan puncak pada daerah sudut 2θ yaitu 26.30°, 32.08°, 33.45°, 40.16°, 43.71°, 44.67°, 46.75°, dan 49.80° mewakili bidang refleksi (002) (112) (300) (221) (113) (400) (222) dan (213). Sampel HAp/PVA/KOPI 6 ml pada daerah sudut 2θ yaitu 26.67°, 32.68°, 43.62°, 44.68°, 47.50°, dan 50.28° mewakili bidang refleksi (002) (300) (113) (400) (312) dan (321).

**Tabel 2.** Nilai Ukuran Kristal dan Parameter Kisi

Sampel	Ukuran Kristal (nm)	Parameter Kisi (Å)	
		a=b	c
HAp	30.88	9.41	6.86
HAp/PVA	27.02	9.43	6.90
HAp/PVA/KOPI 2 ml	37.64	9.32	6.93
HAp/PVA/KOPI 4 ml	29.86	9.27	6.77
HAp/PVA/KOPI 6 ml	21.61	9.48	6.68

Sampel HAp pada gambar 2 menunjukkan pergeseran puncak pada sampel yang ditambahkan PVA dan ampas kopi. Selain itu, terlihat puncak-puncak yang menghilang pada sampel yang ditambahkan PVA dan ampas kopi dan sampel PVA/HAp/2 menunjukkan puncak lainnya pada daerah sudut 2θ yaitu 19.58° puncak ini mengidentifikasi keberadaan PVA (Babakhani et al., 2024). Ukuran kristal yang dihasilkan pada sampel dapat dilihat pada tabel 1.

Pada tabel 2 terlihat ukuran kristal setelah penambahan PVA mengalami penurunan nilai sedangkan ketika ditambahkan 2 ml ampas kopi nilai ukuran kristal meningkat dan menurun kembali ketika dilakukan penambahan ampas kopi. Oleh karena itu, pada sampel HAp murni dan HAp setelah penambahan PVA serta ekstrak ampas kopi terjadi perubahan ukuran kristal, hasil ini mirip dengan penelitian sebelumnya (Hidayat et al., 2018). Ukuran kristal yang lebih kecil dapat memungkinkan lebih banyak interaksi dengan sel atau protein sehingga memungkinkan peningkatan sifat bioaktivitas pada sampel (Roseti et al., 2017).



**Gambar 3.** Hasil Uji SEM

Berdasarkan hasil SEM pada pembesaran 1000x terlihat bahwa keempat sampel memiliki gambar permukaan yang berbeda, pada sampel HAp/PVA mikrostruktur yang dihasilkan sampel menunjukkan butiran kecil yang cukup jelas bentuknya relatif seragam dan homogen hal ini diduga karena tidak ada penambahan ekstrak ampas

kopi di dalamnya. Mikrostruktur pada sampel (HAp/PVA/KOPI 2 ml, HAp/PVA/KOPI 4 ml, HAp/PVA/KOPI 6 ml) menunjukkan adanya aglomerasi terlihat adanya bentuk yang tidak homogen hasil ini seperti yang ada pada penelitian sebelumnya (Nuzula, 2024).

Hasil citra morfologi permukaan dari pengamatan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) menunjukkan bahwa masing-masing sampel memiliki karakteristik ukuran pori yang berbeda-beda dalam skala nanometer. Pada sampel HAp/PVA, ukuran pori tidak dapat dihitung karena tidak teridentifikasi adanya pembentukan pori yang jelas secara visual. Sebaliknya, pori-pori dapat diidentifikasi dan diukur pada sampel HAp/PVA/KOPI 2 ml sebesar 66  $\mu\text{m}$  -148  $\mu\text{m}$ , HAp/PVA/KOPI 4 ml sebesar 36  $\mu\text{m}$  -401  $\mu\text{m}$ , dan HAp/PVA/KOPI 6 ml sebesar 29  $\mu\text{m}$ -119  $\mu\text{m}$ . Berdasarkan hasil yang diperoleh terlihat penggunaan ampas kopi dapat membentuk stuktur pori. Ukuran pori yang cenderung besar dapat menurunkan sifat mekanik sampel namun disisi lain dapat meningkatkan sifat *biodegradable* sampel (Yusuf et al., 2019).

#### KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan karakterisasi FTIR, XRD dan SEM menunjukkan bahwa sampel HAp berhasil disintesis dari tulang ayam. Hasil uji FTIR menunjukkan terdapat gugus fungsi OH<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, dan CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> yang merupakan karakteristik dari gugus fungsi HAp. Ukuran kristal pada masing-masing sampel diperoleh yaitu 30,88 nm, 27,02 nm, 37,64 nm, 29,86 nm dan 21,61 nm. ukuran kristal yang menurun pada bahan dapat memungkinkan lebih banyak interaksi sel dan protein sehingga meningkatkan sifat bioaktivitas bahan. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan bahwa pada sampel setelah penambahan ekstrak ampas kopi dapat membentuk pori-pori dengan masing-masing ukuran pori yaitu 66  $\mu\text{m}$  -148  $\mu\text{m}$ , 36  $\mu\text{m}$  -401  $\mu\text{m}$ , 29  $\mu\text{m}$ -119  $\mu\text{m}$ . Proses pengeringan menggunakan *freeze dryer* dapat dilakukun selama lebih 3 jam. Sebelum penggunaan, alat *freeze dryer* selalu dipastikan telah dibersihkan dan tidak terdapat air didalam tabung. Selain itu disarankan pula dapat melakukan perbandingan menggunakan jenis kopi yang berbeda.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi (Kemendikbudristek) yang telah mendanai penelitian ini dan Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi yang memfasilitasi penelitian serta memberikan dana tambahan.

#### DAFTAR PUSTAKA

Adhikara, A. G., Maharani, A. P., Puspitasari, A., Nuswantoro, N. F., Juliadmi, D., Maras, M. A. J., Nugroho, D. B., Saksono, B., &

- Gunawarman. (2024). Bovine hydroxyapatite for bone tissue engineering: Preparation, characterization, challenges, and future perspectives. *European Polymer Journal*. 214.
- Afifah, F., & Cahyaningrum, S. E. (2020). Sintesis dan Karakterisasi Hidroksiapatiti dari Tulang Sapi (*Bos taurus*) Menggunakan Teknik Kalsinasi. *UNESA Journal of Chemistry*. 9(3). 189–196.
- Afrilia, D., Bahri, S., Jalaluddin, Masrulita, & ZA, N. (2022). Pengaruh Konsentrasi Ekstrak Kopi Sebagai Inhibitor Terhadap Laju Korosi pada Baja. *Chemical Engineering Journal Storage*. 4(1): 111–120.
- Babakhani, A., Jamaledin, S., & Olad, A. (2024). Fabrication of magnetic nanocomposite scaffolds based on polyvinyl alcohol-chitosan containing hydroxyapatite and clay modified with graphene oxide : Evaluation of their properties for bone tissue engineering applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 150.
- Bai, L., Li, J., Li, G., Zhou, D., Su, J., & Liu, C. (2025). Skeletal Interoception and Prospective Application in Biomaterials for Bone Regeneration. *Bone Research*. 13(1): 1–14.
- Bee, S. L., & Hamid, Z. A. A. (2020). Hydroxyapatite derived from food industry bio-wastes: Syntheses, properties and its potential multifunctional applications. *Ceramics International*. 46(11). 17149–17175.
- Bee, S., Mariatti, M., Ahmad, N., Yahaya, B. H., & Hamid, Z. A. A. (2019). Effect of the calcination temperature on the properties of natural hydroxyapatite derived from chicken bone wastes. *Materials Today: Proceedings*, 16(1): 1876–1885.
- Budiatin, A. S., Samirah, Apriliani Gani, M., Putri Nilamsari, W., & Ardianto, C. (2020). The characterization of bovine bone-derived hydroxyapatite isolated using novel non-hazardous method. *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering*. 45:49–56.
- Cahyanto, A., Kosasi/h, E., Aripin, D., & Hasratiningsih, Z. (2016). Fabrication of Hydroxyapatite from Fish Bones Waste Using Reflux Method. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 172(1): 1–5.
- Chocholata, P., Kulda, V., Dvorakova, J., Dobra, J.

