

## Pengaruh Variasi Gaya Kompaksi terhadap Sifat Fisik dan Kekuatan Tekan Pelet Hidroksiapatit Berbasis Tulang Sapi

Komang Widhi Widantha<sup>1\*</sup>, Selly Septianissa<sup>2</sup>, Ayu Zahra Chandrasari<sup>3</sup>,  
Aloysius Abimanyu Winanda<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup>Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali, Badung, Bali

<sup>2,3</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Widyatama, Bandung, Jawa Barat

\*Email: komangwidhi@pnb.ac.id

### Abstract

*This study investigates the effect of compaction force on the physical properties and compressive strength of hydroxyapatite (HAp) pellets derived from bovine bone. This study was conducted because bovine bone waste has the potential to be utilized as a source of hydroxyapatite (HAp), which exhibits porous characteristics and shows promise for various material applications. HAp powder was prepared through cleaning, soaking, calcination, grinding, and sieving, then compacted into pellets at 15, 20, and 25 kN. The resulting pellets were tested for density, porosity, water absorption, and compressive strength. The results show that increasing compaction force leads to higher pellet density and compressive strength, while porosity and water absorption tend to decrease. At a compaction force of 25 kN, the pellets exhibited the highest density (2.11–2.22 g/cm<sup>3</sup>), lowest porosity (20–24%), lowest water absorption (5.74–7.14%), and highest compressive strength of approximately 15 MPa, indicating more intensive particle densification. These findings indicate that compaction force significantly affects the structural and mechanical properties of hydroxyapatite pellets. The obtained porous structure suggests that the material may be further explored for applications requiring a balance between mechanical strength and porosity.*

*Keywords: Hydroxyapatite, bovine bone waste, compaction force, pellet, filtration*

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi gaya kompaksi terhadap sifat fisik dan kekuatan tekan pelet hidroksiapatit (HAp) berbasis tulang sapi. Penelitian ini dilakukan karena limbah tulang sapi memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber HAp yang memiliki karakteristik berpori dan berpotensi untuk berbagai aplikasi material. Serbuk HAp dibuat melalui proses pembersihan, perendaman, kalsinasi, penggerusan, dan penyaringan, kemudian dikompaksi menjadi pelet dengan variasi gaya 15, 20, dan 25 kN. Pelet yang dihasilkan diuji densitas, porositas, penyerapan air, serta kekuatan tekan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan gaya kompaksi menyebabkan densitas dan kekuatan tekan pelet meningkat, sedangkan porositas dan penyerapan air mengalami penurunan. Pada gaya kompaksi 25 kN, pelet menunjukkan densitas tertinggi (2,11–2,22 g/cm<sup>3</sup>), porositas terendah (20–24%), penyerapan air terendah (5,74–7,14%), serta kekuatan tekan tertinggi sekitar 15 MPa, yang mengindikasikan terjadinya pemadatan partikel yang lebih intensif. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi gaya kompaksi berpengaruh terhadap struktur dan sifat mekanik pelet HAp. Struktur berpori yang dihasilkan menunjukkan potensi untuk dikaji lebih lanjut pada aplikasi yang memerlukan keseimbangan antara kekuatan mekanik dan porositas.

Kata kunci: Hidroksiapatit, limbah tulang sapi, gaya kompaksi, pelet, media filter

## 1. Pendahuluan

Ketersediaan air bersih di Bali saat ini terancam akibat tingginya tingkat polusi dari industri dan rumah tangga, yang diperparah oleh rendahnya kinerja dari instalasi pengolahan limbah terpusat [1], [2]. Selain itu, pengembangan sektor pariwisata juga menuntut ketersediaan lingkungan yang bersih dan sumber air yang berkualitas sebagai bagian dari upaya pelestarian lingkungan dan peningkatan kesejahteraan masyarakat lokal [3]. Meskipun sistem reaktor biologis dan teknologi filtrasi telah diterapkan, masih diperlukan material adsorben yang lebih efektif, stabil, dan berkelanjutan untuk meningkatkan kinerja pengolahan limbah cair [4].

Hidroksiapatit (HAp) dengan rumus kimia  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  merupakan material berbasis kalsium fosfat yang memiliki kemampuan adsorpsi yang baik terhadap ion logam berat [5]. Struktur pori dan gugus fungsional pada permukaan HAp memungkinkan interaksi yang kuat dengan kontaminan dalam air, sehingga material ini banyak diteliti sebagai media filtrasi dan adsorben dalam pengolahan limbah cair [6], [7]. Selain itu, HAp memiliki keunggulan berupa sifat biokompatibel, stabil secara kimia, serta relatif ramah lingkungan dibandingkan dengan adsorben sintetis lainnya.

