



Sintesis dan Karakterisasi *Injectable Bone Substitute* Berbasis Cangkang *Pinctada Maxima* dengan Modifikasi Konsentrasi *Polyvinyl Alcohol*

¹Awanda Oktri P.Madani, ¹Susi Rahayu, ^{2*}M. Mukaddam Alaydrus, ³Ahmad Taufik S, ³Maz Isya A.A, ²Dyah Purnaning, ¹Teguh Ardianto

¹Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mataram

²Jurusan Ilmu Kedokteran, Fakultas Ilmu Kedokteran dan Kesehatan, Universitas Mataram

³Jurusan Kedokteran Klinik, Fakultas Ilmu Kedokteran dan Kesehatan, Universitas Mataram

Email Korespondensi: mukaddam.alaydrus@staff.unram.ac.id

Article Info	Abstract
Article History Received: 27 June 2025 Revised: 20 July 2025 Published: 30 July 2025	Bone damage caused by trauma or accidents, along with the limitations of conventional treatment methods, has driven the development of more efficient bone repair strategies. Injectable Bone Substitutes (IBS) offer a minimally invasive alternative with promising clinical potential. This study aims to investigate the physical and chemical characteristics of IBS synthesized from <i>Pinctada maxima</i> shell-derived bioceramics, with modified concentrations of Polyvinyl Alcohol (PVA) as a binder component. IBS formulations were prepared by varying PVA concentrations from 0% to 12%. The resulting materials were characterized by measuring viscosity, density, injectability, and pH to evaluate their suitability as injectable Bone Substitutes. The addition of PVA significantly influenced the properties of the IBS. Viscosity values ranged from 0.03 to 99.77 dPa·s, with all formulations exhibiting injectability above 90%. The density values varied between 0.219 and 1.01 g/cm³, while pH values were close to neutral (around 6). The 10% PVA formulation exhibited the most favorable characteristics, with a viscosity of 25.80 dPa·s and injectability of 98.82%, suggesting optimal performance for physiological application. The modification of PVA concentration effectively tailors the physical properties of IBS materials. Further research is recommended to include setting time analysis and more in-depth pH and injectability studies to validate the material's potential as a biocompatible Injectable Bone Substitute.
Keywords Bioceramics; injectability; viscosity	
Informasi Artikel	Abstrak
Sejarah Artikel Diterima: 27 Juni 2025 Direvisi: 20 Juli 2025 Dipublikasi: 30 Juli 2025	Kerusakan tulang akibat trauma atau kecelakaan, serta keterbatasan metode pengobatan konvensional, telah mendorong pengembangan strategi perbaikan tulang yang lebih efisien. Injectable Bone Substitute (IBS) menawarkan alternatif yang bersifat minimal invasif dengan potensi klinis yang menjanjikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik fisik dan kimia IBS yang disintesis dari biokeramik berbasis cangkang <i>Pinctada maxima</i>, dengan modifikasi konsentrasi Polyvinyl Alcohol (PVA) sebagai komponen pengikat. Formulasi IBS dilakukan dengan memvariasikan konsentrasi PVA dari 0% hingga 12%. Material yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi melalui pengujian viskositas, densitas, injektabilitas, dan pH untuk menilai kelayakannya sebagai bahan injeksi pengganti tulang. Penambahan PVA terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat IBS. Nilai viskositas berkisar antara 0,03 hingga 99,77 dPa·s, dengan seluruh formulasi menunjukkan injektabilitas di atas 90%. Nilai densitas berada pada rentang 0,219 hingga 1,01 g/cm³, sedangkan nilai pH mendekati netral, yaitu sekitar 6. Formulasi dengan konsentrasi PVA sebesar 10% menunjukkan karakteristik paling optimal, dengan viskositas 25,80 dPa·s dan injektabilitas 98,82%, yang mengindikasikan performa terbaik untuk aplikasi fisiologis. Modifikasi konsentrasi PVA terbukti
Kata kunci Biokeramik; Injektabilitas; Viskositas	

efektif dalam menyesuaikan sifat fisik dari material IBS. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk mencakup analisis waktu pengerasan (setting time) serta kajian yang lebih mendalam terhadap parameter pH dan injektabilitas guna memvalidasi potensi IBS sebagai bahan injeksi tulang yang biokompatibel.
--

