

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

Femil Aulia Ihsan¹, 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)-alumina (Al_2O_3) berbentuk *pellets* telah dibuat dengan bervariasi rasio sampel. Partikel HA-alumina disiapkan dengan berbagai rasio dari 97:3%, 94:6%, 92:8%, 88:12%, 85:15%, 82:18% (%berat). HA komersil dan alumina komersil digunakan sebagai material uji dengan tambahan *polyvinyl alcohol* (PVA). HA komersil dan alumina komersil dilakukan proses *mixing* basah selama 2 jam pada setiap variasi sampel. Setiap sampel yang digunakan akan dicampur dengan PVA sebanyak 5% berat dan alkohol sebanyak 5gr. Proses *mixing* tersebut menggunakan *rotary mixer* dengan penambahan *ball mill* alumina sebanyak 10 buah. Setelah dilakukan proses *mixing* sampel dikeringkan selama 48 jam untuk menghilangkan alkohol yang terkandung didalamnya. Selanjutnya proses pencetakan untuk menghasilkan *green body* dilakukan dengan metode *uniaxial pressing* pada tekanan 100 MPa dan di tahan selama 3 menit. Ukuran cetakan yang digunakan memiliki diameter 8mm dan tebal 3,3mm. Proses *sintering* dilakukan untuk mendapatkan *sintered body*, *sintering* dilakukan pada temperatur 1200°C dengan *heating rate* 3°C/menit dan di *holding time* 2 jam. Selanjutnya temperatur di turunkan sampai 800°C dengan *cooling rate* 3°C/menit, selanjutnya temperatur di turunkan sampai 300°C dengan *cooling rate* 5°C/menit. Pada pengujian susut linier terjadi penurunan nilai yang tidak signifikan pada susut berat dan susut diameter. Pada susut berat terjadi penurunan dari 45,67% - 34,65%. Pada susut diameter terjadi penurunan dari 11,15% - 8,86%. Pada pengujian *density* dan *relative density* terjadi kenaikan yang tidak signifikan pada setiap rasio. Pada *relative density* terjadi kenaikan dari 41,71% - 46,00%. Pada *density* terjadi kenaikan dari 1,32% - 1,52%. Pada pengujian *compressive strength* terdapat nilai paling tinggi pada rasio HA-alumina 97:3 %berat dengan nilai 28,6 MPa, dan nilai terendah terdapat pada rasio HA-alumina 88:12 %berat dengan nilai 13,0 MPa. Kata kunci: hidroksiapatit, alumina, *pressureless sintering*, *compressive strength*

ABSTRACT

Sintered body hydroxyapatite (HA)-alumina (Al_2O_3) in the form of pellets was made by varying the sample ratio. HA-alumina particles were prepared in various ratios from 97:3%, 94:6%, 92:8%, 88:12%, 85:15%, 82:18% (%wt). Commercial HA and commercial alumina were used as test materials with the addition of polyvinyl alcohol (PVA). Commercial HA and commercial alumina were wet mixed for 2 hours for each sample variation. Each sample used will be mixed with PVA as much as 5% by weight and 5gr of alcohol. The mixing process uses a rotary mixer with the addition of 10 alumina ball mills. After the mixing process, the samples were dried for 48 hours to remove the alcohol contained therein. Furthermore, the printing process to produce a green body is carried out by the uniaxial pressing method at a pressure of 100 MPa and held for 3 minutes. The mold size used has a diameter of 8mm and a thickness of 3.3mm. The sintering process is carried out to obtain a sintered body, and sintering is carried out at a temperature of 1200°C with a heating rate of 3°C/minute and a holding time of 2 hours. Then the temperature was lowered to 800°C with a cooling rate of 3°C/minute. Then the temperature was lowered to 300°C with a cooling rate of 5°C/minute. In the linear shrinkage test, there was an insignificant decrease in weight loss and diameter shrinkage. The weight loss decreased from 45.67% - 34.65%. In diameter shrinkage, there was a decrease from 11.15% - 8.86%. In the density and relative density tests, there was an insignificant increase in each ratio. In relative density there is an increase from 41.71% - 46.00%. In density, there is an increase from 1.32% - 1.52%. In the compressive strength test, the highest value was found at the HA-alumina ratio of 97:3 wt% with a value of 28.6 MPa, and the lowest value was found in the HA-alumina ratio of 88:12 wt% with a value of 13.0 MPa.