Bali memiliki potensi limbah biomaterial yang besar dari tulang sapi sisa industri pengolahan makanan yang kaya akan kalsium fosfat. Melalui proses kalsinasi, limbah tulang ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku HAp yang bernilai tambah sekaligus berkontribusi dalam pengurangan limbah organik di lingkungan [8], [9]. Pemanfaatan ini berfungsi sebagai solusi strategis untuk mengonversi limbah menjadi material yang berguna dalam pengolahan air.

Meskipun demikian, penggunaan HAp dalam bentuk serbuk murni pada sistem filtrasi memiliki beberapa kendala teknis. Partikel serbuk cenderung mengalami aglomerasi dan dapat menyebabkan penyumbatan pada sistem filtrasi, sehingga kurang efisien untuk aplikasi

skala praktis [10]. Untuk itu, material adsorben biasanya diproduksi dalam bentuk pelet atau granula agar lebih praktis digunakan sebagai media penyaringan, memiliki ketahanan mekanik yang lebih baik, serta dapat diterapkan lebih efisien dalam sistem kolom atau filter.

Studi mengenai HAp pada umumnya masih terfokus pada peningkatan kapasitas adsorpsi fase serbuk, sedangkan eksplorasi terhadap sifat fisik dan mekanik dalam bentuk pelet masih sangat terbatas. Padahal, parameter seperti densitas, porositas, dan penyerapan air sangat memengaruhi stabilitas struktur serta kekuatan mekanik pelet saat proses filtrasi berlangsung [11], [12], [13], [14], [15]. Struktur dengan porositas tinggi dapat meningkatkan kemampuan penyerapan air dan aksesibilitas pori, namun di sisi lain dapat mengurangi kekuatan mekanik dari material tersebut.

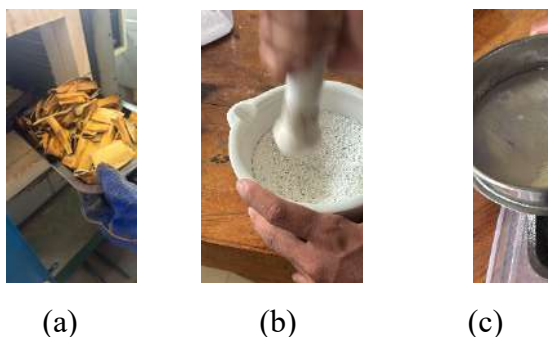
Salah satu parameter penting dalam proses pembentukan pelet adalah gaya kompaksi, yang memengaruhi tingkat pemadatan partikel sehingga menentukan densitas, porositas, serta kekuatan tekan pelet yang dihasilkan [16], [17], [18]. Beberapa penelitian telah melaporkan pembuatan pelet hidroksiapatit, namun umumnya menggunakan hidroksiapatit sintetis atau lebih berfokus pada karakteristik adsorpsi [19], [20], [21]. Sementara itu, studi mengenai hidroksiapatit berbasis limbah tulang sapi dalam bentuk pelet, khususnya yang mengkaji pengaruh parameter kompaksi terhadap sifat fisik dan mekanik masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi gaya kompaksi terhadap sifat fisik serta kekuatan tekan pelet HAp berbahan dasar tulang sapi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai hubungan antara parameter kompaksi dan karakteristik pelet, sebagai dasar untuk pengembangan material berpori lebih lanjut.

## 2. Metoda Penelitian

### 2.1. Pembuatan Serbuk Hidroksiapatit (HAp)

Bahan baku tulang sapi diperoleh dari limbah rumah potong hewan yang telah dibersihkan dan dipotong kecil-kecil. Untuk menghilangkan sisa daging dan lemak yang masih menempel, potongan tulang kemudian direndam dalam larutan NaOH dengan konsentrasi 1 M selama 24 jam, dilanjutkan pencucian dengan air bersih sebelum dikeringkan di bawah sinar matahari.

Tulang yang telah kering kemudian dikalsinasi menggunakan furnace pada suhu 800°C selama 2 jam untuk menghilangkan seluruh komponen organik dan menghasilkan material kalsium fosfat yang didominasi oleh HAp [21], [22], [23], [24]. Setelah proses kalsinasi, sampel didinginkan secara alami di dalam furnace hingga mencapai suhu ruang. Produk kalsinasi tersebut kemudian digerus dengan mortar menjadi serbuk berukuran halus dan disaring menggunakan ayakan 200 mesh.



