

Peningkatan Kekuatan *Sintered Body Hidroksiapatit (HA)* dengan Penambahan Silika Sebagai Material Penguat

Rahmat Hidayat¹, Adi Subardi², Ade Indra^{1*}

¹ Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Padang

² Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

*Korespondensi : adeindra@itp.ac.id

ABSTRAK

Sintered body hidroksiapatit (HA) berbentuk *pellets* dengan penambahan silika sebagai material penguat. Dengan menggunakan ukuran partikel serbuk HA rata-rata 112,7 μm dan ukuran partikel serbuk silika rata-rata 11,11 μm . Telah dibuat dengan rasio HA-Silika 97:3, 94:6, 88:12, 85:15, 82:18, % berat. Masing-masing rasio HA-Silika ditambahkan cairan *polyvinyl alcohol* (PVA) sebagai *binder* (ditambahkan ethanol sebagai pelarut). Campuran dikeringkan pada temperatur ruang selama 48 jam untuk menghilangkan ethanol. Gumpalan campuran dihaluskan kembali menggunakan *rotary drum* selama 2 jam dengan *ceramic ball* di dalamnya. *Green body* dibuat dengan metode *uniaxial pressing* pada tekanan 100 MPa. Dilakukan proses sintering dengan temperatur 1200°C, *holding time* 2 jam, *heating rate* 3°C/menit, *cooling rate* 3°C/menit sampai suhu 800°C dan 5°C/menit sampai suhu 300°C. Karakteristik fisik *sintered body* HA ditentukan dengan pengujian penyusutan linier, *density* dan *relative density* serta pengujian *compressive strength* untuk mengetahui sifat mekanik. Hasil pengujian susut linier ditandai dengan penurunan berat 4,62% dan peningkatan susut diameter 7,68%. Kepadatan produk peningkatan ditandai dengan hasil uji *density* dan *relative density* yang mengalami kenaikan nilai *density* 25,9% dan *relative density* 0,73%. Perubahan sifat fisik ditandai dengan meningkatnya nilai uji *compressive strength* sebesar 73,93 MPa. Kata kunci: Hidroksiapatit, silika, *pressureless*, sifat fisik, *compressive strength*.

ABSTRACT

Sintered body hydroxyapatite (HA) is in the form of *pellets* with the addition of silica as a reinforcing material. The using the average particle size of HA powder is 112.7 μm and the average particle size of silica powder is 11.11 μm . It has been prepared with a HA-Silica ratio of 97:3, 94:6, 88:12, 85:15, 82:18, % by weight. Each ratio of HA-Silica was added with liquid polyvinyl alcohol (PVA) as a binder (added ethanol as a solvent). The mixture was dried at room temperature for 48 hours to remove the ethanol. The lumps of the mixture were mashed again using a rotary drum for 2 hours with a ceramic ball inside. *Green body* is made by *uniaxial pressing* method at a pressure of 100 MPa. The sintering process was carried out with a temperature of 1200°C, *holding time* 2 hours, *heating rate* 3°C/minute, *cooling rate* 3°C/minute until temperature 800°C and 5°C/minute until temperature 300°C. The physical characteristics of HA sintered body were determined by linear shrinkage, density and relative density testing and compressive strength testing to determine the mechanical properties. The results of the linear shrinkage test were indicated by a weight loss of 4.62% and an increase in diameter shrinkage of 7.68%. The increased product density was indicated by the results of the density and relative density test, which increased in the value of density 25.9% and relative density of 0.73%. Changes in physical properties are indicated by the increase in the compressive strength test value of 73.93 MPa.

Keywords: Hydroxyapatite, silica, *pressureless*, physical properties, *compressive strength*.

1. PENDAHULUAN

Keramik berasal dari bahasa Yunani yaitu *keramikos*, yang memiliki arti benda yang terbakar, dikarnakan dalam pembuatannya melalui proses pembakaran pada temperatur tinggi [1]. Berdasarkan bahan dasarnya keramik dibagi menjadi 2 jenis yaitu keramik tradisional bahan utamanya berasal dari alam seperti tanah liat. Keramik maju merupakan keramik yang diproses dengan oksida-oksida logam.

