



## Sintesis Biomaterial Bipasik Kalsium Fosfat dengan Metode Reaksi Padatan Temperatur Tinggi

Tri Windarti<sup>1\*</sup> dan Kartika Eka Prasetya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Kimia, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro,  
Jl. Prof. Sudarto SH, Tembalang, Semarang 50275

\*Corresponding author: [tri.windarti@lecturer.undip.ac.id](mailto:tri.windarti@lecturer.undip.ac.id)

Received: 24 April 2026 / Accepted: 27 Mei 2026

Available online: 31 Mei 2026

### Abstrak

Degradasi hidksiapatit (HA,  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) yang lambat menjadi keterbatasan aplikasi HA sebagai biomaterial untuk implant tulang. Menggabungkan HA dengan  $\alpha$ -trikalsium fosfat ( $\alpha$ -TCP,  $\alpha$ - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) menjadi bipasik kalsium fosfat (BKF) merupakan salah satu solusi untuk meningkatkan bioaktivitas HA. Pada penelitian ini BKF disintesis dengan metode reaksi padatan temperatur tinggi. Sebagai reaktan digunakan  $\text{CaHPO}_4$  dan  $\text{CaCO}_3$ , dimana reaksi dilakukan pada temperatur  $1200^\circ\text{C}$  sesuai dengan temperatur pembentukan  $\alpha$ -TCP. Pengaruh waktu pemanasan terhadap karakter produk yang meliputi jenis kalsium fosfat, kristalinitas dan ukuran bulir kristal dipelajari pada rentang waktu 4- 7 jam. Analisis produk dengan Fourier Transform Infrared (FTIR) dan X-Ray Diffraktion (XRD) menunjukkan produk merupakan campuran HA dan  $\alpha$ -TCP. Semakin lama waktu pemanasan menghasilkan HA dengan ukuran bulir kristal rata-rata yang semakin kecil dan kristalinitas yang semakin meningkat. Sebaliknya, semakin lama waktu pemanasan menghasilkan  $\alpha$ -TCP dengan ukuran bulir kristal rata-rata yang semakin besar dan kristalinitas yang semakin menurun. Ukuran bulir kristal HA dan  $\alpha$ -TCP, masing-masing berada pada rentang 60,331- 63,111 nm dan 39,684 - 54,777 nm, di mana ukuran tersebut kompatibel dengan ukuran HA di dalam tulang manusia.

**Kata Kunci:** bipasik kalsium fosfat, hidksiapatit,  $\alpha$ -trikalsium fosfat, reaksi padatan temperatur tinggi

### 1. Pendahuluan

Bipasik kalsium fosfat (BKF) merupakan gabungan 2 atau lebih senyawa kalsium fosfat. Penggabungan ini dimaksudkan untuk meningkatkan sifat material sesuai dengan aplikasi yang diharapkan [1]. Di antara 10 jenis senyawa kalsium, hidksiapatit (HA,  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) dan trikalsium fosfat (TCP,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) merupakan senyawa kalsium fosfat yang banyak diaplikasikan untuk implantasi tulang terutama sebagai semen kalsium fosfat (SKF) [2]. Berbeda dengan HA, TCP memiliki tiga polimorf, yaitu  $\beta$ -TCP,  $\alpha$ -TCP dan  $\alpha'$ -TCP. Perbedaan ketiganya terletak pada bentuk kisi kristalnya, di mana  $\beta$ -TCP,  $\alpha$ -TCP dan  $\alpha'$ -TCP masing-masing memiliki kisi kristal rombohedral, monoklinik, dan heksagonal [3]. Di antara ketiga senyawa trikalsium fosfat,  $\alpha$ -TCP memiliki sifat bioresorpsi yang paling baik. Di dalam tulang,  $\alpha$ -TCP akan terhidrolisis menjadi *calcium-deficient hydroxyapatite* (CDHA) dan selanjutnya akan membentuk HA [4].

