



Analisis Sifat Mekanik dan Karakteristik Fisik Campuran Hidroksiapatit dari Tulang Sapi, Silika dengan Pengikat Resin sebagai Kandidat Implan Tulang

Hengki Ebita Yanda¹, Gunawarman^{2*}, Jon Affi³, Yuli Yetri⁴

^{1,2,3}Department of Mechanical Engineering, Universitas Andalas

⁴Department of Mechanical Engineering, Politeknik Negeri Padang

¹hengkiebitra@gmail.com ²gunawarman@eng.unand.ac.id ³jon_afi@eng.unand.ac.id ⁴yuliyetri@pnp.ac.id

Abstract

Ceramic biomaterials based on hydroxyapatite (HA) and silica have been extensively studied due to their load-bearing capabilities in bone replacement and reconstruction applications. This study presents an analysis of the mechanical properties and physical characteristics of a mixture of bovine bone hydroxyapatite and silica with a resin binder as a candidate for bone implants. The objective of this research is to examine the effect of the quantity of hydroxyapatite grains and the composition of silica reinforcement particles on the mechanical and physical properties of the product. The methodology involves mixing bovine bone hydroxyapatite and silica in ratios of 90:10, 80:20, and 70:30. Subsequently, the specimens were molded and subjected to tensile tests to determine their tensile strength and elongation. Surface morphology analysis was conducted using a scanning electron microscope (SEM), while functional group and crystallographic analyses were performed using FTIR and XRD. The results indicate that the 70:30 composition provided the best outcomes, with a tensile strength of 13.07 MPa, compared to the 90:10 and 80:20 compositions, which had tensile strengths of 6.68 MPa and 12.96 MPa, respectively. The microstructure of the surface after tensile testing shows that the addition of silica can increase mechanical strength and reduce the porosity of the specimen surface.

Keywords: hydroxyapatite, silica, bovine bone, resin, biocomposite.

Abstrak

Keramik biomaterial berbasis hidroksiapatit (HA) dan silika telah dipelajari secara intensif karena kemampuannya dalam menahan beban untuk aplikasi penggantian dan rekonstruksi tulang. Studi ini menyajikan analisis sifat mekanik dan karakteristik fisik campuran hidroksiapatit dari tulang sapi dan silika dengan pengikat resin sebagai kandidat implan tulang. Tujuan penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh jumlah butir hidroksiapatit dan komposisi penambahan partikel penguat dari silika terhadap sifat mekanik dan sifat fisik produk. Metode yang dilakukan meliputi pencampuran hidroksiapatit tulang sapi dan silika dengan komposisi 90:10, 80:20, dan 70:30. Selanjutnya, dilakukan proses pencetakan dan uji tarik terhadap benda uji untuk mengetahui kekuatan tarik dan regangannya. Analisis morfologi permukaan dilakukan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM), serta analisis gugus fungsi dan karakteristik hidroksiapatit tulang sapi dan silika dilakukan dengan FTIR dan XRD. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa komposisi 70:30 memberikan hasil terbaik dengan kekuatan tarik sebesar 13,07 MPa, dibandingkan dengan komposisi 90:10 dan 80:20 yang masing-masing sebesar 6,68 MPa dan 12,96 MPa. Struktur mikro permukaan setelah uji tarik menunjukkan bahwa penambahan silika dapat meningkatkan kekuatan mekanik dan mengurangi porositas permukaan spesimen.

Kata kunci: hidroksiapatit, silika, tulang sapi, resin, biokomposit,

1. Pendahuluan

Peningkatan kasus kerusakan tulang di tengah masyarakat disebabkan oleh berbagai faktor. Berdasarkan laporan global tentang keselamatan berlalu lintas dari *World Health Organization* (WHO), sekitar 1,25 juta orang meninggal setiap tahun akibat kecelakaan (WHO,2015). Selain itu,

menurut data International Osteoporosis Foundation, osteoporosis menyebabkan 8,9 juta kasus patah tulang setiap tahun [1]. Faktor-faktor yang menyebabkan kerusakan tulang meliputi penyakit atau degenerasi tulang, seperti osteoporosis, kanker tulang, atau cacat tulang lainnya. Jika kerusakan jaringan tulang tidak diperbaiki, korban dapat mengalami cacat

permanen [2]. Tingkat kecelakaan yang semakin meningkat dan prevalensi osteoporosis mengakibatkan permintaan akan implan tulang semakin tinggi. Penggunaan bahan implan di seluruh dunia terus meningkat setiap tahunnya[3]. Oleh karena itu, bahan alternatif yang dapat digunakan sebagai pengganti tulang adalah campuran hidroksiapatit tulang sapi dan silika.