Keywords: hydroxyapatite, alumina, *pressureless sintering*, *compressive strength*

1. PENDAHULUAN

Keramik dalam Bahasa Yunani berarti *keramikos*, artinya benda yang terbakar di karnakan dalam pembuatannya melalui proses pembakaran pada temperatur tinggi [1]. Keramik merupakan bahan anorganik yang pada umumnya proses pembuatan dilakukan dengan teknologi serbuk yang dipanaskan. Pada saat sekarang ini

keramik sering kali dipakai dalam bidang material, salah satunya dalam pembuatan implan [2].

Biomaterial adalah bahan sintetik yang berfungsi sebagai pengganti bagian dari sistem tubuh melalui kontak langsung dengan jaringan hidup [3]. Salah satu biomaterial yang sangat berpotensi sebagai pengganti jaringan tubuh yaitu hidroksiapatit. Hidroksiapatit (HA) dengan rumus kimia $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ merupakan komponen utama mineral tulang [4]. HA merupakan biokeramik dengan biokompatibilitas yang sangat baik. Sebagai bahan bioaktif dengan rasio kalsium dan fosfor yang menyerupai tulang alami, sangat ideal sebagai kandidat implan tulang [5]. Dari kelebihan HA tersebut, juga terdapat beberapa kelemahan yang dimiliki HA, seperti sifat rapuh (*brittle*), hal ini mengakibatkan kuat tekan yang rendah dan mudah hancur saat di tekan, sifat rapuh ini dikarenakan porositas HA yang tinggi.[6]. Untuk mengatasi sifat rapuh pada HA ini, maka HA perlu dilakukan proses penguatan dengan jenis biokeramik lainnya.

Salah satu biokeramik yang bersifat bioaktif yaitu alumina (Al_2O_3). Alumina mempunyai sifat fisika dan kimia yang baik, sehingga kerap kali dipergunakan pada berbagai aplikasi. Titik leleh alumina mencapai temperatur sekitar 2040°C , kekuatan mekanik alumina yang tinggi, dapat menghantarkan panas dan bersifat menghambat listrik[1] Alumina mengalami perkembangan yang pesat karena perkembangan mobil, computer, semikonduktor, dll. [7].

Dari beberapa penelitian sebelumnya sifat mekanik HA dapat dikuatkan dengan cara mengkompositkan dengan material lainnya, antara lain; HA yang dikompositkan dengan *zirconia* dapat meningkatkan nilai kuat tekan [8], HA yang dikompositkan dengan mullite dapat meningkatkan nilai kekerasan *Vickers*, HA dikompositkan dengan spinel Al-Mg dapat meningkatkan kekerasan *Vickers*, HA dikompositkan dengan *Polyvinlyl Pyrrolidone* juga dapat meningkatkan nilai kekerasan *Vickers*, HA dikompositkan dengan alumina dapat meningkatkan nilai kuat tekan HA [9].

Dari kajian beberapa jurnal literatur seperti yang disebutkan di atas, bahwa HA sangat berpotensi untuk dilakukan proses penguatan dengan penambahan material penguat. Pada penelitian ini HA akan dikompositkan dengan biokeramik alumina dengan tujuan untuk meningkatkan kekuatan *sintered body* HA.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Material

HA komersil dan alumina komersil digunakan sebagai material uji dengan tambahan PVA. PVA berbentuk cairan berwarna biru digunakan sebagai *binder* dan ethanol 70% sebagai pengencer. HA-alumina dengan HA sebagai *materiks* dan alumina sebagai *filler*. Seperti yang terlihat pada table 1, HA-alumina dikompositkan dengan variasi %berat.