HA dikenal memiliki biokompatibilitas yang tinggi karena memiliki kemiripan struktur dengan mineral tulang. Namun, HA sulit terdegradasi sehingga transformasi HA menjadi jaringan tulang yang baru berlangsung sangat lambat. Sebaliknya,  $\alpha$ -TCP lebih mudah terdegradasi di dalam

lingkungan fisiologis. Hasil degradasi  $\alpha$ -TCP dapat digunakan untuk membangun jaringan tulang yang baru sehingga  $\alpha$ -TCP juga memiliki bioaktivitas yang lebih baik [5][6]. Menggabungkan sifat unggul HA dan  $\alpha$ -TCP diharapkan dapat menghasilkan BKF dengan sifat biokompatibilitas dan biokativitas yang dapat mendorong pembentukan jaringan tulang yang baru.

Pembentukan  $\alpha$ -TCP terjadi pada temperatur  $1125^\circ\text{C}$ , sedangkan HA dapat mulai terbentuk pada temperatur  $600^\circ\text{C}$  [4][7]. Dengan demikian, sintesis kalsium fosfat dengan metode reaksi padatan pada temperatur di atas  $1125^\circ\text{C}$  diharapkan dapat menghasilkan BKF yang terdiri dari HA dan  $\alpha$ -TCP [8]. Reaksi padatan adalah reaksi yang melibatkan reaktan dengan fase padatan. Reaksi terjadi pada temperatur tinggi supaya ion-ion diinduksi untuk bervibrasi. Eksitasi vibrasional akan memudahkan terjadinya difusi ion sehingga membentuk produk reaksi. Informasi tentang pengaruh waktu terhadap karakter produk sangat penting namun belum banyak tersedia. Lamanya pemanasan karena terkait dengan banyaknya energi yang diberikan agar reaktan mengalami eksitasi vibrasional dan difusi ion. Pada penelitian ini, sintesis BKF dilakukan pada temperatur  $1200^\circ\text{C}$  dengan variasi

Doi:

waktu pemanasan 4–7 jam. Reaktan yang digunakan adalah padatan kalsium hidrogen fosfat (CaHPO<sub>4</sub>) dan kalsium karbonat (CaCO<sub>3</sub>), dengan rasio molar Ca/P = 3/2 sesuai dengan rasio molar Ca/P α-TCP. Hasil sintesis dianalisis dengan *Fourier Transform Infrared* (FT-IR) dan *X-ray diffraction* (XRD) untuk mengetahui pengaruh waktu terhadap jenis kalsium fosfat yang terbentuk, kristalinitas, dan ukuran bulir kristal.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Alat dan Bahan

**Alat:** furnis pada industri keramik Nuanza (Boyolali, Jawa Tengah, Indonesia), spektroskopi *Fourier Transform Infrared* (FT-IR) (Shimadzu) dan *X-ray Diffractometer* (XRD) (Bruker).

**Bahan:** CaCl<sub>2</sub> (Merck), Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (Merck), etanol (Merck) dan CaCO<sub>3</sub> (Merck).

### 2.2. Cara Kerja

Cara kerja penelitian ini terdiri dari tiga tahap, sintesis CaHPO<sub>4</sub>, *pre-treatment* reaktan dalam etanol, dan reaksi padatan pada temperatur 1200 °C dengan variasi waktu 4-7 jam. Waktu yang dibutuhkan agar furnis mencapai temperatur 1200 °C dengan stabil adalah 3 jam.

#### 2.2.1 Sintesis CaHPO<sub>4</sub>

Sebanyak 300 mL larutan CaCl<sub>2</sub> 1M dimasukkan dalam gelas beker 1000 mL, kemudian ditambah dengan 300 mL larutan Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 1 M secara perlahan dengan penetesan menggunakan buret. Selama proses pencampuran berlangsung, dilakukan pengadukan menggunakan magnetic stirrer dengan kecepatan sedang. Setelah penetesan selesai, pengadukan dilanjutkan selama 24 jam, kemudian campuran didiamkan selama 48 jam pada temperatur kamar. Endapan yang diperoleh kemudian disaring dan dikeringkan pada temperatur 105°C selama 1 jam.

#### 2.2.2. Pre-treatment dengan etanol

Sebanyak 15 gram CaCO<sub>3</sub> dan 40,8 gram CaHPO<sub>4</sub> hasil sintesis, dicampur dan digerus dengan mortar. Campuran kemudian diayak menggunakan ayakan 230 mesh. Sebanyak 5 gram serbuk didispersikan dalam etanol 250 mL selama 4 jam menggunakan magnetic stirrer dengan kecepatan sedang. Selanjutnya dilakukan pendiaman selama 24 jam. Endapan yang terbentuk dipisahkan dari filtratnya, kemudian dikeringkan pada temperatur ruang selama 24 jam. Hasil yang diperoleh kemudian dicetak berbentuk silinder dengan diameter 1,5 cm dan tinggi 0,5 cm.