Biomaterial adalah bahan sintetik yang berfungsi sebagai pengganti bagian dari sistem tubuh melalui kontak langsung dengan jaringan hidup [2]. Salah satu biomaterial yang sangat berpotensi sebagai pengganti jaringan tubuh adalah hidroksiapatit (HA) [3]. Termasuk biomaterial yang berupa biokeramik dengan biokompatibilitas yang sangat baik. Sebagai bahan bioaktif dengan rasio kalsium dan fosfor yang menyerupai tulang alami, sangat ideal sebagai kandidat implan tulang [4], [5]. $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ merupakan rumus kimia dari HA [6]. Deposisi HA memungkinkan dapat mudah di reaksi oleh tubuh mahluk hidup [7]. Namun, dibalik kelebihan tersebut, HA diklasifikasikan sebagai keramik yang sangat rapuh dan tidak stabil di bawah tekanan [4].

HA mempunyai sifat mekanik yang kurang baik [8]. Dari kelemahan tersebut, perlu upaya mengkompositkan dengan biokeramik lain yang sifat mekaniknya lebih baik.

Silika merupakan salah satu material dengan sifat biokompatibilitas, dari senyawa hasil polimerisasi asam silikat, dengan rumus kimia SiO_2 . Memiliki sifat mekanik yang baik, senyawa silika terdapat pada beberapa bahan alam, seperti pasir, kuarsa, dan sebagainya [9]. Silika dan kalsium banyak di manfaatkan sebagai bahan bioaktif yang dibuat nano komposit pada aplikasi perbaikan jaringan tulang, serta pemanfaatan pada industri yang bergerak di bidang pembuatan pigmen, *pharmaceutical*, keramik dan katalis [10].

Banyak penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik *sintered body* hidroksiapatit diantaranya menyatakan bahwa, metode temperatur *sintering* berpengaruh terhadap sifat mekanik *sintered body* [4]. Penggunaan HA dengan kualitas yang baik dapat meningkatkan sifat mekanik [11]. Beberapa penelitian pernah membahas tentang pembuatan hidroksiapatit dari berbagai macam bahan untuk mendapatkan HA murni dengan sifat mekanik yang lebih baik seperti hidroksiapatiti berbasah dasar kareng bercabang (*Acropora*), cangkang bekicot, cangkang kerang darah, dan tulang ikan patin [12]–[14]. Memperbaiki proses pencetakan *green body*, pengompositan dengan penambahan bahan penguat. Hasil dari penelitian sebelumnya juga mengungkapkan semakin tinggi temperatur *sintering* dapat meningkatkan sifat mekanik [7]. Dalam meningkatkan sifat kekerasan dapat dilakukan proses *sintering* pada temperatur 1300°C dengan menggunakan gas N_2 [15]. Nilai kuat tekan HA yang baik didapat pada temperatur *sintering* 1100°C [8]. Dalam proses pencetakan *green body* yang pernah dilakukan menyatakan bahwa semakin tinggi tekanan yang diberikan pada serbuk semakin kecil penyusutan yang terjadi pada saat proses *sintering*, sehingga diperoleh bentuk yang lebih padat [16]. Pencetakan *green body* dengan hasil yang optimal menggunakan metode *uniaxial pressing* [17]. Berbagai komposit HA dengan bahan penguat lainnya juga telah dilakukan upaya untuk meningkatkan sifat mekanik seperti HA-Kitosan [18], HA-Zirkonia [19], HA-Silika [8], dan lainnya.

Dari beberapa kajian jurnal literatur seperti yang disebutkan di atas, menjadi acuan para peneliti melakukan studi lebih lanjut dalam meningkatkan sifat mekaniknya, maka perlu usaha untuk memperkuat agar penggunaannya dapat lebih optimal. Pada penelitian ini serbuk HA akan dikompositkan dengan biokeramik serbuk silika untuk meningkatkan kekuatan *sintered body* HA.