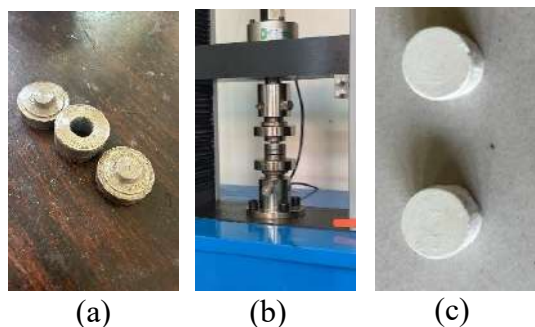
Gambar 1. Proses preparasi hidroksiapatit: (a) kalsinasi tulang dalam furnace, (b) penggerusan HAp hasil kalsinasi, (c) pengayakan menggunakan ayakan 200 mesh.

### 2.2. Pembuatan Pelet Hidroksiapatit

Serbuk hidroksiapatit dimasukkan ke dalam cetakan silinder untuk membentuk pelet berdiameter 20 mm dengan ketebalan antara 10–12 mm, dengan massa serbuk sebesar 7 gram untuk setiap pelet. Proses pembentukan dilakukan menggunakan alat tekan dengan tiga variasi beban kompaksi, yaitu 15 kN, 20 kN,

dan 25 kN, dengan waktu penahanan kompaksi selama 60 detik.

Setelah proses kompaksi selesai, pelet dikeluarkan dari cetakan secara hati-hati untuk menghindari kerusakan pada sampel yang masih rapuh. Pelet kemudian disinter pada suhu 800°C dengan waktu penahanan selama 2 jam menggunakan furnace untuk meningkatkan kekuatan dan ikatan antar partikel pada pelet HAp. Setelah proses sintering, pelet didinginkan secara alami di dalam furnace hingga mencapai suhu ruang.



Gambar 2. Proses pembuatan pelet HAp: (a) cetakan pelet, (b) proses penekanan cetakan, (c) pelet HAp yang dihasilkan.

### 2.3. Pengujian Pelet

Pengujian dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dan sifat mekanik pelet HAp yang dihasilkan.

#### *Pengukuran Densitas*

Densitas pelet dihitung berdasarkan hasil pengukuran massa dan dimensi sampel. Massa pelet diukur menggunakan timbangan digital dengan ketelitian 0,001 g, sedangkan diameter dan tinggi pelet diukur menggunakan jangka sorong dengan ketelitian 0,05 mm. Densitas dihitung menggunakan persamaan:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

dengan volume pelet dihitung menggunakan rumus volume silinder. Selain itu, dilakukan pengukuran bulk density pada serbuk HAp menggunakan timbangan dan gelas ukur volume.

#### *Perhitungan Porositas*

Metode perhitungan porositas dalam penelitian ini menggunakan pendekatan densitas relatif, yaitu perbandingan antara

densitas pelet dan densitas serbuk HAp. Pendekatan ini digunakan karena penelitian ini berfokus pada analisis perbandingan pengaruh gaya kompaksi terhadap perubahan struktur pelet, sehingga nilai porositas digunakan sebagai indikator tingkat kerapatan material. Persentase porositas dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Porositas (\%)} = \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_s}\right) \times 100\%$$

dimana  $\rho_p$  merupakan densitas pelet dan  $\rho_s$  merupakan densitas serbuk HAp.

#### *Pengujian Penyerapan Air*

Pengujian penyerapan air dilakukan untuk mengetahui kemampuan pelet dalam menyerap air melalui pori-pori. Sampel ditimbang sebagai massa kering ( $W_d$ ), lalu direndam dalam air mendidih selama 1 jam. Setelah permukaan dilap hingga kering dan ditimbang kembali sebagai massa basah ( $W_w$ ) Persentase penyerapan air dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Water absorption (\%)} = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100\%$$

#### *Pengujian Kekuatan Tekan*

Pengujian kekuatan tekan dilakukan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) dengan mengacu pada prosedur umum standar ASTM C1424 untuk material keramik. Sampel pelet ditempatkan di antara dua plat penekan dengan orientasi tegak lurus terhadap arah pembebanan, kemudian diberikan beban tekan hingga sampel mengalami kerusakan, yang didefinisikan sebagai kondisi ketika sampel mengalami retak awal dan penurunan beban secara signifikan hingga hancur. Pengujian dilakukan dengan kecepatan pembebanan 5 mm/menit. Sampel diuji dalam kondisi kering pada suhu ruang setelah proses sintering. Nilai kekuatan tekan dihitung menggunakan persamaan:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

dimana  $\sigma$  merupakan kekuatan tekan,  $F$  adalah gaya maksimum yang diterima sampel, dan  $A$  adalah luas penampang pelet.