Menurut [4]. semakin bertambahnya kebutuhan implan, biokomposit bisa digunakan sebagai implan, jaringan, organ transplantasi dan sistem pengiriman obat. Biomaterial berfungsi untuk memperbaiki, mengganti bagian jaringan yang rusak dengan berintegrasi dengan bagian yang bermasalah dari tubuh untuk meningkatkan harapan hidup. Adapun bahan biomaterial digunakan adalah logam, keramik, polimer, komposit dan resin [5]. Biomaterial dapat diperoleh dari berbagai sumber, baik dari bahan organik maupun yang non organik. Salah satu Biomaterial yang digunakan untuk implan tulang adalah hidroksiapatit [6]. 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 [7,8].

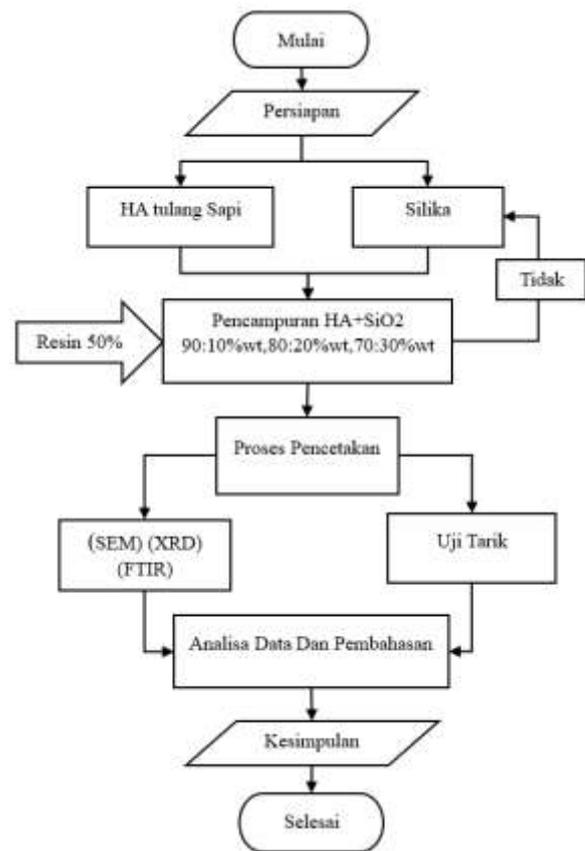
Hidroksiapatit (HA) dengan rumus kimia $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ merupakan material biokeramik secara termodinamika stabil dalam bentuk kristal dalam cairan tubuh dan memiliki komposisi yang mirip dengan mineral tulang [9]. Hidroksiapatit telah secara luas dipergunakan untuk memperbaiki, mengisi, menambahkan dan merekonstruksi ulang jaringan tulang dan gigi yang telah rusak dan juga didalam jaringan lunak [10]. Hidroksiapatit dapat diperoleh dari batu kapur, cangkang telur, dan dari tulang hewan. Dari berbagai tulang hewan yang mirip tulang manusia salah satunya tulang sapi. Komposisi tulang sapi terdiri dari 93% hidroksiapatit dan 7% β -tricalcium phosphate [11]. Untuk memperoleh hidroksiapatit dari tulang sapi ini dapat diperoleh dengan berbagai teknik. Menurut penelitian sebelumnya [12]. metode yang digunakan baik secara kimia, mekanik maupun dengan jumlah komposisi bahan.

Produk hidroksiapatit dari tulang sapi merupakan produk yang memiliki peluang usaha yang sangat prospektif. Produk dikembangkan seiring dengan semakin berkembangnya gaya hidup kembali ke alam (*back to nature*). Kecenderungan untuk menggunakan material pengganti tulang dengan bahan alam tidak hanya berlaku di Indonesia, tetapi juga berlaku di banyak negara. Material alam diyakini mempunyai efek samping yang lebih kecil dibandingkan material buatan modern. Dengan demikian kebutuhan penduduk dunia terhadap penggantian tulang secara alami sangat tinggi [12].