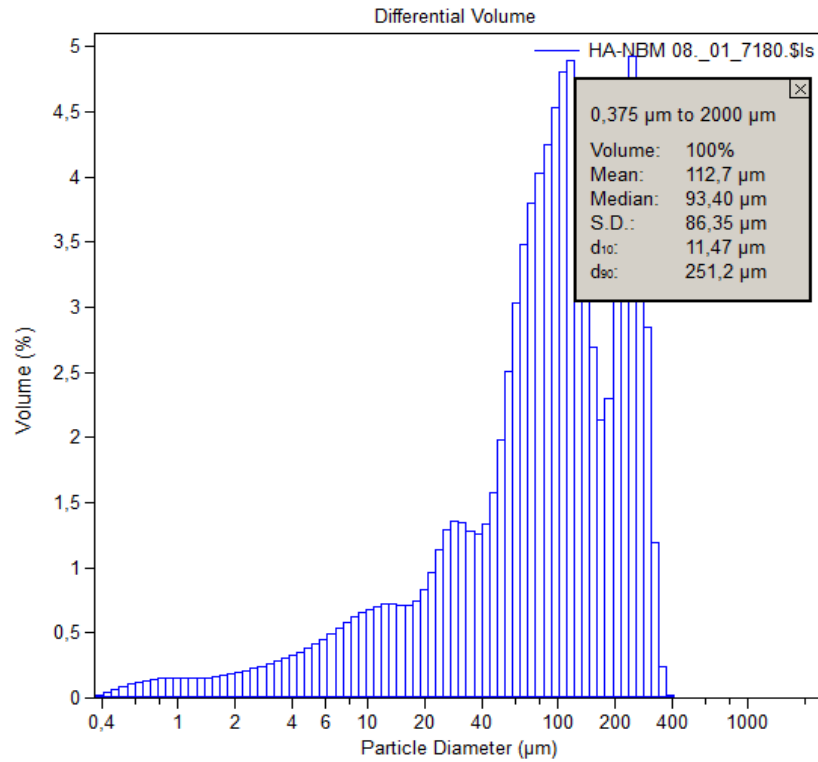
Tabel 1 Rasio HA-Alumina

| Perbandingan %berat HA- Al_2O_3 | Hidroksiapatit (gr) | Alumina (gr) |
|----------------------------------------------------|------------------------|-----------------|
| 100% | 4.28 | 0 |
| 97:3% | 4.15 | 0.16 |
| 94:6% | 4.02 | 0.32 |
| 91:9% | 3.90 | 0.49 |
| 88:12% | 3.77 | 0.65 |
| 85:15% | 3.64 | 0.81 |
| 82:18% | 3.51 | 0.97 |

2.2. Metode

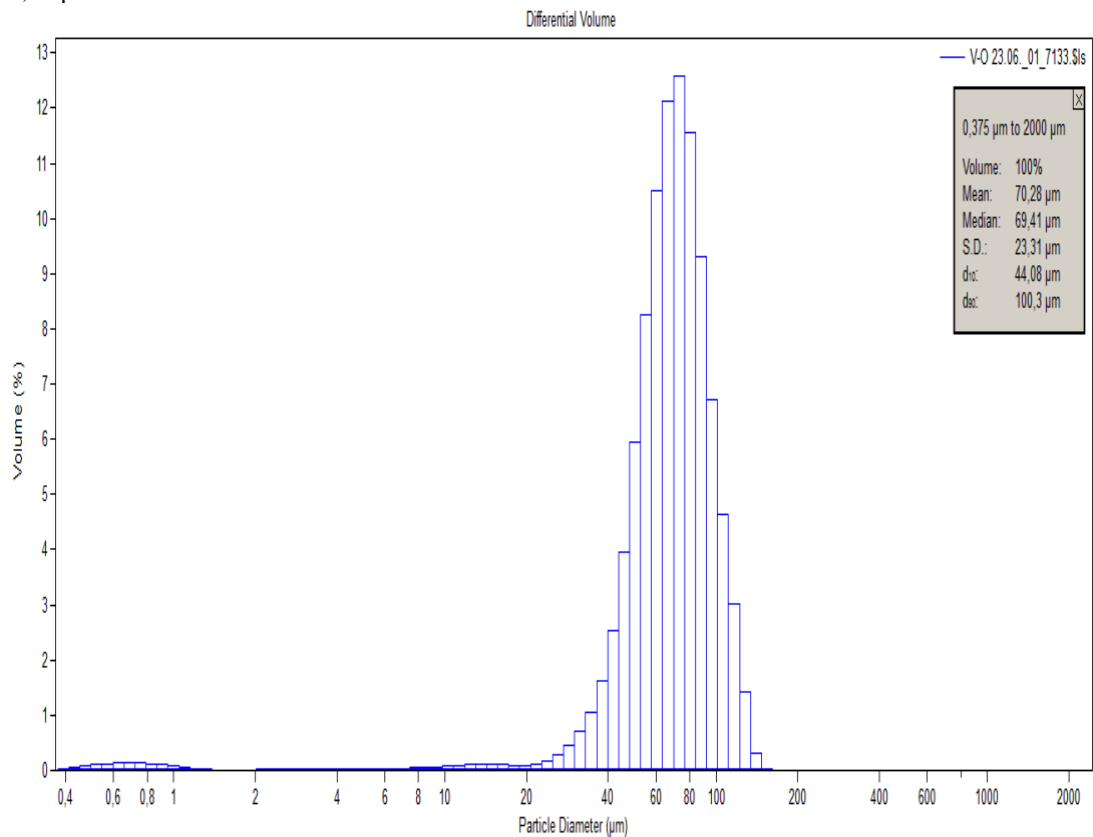
2.2.1. Persiapan partikel hidroksiapatit-alumina dan karakterisasi