Sitasi: Madani, A. O. P., Rahayu, S., Alaydrus, M. M., Taufik S, A., Isya AA, M., Purnaning, D., & Ardianto, T. (2025). Sintesis dan Karakterisasi *Injectable Bone Substitute* Berbasis Cangkang *Pinctada Maxima* dengan Modifikasi Konsentrasi *Polyvinyl Alcohol*. *Lambda: Jurnal Ilmiah Pendidikan MIPA dan Aplikasinya*, 5(2), 585-594.

PENDAHULUAN

Kerusakan tulang akibat trauma atau kecelakaan, penyakit degeneratif, dan tumor merupakan masalah serius karena tulang berfungsi sebagai penopang dan pelindung organ-organ vital. Metode pengobatan konvensional seperti *autograft*, *allograft*, dan *xenograft* memiliki keterbatasan, termasuk risiko infeksi, reaksi penolakan imun, serta terbatasnya ketersediaan jaringan donor (Effendi et al., 2019; Rasmiyanti et al., 2022). Oleh sebab itu, dikembangkan material sintetis seperti Hidroksiapatit (HAp) yang memiliki komposisi dan sifat mirip tulang manusia serta mampu menyerap ion logam beracun (Megawati et al., 2023; Rahayu et al., 2018). Namun, pemasangan implan konvensional menjadi sulit pada area tulang yang sulit dijangkau atau memiliki bentuk tidak beraturan. Untuk mengatasi hal ini, *Injectable Bone Substitute* (IBS) diperkenalkan sebagai solusi minimal invasif yang memungkinkan injeksi material pengisi rongga secara tepat, sekaligus mendukung pertumbuhan jaringan tulang baru sesuai dengan bentuk kerusakan (Rasmiyanti et al., 2022).

Seiring berkembangnya riset di bidang material medis dan rekayasa jaringan, pengembangan IBS kini tidak hanya berfokus pada teknik aplikasinya, tetapi juga pada peningkatan kualitas material pembentuknya. Meskipun hidroksiapatit (HAp) dikenal biokompatibel, material ini masih memiliki kelemahan seperti sifat yang mudah rapuh dan proses degradasi yang lambat. Untuk mengatasi hal tersebut, HAp dikombinasikan dengan polimer agar dapat meningkatkan kemampuan injeksi, stabilitas, serta mendukung proses regenerasi tulang secara lebih optimal. Polimer yang umum digunakan dalam injeksi tulang dapat berupa natural (selulosa, alginat, gelatin, kitosan) serta polimer sintetis (PEG, PLLA, PLGA) (Arifiadi et al., 2022; Teterina et al., 2023). Kitosan (*Chitosan* (Cs)), yang merupakan turunan dari kitin (*Chitin*), adalah salah satu polimer alami yang menjanjikan untuk aplikasi pengganti tulang berkat biokompatibilitasnya yang tinggi, toksisitas rendah, serta aktivitas antibakterinya yang baik (Alaydrus et al., 2025; Firnanely et al., 2017).

Kitosan dapat dihasilkan dari limbah tulang hewan, serta cangkang hewan laut seperti kerang mutiara (*Pinctada maxima*), yang mengandung kitin hingga 69,65% (Alabaraoye et al., 2018). Dari limbah cangkang kerang mutiara tersebut, kitosan berhasil diisolasi dengan tingkat kemurnian mencapai 89,75% dan memiliki gugus fungsi yang serupa dengan komponen tulang manusia (Kurniawidi et al., 2024; Taufik et al., 2025). Namun, sebagai polimer alami, kitosan masih memiliki keterbatasan yakni masih bersifat rapuh serta mudah mengalami degradasi sehingga memerlukan bahan pengikat agar meningkatkan kestabilan strukturnya. Hal ini mendorong penggunaan kombinasi dengan polimer sintetis. Salah satu polimer sintetis yang banyak diteliti untuk aplikasi injeksi tulang adalah polivinil alkohol (PVA), karena memiliki laju degradasi yang lambat, biokompatibilitas tinggi, serta ketahanan terhadap gesekan dan keausan. Sifat hidrofilik PVA membuatnya mudah larut dalam air dan mendukung pembentukan jaringan elastis yang efektif menutup rongga tulang. Selain itu, PVA mudah diproses dan harganya relatif terjangkau, sehingga menjadi pilihan menarik dalam pengembangan injeksi tulang (Chocholata et al., 2021; Inayah et al., 2023; Warastuti, 2018).