#### 2.2.3. Reaksi padat-padat temperatur tinggi

Sampel berbentuk silinder dimasukkan ke dalam furnis yang telah dipanaskan pada temperatur 1200°C. Pemanasan dilakukan dengan variasi waktu 4–7 jam, sesuai dengan kode sampel pada Tabel 1. Setelah waktu pemanasan selesai,

sampel langsung didinginkan pada temperatur ruang.

Tabel 1 Kode sampel

Kode Sampel	Waktu Reaksi (Jam)
BKF_0	0
BKF_4	4
BKF_5	5
BKF_6	6
BKF_7	7

### 2.2.4 Karakterisasi

Identifikasi gugus fungsi dengan FTIR dilakukan menggunakan pelet KBr pada bilangan gelombang 400–4000 cm<sup>-1</sup>. Struktur kristal dikarakterisasi dengan XRD yang dilengkapi dengan radiasi monokromatik Cu Kα yang dioperasikan pada 40 kW (λ = 1,54 Å) dan 3° ≤ 2θ ≤ 80° dengan kecepatan perubahan sudut 3°/menit (perubahan sudut 0,02°). Sifat kekristalan meliputi kristalinitas dan ukuran bulir yang didasarkan pada data difraksi sinar X. Pengolahan data dilakukan menggunakan software Origin dan ukuran bulir (D) dihitung dengan persamaan Scherrer berikut.

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos\theta}$$

Di mana λ adalah panjang gelombang sinar X, β adalah full width at half maximum (FWHM), dan θ adalah sudut difraksi.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Hasil Sintesis CaHPO<sub>4</sub>

Pembuatan α-TCP dilakukan menggunakan reaktan CaCO<sub>3</sub> dan CaHPO<sub>4</sub>. CaHPO<sub>4</sub> disintesis dengan metode pengendapan dengan mereaksikan larutan CaCl<sub>2</sub> dengan larutan Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> sesuai dengan reaksi (1).



Untuk meningkatkan antarmuka reaktan CaCO<sub>3</sub> dan CaHPO<sub>4</sub>, dilakukan dispersi di dalam etanol. Dispersi diharapkan dapat memecah aglomerasi pada CaCO<sub>3</sub> dan CaHPO<sub>4</sub> agar membentuk campuran yang homogen. Etanol dipilih sebagai pendispersi karena sifatnya yang polar. Di samping itu, pada konsentrasi yang tinggi etanol dapat mengikat air sehingga mengurangi kadar air dalam reaktan. Dispersi kemudian dibiarkan mengendap sehingga dapat dipisahkan. Endapan yang diperoleh dikeringkan pada suhu ruangan untuk menghilangkan sisa etanol. Sebanyak 1,5 g serbuk dicetak dengan menggunakan metode tekanan, untuk meminimalkan ruang kosong di antara CaCO<sub>3</sub> dan CaHPO<sub>4</sub> (Gambar 1.a). Gambar 1.b memperlihatkan furnis industri keramik Nuanza,

Doi:

dimana reaktan di masukkan ke dalam furnis melalui lubang, sehingga sampel langsung mendapat perlakuan termal pada temperatur 1200°C. Gambar 1.c merupakan produk sintesis selama 7 jam. Produk memiliki bentuk yang sama dengan reaktan ketika dimasukkan ke dalam furnis. Produk masih membara ketika dikeluarkan dari furnis dan menjadi keras ketika dingin.