Pada penelitian Kalfas [13] dan Ooi [14]. telah dilakukan analisis mekanik dan fisik implan tulang yang dibuat dari hidroksiapatit tulang sapi yang dicampur dengan pengikat resin. Namun, kekuatan dan ketangguhan komposit yang dihasilkan lebih rendah dari tulang asli, dan dengan rentang nilai kekuatan yang terlalu lebar. Salah satu faktor penyebabnya adalah ukuran butir HA yang masih kasar (1- 63 μ m) dan distribusi resin pengikat yang tidak/kurang seragam [5,6] Selain itu, belum ada penambahan partikel penguat yang berfungsi untuk meningkatkan kekuatan dan ketangguhan bahan. Oleh sebab itu, perlu dilakukan penelitian terhadap pengaruh ukuran HA dan penambahan partikel penguat [15].

2. Metode Penelitian

Metode penelitian ini direncanakan dengan tahapan seperti yang ditampilkan pada diagram alir dalam Gambar 1 tahapan penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut.

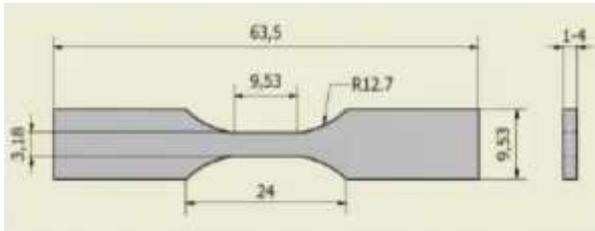


Gambar 1. Diagram Alir

2.1 Spesifikasi Produk

Proses pembuatan sampel komposit menggunakan serbuk silika sebagai matriks dan serbuk tulang sapi sebagai filler telah berhasil dilakukan. Dalam penelitian ini, karakterisasi dilakukan melalui uji *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *X-Ray*

Diffraction (XRD), dan *Fourier Transform Infrared (FTIR)*. Selain itu, juga dilakukan pengujian mekanik berupa uji tarik dengan standar ASTM D638 tipe IV di laboratorium metalurgi fisik untuk mengetahui kekuatan tarik dari material HA-silika. Gambar 2 menjelaskan geometri dari spesimen uji tarik yang akan digunakan untuk uji Tarik.



Gambar 2. Geometri Benda Uji Tarik Sesuai Standar ASTM D638 Type IV

2.2 Bahan dan Spesifikasi

Pemilihan material sangat penting, karena secara langsung memengaruhi integritas dan penerapan temuan. Dalam penelitian ini bahan yang digunakan dalam pengujian ini berupa serbuk hidroksiapatit tulang sapi karena biokompatibilitas dan sifat mekanisnya. yang bisa dilihat pada gambar 3 a dan serbuk silika pada gambar 3 b dan serbuk silika pada gambar 3 c dan 3 d *liquid resin* yang bersifat *self cure* gabungan dari keempat bahan tersebut akan menghasilkan material biokomposit.



A

B



C

D

Gambar 3. A. Serbuk Hidroksiapatit, B. Serbuk Silika, C. Serbuk Resin Dan D. *Liquid Resin*

Material yang dipilih dicampur dalam rasio tertentu: 90:10, 80:20, dan 70:30 [16]. Langkah ini penting untuk memastikan distribusi komponen yang merata, yang memengaruhi kinerja komposit secara keseluruhan. Setelah dicampur, material komposit dicetak menjadi spesimen uji. Tahap ini memerlukan presisi untuk menjaga keseragaman ukuran dan bentuk, sehingga memudahkan kondisi pengujian yang konsisten.