Penelitian terdahulu telah mengkaji terkait potensi dari penggabungan material keramik dengan polimer dalam pengembangan injeksi tulang, seperti pembuatan hidrogel biokomposit PVA-HAp dikonfirmasi penambahan HAp tidak terlalu berdampak pada biodegradasi hidrogel bahkan berdampak positif bagi tubuh karena mengandung ion Ca^{2+} dalam aliran darah (Abbas et al., 2020). Dalam penelitian lain pembuatan komposit HAp/Cs/Alginat sebagai IBS didapatkan bahwa penambahan kitosan dan alginat dapat menyebabkan membesarnya ukuran pori sehingga permukaan semakin poros (Rasmiyanti et al., 2022). Penambahan PVA cenderung meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik serta mempengaruhi kompatibilitas hidrogel tulang (Warastuti, 2018). Dalam penelitian lain menyatakan penambahan PVA memberikan pengaruh memperlambat degradasi material IBS (Medrano-David et al., 2021).

Meskipun berbagai studi sebelumnya telah mengembangkan *Injectable Bone Substitute* (IBS) berbasis hidroksiapatit (HAp), kitosan (Cs), dan polivinil alkohol (PVA), sebagian besar masih berfokus pada formulasi umum tanpa mempertimbangkan potensi biomaterial lokal yang melimpah, seperti limbah cangkang *Pinctada maxima*. Padahal, cangkang kerang mutiara ini mengandung kيتين dalam jumlah tinggi dan telah terbukti mampu menghasilkan kitosan berkualitas tinggi dengan kemurnian mencapai hampir 90%. Selain itu, sebagian besar penelitian terdahulu belum mengkaji secara sistematis pengaruh variasi konsentrasi PVA terhadap karakteristik fisis dan kimia IBS, seperti viskositas, densitas, injektabilitas, dan derajat keasaman (pH), yang sangat krusial dalam menentukan performa dan kompatibilitas material saat digunakan dalam aplikasi medis. Oleh karena itu, kebaruan dalam penelitian ini terletak pada pemanfaatan limbah biogenik lokal (*Pinctada maxima*) sebagai sumber biomaterial berkelanjutan yang dikombinasikan dengan variasi konsentrasi PVA untuk menghasilkan formulasi IBS yang lebih stabil secara fisik dan kimia. Studi ini memberikan pendekatan baru dalam formulasi IBS berbasis sumber daya alam, serta menyediakan data awal yang penting untuk pengembangan material injeksi tulang yang lebih adaptif terhadap morfologi tulang yang tidak beraturan dan mendukung regenerasi jaringan secara optimal.