2. METODE PENELITIAN

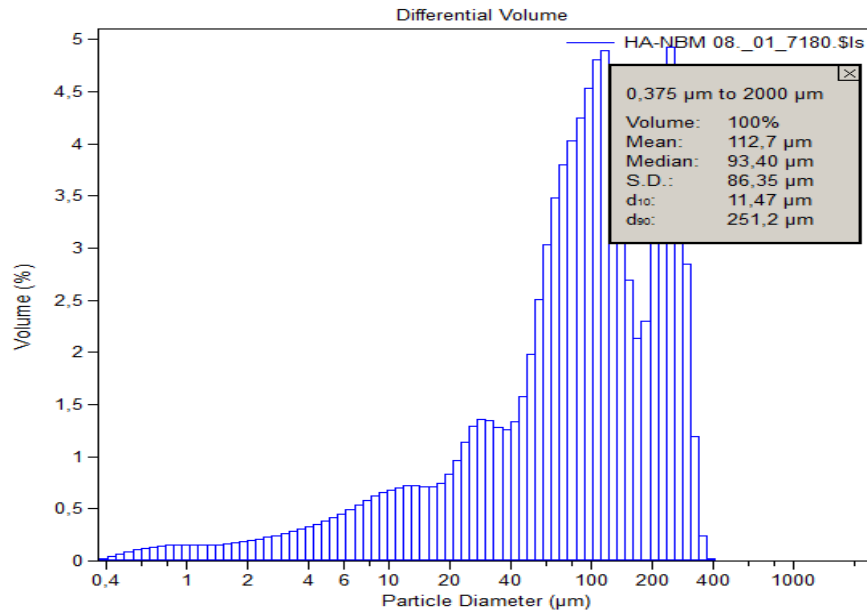
2.1. Material

Hidroksiapatit komersil digunakan sebagai material dasar yang akan di tingkatkan kekuatannya. Silika komersil merupakan material tambahan yang akan digunakan dalam meningkatkan kekuatan. *Polyvinyl alcohol* (PVA) berbentuk cairan berwarna biru digunakan sebagai perekat dan Ethanol 70% sebagai pelarut.

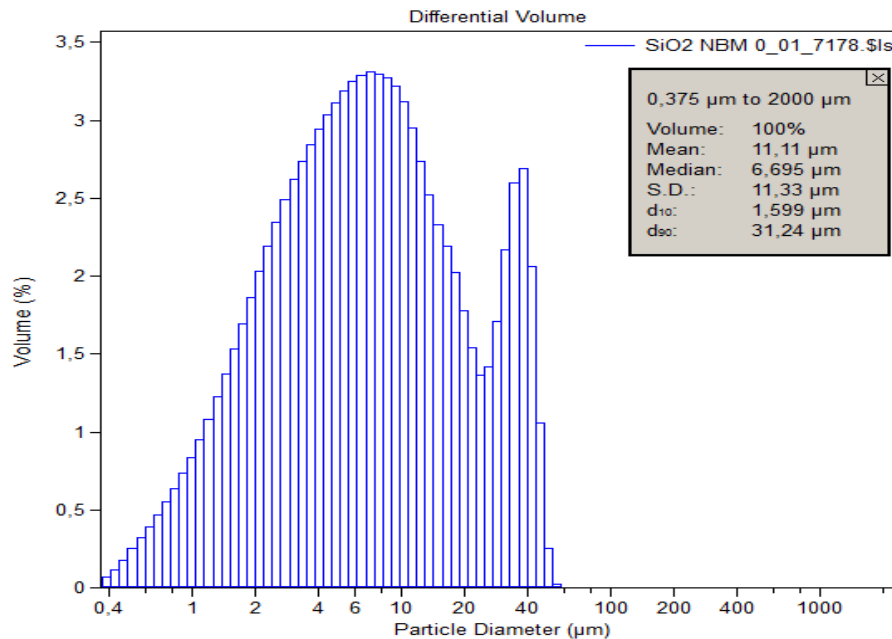
2.2. Metode

2.2.1. Persiapan bahan dan karakterisasi

Partikel hidroksiapatit yang digunakan memiliki nilai masa jenis $3,156 \text{ gr/cm}^3$ dan berukuran rata-rata $112,7 \mu\text{m}$ diyakinkan dengan hasil uji PSA (*Particle Size Analyzer*) yang dapat dilihat pada gambar 1. Silika yang digunakan memiliki masa jenis $2,320 \text{ gr/cm}^3$ dan berukuran rata-rata $11,11 \mu\text{m}$ diyakinkan dengan hasil uji PSA yang dapat dilihat pada gambar 2. HA dan silika disiapkan dengan rasio 97:3, 94:6, 88:12, 85:15, 82:18, %berat, serta penambahan PVA (*polyvinyl alcohol*) sebagai perekat dan Ethanol sebagai pelarut pada proses *mixing* basah.