### 3. Hasil Penelitian

#### 3.1. Densitas dan Porositas Pelet Hidroksiapatit

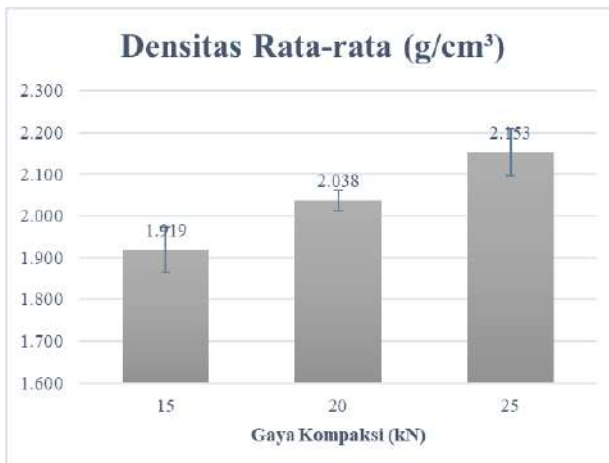
Densitas dan porositas merupakan parameter penting yang menunjukkan kerapatan struktur internal pelet HAp. Hasil pengujian densitas dan porositas pelet pada berbagai variasi gaya kompaksi ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian densitas dan porositas pelet HAp pada variasi gaya kompaksi

Sampel	Gaya Kompaksi (kN)	Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	Porositas (%)
1	15	1.924	30.8
2	15	1.972	29.1
3	15	1.861	33.1
4	20	2.016	27.5
5	20	2.064	25.8
6	20	2.034	26.9
7	25	2.134	23.3
8	25	2.108	24.2
9	25	2.218	20.3

Berdasarkan Tabel 1 dapat dilihat bahwa nilai densitas pelet HAp cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya gaya kompaksi yang diberikan. Pada variasi gaya kompaksi 15 kN diperoleh densitas pelet pada kisaran sekitar 1,86–1,97 g/cm<sup>3</sup>. Ketika gaya kompaksi ditingkatkan menjadi 20 kN, densitas pelet meningkat hingga kisaran sekitar 2,01–2,06 g/cm<sup>3</sup>. Sementara itu, pada gaya kompaksi 25 kN, densitas pelet mencapai nilai tertinggi yaitu sekitar 2,11–2,22 g/cm<sup>3</sup>.

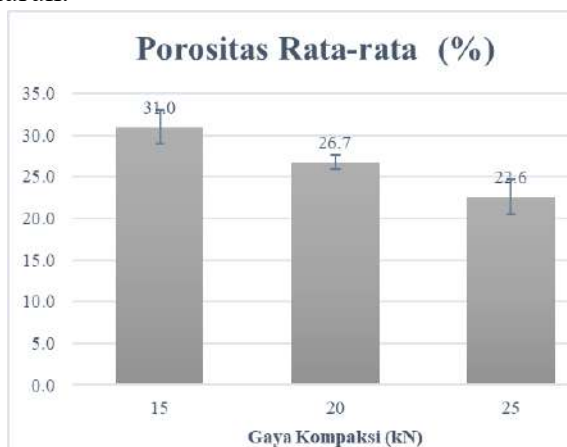
Hubungan antara gaya kompaksi dengan densitas pelet HAp ditunjukkan pada Gambar 3. Grafik tersebut memperlihatkan bahwa semakin besar gaya kompaksi yang diberikan, semakin tinggi densitas pelet yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa gaya kompaksi yang lebih besar mampu meningkatkan proses pemadatan partikel HAp.



Gambar 3. Hubungan antara gaya kompaksi dan densitas pelet HAp

Sebaliknya, nilai porositas menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan peningkatan gaya kompaksi. Pada kompaksi 15 kN porositas pelet berada pada kisaran sekitar 29-33%. Ketika gaya kompaksi ditingkatkan menjadi 20 kN, porositas menurun menjadi sekitar 25-27%. Porositas terendah diperoleh pada gaya kompaksi 25 kN dengan kisaran sekitar 20-24%.