METODE

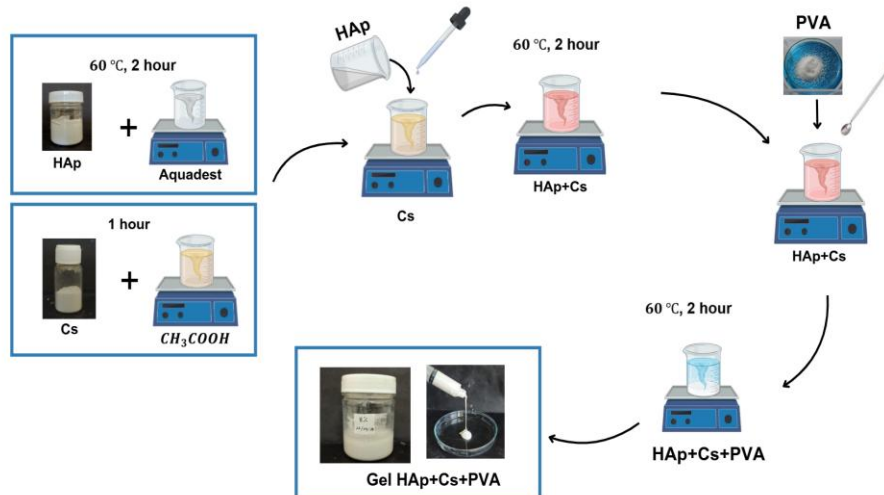
Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan berbagai peralatan dan bahan, dimulai dari tahap preparasi sampel hingga karakterisasi. Alat-alat laboratorium yang digunakan dalam penelitian ini, termasuk alat batang pengaduk, cawan petri, gelas kimia, *hot plate* (IKA-CMAG HS7, Indonesia), pipet volum, Viskometer Rotasi (NDJ-8S, Indonesia), Indikator pH stick (Dr Gray, Indonesia), Suntikan (One-Med, Indonesia), dan timbangan digital (Osuka, China). Bahan-bahan yang digunakan meliputi aquadest, asam asetat (CH_3COOH) (Riedel-de Haen, Indonesia), ekstrak Kitosan, Hidroksiapatit (HAp), dan PVA (Himedia GRM6170-500G, Indonesia).

Prosedur Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan preparasi bahan utama yaitu menyiapkan PVA, isolasi, kitosan, dan sintesis hidroksiapatit (HAp). Sintesis HAp menggunakan presipitasi (Rahayu et al., 2018) mereaksikan larutan $Ca(OH)_2$ 0,5 M dan H_3PO_4 0,3 M 80°C pH 10, dilanjutkan dengan pengeringan 100°C dan kalsinasi 900°C selama tiga jam.. Isolasi kitosan mengikuti metode (Alaydrus et al., 2025) yang terdiri dari empat tahap, yaitu demineralisasi menggunakan HCl 1 M, deproteinasi dengan NaOH 4%, dekolorisasi memakai NaOCl 0,5%, dan deasetilasi menggunakan NaOH 60% yang dipanaskan dengan microwave. Produk akhir dikeringkan pada suhu 60°C dan dihaluskan menjadi serbuk kitosan siap pakai. Setelah proses isolasi kitosan dan sintesis HAp selesai, dilanjutkan dengan pembuatan IBS. Pembuatan memodifikasi metode (Arifah & Cahyaningrum, 2017), dimulai dengan melarutkan 2% kitosan dalam asam asetat 2% pada suhu ruang selama 1 jam dengan kecepatan pengadukan 700 rpm.

Kemudian, 4% serbuk HAp dilarutkan dalam aquadest dan dihomogenkan pada suhu 60°C selama 2 jam. Larutan HAp ditetaskan secara bertahap ke dalam larutan kitosan dengan perbandingan HAp/Cs 7:3, diaduk pada suhu 60°C dengan kecepatan 700 rpm selama dua jam. Selanjutnya, serbuk PVA ditambahkan dan dihomogenkan selama 2 jam pada suhu 60°C sampai terbentuk gel HAp/Cs/PVA (IBS).



Gambar 1. Skema proses sintesis Injectable Bone Substitute (IBS) dengan variasi konsentrasi Polyvinyl Alcohol (PVA).

Analisis Data

Karakteristik sifat dari IBS meliputi pengujian viskositas, injektabilitas, densitas, dan pH. Nilai injektabilitas, diperoleh dengan menghitung menggunakan rumus dibawah:

$$\% \text{ Injektabilitas} = \frac{m_a}{m_b} \times 100\% \quad 1$$

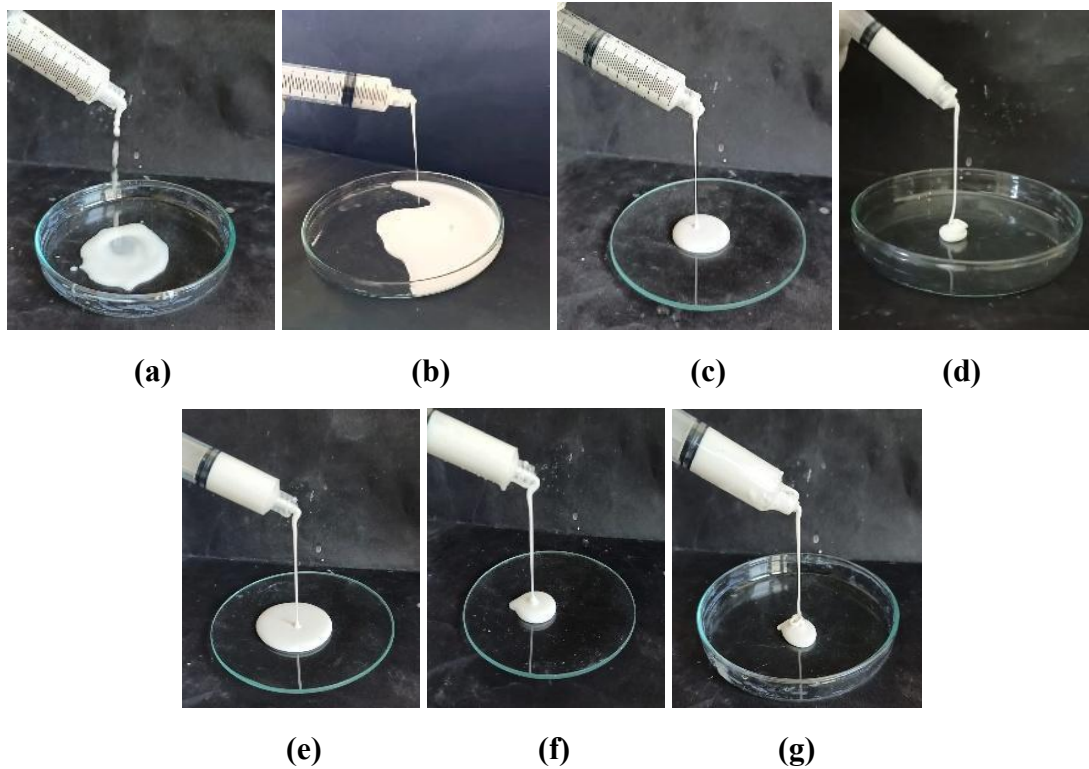
m_a adalah massa cairan setelah diinjeksikan, dan m_b adalah massa total cairan sebelum diinjeksikan (Racmawati, et al., 2019). Pengujian berikutnya adalah densitas, nilainya dihitung menggunakan rumus:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad 2$$

m adalah massa larutan (*gram*), dan V adalah volume cairan IBS (cm^3) (Aljarwi et al., 2020).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil sintesis dan karakterisasi yang telah dilakukan, formulasi gel *Injectable Bone Substitute* (IBS) berbasis cangkang *Pinctada maxima* dengan variasi konsentrasi *Polyvinyl Alcohol* (PVA) berhasil dikembangkan dan dievaluasi melalui pengujian viskositas, densitas, injektabilitas, serta pH. Penambahan PVA menunjukkan pengaruh signifikan terhadap konsistensi fisik gel dan kinerja injeksi material. Variasi konsentrasi PVA memberikan perubahan yang jelas pada parameter viskositas dan kemampuan alir material, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Hal ini mengindikasikan bahwa PVA berperan penting dalam mengatur stabilitas dan kemudahan injeksi formulasi IBS.



Gambar 2. Tampilan visual gel Injectable Bone Substitute (IBS) dengan variasi konsentrasi Polyvinyl Alcohol (PVA): a) 0%; b) 2%; c) 4%; d) 6%; e) 8%; f) 10%; dan g) 12%.

Untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif terhadap pengaruh PVA terhadap karakter fisik IBS, dilakukan analisis visual terhadap pola aliran selama proses injeksi, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2. Variasi konsentrasi PVA pada formulasi IBS (Gambar 2) menunjukkan perbedaan tekstur yang nyata selama proses injeksi. Perbedaan pola aliran pada setiap sampel mengindikasikan perubahan konsistensi, di mana pada konsentrasi 0% PVA aliran terlihat terputus-putus, mencerminkan sifat gel yang masih sangat cair, sedangkan pada konsentrasi 12% tampak aliran yang lebih kental dan stabil. Perubahan pola ini merefleksikan peningkatan viskositas dan konsistensi sistem seiring bertambahnya konsentrasi PVA. Untuk mendukung observasi visual tersebut, karakterisasi parameter fisik seperti warna, bau, viskositas, densitas, dan injektabilitas disajikan secara komprehensif dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil analisis mikro dan makro terhadap formulasi Injectable Bone Substitute (IBS) dengan variasi konsentrasi Polyvinyl Alcohol (PVA).

Parameter	Konsentrasi PVA (%)						
	0	2	4	6	8	10	12
Warna	Putih	Putih	Putih	Putih	Putih	Putih	Putih
Bau	Berbau	Berbau	Berbau	Tidak terlalu berbau	Tidak terlalu berbau	Tidak terlalu berbau	Tidak terlalu berbau
Viskositas (dPa.s)	0,03 ±0	0,129 ±0	4,99 5±0	99,77 ±0,23	72,43 ±0,31	25,80 ±0,35	70,93 ±0,98
Densitas ($\frac{gram}{cm^3}$)	1,01 ±0	0,334 ±0	0,398 ±0	0,214 ±0	0,488 ±0	0,243 ±0	0,219 ±0
Injektabilitas (%)	99,70 ±0	99,78 ±1.77	98,29 ±0,06	97,20 ±0	96,74 ±0,05	98,82 ±0	95,54 ±2.94

Penambahan PVA pada formulasi IBS tidak menunjukkan perubahan warna yang signifikan pada sampel. Seluruh sampel tetap mempertahankan warna putih, yang mengindikasikan tidak terjadinya degradasi termal maupun reaksi kimia samping selama proses sintesis. Temuan ini sejalan dengan laporan Megawati et al. (2023), yang menyatakan bahwa hidroksiapatit (HAp) murni hasil sintesis dari cangkang *Pinctada maxima* memiliki warna putih, serta didukung oleh Taufik et al. (2025), yang melaporkan bahwa kitosan murni hasil deasetilasi kitin menunjukkan warna putih hingga krem setelah proses pemurnian. Selain itu, pada sampel dengan konsentrasi PVA antara 0–4%, tercium aroma asam khas yang berasal dari sisa asam asetat. Namun, aroma tersebut cenderung menurun secara signifikan pada konsentrasi PVA $\geq 6\%$. Penurunan ini diduga terkait dengan peningkatan viskositas sistem, di mana kekentalan gel yang lebih tinggi dapat menghambat penguapan molekul volatil, serta terbentuknya matriks PVA yang mampu menahan pelepasan aroma. Fenomena ini juga mencerminkan peningkatan kohesi permukaan dan kestabilan struktur gel. Selain aroma, perubahan fisik yang paling nyata akibat penambahan PVA adalah pada viskositas, di mana nilai viskositas meningkat seiring bertambahnya konsentrasi PVA, menunjukkan pengaruh langsung polimer terhadap konsistensi dan kekentalan sistem.

Untuk memperkuat indikasi pengaruh PVA terhadap kekentalan sistem yang telah diamati secara visual dan sensorik, dilakukan pengukuran viskositas secara sistematis terhadap seluruh formulasi dengan berbagai konsentrasi PVA. Variasi konsentrasi PVA pada formulasi IBS menghasilkan perubahan viskositas yang tidak linier. Peningkatan viskositas tercatat pada kisaran konsentrasi PVA 0–6%, kemudian mengalami penurunan pada konsentrasi 8–10%, sebelum kembali meningkat pada konsentrasi 12%. Kenaikan viskositas pada konsentrasi awal diduga disebabkan oleh terbentuknya interaksi antarmolekul, khususnya ikatan hidrogen antara rantai PVA dan kitosan, yang memperkuat struktur jaringan polimer sehingga meningkatkan kekentalan sistem gel. Namun, penurunan viskositas pada konsentrasi menengah (8–10%) dapat diakibatkan oleh terbentuknya rongga udara atau ketidakseragaman dalam struktur polimer, yang mengganggu keterikatan antar molekul dan menyebabkan penurunan kekentalan (Ermawati & Adi, 2023). Berdasarkan hasil pengukuran, formulasi dengan konsentrasi PVA 10% menghasilkan viskositas sebesar 25,80 dPa·s, yang mendekati nilai viskositas ideal untuk IBS, yaitu 40 dPa·s (Firmanelty et al., 2017). Selain memengaruhi viskositas, penambahan PVA juga memberikan dampak terhadap parameter fisik lain, salah satunya densitas, yang akan dibahas lebih lanjut pada bagian berikutnya.