HA-alumina disiapkan dengan berbagai rasio dari 97:3%, 94:6%, 92:8%, 88:12%, 85:15%, 82:18% (%berat). Partikel HA-alumina yang digunakan dilakukan uji *particle size analyzer* (PSA) terlebih dahulu untuk mengetahui ukuran dari partikel yang kita gunakan. Pada gambar 1 memperlihatkan bahwa partikel HA yang digunakan sekarang dengan bentuk *cylindrical* memiliki ukuran arata-rata $112,7 \mu\text{m}$.



Gambar 1. Hasil uji PSA pada HA

Pada gambar 2 memperlihatkan bahwa partiker alumina komersil yang digunakan dengan ukuran rata-rata 70,28 μm .



Gambar 2. Hasil uji PSA alumina

2.2.2. Persiapan sampel

HA komersil dan alumina komersil dilakukan proses *mixing* basah selama 2 jam pada setiap variasi sampel. Setiap sampel yang digunakan akan dicampur dengan PVA sebanyak 5% berat [10] [11] dan alkohol sebanyak 5gr. Proses *mixing* tersebut menggunakan *rotary mixer* dengan penambahan *ball mill* alumina sebanyak 10 buah. Setelah dilakukan proses *mixing* sampel dikeringkan selama 48 jam untuk menghilangkan alkohol yang terkandung didalamnya. Selanjutnya proses pencetakan untuk menghasilkan *green body* dilakukan dengan metode *uniaxial pressing* pada tekanan 100 MPa dan di tahan selama 3 menit. Ukuran cetakan yang digunakan memiliki diameter 8mm dan tebal 3,3mm. Proses *sintering* dilakukan untuk mendapatkan *sintered body*, *sintering* dilakukan pada temperatur 1200°C dengan *heating rate* 3°C/menit dan di *holding time* 2 jam. Selanjutnya temperatur di turunkan sampai 800°C dengan *cooling rate* 3°C/menit, selanjutnya temperatur di turunkan sampai 300°C dengan *cooling rate* 5°C/menit.