Gambar 1. Hasil pengujian PSA (*Particle Size Analyzer*) HA



Gambar 2. Hasil pengujian PSA (*Particle Size Analyzer*) Silika

2.2.2. Persiapan sampel

Hidroksiapatit komersil dengan jenis *silindrical* dan silika komersil. Langkah pertama dilakukan proses *mixing* basah hidroksiapatit (HA)-silika selama 120 menit rasio 97:3, 94:6, 88:12, 85:15, 82:18, % berat dengan tambahan PVA (*polyvinyl alcohol*) 5% dari berat berfungsi sebagai perekat dan 5gr ethanol yang berfungsi sebagai pelarut. Selanjutnya dilakukan proses pencetakan pada tekanan 100 MPa dengan metode *uniaxial pressing* ditahan selama 3 menit, dengan ukuran cetakan diameter 8 mm dan tebal 3,3 mm yang di sebut *green body* [17]. Setelah itu *green body* dilakukan proses *sintering* dengan temperature 1200°C, *holding time* 2 jam, *heating rate* 3°C/menit, *cooling rate* 3°C/menit sampai suhu 800°C dan 5°C/menit sampai suhu 300°C. Proses *sintering* ini menghasilkan *Sintetered Body*.

2.2.3. Karakterisasi sampel

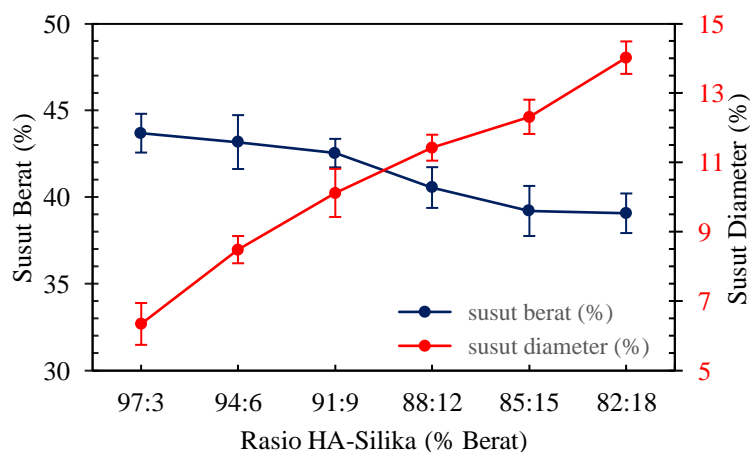
Data hasil perhitungan dari penyusutan diameter serta penyusutan berat antara *green body* dan *sintered body* digunakan untuk beberapa pengujian yaitu, penyusutan linier. Pengujian *density* dan *relative density* yang

berpedoman pada teori *Archimedes*. Pengukuran diameter dan ketebalan *sintered body* dilakukan untuk pengujian *compressive strength* dengan menggunakan mesin UTM (*Universal Testing Machine*).

3. HASIL DAN ANALISIS

3.1. Penyusutan linier

Gambar 3 menunjukkan hasil pengujian susut linier, dimana data persentase susut berat berbanding terbalik dengan data persentase susut diameter dari komposit HA-Silika. Gambar 3 dapat dilihat terjadinya penurunan susut berat dari rasio HA-Silika 97:3 hingga rasio HA-Silika 91:9 terjadi secara simetris, sedangkan pada rasio HA-Silika 91:9 ke rasio HA-Silika 88:12 mengalami penurunan yang signifikan, dan pada rasio HA-Silika 82:12 hingga rasio HA-Silika 82:18 penurunan nilai susut beratnya kembali simetris. Didapat nilai susut berat tertinggi pada rasio HA-silika 97:3 yaitu 43,70% sedangkan nilai susut berat terendah yaitu 39,08% pada rasio HA-Silika 82:18. Penurunan nilai susut berat diakibatkan oleh adanya kehilangan fasa pada PVA (*polyvinyl alcohol*) dan ethanol saat proses *sintering*. Serta tingginya kandungan air pada serbuk HA yang berbentuk *cylindrical*. Gambar 3 juga melampirkan hasil pengujian susut diameter nilainya mengalami kenaikan secara simetris dari rasio HA-Silika 97:3 hingga rasio HA-Silika 82:18. Dimana diameter susut yang nilainya paling tinggi pada rasio HA-Silika 82:18 yaitu 14,03% dan nilai terendah yaitu 6,35% pada rasio HA-Silika 97:3. Hasil pengujian ini berkaitan erat dengan penggunaan jenis ukuran partikel serbuk yang jauh berbeda yaitu HA dengan ukuran 112,7 μm dan silika 11,11 μm yang bisa dianggap dengan ukuran serbuk silika yang jauh lebih kecil dapat mengisi celah pori-pori yang ada diantara partikel serbuk HA saat proses *sintering* yang berpengaruh terhadap tingkat kepadatan produk.