Tabel 1. Spesifikasi Produk Hidroksiapatit

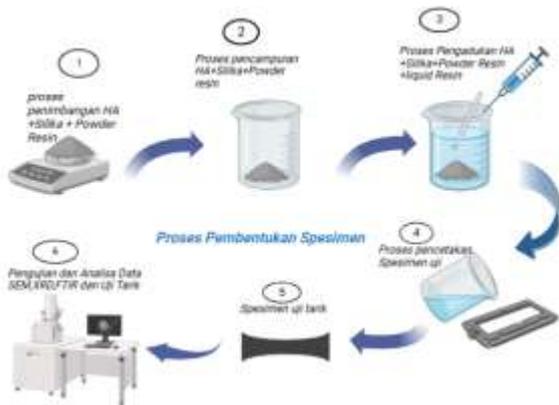
Nama Produk	<i>BHANEX</i>
<i>Particle size</i>	400-650 nm
<i>Purity</i>	> 95 %
<i>Decomposition Temp</i>	1000 °C (1832 °F)
<i>Ca/P Molar Ratio</i>	1.60 to 1.90
<i>Morphology</i>	Hexagonal Chrystal
<i>Color</i>	White to Off-White
<i>Manufacture</i>	Hydrothermal Reaction (Calcination)

Tabel 2. Spesifikasi Produk Silika

Nama produk	<i>Silika Powder nano Grade</i>
<i>Kode produk</i>	<i>M600</i>
<i>Particle size</i>	20 nm
<i>kemurnian</i>	98,8%
<i>Color</i>	white

2.3 Pembentukan Sampel

Ada beberapa tahap yang harus dilakukan dalam kegiatan pengujian ini. untuk mempermudah dan menghasilkan perhitungan yang akurat. pada Gambar 4 adalah skema pembuatan uji Tarik.



Gambar 4. Proses Pembentukan Spesimen Uji Tarik

Spesimen yang dicetak kemudian menjalani proses pengerasan untuk mencapai kekerasan dan stabilitas yang diinginkan. Langkah ini penting untuk mencegah variasi apa pun yang dapat memengaruhi fase pengujian berikutnya.

3. Data dan Pembahasan

Pada Gambar 5 ditunjukkan proses pembuatan sampel uji tarik yang dilakukan di laboratorium metalurgi. Setelah itu, sampel diuji dengan menggunakan uji tarik mini.



Gambar 5. Proses Pencetakan Hidroksiapatit dan Silika

Persiapan sampel merupakan fase krusial dalam memastikan keakuratan dan keandalan hasil eksperimen. Proses ini melibatkan serangkaian langkah cermat yang dirancang untuk mencapai homogenitas dan karakteristik fisik yang sesuai dalam spesimen uji. Tahapan penting dalam persiapan sampel tercantum dalam tabel, yang menunjukkan persiapan bahan sebelum dilakukan uji tarik sesuai dengan standar yang telah ditentukan. Pada Tabel 3, dijelaskan komposisi pencampuran HA dan silika dalam satuan berat.

Tabel 3. Komposisi Hidroksiapatit dan Silika

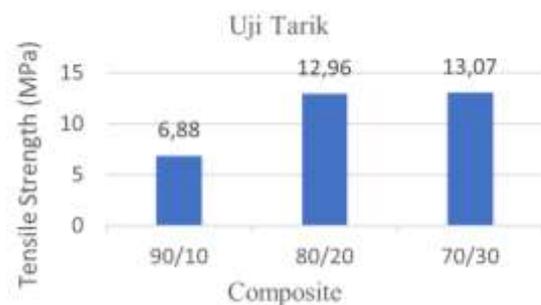
Kode Sampel	komposisi				Volume	
	HA (%)	SiO ₂ (%)	HA (gram)	SiO ₂ (gram)	Resin(g)	Resin(ml)
A	90	10	9	1	5	12 ml
B	80	20	8	2	5	12 ml
C	70	30	7	3	5	12 ml

Setelah dicampur, material komposit dicetak menjadi spesimen uji. Tahap ini memerlukan

presisi untuk menjaga keseragaman ukuran dan bentuk, sehingga memudahkan kondisi pengujian yang konsisten.

Spesimen yang dicetak kemudian menjalani proses pengerasan untuk mencapai kekerasan dan stabilitas yang diinginkan. Langkah ini penting untuk mencegah variasi apa pun yang dapat memengaruhi fase pengujian berikutnya.

Terakhir spesimen menjalani uji tarik untuk mengevaluasi sifat mekanisnya, seperti kekuatan tarik dan perpanjangan. Teknik canggih, termasuk SEM, FTIR, dan XRD, digunakan untuk menganalisis morfologi permukaan dan struktur kimia komposit.