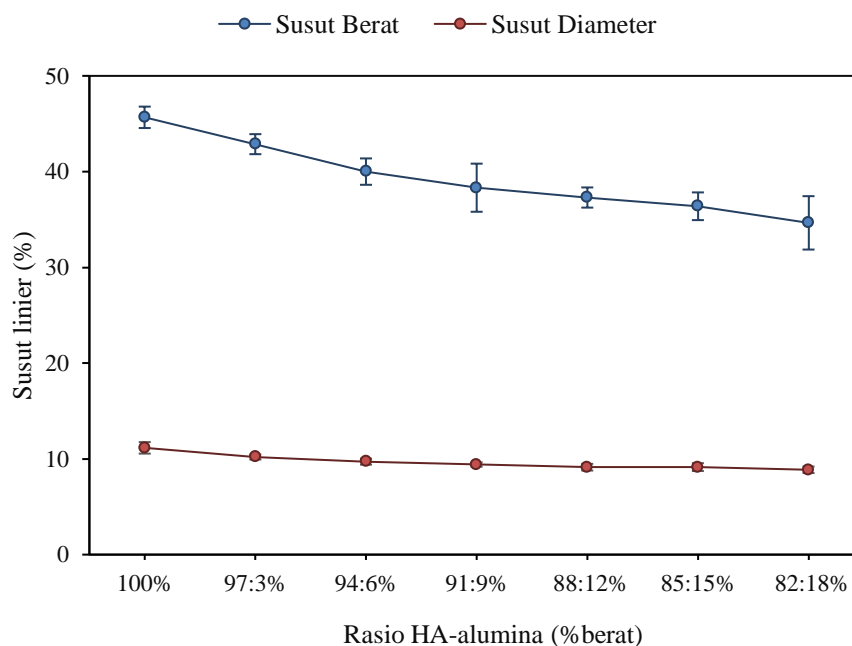
2.2.3. Karakterisasi sampel

Penyusutan linier dilakukan untuk mengetahui perubahan sampel antara *green body* dengan *sintered body* dengan menghitung penyusutan diameter dan penyusutan berat. Pengujian densitas berpedoman pada teori *Archimedes*. *Compressive strenght* dilakukan untuk mengetahui kekuatan dari setiap rasio yang digunakan pada sampel [12].

3. HASIL DAN ANALISIS

3.1. Karakterisasi penyusutan linier

Pengukuran penyusutan linier dilakukan dengan melakukan pengukuran susut diameter dan susut berat.

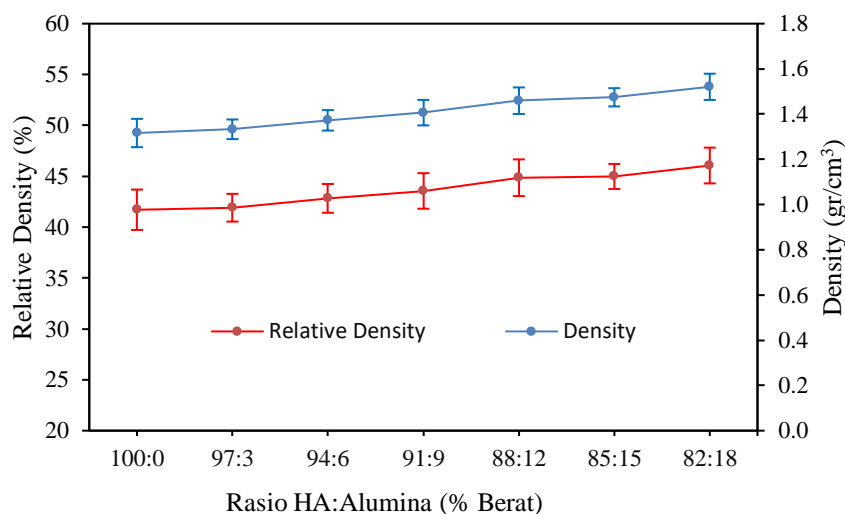


Gambar 3. Pengaruh rasio HA-alumina terhadap nilai penyusutan

Gambar 3 memperlihatkan penyusutan linier yang terjadi pada *sintered body* HA-alumina. Pengujian dilakukan dengan membandingkan sampel sebelum dan sesudah di *sintering*. Pada gambar 3 terjadinya penurunan nilai susut berat sampel yang tidak signifikan dari rasio HA-alumina 100:0 %berat dengan nilai 45,67% sampai rasio 82:18 %berat dengan nilai 34,65%. Penurunan ini terjadi karena HA yang digunakan adalah jenis *cylindrical*, dan HA jenis ini memiliki kandungan air yang tinggi. Pada gambar 3 terlihat bahwa terjadinya penurunan nilai susut diameter sampel yang tidak signifikan dari rasio HA-alumina 100:0 %berat dengan nilai 11,15% sampai rasio HA-alumina 82:12 %berat dengan nilai 8,86%. Semakin tinggi persentase alumina, maka susut diameternya akan semakin rendah, dikarenakan perbandingan *melting point* HA dan alumina yang sangat jauh, dan mengakibatkan tidak terjadinya ikatan butir yang sempurna pada temperature *sintering* 1200°C.

3.2. Karakterisasi densitas dan *relative density*

Pengukuran *density* sampel dilakukan dengan metode *Archimedes* pada sampel uji dalam keadaan berat kering dan berat dalam air.