(a) (b) (c)

**Gambar 1** Furnis industri keramik Nuanza (a), sampel sebelum reaksi (b) dan hasil sintesis selama 7 jam (c)

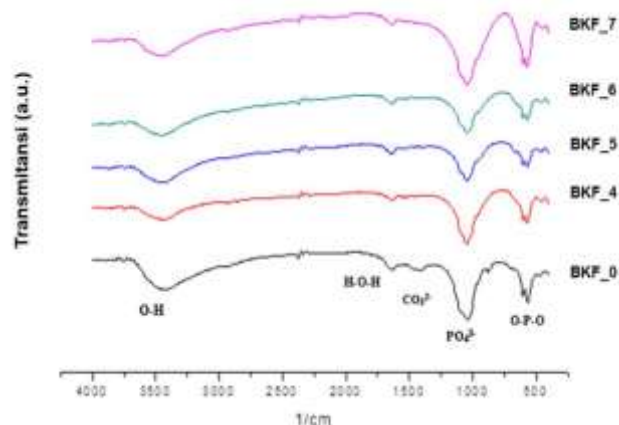
Pada temperatur tinggi,  $\text{CaCO}_3$  melepaskan  $\text{CO}_2$  sehingga mengakibatkan kekosongan kisi kristal  $\text{CaCO}_3$ . Pada  $\text{CaHPO}_4$  terjadi ionisasi menjadi  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Ikatan kovalen pada  $\text{HPO}_4^{2-}$  akan terputus dan membentuk  $\text{PO}_4^{3-}$  disertai pelepasan  $\text{H}^+$ . Kekosongan dalam padatan  $\text{CaCO}_3$  dan  $\text{CaHPO}_4$  akan menyebabkan  $\text{PO}_4^{3-}$  berdifusi ke arah ion  $\text{Ca}^{2+}$  dan membentuk struktur  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ . Reaksi yang terjadi pada sintesis  $\alpha$ -TCP adalah:



### 3.2 Hasil Karakterisasi

Spektra FTIR hasil sintesis diperlihatkan pada Gambar 2. Pada reaktan (Sampel BKF\_0), keberadaan gugus fosfat diidentifikasi dari munculnya puncak pada bilangan gelombang  $570,92 \text{ cm}^{-1}$  dan  $1041,56 \text{ cm}^{-1}$ . Kedua puncak tersebut mengindikasikan energi vibrasional O-P-O tekuk dan P-O ulur. Adanya gugus fosfat juga dinyatakan dengan munculnya pita serapan pada daerah bilangan gelombang  $956,69 \text{ cm}^{-1}$ . Gugus karbonil muncul pada bilangan gelombang  $1419,6$  dan  $1543,05 \text{ cm}^{-1}$ . Puncak lebar pada bilangan gelombang  $3495,45 \text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya ikatan O-H stretching. Pada bilangan gelombang  $1635,63 \text{ cm}^{-1}$ , muncul puncak dari vibrasi *bending*  $\text{H}_2\text{O}$ .

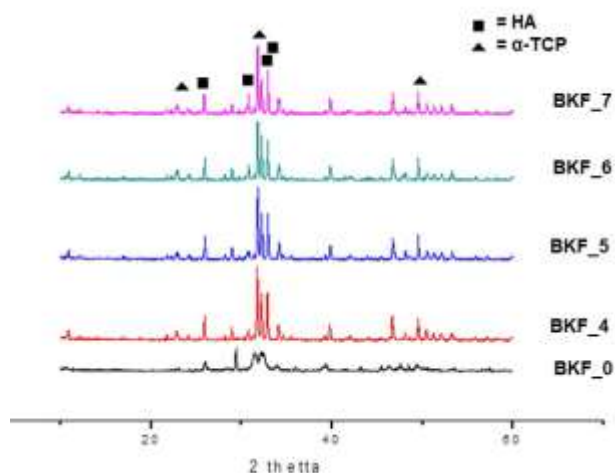
Spektra FTIR hasil reaksi memperlihatkan pola yang sama, di mana tidak ditemukan lagi puncak spesifik milik karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) [8][9]. Semakin lama waktu reaksi puncak yang mengindikasikan keberadaan gugus ortofosfat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) menjadi semakin tajam. Masih munculnya puncak OH stretching dan H-O-H bending mengindikasikan adanya air yang terjebak di dalam sampel pada semua variasi waktu.