- K., & Babuska, V. (2020). Biological evaluation of polyvinyl alcohol hydrogels enriched by hyaluronic acid and hydroxyapatite. *International Journal of Molecular Sciences*. 21(16): 1–11.
- Cui, L., Zhang, J., Zou, J., Yang, X., Guo, H., Tian, H., Zhang, P., Wang, Y., Zhang, N., Zhuang, X., Li, Z., Ding, J., & Chen, X. (2020). Electroactive composite scaffold with locally expressed osteoinductive factor for synergistic bone repair upon electrical stimulation. *Biomaterials*. 230.
- Darabi, N. H., Kalaei, M., Mazinani, S., & Khajavi, R. (2024). GO/AgNW aided sustained release of ciprofloxacin loaded in Starch/PVA nanocomposite mats for wound dressings application. *International Journal of Biological Macromolecules*. 266.
- Dong, Y., Liang, J., Cui, Y., Xu, S., & Zhao, N. (2018). Fabrication of novel bioactive hydroxyapatite-chitosan-silica hybrid scaffolds: Combined the sol-gel method with 3D plotting technique. *Carbohydrate Polymers*. 197: 183–193.
- El-Bahrawy, N. R., Elgharbawy, H., Elmekawy, A., Salem, M., & Morsy, R. (2024). Development of porous hydroxyapatite/PVA/gelatin/alginate hybrid flexible scaffolds with improved mechanical properties for bone tissue engineering. *Materials Chemistry and Physics*. 319: 1–9.
- Eliaz, N., & Metoki, N. (2017). Calcium phosphate bioceramics: A review of their history, structure, properties, coating technologies and biomedical applications. *Materials*. 10(4): 1–104.
- Ezerskyte-Miseviciene, A., & Kareiva, A. (2019). Everything old is new again: a reinspection of solid-state method for the fabrication of high quality calcium hydroxyapatite bioceramics. *Mendeleev Communications*. 29(3): 273–275.
- Fonseca, S. C. da, Freitas, R. B., Sotiles, A. R., Schemczssen-Graeff, Z., Miranda, I. M. D. A., Biscaia, S. M. P., Wypych, F., Silva Trindade, E. da, Leão, M. P., Zielak, J. C., and Franco, C. R. C. (2025). 3D scaffold of hydroxyapatite/ $\beta$  tricalcium phosphate from mussel shells: Synthesis, characterization and cytotoxicity. *Heliyon*. 11(1): 1-13.
- Gupta, S., Panneer Selvam, S., Ramadoss, R., and Sundar, S. (2025). Alginate-hydroxyapatite scaffolds: A comprehensive characterization study. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*. 15(3): 555–562.
- Hanura, A. B., Trilaksana, W., & Suptijah, P. (2017). Karakterisasi Nanohidroksiapatit Tulang Tuna Thunnus sp. Sebagai Sediaan Biomaterial. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*. 9(2): 619–629.
- Hartatiek, Yudyanto, Wuriantika, M. I., Utomo, J., Nurhuda, M., Masruroh, & Santjojo, D. J. D. H. (2020). Nanostructure, porosity and tensile strength of PVA/Hydroxyapatite composite nanofiber for bone tissue engineering. *Materials Today: Proceedings*. 44: 3203–3206.
- Hidayat, T., Triyono, J., & Masykur, A. (2018). Karakterisasi dan Profil Biodegradasi Material Biokomposit Bovine Hidroksiapatit (BHA)/Ampas Kopi/Shellac. *Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika*. 17(1): 26–32.
- Hussain, S., & Sabiruddin, K. (2021). Effect of heat treatment on the synthesis of hydroxyapatite from Indian clam seashell by hydrothermal method. *Ceramics International*. 47(21): 29660–29669.
- Hutama, A. S., & Nugroho, A. (2020). Optimasi Pembuatan Scaffold dengan Struktur Pori-Pori Beraturan Menggunakan Metode Response Surface Method. *JMPM (Jurnal Material Dan Proses Manufaktur)*. 4(1): 1–11.
- Kalidas, S., & Sumathi, S. (2025). Biomedical application of gelatin-PVA-silk fibre composite reinforced with copper and manganese substituted hydroxyapatite. *Journal of Materials Research and Technology*. 34: 1850-1864.
- Khalil, M. H., & Zawam, S. H. (2025). Comparative study of Peroneus longus tendon autograft versus Hamstring tendon autograft in arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction. *International Orthopaedics*, 49(6): 1365–1372.
- Kumar, B. Y. S., Kumar, G. C. M., Shahapurkar, K., Tirth, V., Algahtani, A., Al-mughanam, T., Alghatani, A. H., & Murthy, H. C. A. (2023). Processing and characterization of egg shell derived nano-hydroxyapatite synthetic bone for Orthopaedic and Arthroscopy implants and substitutes in dentistry. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 144.
- Kumar, K. C. V., Subha, T. J., Ahila, K. G., Ravindran, B., Chang, S. W., Mahmoud,