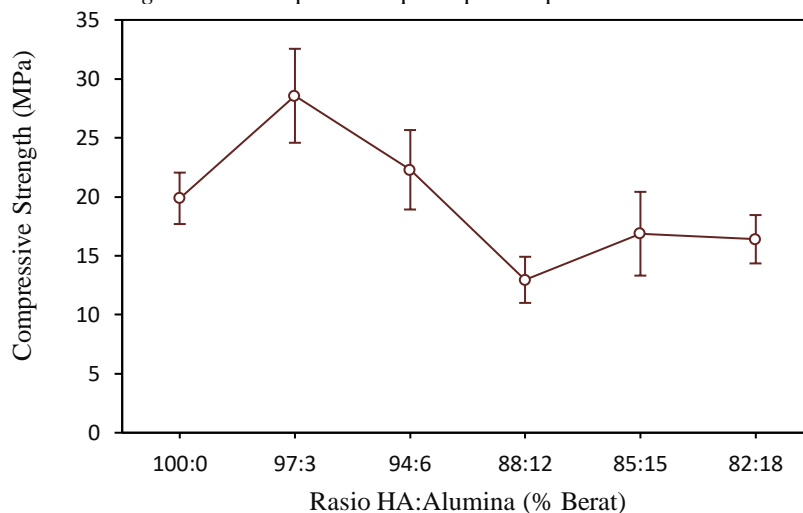


Gambar 4. Pengaruh rasio HA-alumina terhadap nilai *relative density* dan *density*

Gambar 4 menunjukkan nilai *density* dan *relative density sintered body* HA-alumina pada setiap rasio yang berbeda. Pengujian pada *relative density* terjadi kenaikan yang tidak signifikan pada rasio HA-alumina 100:0 %berat dengan nilai 41,71% sampai rasio 82:18 %berat dengan nilai 46,06%. Pengujian pada *density* HA-alumina juga mengalami kenaikan yang tidak signifikan pada rasio HA-alumina 100:0 %berat dengan nilai 1,32 gr/cm³ sampai rasio 82:18 %berat dengan nilai 1,52 gr/cm³. Terlihat pada gambar 1 ukuran rata-rata partikel HA yang digunakan sebesar 112,7 μm dan terlihat pada gambar 2 ukuran rata-rata partikel alumina yang digunakan sebesar 70,28 μm . Hal ini diduga karena serbuk alumina yang lebih kecil dapat mengisi celah atau pori-pori diantara serbuk HA yang lebih besar. Pada pengujian *density* dan *relative density* ukuran partikel sangat mempengaruhi nilainya. Jika ukuran partikel semakin kecil, maka pori yang terbentuk juga akan lebih sedikit. Penelitian sebelumnya juga sudah melaporkan bahwa sifat dari suatu produk akan dipengaruhi oleh ukuran dari partikel [13]–[17]. Kualitas *sintered body* ini sangat dipengaruhi oleh data *relative density*, jika nilai *relative density* tinggi maka nilai *compressive strength* juga akan tinggi [18]–[22].

3.3. Karakterisasi *Compressive strength*

Pengujian *compressive strength* dilakukan pada setiap sampel sampai hancur.



Gambar 5. Pengaruh rasio HA-alumina terhadap nilai *compressive strength*

Gambar 5 menunjukkan hubungan rasio HA-alumina terhadap nilai *compressive strength*. Pada pengujian *compressive strength* ini terlihat bahwa terjadi kenaikan nilai *compressive strength* yang signifikan dari rasio HA-alumina 100:0 %berat dengan nilai 19,9 MPa ke rasio HA-alumina 97:3 %berat dengan nilai 28,6 MPa. Selanjutnya terjadi penurunan nilai *compressive strength* yang signifikan dari rasio HA-alumina 97:3 %berat dengan nilai 28,6 MPa ke rasio HA-alumina 88:12 %berat dengan nilai 13,0 MPa. Selanjutnya dari rasio HA-alumina 88:12 %berat

dengan nilai 13,0 MPa sampai rasio 82:18 %berat dengan nilai 16,4 MPa mendapatkan nilai *compressive strength* yang konstan. Hal yang menyebabkan kenaikan pada rasio HA-alumina 97:3 %berat karena ada penambahan serbuk alumina, yang secara teoritis alumina memiliki nilai *compressive strength* yang lebih tinggi dibanding HA. Pada rasio HA-alumina 94:6 %berat, penambahan alumina membuat nilai *compressive strength sintered body* HA-alumina turun secara signifikan. Hal ini diduga semakin tinggi penambahan alumina maka nilai *compressive strength* akan semakin rendah, karena *milting point* alumina yang tinggi mengakibatkan tidak terbentuknya butir yang sempurna pada *sinterd body*.