**Gambar 2** Spektra FTIR bipasik kalsium fosfat

Analisis dengan XRD memperlihatkan pola difraksi yang berbeda antara reaktan dengan hasil reaksi (Gambar 3). Sebelum reaksi, reaktan telah memiliki puncak yang spesifik milik HA yang muncul tajam pada  $2\theta = 25,879^\circ$  dan puncak lebar di sekitar  $2\theta = 31-32^\circ$ [10]. Hal tersebut mengindikasikan tahap *pre-treatment* yang dilakukan dengan cara penggerusan dengan mortar dan dispersi dalam etanol telah menyebabkan terbentuknya HA. Setelah reaksi selama 4 jam, muncul puncak-puncak baru pada difraktogram yang teridentifikasi sebagai HA dan  $\alpha$ -TCP. Identifikasi keberadaan HA didasarkan pada data JCPDS nomor 09-0432 di mana tiga puncak utama HA muncul pada  $2\theta = 25,879^\circ$ ;  $31,773^\circ$ ; dan  $32,196^\circ$ , masing-masing merupakan difraksi sinar X oleh bidang  $[0\ 0\ 2]$ ,  $[2\ 1\ 1]$ , dan  $[0\ 0\ 2]$  [11]. Pada penelitian ini, tiga puncak spesifik HA muncul pada  $2\theta = 25,941^\circ$ ;  $31,799^\circ$ ; dan  $32,244^\circ$ , sedikit bergeser ke kanan jika dibandingkan dengan data JCPDS nomor 09-0432.

Berdasarkan Hukum Bragg yang menyatakan bahwa sudut difraksi berbanding terbalik dengan jarak antarbidang, hasil sintesis memiliki ukuran kristal yang lebih kecil dari HA pada JCPDS nomor 09-0432. Jarak antarbidang yang semakin kecil mengindikasikan kekuatan mekanik yang lebih besar. Keberadaan  $\alpha$ -TCP diidentifikasi berdasarkan data pada JCPDS nomor 06-0200 di mana tiga puncak utama  $\alpha$ -TCP berada pada  $2\theta = 22,902^\circ$ ;  $30,807^\circ$ ; dan  $49,439^\circ$ , masing-masing merupakan difraksi sinar X oleh bidang  $[4\ 0\ 2]$ ,  $[4\ 1\ 4]$ , dan  $[6\ 2\ 2]$  [12]. Pada penelitian ini, puncak spesifik  $\alpha$ -TCP muncul pada sudut  $2\theta = 22,891^\circ$ ;  $30,757^\circ$ ; dan  $49,522^\circ$ .



**Gambar 3** Difraktogram XRD bipasik kalsium fosfat

Ukuran bulir kristal rata-rata HA dan  $\alpha$ -TCP dapat dilihat pada Tabel 2 dan 3. Ukuran bulir dihitung dengan persamaan Scherrer untuk tiga puncak utama [13]. Sebelum reaksi, HA sudah terbentuk, namun ukuran bulir kristal rata-ratanya masih kecil, yaitu 21,209 nm. Pada reaksi selama 4 jam, ukuran bulir kristal rata-rata HA meningkat menjadi 62,391 nm. Hal ini terjadi karena perlakuan panas menyebabkan kristal HA bertumbuh [14]. Pada reaksi selama 5 jam, ukuran bulir kristal rata-rata HA semakin besar menjadi 63,111 nm. Kenaikan waktu reaksi sampai 7 jam menyebabkan ukuran bulir cenderung turun menjadi 60,331 nm. Fenomena ini menunjukkan bahwa energi yang diberikan selama pemanasan 4-5 jam digunakan untuk pertumbuhan kristal HA. Pada pemanasan lebih lanjut ukuran kristalit menjadi lebih kecil. Hal ini mungkin disebabkan karena munculnya cacat kristal. Cacat kristal kemudian berdampak pada munculnya batas butir yang baru sehingga ukuran kristalit menjadi lebih kecil. Sebelum reaksi, tidak ditemukan puncak spesifik milik  $\alpha$ -TCP. Ukuran bulir kristal rata-rata  $\alpha$ -TCP berfluktuasi terhadap waktu reaksi, namun memiliki kecenderungan untuk naik menjadi 54,777 nm pada reaksi selama 7 jam. Pada semua variasi waktu dihasilkan HA dan  $\alpha$ -TCP dengan ukuran yang mirip dengan ukuran HA di dalam tulang, yaitu berkisar 40–60 nm [15].