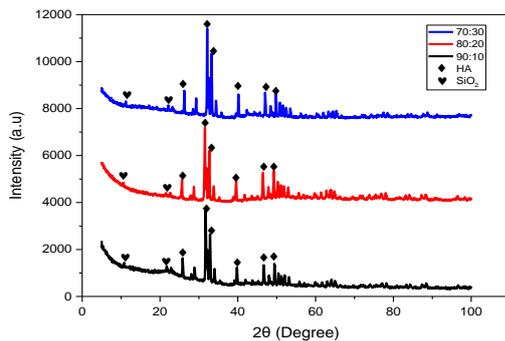
Gambar 6. Kekuatan Tarik Hidroksiapatit dan Silika

Di dalam proses pengujian tarik komposit hidroksiapatit tulang sapi dan silika dapat dilihat bahwa seiring bertambahnya persentase dari serbuk silika akan semakin kuat kekuatannya, dari perbandingan komposisi hidroksiapatit dan silika 90:10%wt hasil kekuatannya sebesar 6,88 MPa seterusnya antara 80:20%wt didapat hasil sebesar 12,96 MPa dan komposisi hidroksiapatit dan silika 70:30 didapat hasil yg lebih tinggi dari komposisi 10% dan 20% silika sebesar 13,07 MPa. Kekuatan tertinggi *Green body* HA murni adalah 0,2 MPa [17]. Sedangkan kekuatan HA baik dibandingkan dengan produk alami [18]. Berdasarkan persentase silika yang diperoleh, kekuatan komposit serbuk hidroksiapatit dan silika masih dapat digunakan sebagai kandidat potensial untuk implan tulang buatan. dari hasil penelitian sebelumnya oleh Paskarino [16] dan Yuli [19] kekuatan tarik maksimum sebesar 13,66 MPa dan 86,56MPa dengan konsentrasi campuran HA sebesar 30% dan 50% sedangkan dalam penelitian ini didapat komposisi 30% sebesar 13,07 MPa ini cenderung lebih kecil dari penelitian sebelumnya mungkin disebabkan olah resin yang digunakan berbeda dengan penelitian sebelumnya, oleh sebab itu harus dilakukan penelitian untuk mendapatkan kekuatan yang lebih baik lagi. dengan kekuatan 13,07 MPa masih bisa digunakan sebagai kandidat implan tulang.

3.1 Analisa dan Pembahasan

Analisis XRD dan FTIR mengonfirmasi keberadaan dan interaksi HA dan silika dalam komposit. Analisis gugus fungsi menyoroti ikatan antara HA-silika, sementara analisis kristalografi memberikan wawasan tentang integritas struktural dan komposisi fase bahan. Analisis ini sangat penting dalam memahami bagaimana komposit berperilaku di bawah tekanan mekanis dan potensinya untuk digunakan dalam aplikasi biomedis.

Dengan dilakukannya pengujian XRD kita dapat mengetahui struktur kristal dari material uji.

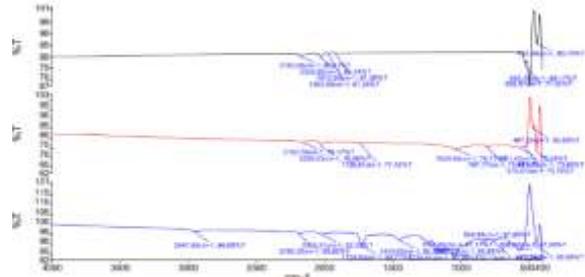


Gambar 7. Grafik Hasil Uji X-Ray (XRD) Hidroksiapatit dan Silika

Hasil karakterisasi XRD dari spesimen hidroksiapatit dan silika yang telah dilakukan pengujian, setelah dilakukannya pengujian dapat dilihat mayoritas puncak yang terbentuk adalah hidroksiapatit lebih dominan dibandingkan dengan silika, dibuktikan dengan sudut 2θ pada sampel hidroksiapatit yang telah diuji (Gambar 7) yaitu, 31,7153, 32,8527, 39,7442, 46,624 dan 49,3972. dari perbandingan titik puncak data HA Ref Kode 01-076-0694 yang dibandingkan dengan titik puncak hasil XRD spesimen hidroksiapatit tulang sapi dan silika komposisi 70:30 mempunyai kemiripan hidroksiapatit yang hampir mirip dan lebih baik dari komposisi 10% dan 20%. Tabel 4 menjelaskan bahwa dari sudut 2θ didapat nilai puncak-puncak tertinggi dengan kode ref HA standar dan ref silika standar 00-001-0649.