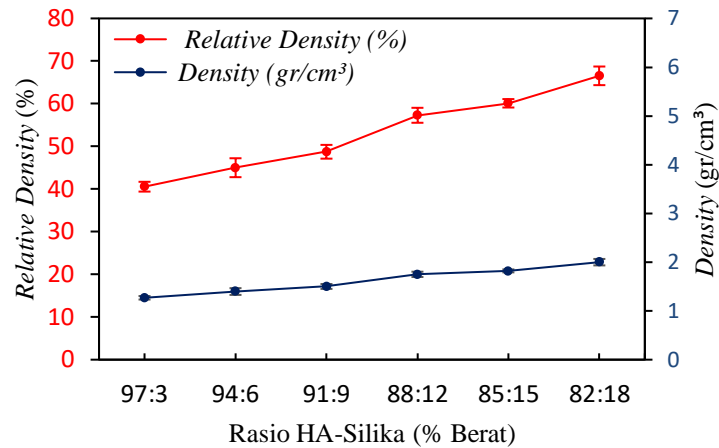


Gambar 3. Pengaruh rasio HA-Silika terhadap nilai penyusutan linier

3.2. Density dan relative density

Gambar 4 menampilkan hubungan nilai *density* dan *relative density* pada *sintered body* komposit dari masing-masing rasio HA-Silika. Nilai uji *density* dan *relative density* mengalami peningkatan seiring dengan penyusutan linier yang terjadi pada setiap rasio HA-Silika. Gambar 4 dapat dilihat peningkatan secara simetris nilai *density* dari rasio HA-silika 93:7 sampai dengan rasio HA-silika 82:18, nilai terendah pada uji *density* terdapat pada rasio HA-Silika 97:3 yaitu 1,270 gr/cm^3 dan nilai tertinggi terdapat pada rasio HA-Silika 82:18 yaitu 1,821 gr/cm^3 . Kenaikan nilai *density* dari setiap rasio HA-silika ini menunjukkan hasil yang baik, dan pada pengujian *density* dengan berpedoman pada teori hukum *Arhimedes*. Gambar 4 juga menampilkan hasil uji *relative density* yang juga mengalami kenaikan. Pada rasio HA-Silika 97:3 sampai dengan rasio HA-Silika 91:9 mengalami kenaikan nilai yang simetris, sedangkan pada rasio HA-Silika 91:9 ke rasio HA-Silika 88:12 dengan nilai yang mengalami kenaikan secara signifikan, dan pada rasio HA-Silika 88:12 sampai dengan rasio HA-Silika 82:18 dengan nilai kenaikan yang kembali simetris. Nilai uji *relative density* terendah terdapat pada rasio HA-Silika 93:3 yaitu 40,6% dan nilai tertinggi uji *relative density* terdapat pada rasio HA-Silika 82:12 yaitu 66,5%. Hasil uji *density* dan *relative density* yang mengalami kenaikan ini merupakan suatu hal yang baik, yang didukung juga dengan penggunaan serbuk HA yang memiliki nilai massa jenis yang lebih besar yaitu 3,156 gr/cm^3 dan Serbuk silika dengan nilai masa jenis 2,320 gr/cm^3 serta penggunaan jenis ukuran partikel serbuk yang juga jauh berbeda yaitu HA dengan ukuran 112,7 μm (Gambar 1) dan ukuran serbuk silika 11,11 μm (Gambar 2). Bisa dianggap