- A. H., 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.
- Li, H., Wu, C., Yu, X., & Zhang, W. (2023). Recent advances of PVA-based hydrogels in cartilage repair application. *Journal of Materials Research and Technology*. 24: 2279–2298.
- Liandi, A. R., Al-wahid, A. A., Siregar, Y. D. I., Wendari, T. P., Cahyana, A. H., & Insani, A. (2024). Green mussel shell-derived hydroxyapatite-CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> catalyst: Microwave-assisted synthesis of 2-amino-4H-chromene derivative Agus. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 10.
- Mahdy, H. M., Hendawy, H., Abbas, Y. M., & Duraia, E. shazly M. (2025). Design and characterization of AgVO<sub>3</sub>-HAP/GO@PCL ceramic-based scaffolds for enhanced wound healing and tissue regeneration. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 36(1).
- Mirwan, A. (2013). Keberlakuan Model HB- GFT Sistem n-Heksana-MEK- Air Pada Ekstraksi Cair-Cair Kolom Isian. *Konversi*. 2(1): 32–39.
- Miura, T., Watanabe, A., Miyake, M., Suga, S., Miyoshi, M., Miyashita, K., Komatsu, S., Nishimura, N., Shimizu, K., & Hori, Y. (2025). Novel orthotopic patient-derived xenograft model using human pancreatic cancer tissue fragments to recapitulate distant metastasis and cancer-related hypercoagulability. *Medical Molecular Morphology*: 1–10.
- Mutmainnah, M., Chadijah, S., & Rustiah, W. O. (2017). Hidroksiapatit dari Tulang Ikan Tuna Sirip Kuning (Tunnus albacores) dengan Metode Presipitasi. *Al-Kimia*. 5(2): 119–126.
- Najim, M. A., Khalil, B. I., & Hameed, A. A. (2022). Characterizing Optimum Electrospinning Conditions for Graft Urethanized Poly(Vinyl Alcohol)(U-PVA). *Heliyon*. 8(11): 1–8.
- Paneer Selvam, S., Ayyappan, S., I Jamir, S., Sellappan, L. K., & Manoharan, S. (2024). Recent advancements of hydroxyapatite and polyethylene glycol (PEG) composites for tissue engineering applications – A comprehensive review. *European Polymer Journal*. 215.
- 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*. 13(2): 247–253.
- Rajan, S., Marimuthu, K., Ayyanar, C. B., & Hoque, M. E. (2022). Development and in-vitro characterization of HAP blended PVA/PEG bio-membrane. *Journal of Materials Research and Technology*. 18: 4956–4964.
- Ranamanggala, J. A., Laily, D. I., Annisa, Y. N., & Cahyaningrum, S. E. (2020). Potensi Hidroksiapatit dari Tulang Ayam Sebagai Pelapis Implan Gigi. *Jurnal Kimia Riset*. 5(2): 141.
- Roseti L, Parisi V, Petretta M, Cavallo C, Desando G, Bartolotti I, Grigolo B. (2017). Scaffolds for Bone Tissue Engineering: State of the art and new perspectives. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 1(78):1246-1262.
- Salcedo, S. S., Arcos, D., & Vallet-regí, M. (2008). Upgrading calcium phosphate scaffolds for tissue engineering applications. *Engineering Materials*. 377: 19–42.
- Shang, X., Hu, J., Qu, J., Wen, P., Li, J., Li, Q., & Zheng, J. (2024). Allograft to bone-tunnel integration in a canine anterior cruciate ligament reconstruction model: a comparison study of allograft preparation methods. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. 19(1): 1–15.
- Susanto, R. (2021). Potensi Pembuatan Replika Tulang Berpori Menggunakan Template Ampas Tebu. *Chempublish Journal*. 5(2): 116–129.
- Syafira, R. S., Devi, M. J., Gaffar, S., & Hartati, Y. W. (2023). Immobilization of Biomolecules on Hydroxyapatite and Its Composites in Biosensor Application: A Review. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 13(5): 1–17.
- Syukur, V. M., Rahyuni, D., Ayuningtyas, E., & Triastianti, R. D. (2024). Pemanfaatan Tulang sapi dan Tulang ayam Menjadi Arang Aktif. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*. 24(2): 17–22.
- Szterner, P., & Biernat, M. (2022). Effect of reaction time, heating and stirring rate on the morphology of HAp obtained by hydrothermal synthesis. *Journal of Thermal*