Tabel 4. Puncak Utama Serbuk Hidroksiapatit Dan Silika Dari Analisis XRD

KODE SAMPEL						HA REF KODE 01-076- 0694	Rel. Int. [%]
A	B	C					
Pos. [2θ .]	Rel. Int. [%]	Pos. [2θ .]	Rel. Int. [%]	Pos. [2θ .]	Rel. Int. [%]	Pos. [2θ .]	Rel. Int. [%]
31,563	100	32,132	100	31,715	100	31,771	100
32,696	69,38	33,270	71,7	32,852	66,8	32,906	61,4
39,576	28,02	40,154	26,2	39,744	24,1	39,802	20,5
47,860	18,35	47,029	28,1	46,624	28,2	46,698	28,5
50,265	22,44	49,790	26,5	49,397	30,3	39,725	25,6



Gambar 8. Spectrometer Infrared (FTIR) Hidroksiapatit dan Silika

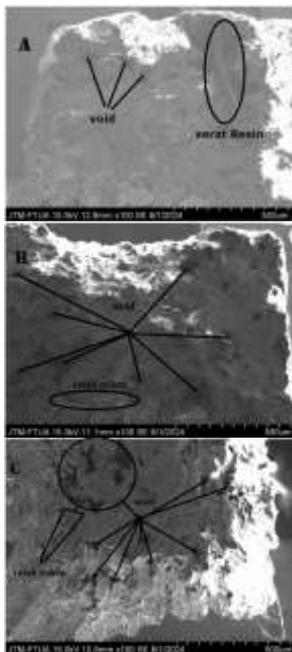
Untuk mengidentifikasi gugus fungsi tersebut, dilakukan analisis menggunakan spektroskopi FTIR. terlihat gambaran kualitas hidroksiapatit yang terbaik, serta variasi rasio yang dapat dilihat pada Gambar 8 menunjukkan spektra FTIR dari gugus-gugus fungsi yang ada. Terlihat pada gambar bahwa terdapat puncak-puncak pada bilangan gelombang (wave number) $495,20 \text{ cm}^{-1}$ dengan intensitas yang merupakan karakteristik stretching mode gugus fosfat (PO_4^{3-}) dengan intensitas Cahaya sebesar 68,17%. serapan pada bilangan gelombang $1280,05 \text{ cm}^{-1}$ dengan intensitas Cahaya sebesar 80,51% yang merupakan gugus karbonat (CO_3^{2-}) dan bilangan gelombang 3500 cm^{-1} yang merupakan gugus hidroksil (OH). dengan intensitas Cahaya sebesar 80,46% dari spektra terlihat bahwa gugus fosfat terdeteksi paling dominan. ini menunjukkan bahwa dengan hasil yang telah didapat apabila di dibandingkan dengan gelombang gugus fungsi hidroksiapatit standar mempunyai kesama walaupun masih terdapat gugus CO_3^{2-} dan OH tidak begitu jelas jumlah yang sangat kecil (trace element) ini mungkin disebabkan karna pencampuran anatar hidroksiapatit dan silika.

Analisis *Scanning Electron Microscope* (SEM) mengungkapkan bahwa struktur mikro permukaan komposit dipengaruhi oleh jumlah silika. Dengan peningkatan kandungan silika, porositas permukaan spesimen menurun. Pengurangan porositas ini dapat dikaitkan dengan efek pengisian partikel silika, yang menempati ruang antara butiran HA, yang mengarah ke struktur mikro yang lebih padat dan lebih kompak.

Berdasarkan gambar 8 diketahui bahwa komposisi silika mempengaruhi kekuatan komposit Hidroksiapatit dan Silika. Penelitian yang dilakukan oleh [20] menunjukkan bahwa sifat mekanik hidroksiapatit meningkat seiring penambahan silika. Hal ini terkait dengan penurunan porositas pada komposit HA-silika. Penurunan porositas menyebabkan partikel semakin dekat satu sama lain. Akibatnya, ketika komposit diberikan gaya tarik dari luar, kekuatannya meningkat.