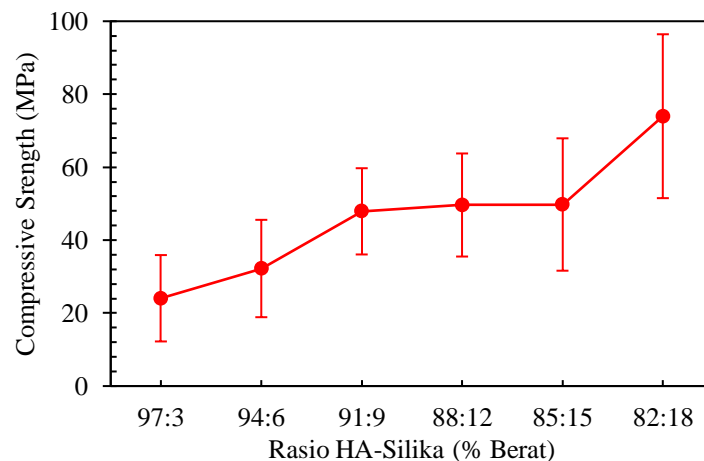
dengan ukuran serbuk silika yang jauh lebih kecil dapat mengisi celah pori-pori yang ada diantara partikel serbuk HA saat proses *sintering* yang berpengaruh terhadap tingkat kepadatan produk. Dimana tingginya nilai *density* dan *relative density* suatu produk sangat besar kaitannya dengan kerapatan antar partikel pada produk tersebut. Semakin padat produk tersebut akan semakin baik terhadap sifat mekaniknya. Pada penelitian terdahulu juga melaporkan adanya hubungan sifat suatu produk dengan ukuran partikel yang digunakan [20]–[24].



Gambar 4. Pengaruh rasio HA-Silika terhadap nilai *density* dan *relative density*

3.3. Compressive Strength

Gambar 5 memperlihatkan hasil pengujian *compressive strength* dari komposit HA:Silika yang mengalami kenaikan. Dimana rasio HA:Silika 97:3 sampai dengan rasio HA:Silika 91:9 pada uji *compressive strength* nilai nya mengalami kenaikan yang signifikan, dan pada rasio HA:Silika 91:9 sampai dengan rasio HA:Silika 85:15 nilai uji *compressive strength* mengalami kenaikan yang tidak jauh berbeda, selanjut pada rasio HA-Silika 85:15 ke rasio HA-Silika 82:18 pada uji *compressive strength* mengalami kenaikan nilai secara drastis. Nilai *compressive strength* terendah didapat pada rasio HA-Silika 97:3 dengan nilai 24,07 MPa, dan *compressive strength* tertinggi didapat pada rasio HA:Silika 82:12 dengan nilai 73,97 MPa. nilai uji *compressive strength* ini juga didukung oleh data uji penyusutan linier, uji *density* dan *relative density*. Penelitian sebelumnya juga sudah melaporkan bahwa nilai *density* dan *relative density* yang tinggi sangat berpengaruh pada tingkat kekuatan, terutama pada nilai *compressive strength* yang meningkat [2], [25]–[28].



Gambar 5. Pengaruh rasio HA-Silika terhadap nilai *Compressive Strength*

4. KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil pengujian serta pembahasan yang telah dilakukan, maka penulis dapat menyimpulkan bahwa silika sesuai sebagai bahan penguat pada komposit HA dengan alasan sebagai berikut:

1. Penggunaan material dengan *milting point* yang tidak jauh berbeda sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik komposit HA-Silika. Dibuktikan dengan nilai uji *compressive strength* HA-Silika pada rasio 82:18 dengan nilai kuat tekan maksimal 73,93 MPa.