Gambar 4 menunjukkan bagaimana gaya kompaksi mempengaruhi porositas pelet HAp. Grafik tersebut menunjukkan bahwa ketika gaya kompaksi meningkat, partikel HAp menjadi lebih rapat, sehingga ruang di antara partikel menjadi lebih kecil dan porositasnya menurun.



Gambar 4. Hubungan antara gaya kompaksi dan porositas pelet HAp

Peningkatan densitas dan penurunan porositas seiring bertambahnya gaya kompaksi

menunjukkan terjadinya pemadatan partikel yang lebih intensif selama proses penekanan. Peningkatan tekanan kompaksi menyebabkan deformasi dan penyusunan ulang partikel sehingga mikrostruktur menjadi lebih rapat dan volume void antarpartikel berkurang secara signifikan, sebagaimana dijelaskan dalam teori kompaksi serbuk [25]. Mekanisme pengurangan void ini juga sejalan dengan studi pada hidroksiapatit yang menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi packing antarpartikel dapat meningkatkan densitas material [20]. Fenomena ini umum terjadi pada material berbasis serbuk, di mana peningkatan tekanan kompaksi menghasilkan struktur yang lebih padat dengan porositas yang lebih rendah [17].

### 3.2. Penyerapan Air Pelet Hidroksiapatit

Uji penyerapan air dilakukan untuk melihat kemampuan material menahan air, yang erat kaitannya dengan volume pori-porinya. Tabel 2 menunjukkan hasil uji penyerapan air pada pelet HAp dengan gaya kompaksi yang berbeda.

Tabel 2. Hasil pengujian penyerapan air pelet HAp pada variasi gaya kompaksi

Sampel	Gaya Kompaksi (kN)	Penyerapan Air (%)
1	15	9.58
2	15	9.24
3	15	8.94
4	20	7.81
5	20	8.86
6	20	8.51
7	25	5.74
8	25	7.14
9	25	6.68

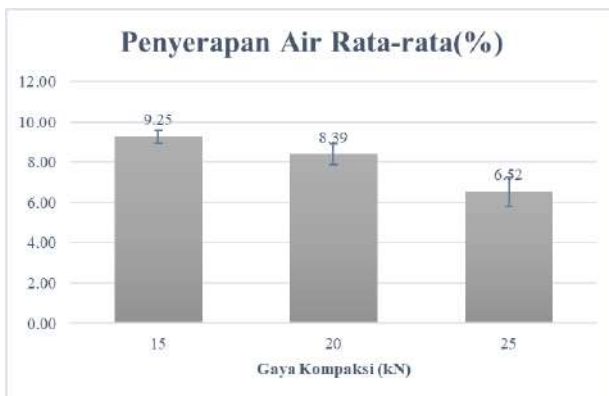
Berdasarkan Tabel 2, nilai penyerapan air menunjukkan tren menurun seiring dengan meningkatnya gaya kompaksi. Pada beban 15 kN, penyerapan air berkisar antara 8,94-9,58%, kemudian menurun menjadi 7,81-8,86% pada beban 20 kN, dan mencapai nilai terendah sebesar 5,74-7,14% pada gaya kompaksi 25 kN.

Gambar 5 menunjukkan bahwa peningkatan gaya kompaksi menurunkan

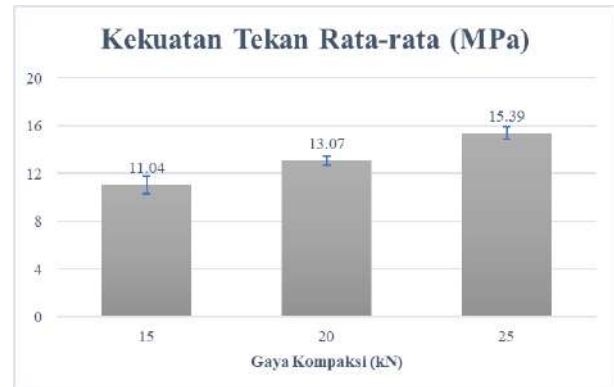
penyerapan air pelet HAp akibat berkurangnya porositas terbuka dan ruang antarpartikel. Peningkatan densifikasi ini menyebabkan jalur kapiler menjadi lebih terbatas sehingga menghambat penetrasi air ke dalam struktur material. Dengan demikian, penurunan porositas berbanding lurus dengan penurunan kemampuan penyerapan air. Fenomena ini merupakan karakteristik umum material berpori, di mana peningkatan densifikasi menurunkan konektivitas pori dan permeabilitas fluida [26]. Selain itu, pada keramik hasil sintering, morfologi dan konektivitas pori berperan penting dalam mengontrol aliran dan penyerapan air dalam material [27].