Serbuk HA-Silika yang dihasilkan melalui proses pencampuran diberi kode A (70:30% berat), B

(80:20% berat), dan C (90:10% berat) pada Gambar 9 A. Komposisi dengan Silika sebesar 30% menunjukkan permukaan yang tidak rata pada HA-silika yang terbentuk setelah uji tarik. Permukaan ini memiliki retakan dan sedikit porositas dibandingkan dengan komposisi 10% dan 20%. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa uji tarik yang dilakukan bersifat getas, dan kekuatan yang dihasilkan lebih rendah daripada dua material setelahnya. Selanjutnya, melihat variasi komposisi, kita dapat menyimpulkan bahwa komposisi yang berbeda-beda mempengaruhi kekuatan tarik hidroksiapatit dan silika. Pada Gambar 9.B dan C, terlihat pengaruh komposisi silika yang menyebabkan porositas yang cukup signifikan dan tidak seragam, sehingga kekuatan tariknya rendah dibandingkan dengan komposisi 30%.



Gambar 9. Permukaan Struktur Setelah Dilakukan Uji Tarik

4. Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh variasi komposisi hidroksiapatit (HA) tulang sapi dan silika (SiO₂) terhadap sifat mekanik dan fisik bahan komposit yang dimaksudkan untuk digunakan sebagai implan tulang. Temuan menunjukkan bahwa proporsi silika secara signifikan memengaruhi kekuatan tarik dan struktur mikro komposit.

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data yang telah dilakukan terhadap serbuk hidroksiapatit tulang sapi dan silika dengan penambahan serbuk resin dan liquid resin, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

Dengan menambahkan serbuk silika sebanyak 30% berat pada material komposit hidroksiapatit tulang sapi, kekuatan tarik dapat meningkat dua kali lipat, mencapai nilai 13,07 MPa, dibandingkan dengan komposisi 80:20% berat dan 90:10% berat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi terbaik adalah 70:30% berat dengan kekuatan tarik sebesar 13,07 MPa. Semakin tinggi komposisi silika, semakin tinggi pula kekuatan tarik yang dihasilkan, hal ini menunjukkan bahwa silika bertindak sebagai bahan penguat yang efektif, yang meningkatkan sifat mekanik bahan komposit.

Penelitian ini menunjukkan bahwa komposisi HA-silika adalah kunci untuk meningkatkan sifat mekanis bahan komposit untuk implan tulang. Komposit HA-silika 70:30 muncul sebagai formulasi yang paling efektif, memberikan keseimbangan antara kekuatan dan integritas struktural. Temuan ini memberikan wawasan berharga tentang pengembangan bahan biokompatibel untuk aplikasi medis, yang berpotensi meningkatkan kualitas hidup pasien yang memerlukan penggantian atau rekonstruksi tulang.

5. Saran

Mengingat komposisi 70:30 HA-silika memberikan hasil terbaik dibandingkn denga 90:10 dan 80:20 dalam hal kekuatan tarik, disarankan untuk mempertimbangkan penggunaan komposisi ini dalam aplikasi lebih lanjut. Pengoptimalan lebih lanjut dapat dilakukan dengan mencoba variasi lebih dalam komposisi untuk melihat apakah ada peningkatan lebih lanjut dalam sifat mekanik.