**Tabel 2** Ukuran bulir kristal HA

2 $\theta$	Ukuran Bulir Kristal (nm)				
	BKF_0	BKF_4	BKF_5	BKF_6	BKF_7
25,8°	38,881	69,406	67,780	68,223	63,396
31,7°	13,400	58,357	58,055	54,299	55,192
32,2°	11,348	59,409	63,496	61,776	62,404
Rata-rata	21,209	62,391	63,111	61,433	60,331

**Tabel 3** Ukuran bulir kristal  $\alpha$ -TCP

2 $\theta$	Ukuran Bulir Kristal (nm)			
	BKF_4	BKF_5	BKF_6	BKF_7
22,8°	32,088	25,290	25,822	74,936
30,7°	38,694	26,103	50,785	39,187
49,5°	48,270	83,980	47,447	50,206
Rata-rata	39,684	45,124	41,352	54,777

Perubahan kristalinitas akibat variasi waktu reaksi dapat diamati dari perubahan nilai FWHM karena kristalinitas berbanding terbalik dengan FWHM [16]. Semakin tajam puncak difraktogram semakin besar kristalinitas suatu produk. Data nilai FWHM HA dan  $\alpha$ -TCP ditunjukkan pada Tabel 4 dan 5. Nilai FWHM HA turun drastis setelah reaksi. Pada  $2\theta = 25,8^\circ$  dan  $31,7^\circ$ , nilai FWHM cenderung naik dengan naiknya waktu reaksi. Hal yang berbeda terjadi pada  $2\theta = 32,2^\circ$ . Dapat dikatakan bahwa derajat kristalinitas HA cenderung turun dengan semakin lama waktu reaksi. Hal yang berbeda terjadi pada  $\alpha$ -TCP. Hal ini mungkin disebabkan oleh proses pendinginan dari pemanasan pada temperatur 1200 °C yang dilakukan secara mendadak ke temperatur ruang sehingga penataan atom-atom tidak terjadi secara gradual.

**Tabel 4** Nilai FWHM HA

2 $\theta$	FWHM				
	BKF_0	BKF_4	BKF_5	BKF_6	BKF_7
25,8°	0,218	0,122	0,125	0,124	0,134
31,7°	0,643	0,147	0,148	0,158	0,156
32,2°	0,760	0,145	0,135	0,139	0,138

**Tabel 5** Nilai FWHM  $\alpha$ -TCP

2 $\theta$	FWHM			
	BKF_4	BKF_5	BKF_6	BKF_7
22,8°	0,263	0,334	0,327	0,112
30,7°	0,222	0,329	0,169	0,219
49,5°	0,189	0,108	0,192	0,181

#### 4. Kesimpulan

Sintesis bipasik kalsium fosfat (BKF) dengan metode reaksi padatan pada temperatur 1200°C selama 4-7 jam, menghasilkan BKF yang merupakan gabungan hidroksiapatit (HA) dan  $\alpha$ -trikalsium fosfat ( $\alpha$ -TCP). Besarnya ukuran bulir kristal rata-rata HA cenderung mengecil sedangkan ukuran bulir kristal rata-rata  $\alpha$ -TCP cenderung naik dengan semakin lamanya waktu

## Doi:

reaksi. Sebaliknya kristalinitas HA cenderung naik sedangkan  $\alpha$ -TCP cenderung turun dengan semakin lamanya waktu reaksi. Ukuran bulir kristal HA dan  $\alpha$ -TCP, masing-masing berada pada rentang 60,331- 63,111 nm dan 39,684 - 54,777 nm, di mana ukuran tersebut kompatibel dengan ukuran HA di dalam tulang manusia (40-60 nm).

**Ucapan Terimakasih**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Kimia Fisik Departemen Kimia FSM Undip yang telah menyediakan fasilitas penelitian.