2	15	3206	10.20
3	15	3642	11.59
4	20	3988	12.69
5	20	4206	13.39
6	20	4126	13.13
7	25	4681	14.90
8	25	4824	15.36
9	25	5001	15.92

Hubungan antara gaya kompaksi dengan kekuatan tekan pelet HAp ditunjukkan pada Gambar 6. Grafik tersebut memperlihatkan bahwa peningkatan gaya kompaksi menghasilkan peningkatan kekuatan tekan pelet HAp.



Gambar 5. Hubungan antara gaya kompaksi dan penyerapan air pelet HAp



Gambar 6. Hubungan antara gaya kompaksi dan kekuatan tekan pelet HAp

### 3.3. Kekuatan Tekan Pelet Hidroksiapatit

Sifat mekanik pelet diuji melalui pengukuran kekuatan tekan untuk melihat seberapa baik pelet tersebut dapat menahan beban mekanis sebelum pecah. Data dalam Tabel 3 menunjukkan bahwa kekuatan tekan pelet HAp meningkat seiring dengan peningkatan gaya kompaksi. Pada beban 15 kN, kekuatan tekan berkisar antara 10,20-11,59 MPa, yang kemudian meningkat secara konsisten hingga mencapai puncaknya pada beban 25 kN dengan nilai 14,90-15,92 MPa.

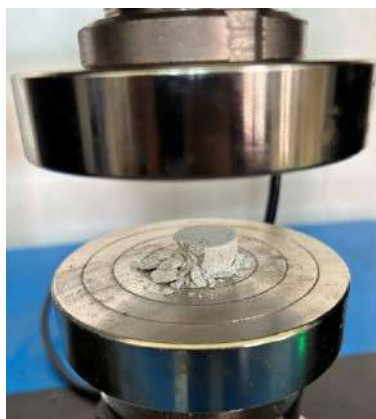
Tabel 3. Hasil pengujian kekuatan tekan pelet HAp pada variasi gaya kompaksi

Sampel	Gaya Kompaksi (kN)	Beban Maksimum (N)	Kekuatan Tekan (MPa)
1	15	3559	11.33

Kekuatan tekan meningkat seiring dengan peningkatan gaya kompaksi karena partikel HAp tersusun lebih rapat sehingga meningkatkan kontak antarpartikel dan mengurangi porositas dalam struktur. Struktur yang lebih padat ini memungkinkan pelet menahan beban tekan yang lebih besar sebelum mengalami kerusakan. Hal ini sejalan dengan laporan bahwa peningkatan gaya kompaksi dapat meningkatkan densitas material melalui pemadatan partikel [28], serta bahwa penurunan porositas melalui proses kompaksi berkontribusi langsung terhadap peningkatan kekuatan tekan material berbasis kalsium fosfat [29]. Selain itu, hubungan antara porositas dan sifat mekanik pada hidroksiapatit menunjukkan bahwa peningkatan densifikasi dan homogenitas mikrostruktur akan meningkatkan kekuatan

material [30], [31] yang juga didukung oleh studi yang melaporkan bahwa peningkatan densitas relatif berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan mekanik pada komposit hidroksiapatit [32].

Selain nilai kekuatan tekan yang diperoleh, pengamatan visual terhadap spesimen setelah pengujian juga menunjukkan karakteristik kegagalan material. Secara visual, kegagalan pelet menunjukkan karakteristik keruntuhan material keramik yang bersifat getas (brittle). Sebagaimana terlihat pada Gambar 7, kegagalan dimulai dengan munculnya retakan pada bagian tepi spesimen yang kemudian terkelupas akibat propagasi retak saat tegangan tekan melampaui ambang batas kekuatan material.



Gambar 7. Mode kegagalan pelet HAp setelah pengujian kekuatan tekan yang menunjukkan propagasi retak dari bagian tepi.

#### 4. Kesimpulan

Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa peningkatan gaya kompaksi berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan mekanik dari pelet HAp. Pelet dengan densitas yang lebih tinggi dan porositas serta daya serap air yang lebih rendah didapatkan melalui gaya kompaksi yang lebih tinggi. Hal ini juga menyebabkan pelet lebih kuat karena partikel menjadi tersusun lebih rapat. Hasil ini memperlihatkan bahwa parameter seperti gaya kompaksi sangat penting terhadap kualitas dan mungkin berpengaruh terhadap bagaimana pelet bekerja sebagai media filter. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memperlihatkan

hubungan langsung antara parameter ini terhadap performa filtrasi material.