Daftar Rujukan

- [1] O. Johnell and J. A. Kanis., 2006. An estimate of the worldwide prevalence and disability associated with osteoporotic fractures. *Osteoporos. Int*, 17(12), pp. 1726–1733.
- [2] T. Estiasih *et al.*, 2014. The Effect of Unsaponifiable Fraction from Palm Fatty Acid Distillate on Lipid Profile of Hypercholesterolaemia Rats. *J. Food Nutr. Res*, 2(12), pp. 1029–1036.
- [3] S. S. RAGHAVENDRA., 2017. Biocerm. *Bioceram. Endod. – a Rev*, vol. 51, pp. 128–137.
- [4] A. Szcześ, L. Hołysz, and E. Chibowski., 2017. *Synthesis of hydroxyapatite for biomedical applications*, 249(4), pp. 321–330.
- [5] J. Triyono, B. Tantomo Christiawan, and A. Masykur., 2017. Karakterisasi dan Laju Biodegradasi Biokomposit Serbuk Tulang Sapi/Shellac/Tepung Tapioka sebagai Material Pengisi Tulang. *Mek. Maj. Ilm. Mek.*, 19(1), pp. 22–28.
- [6] S. E. Cahyaningrum, N. Herdyastuty, D. Supangat, and B. Devina., 2017. Sintesis Hidroksiapatit Dari Cangkang Telur Menggunakan Metode Pengendapan Basah. *Pros. Semin. Nas. Kim. UNY*, pp. 367–370.
- [7] A. D. E. Indra, J. O. N. Affi, I. H. Mulyadi, and Y. Wiyanto., 2021. Physical and Mechanical Properties of Hydroxyapatite Ceramics With A Mixture of Micron And

- Nano-Sized Powders: Optimising the Sintering Temperatures, 65(3), pp. 224–234.
- [8] K. Dahlan and S. U. Dewi., 2013. Pengaruh sintering dan penambahan senyawa karbonat pada sintesis senyawa kalsium fosfat. *J. Pros. Semirata FMIPA Univ. Lampung*, 1(1), pp. 153–158.
- [9] M. Sadat-Shojai, M. T. Khorasani, E. Dinpanah-Khoshdargi, and A. Jamshidi., 2013. Synthesis methods for nanosized hydroxyapatite with diverse structures. *Acta Biomater.*, 9(8), pp. 7591–7621.
- [10] W. Stapleton and P. Tobin., 2009. Verification problems in reusing internal design components, *Proc. - Des. Autom. Conf.* pp. 209–211.
- [11] T. C. Wahyudi, I. Sukmana, and S. Savetlana., 2019. Potensi Pengembangan Material Implan Tulang Hidroksiapatit Berbasis Bahan Alam Lokal. *InProsiding Kolok. Tek.*, 3(1), pp. 1–5.
- [12] Burmawi, N. Jamarun, S. Arief, and Gunawarman., 2018. Analisa Kekuatan Tekan Biokomposit Hidroksiapatit Tulang Sapi-Borosilikat dengan Variasi Komposisi dan Tekanan Cetakan. *Semin. Nas. Mesin dan Ind. (SNMI XII)*, no.4, pp.26–28.
- [13] S. Kondi and S. R. Gowda., 2023. Principles of bone healing. *Surg. (United Kingdom)*, 41 (10), pp.625–631.
- [14] C. Y. Ooi, M. Hamdi, and S. Ramesh., 2007. Properties of hydroxyapatite produced by annealing of bovine bone. *Ceram. Int.*, 33 (7), pp.1171–1177.
- [15] J. K. Odusote, Y. Danyuo, A. D. Baruwa, and A. A. Azeez., 2019. Synthesis and characterization of hydroxyapatite from bovine bone for production of dental implants. *J. Appl. Biomater. Funct. Mate.*, 17 (2).
- [16] R. Paskarino and J. Affi., 2015. Mechanical Properties and Microstructure of Artificial Bone Prototype Made of Bovine Bone Powder by Mixing Method. vol. 23, pp. 16–21.
- [17] E. Bartonickova *et al.*, 2017. Porous HA/alumina composites intended for bone-tissue engineering. *Mater. Tehnol*, 51 (4), pp. 631–636.
- [18] S. Pramanik, A. K. Agarwal, K. N. Rai, and A. Garg., 2007. Development of high strength hydroxyapatite by solid-state-sintering process. *Ceram. Int.*, 33(3), pp. 419–426.
- [19] Y. Yetri, A. Indra, and J. Affi., 2024. Extraction of hydroxyapatite from bovine bones: The manufacturing development and its behavior properties towards acrylic resin / hydroxyapatite / alumina composites. *Mater. Chem. Phys.*, vol. 319, no. March, p. 129244.
- [20] Fatma, . Desnelli, F. Riyanti, M. Kamal, M. R. A. Mannan, and P. L. Hariani., 2021. Effect of Silica Addition on Mechanical Properties of Eggshell-Derived Hydroxyapatite. *Aceh Int. J. Sci. Technol*, 10 (2), pp. 129–138.