**Daftar Pustaka**

- [1] Anjarsari, I., Kemala, T., and Suryani, 2016, "Synthesis and Characterization of Biocomposite BCP/Collagen for Bone Material Scaffold", *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, vol. 19, no. 3, pp. 356–363. <https://doi.org/10.17844/jphpi.2016.19.3.356>.
- [2] Owen, G. R., Dard, M., and Larjava, H., 2018, "Hydroxyapatite/beta-tricalcium phosphate biphasic ceramics as regenerative material for the repair of complex bone defects", *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, vol. 106, no. 6, pp. 2493–2512. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34049>.
- [3] Bohner, M., Le Gars Santoni, B., and Döbelin, N., 2020, " $\beta$ -Tricalcium phosphate for bone substitution: Synthesis and properties", *Acta Biomaterialia*, vol. 113, pp. 23–41. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.06.022>.
- [4] Kazuz, A., et al., 2020, " $\alpha$ -Tricalcium phosphate/fluorapatite based composite cements: Synthesis, mechanical properties, and biocompatibility", *Ceramics International*, vol. 46, no. 16, pp. 25149–25154. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.301>.
- [5] Niño, A. F. V., and Dos Santos, L. A. L., 2016, "Preparation of an injectable macroporous  $\alpha$ -TCP cement", *Materials Research*, vol. 19, no. 4, pp. 908–913. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0229>.
- [6] Safronova, T. V., et al., 2020, "Biocompatibility of biphasic  $\alpha,\beta$ -tricalcium phosphate ceramics in vitro", *Bioactive Materials*, vol. 5, no. 2, pp. 423–427. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.03.007>.
- [7] Moreno, D., Vargas, F., Ruiz, J., and López, M. E., 2020, "Solid-state synthesis of alpha tricalcium phosphate for cements used in biomedical applications", *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 59, no. 5, pp. 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2019.11.004>.
- [8] Laonapakul, T., Sutthi, R., Chaikool, P., Talangkun, S., Boonma, A., and Chindaprasirt, P., 2021, "Calcium phosphate powders synthesized from  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{CaO}$  of natural origin using mechanical activation in different media combined with solid-state interaction", *Materials Science and Engineering: C*, vol. 118, p. 111333. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.11.1333>.
- [9] Martinez, T., Espanol, M., Charvillat, C., et al., 2021, " $\alpha$ -Tricalcium phosphate synthesis from amorphous calcium phosphate: structural characterization and hydraulic reactivity", *Journal of Materials Science*, vol. 56, pp. 13509–13523. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06161-0>.
- [10] Farazin, A., and Ghasemi, A. H., 2022, "Design, Synthesis, and Fabrication of Chitosan/Hydroxyapatite Composite Scaffold for Use as Bone Replacement Tissue by Sol-Gel Method", *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, vol. 32, no. 8, pp. 3067–3082. <https://doi.org/10.1007/s10904-022-02343-8>.
- [11] Windarti, T., Widjijono, and Nuryono, 2021, "Deposition of hydroxyapatite on silica made from rice husk ash to produce the powder component of calcium phosphate cement", *Indonesian Journal of Chemistry*, vol. 21, no. 3, pp. 588–597. <https://doi.org/10.22146/ijc.57900>.
- [12] Arahira, T., Maruta, M., and Matsuya, S., 2017, "Characterization and in vitro evaluation of biphasic  $\alpha$ -tricalcium phosphate/ $\beta$ -tricalcium phosphate cement", *Materials Science and Engineering: C*, vol. 74, pp. 478–484. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.12.049>.
- [13] Ahmad, N. M., and Hasan, N. A., 2023, "Synthesis of Green Cerium Oxide

Doi:

- Nanoparticles Using Plant Waste from Colocasia esculenta for Seed Germination of Mung Bean (*Vigna radiata*)", *Journal of Nanotechnology*, vol. 2023, Article ID 9572025.  
<https://doi.org/10.1155/2023/9572025>
- [14] Kalpana, M., and Nagalakshmi, R., 2023, "Effect of reaction temperature and pH on structural and morphological properties of hydroxyapatite from precipitation method", *Journal of the Indian Chemical Society*, vol. 100, no. 4, p. 100947.  
<https://doi.org/10.1016/j.jics.2023.100947>.
- [15] Liu, Y., Luo, D., and Wang, T., 2016, "Hierarchical Structures of Bone and Bioinspired Bone Tissue Engineering", *Small*, vol. 12, no. 34, pp. 4611–4632.  
<https://doi.org/10.1002/sml.201600626>.
- [16] Matković, I., Maltar-Strmečki, N., Babić-Ivančić, V., Dutour Sikirić, M., and Noethig-Laslo, V., 2012, "Characterisation of  $\beta$ -tricalcium phosphate-based bone substitute materials by electron paramagnetic resonance spectroscopy", *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 81, no. 10, pp. 1621–1628.  
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.04.012>.