2. Penggunaan material dengan ukuran partikel serbuk yang berbeda sangat berpengaruh terhadap sifat fisik pada komposit HA-Silika. Dibuktikan dengan hasil pengujian susut linier dengan penurunan berat 4,62% dan peningkatan susut diameter 7,68% serta pengujian *density* dan *relative density* yang mengalami kenaikan nilai *density* 25,9% dan *relative density* 0,73%.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi, Indonesia yang sudah membiayai penelitian ini dengan nomor kontrak 076/E5/EG.02.00.PT/2022. Kepala laboratorium Teknik Mesin Institut Teknologi Padang dan laboratorium material Teknik Mesin Institut Teknologi Nasional Yogyakarta atas dukungan fasilitasnya. Terimakasih juga disampaikan kepada seluruh tim *Ceramics Research Group* Teknik Mesin ITP atas kerjasama dan dukungan pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Djuhana, M. Mulyadi, and S. Sunardi, "Efek Aditif SiO₂ Terhadap Suhu Sintering Keramik Alumina dan Karakteristiknya," *Pist. J. Tech. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 22–26, 2019, doi: 10.32493/pjte.v2i1.3224.
- [2] A. Indra, R. Firdaus, I. H. Mulyadi, J. Affi, and Gunawarman, "Enhancing the physical and mechanical properties of pellet-shaped hydroxyapatite by controlling micron- and nano-sized powder ratios," *Ceram. Int.*, vol. 46, no. 10, pp. 15882–15888, 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.03.136.
- [3] S. E. Cahyaningrum, N. Herdyastuty, D. Supangat, and B. Devina, "Sintesis Hidroksiapatit Dari Cangkang Telur Menggunakan Metode Pengendapan Basah," *Pros. Semin. Nas. Kim. UNY*, pp. 367–370, 2017.
- [4] A. Indra, Gunawarman, J. Affi, I. H. Mulyadi, and Y. Wiyanto, "Physical and mechanical properties of hydroxyapatite ceramics with a mixture of micron and nano-sized powders: Optimising the sintering temperatures," *Ceram. - Silikaty*, vol. 65, no. 3, pp. 224–234, 2021, doi: 10.13168/cs.2021.0022.
- [5] K. Dahlan and S. U. Dewi, "Pengaruh Sintering dan Penambahan Senyawa Karbonat pada Sintesis Senyawa Kalsium Fosfat," pp. 153–158, 2013.
- [6] S. Rusdiana and D. Shinta, "Characterization Of Hydroxyapatite Which is synthesized From Snakehead Fish (*Channa striata*) Scales With Variation Of Calcination Temperatures," vol. 4, no. 1, pp. 1–5, 2022.
- [7] A. D. Wuntu, H. S. . Koleangan, and N. L. Wuntu, "Adsorpsi Metilen Biru Pada Hidroksiapatit Dari Tulang Ikan Kakap Merah," *J. Ilm. Sains*, vol. 20, no. 1, p. 6, 2020, doi: 10.35799/jis.20.1.2020.25758.
- [8] S. Oktaviyani and Fitri Afriani, "Perancah Tulang Berbasis Komposit Hidroksiapatit/Silika Melalui Metode 3D-Printing: Sebuah Kajian Naratif," *JoP*, vol. 6, no. 1, pp. 57–66, 2020.
- [9] S. Sulastris and S. Kristianingrum, "Berbagai Macam Senyawa Silika : Sintesis, Karakterisasi dan Pemanfaatan," *Pros. Semin. Nas. Penelitian, Pendidik. dan Penerapan MIPA*, pp. 211–216, 2010.
- [10] S. Silahooy, "Analisis Serbuk Silika Amorf (SiO₂) Berbahan Dasar Pasir," *Sci. Map J.*, vol. 2, no. 2, pp. 75–78, 2020, [Online]. Available: <https://ojs3.unpatti.ac.id/index.php/sciencemap/article/view/3818>
- [11] A. Asril and J. Rahayuningsih, "Sintesis Hidroksiapatit dari Tulang Ikan Patin melalui Metode Presipitasi," *ALKIMIA J. Ilmu Kim. dan Terap.*, vol. 4, no. 1, pp. 12–16, 2020, doi: 10.19109/alkimia.v4i1.4633.
- [12] Agusriyadin, F. Anindita, Alimuddin, and L. A. Kadir, "Kualitas Hidroksiapatit dan Diammonium Hidrogen Fosfat Sebagai Bahan Pembuatan Bonegraft," *Saintifik*, vol. 8, no. 1, pp. 85–90, 2022, doi: 10.31605/saintifik.v8i1.346.
- [13] T. Mujiyanti, "Analisis Struktur Kristal Kalsium Hidroksida dari Cangkang Bekicot sebagai Kandidat RAW Material Hidroksiapatit Berbasis Bahan Alam 1," vol. 6, no. November, pp. 890–895, 2021.
- [14] R. Rahmaniah, "SINTESIS DAN KARAKTERISASI HIDROKSIAPATIT DARI CANGKANG KERANG DARAH (*Anadara granosa*) SEBAGAI BAHAN BAKU SEMEN TAMBAL GIGI," *Teknosains Media Inf. Sains Dan Teknol.*, vol. 13, no. 1, pp. 27–32, 2019, doi: 10.24252/teknosains.v13i1.7832.
- [15] L. H. Huan, A. Mughtar, M. Razali, and C. H. Chin, "Sinteran Hidroksiapatit dalam Atmosfera Nitrogen untuk Peningkatan Sifat Sinteran Hidroksiapatit dalam Atmosfera Nitrogen untuk Peningkatan Sifat Mikrokekeraan," no. March 2019, 2017, doi: 10.17576/jsm-2017-4609-36.
- [16] W. Gita Novian Hermana, "Pengaruh Komposisi Cu dan Variasi Tekanan Kompaksi Terhadap Densitas dan Kekerasan pada Komposit W-Cu untuk Proyektil Peluru dengan Proses Metalurgi Serbuk," *J. Tek. Pomits*, vol. 3, no. 1, pp. 96–101, 2014.
- [17] A. Indra, "Pengembangan Proses Manufaktur Bone Scaffold Berbasis Bio-Keramik Hidroksiapatit Program Studi Doktor Teknik Mesin Pengembangan Proses Manufaktur Bone Scaffold Berbasis Bio-Keramik Hidroksiapatit," 2021.
- [18] A. Indriani1, M. S. Ir. Aminatun, and M. S. Drs. Siswanto, "Upaya Meningkatkan Kuat Tekan Komposit Ha-Kitosan Sebagai Kandidat Aplikasi Implan Tulang Kortikal," 2014.
- [19] E. Maryani, S. C. Kurniasih, N. Sofyaningsih, and B. Priyanto, "Penyiapan Komposit Hidroksiapatit - Zirkonia Sebagai Bahan Biokeramik The Preparation of Hydroxyapatite – Zirconia Composites as Bioceramic Materials," vol. 27, no. 1, pp. 40–50, 2018.
- [20] H. Xing *et al.*, "Effect of particle size distribution on the preparation of ZTA ceramic paste applying for stereolithography 3D printing," *Powder Technol.*, vol. 359, pp. 314–322, 2020, doi: 10.1016/j.powtec.2019.09.066.
- [21] D. Sofia, D. Barletta, and M. Poletto, "Laser sintering process of ceramic powders: The effect of particle size on the mechanical properties of sintered layers," *Addit. Manuf.*, vol. 23, pp. 215–224, 2018, doi:

- 10.1016/j.addma.2018.08.012.
- [22] H. Wu *et al.*, “Effect of the particle size and the debinding process on the density of alumina ceramics fabricated by 3D printing based on stereolithography,” *Ceram. Int.*, vol. 42, no. 15, pp. 17290–17294, 2016, doi: 10.1016/j.ceramint.2016.08.024.
- [23] C. Sun *et al.*, “Effect of particle size gradation on the performance of glass-ceramic 3D printing process,” *Ceram. Int.*, vol. 43, no. 1, pp. 578–584, 2017, doi: 10.1016/j.ceramint.2016.09.197.
- [24] Y. Luo, S. Ma, C. Liu, Z. Zhao, S. Zheng, and X. Wang, “Effect of particle size and alkali activation on coal fly ash and their role in sintered ceramic tiles,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 37, no. 4, pp. 1847–1856, 2017, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.11.032.
- [25] F. Niu, D. Wu, F. Lu, G. Liu, G. Ma, and Z. Jia, “Microstructure and macro properties of Al₂O₃ ceramics prepared by laser engineered net shaping,” *Ceram. Int.*, vol. 44, no. 12, pp. 14303–14310, 2018, doi: 10.1016/j.ceramint.2018.05.036.
- [26] K. Miyake, Y. Hirata, T. Shimonosono, and S. Sameshima, “The effect of particle shape on sintering behavior and compressive strength of porous alumina,” *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 7, 2018, doi: 10.3390/ma11071137.
- [27] J. Ding, Q. Liu, B. Zhang, F. Ye, and Y. Gao, “Preparation and characterization of hollow glass microsphere ceramics and silica aerogel/hollow glass microsphere ceramics having low density and low thermal conductivity,” *J. Alloys Compd.*, vol. 831, p. 154737, 2020, doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154737.
- [28] M. Weiß, P. Sälzler, N. Willenbacher, and E. Koos, “3D-Printed lightweight ceramics using capillary suspensions with incorporated nanoparticles,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 40, no. 8, pp. 3140–3147, 2020, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.02.055.