- Analysis and Calorimetry*. 147(23): 13059–13071.
- Teixeira, M. A., Amorim, M. T. P., & Felgueiras, H. P. (2020). *Poly ( Vinyl Alcohol ) -Based Nanofibrous Electrospun Scaffolds for Tissue Engineering Applications*.
- Triyono, J., Hidayat, T., & Masykur, A. (2020). *Karakterisasi dan Laju Biodegradasi Material Biokomposit Bovine Hidroksiapatit ( Bha ) / Ampas Kopi / Shellac sebagai Material Pengisi Tulang*. 22(2): 111–118.
- Uma Maheshwari, S., Samuel, V. K., & Nagiah, N. (2014). Fabrication and evaluation of (PVA/HAp/PCL) bilayer composites as potential scaffolds for bone tissue regeneration application. *Ceramics International*. 40(6): 8469–8477.
- Vijayaraghavan, P., Rathi, M. A., Almaary, K. S., Alkhattaf, F. S., Elbadawi, Y. B., Woong, S., & Ravindran, B. (2022). Preparation and antibacterial application of hydroxyapatite doped Silver nanoparticles derived from chicken bone. *Journal of King Saud University - Science*. 34(2).
- Wadhwa, H., Kandhol, G., Deshpande, U. P., Mahendia, S., & Kumar, S. (2020). Thermal stability and dielectric relaxation behavior of in situ prepared poly(vinyl alcohol) (PVA)-reduced graphene oxide (RGO) composites. *Colloid and Polymer Science*. 298(10): 1319–1333.
- Wibisono, Y., Ummah, S. R., Hermanto, M. B., Djoyowasito, G., & Noviyanto, A. (2024). Slow-release hydroxyapatite fertilizer from crab shells waste for sustainable crop production. *Results in Engineering*. 21.
- Yusuf, Y., & Diputra, A. H. (2024). *Konsep Dasar Scaffold Biomaterial dan Rekayasa Jaringan*. Gadjah Mada University Press.
- Yusuf, Y., Khasanah, D. U., Syafaat, F. Y., Pawarangan, I., Sari, M., Mawuntu, V. J., & Rizkayanti, Y. (2019). *Hidroksiapatit Berbahan Dasar Biogenik* (1st ed.). Gadjah Mada University Press.
- Yusuf, Y., Khasanah, D. U., Syafaat, F. Y., Pawarangan, I., Sari, M., Mawuntu, V. J., & Rizkayanti, Y. (2019b). *Hidroksiapatit Berbahan Dasar Biogenik* (Ifan (ed.)). Gadjah Mada University Press.