Pada gambar 5 terlihat bahwa nilai *compressive strength* tertinggi pada rasio HA-alumina 97:3 %berat dengan nilai 28,6 MPa. Dan nilai *compressive strength* terendah terlihat pada rasio HA-alumina 88:12 %berat dengan nilai 13,0 MPa.

4. KESIMPULAN

Sintered body HA-alumina mengalami perubahan sifat fisik dan mekanik pada masing-masing rasio. Pada pengujian susut linier terjadi penurunan nilai yang tidak signifikan pada susut berat dan susut diameter. Pada susut berat terjadi penurunan dari 45,67% - 34,65%. Pada susut diameter terjadi penurunan dari 11,15% - 8,86%. Pada pengujian *density* dan *relative density* terjadi kenaikan yang tidak signifikan pada setiap rasio. Pada *relative density* terjadi kenaikan dari 41,71% - 46,00%. Pada *density* terjadi kenaikan dari 1,32% - 1,52%. Pada pengujian *compressive strength* terdapat nilai paling tinggi pada rasio HA-alumina 97:3 %berat dengan nilai 28,6 MPa, dan nilai terendah terdapat pada rasio HA-alumina 88:12 %berat dengan nilai 13,0 MPa.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih 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] S. M. B. Respati, "Bahan Biomaterial Stainless Steel Dan Keramik," *Momentum*, vol. 6, no. 1, pp. 5–8, 2010.
- [3] 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.
- [4] P. F. Rubio, "Sintesis Hidroksiapatit dari Cangkang Telur dengan Metode Presipitasi," vol. 1, pp. 81–109, 2013.
- [5] 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. - Silikat*, vol. 65, no. 3, pp. 224–234, 2021, doi: 10.13168/cs.2021.0022.
- [6] J. N. Setiadiputri, "Sintesis dan Karakterisasi Biokomposit Hidroksiapatit-Alginat-Zinc Sebagai Bone graft Untuk Penanganan Bone Defect," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2018, [Online]. Available: file:///C:/Users/User/Downloads/fvm939e.pdf
- [7] J. Raharjo and S. Rahayu, "Pengaruh Tingkat Kemurnian Bahan Baku Alumina Terhadap Temperatur Sintering dan Karakteristik Keramik Alumina," pp. 1–7, 2015.
- [8] 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.
- [9] F. Arifiadi, K. Wahyudi, R. J. Manullang, and Nurhidayati, "SINTESIS DAN KARAKTERISASI HIDROKSIAPATIT-GIBSIT Synthesis And Characterization of Hydroxyapatite-Gibbsite," vol. 30, no. 2, pp. 78–89, 2022.
- [10] V. Y. Pamela, R. Syarif, E. S. Iriani, and N. E. Suyatma, "KARAKTERISTIK MEKANIK, TERMAL DAN MORFOLOGI FILM POLIVINIL ALKOHOL DENGAN PENAMBAHAN NANOPARTIKEL ZnO DAN ASAM STEARAT UNTUK KEMASAN MULTILAYER," *J. Penelit. Pascapanen Pertan.*, vol. 13, no. 2, p. 63, 2017, doi: 10.21082/jpasca.v13n2.2016.63-73.
- [11] A. Indra, R. B. Setiawan, I. H. Mulyadi, J. Affi, and Gunawarman, "The Effect of PVA Addition as Binders on the Properties of Hydroxyapatite Sintered Body," 2019.
- [12] Indriani, Arista, Aminatun, and Siswanto, "Upaya Meningkatkan Kuat Tekan Komposit Ha-Kitosan Sebagai Kandidat Aplikasi Implan Tulang Kortikal," *J. Fis. dan Ter.*, pp. 1–15, 2014.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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, pp. 15882–15888, 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.03.136.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.