#### 5. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji pengaruh parameter lain seperti ukuran partikel, temperatur sintering, atau waktu penahanan terhadap sifat fisik dan mekanik pelet HAp. Selain itu, pengujian aplikasi sebagai media filter juga perlu dilakukan untuk mengetahui kinerja material secara langsung.

#### 6. Daftar Pustaka

- [1] S. K. Chapagain, G. Mohan, A. B. Rimba, C. Payus, I. M. Sudarma, and K. Fukushi, "Analyzing the relationship between water pollution and economic activity for a more effective pollution control policy in Bali Province, Indonesia," *Sustainable Environment Research*, vol. 32, no. 1, p. 5, 2022, doi: 10.1186/s42834-021-00115-6.
- [2] M. Widianingias, S. Kazama, S. Benyapa, and S. Takizawa, "Assessment of water reclamation and reuse potential in Bali Province, Indonesia," *Water (Basel)*, vol. 15, no. 14, p. 2642, 2023.
- [3] G. A. P. Aryandini, I. M. I. Wahyudi, B. G. A. Juhara, and K. S. M. Parwati, "Peningkatan kesadaran hidup sehat dan bersih melalui penyediaan filter air dan sosialisasi air bersih kepada masyarakat Desa Wisata Pinge," *MSJ: Majority Science Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 15–19, 2023.
- [4] I. Suyasa and G. A. W. Sudiarta, "Treatment of Fabric Dye Wastewater from Household Industries Using Fixed Bed Reactor (FBR) With Local Microbial Isolates from Water Channel Sediment in Denpasar City, Bali Province, Indonesia.," *EnvironmentAsia*, vol. 15, no. 1, 2022.
- [5] D. L. Sembiring, M. Andre, and C. Wijaya, "Analisis Kinetika Adsorpsi Zat Warna Rhodamin B menggunakan Hidroksiapatit Hasil Kalsinasi Tulang Sapi Lombok yang Diaktivasi oleh Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>," *Pure Chemistry Research*, vol. 1, no. 2, pp. 39–44, 2025.
- [6] A. Aissa and M. Othmani, "Heavy Metals Removal Using Nano-Hydroxyapatite Extracted from Cattle Bones," *ChemistrySelect*, vol. 8, no. 13, p.

- e202300165, Apr. 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/slct.202300165>.
- [7] A. Nayak and B. Bhushan, "Hydroxyapatite as an advanced adsorbent for removal of heavy metal ions from water: Focus on its applications and limitations," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 11029–11034. doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.149.
- [8] V. M. Syukur, D. Rahyuni, E. Ayuningtyas, and R. D. Triastianti, "Pemanfaatan Tulang sapi dan Tulang ayam Menjadi Arang Aktif," *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, vol. 24, no. 2, pp. 17–22, 2024.
- [9] F. Afifah and S. E. Cahyaningrum, "Sintesis dan karakterisasi hidroksiapatit dari tulang sapi (Bos Taurus) menggunakan teknik kalsinasi," *UNESA Journal of Chemistry*, vol. 9, no. 3, pp. 189–196, 2020.
- [10] G. Sorrentino, K. Chellappah, and G. Biscontin, "Understanding clogging mechanisms in filter media: An integration of laboratory findings and theoretical perspectives," Jun. 22, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.seppur.2024.130602.
- [11] Y. A. B. Neolaka *et al.*, "Adsorption of methyl red from aqueous solution using Bali cow bones (*Bos javanicus domesticus*) hydrochar powder," *Results in Engineering*, vol. 17, p. 100824, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100824>.
- [12] L. Wan *et al.*, "Recovery phosphorus and water resources from corn deep-processing wastewater using a combined process of forward osmosis and hydroxyapatite," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 39, p. 104277, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104277>.
- [13] L. Jian, W. Botao, Z. Tianyou, L. Tiancheng, and J. Lijuan, "Waste-to-resource synthesis of hydroxyapatite from sludge and eggshell for high-capacity copper remediation in wastewater," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 77, p. 108310, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108310>.
- [14] M. Li, G. Huang, S. Wang, J. Huang, and Z. Xu, "Development of hydroxyapatite-enhanced membrane for nanoplastics removal: Multiple scenarios and mechanism exploration," *J. Hazard. Mater.*, vol. 495, p. 138781, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138781>.
- [15] A. Tripathi, R. Raj, S. M. Sathe, R. Y. Surampalli, and M. M. Ghangrekar, "Reviewing the advancement of calcium hydroxyapatite-mediated treatment for the remediation of wastewater: applications, degradation kinetics and future perspective," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 26, no. 11, pp. 3697–3714, 2024, doi: 10.1007/s10098-023-02576-2.
- [16] M. Asep, A. Rusdy, and S. Sukanto, "pengaruh variasi tekanan kompaksi panas terhadap densitas dan kekerasan amc diperkuat SiO<sub>2</sub>," *Machine: Jurnal Teknik Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 1–7, 2023.
- [17] O. A. Osuchukwu *et al.*, "Effect of compaction force on the mechanical properties of novel mixtures of naturally derived hydroxyapatite ceramics," *Results in Materials*, vol. 26, p. 100672, 2025.
- [18] D. O. Obada, E. T. Dauda, J. K. Abifarin, D. Dodoo-Arhin, and N. D. Bansod, "Mechanical properties of natural hydroxyapatite using low cold compaction pressure: Effect of sintering temperature," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 239, p. 122099, 2020.
- [19] X. Zhao, W. Wu, D. Pan, and H. Wu, "Study on the behaviors and mechanism of Ni (II) adsorption at the hydroxyapatite-water interface: Effect of particle size," *Adsorption Science & Technology*, vol. 2022, p. 3838766, 2022.
- [20] A. Indra, R. Firdaus, I. H. Mulyadi, and J. Affi, "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.
- [21] W. Khoo, F. M. Nor, H. Ardhyanta, and D. Kurniawan, "Preparation of natural hydroxyapatite from bovine femur bones using calcination at various temperatures," *Procedia Manuf.*, vol. 2, pp. 196–201, 2015.
- [22] K. W. Widantha, R. N. Baiti, and I. B. A. Peling, "Synthesis of Hydroxyapatite from Pig Bone Waste as Adsorbent for Heavy Metal Lead," 2024, pp. 126–133. doi: 10.2991/978-94-6463-587-4\_15.
- [23] M. A. Irfa'i *et al.*, "Calcination-based direct extraction of hydroxyapatite from bovine

- bone waste,” *Environ. Technol.*, vol. 45, no. 28, pp. 6249–6261, 2024.
- [24] E. Fiume, G. Magnaterra, A. Rahdar, E. Verné, and F. Bairo, “Hydroxyapatite for biomedical applications: A short overview,” *Ceramics*, vol. 4, no. 4, pp. 542–563, 2021.
- [25] C. Sinka, “Modelling powder compaction,” *KONA Powder and Particle Journal*, vol. 25, pp. 4–22, 2007.
- [26] T. Ohji and M. Fukushima, “Macro-porous ceramics: processing and properties,” *International Materials Reviews*, vol. 57, no. 2, pp. 115–131, 2012.
- [27] S. Kam *et al.*, “Permeability to water of sintered clay ceramics,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 46, no. 4, pp. 351–357, 2009.
- [28] Burmawi, A. Syahroom, N. Jamarun, S. Arief, and Gunawarman, “Material Density of Composite hydroxyapatite Bovine Bone-Borosilicate formed by Compaction and Sintering Techniques,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2020, p. 012024.
- [29] J. E. Barralet, T. Gaunt, A. J. Wright, I. R. Gibson, and J. C. Knowles, “Effect of porosity reduction by compaction on compressive strength and microstructure of calcium phosphate cement,” *Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, vol. 63, no. 1, pp. 1–9, 2002.
- [30] L.-H. He, O. C. Standard, T. T. Y. Huang, B. A. Latella, and M. V Swain, “Mechanical behaviour of porous hydroxyapatite,” *Acta Biomater.*, vol. 4, no. 3, pp. 577–586, 2008.
- [31] N. Thangamani, K. Chinnakali, and F. D. Gnanam, “The effect of powder processing on densification, microstructure and mechanical properties of hydroxyapatite,” *Ceram. Int.*, vol. 28, no. 4, pp. 355–362, 2002.
- [32] M. Aminzare *et al.*, “Hydroxyapatite nanocomposites: Synthesis, sintering and mechanical properties,” *Ceram. Int.*, vol. 39, no. 3, pp. 2197–2206, 2013.