Penambahan PVA dalam sistem formulasi IBS berdampak pada perubahan tekstur material, di mana peningkatan konsentrasi PVA cenderung menghasilkan struktur yang lebih mengembang, berpori, dan berbusa. Karakteristik ini menyebabkan penurunan bobot jenis material, sehingga menghasilkan densitas yang lebih rendah. Fenomena tersebut turut menjelaskan mengapa nilai densitas yang diperoleh bersifat fluktuatif antar variasi konsentrasi. Meskipun demikian, seluruh sampel menunjukkan nilai densitas yang masih berada dalam kisaran densitas tulang spons manusia, yaitu antara 0,05 hingga 1,1 gram/cm³ (Effendi et al., 2019). Di antara seluruh formulasi, sampel dengan konsentrasi PVA 10% dinilai paling optimal karena mampu memberikan keseimbangan antara viskositas dan densitas, yang merupakan dua parameter utama yang memengaruhi sifat alir sistem saat proses injeksi. Oleh karena itu, pengujian terhadap injektabilitas menjadi penting untuk dilakukan, mengingat parameter ini berperan krusial dalam menentukan kinerja IBS dalam aplikasi klinis secara praktis.

Sejalan dengan pengaruh densitas dan viskositas terhadap perilaku alir material, evaluasi terhadap parameter injektabilitas menjadi langkah lanjutan yang esensial untuk menilai sejauh mana formulasi IBS mampu memenuhi kebutuhan praktis dalam aplikasi injeksi klinis. Hasil perhitungan injektabilitas pada masing-masing variasi formulasi IBS menunjukkan nilai yang tinggi, berada dalam rentang 95,54% hingga 99,78%. Secara umum,

peningkatan konsentrasi PVA cenderung meningkatkan viskositas gel, sehingga dibutuhkan gaya dorong yang lebih besar selama proses injeksi. Konsekuensinya, nilai injektabilitas mengalami penurunan, meskipun penurunan tersebut tidak berlangsung secara linier atau konsisten. Fluktuasi ini diduga dipengaruhi oleh faktor teknis, terutama ketidakkonsistenan tekanan manual yang diberikan selama pengujian injeksi. Meskipun demikian, seluruh formulasi menunjukkan tingkat injektabilitas di atas ambang batas minimal untuk aplikasi klinis, yaitu >90% (Rasmiyanti et al., 2022). Di antara seluruh variasi, formulasi dengan konsentrasi PVA sebesar 10% menunjukkan performa terbaik, dengan viskositas sebesar 25,80 dPa·s dan injektabilitas mencapai 98,82%, sehingga dapat dianggap sebagai formulasi paling optimal untuk aplikasi injeksi tulang.

Selain parameter fisik, karakteristik kimia seperti derajat keasaman (pH) turut berperan penting dalam menentukan kompatibilitas material IBS terhadap lingkungan biologis. Nilai pH yang berada dalam kisaran fisiologis sangat diperlukan untuk menghindari iritasi atau reaksi negatif pada jaringan tubuh. Oleh karena itu, pengujian pH dilakukan secara berkala setiap hari selama periode tujuh hari untuk memantau stabilitas keasaman sistem. Hasil pengujian derajat keasaman selama periode tersebut disajikan secara rinci pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian pH formulasi Injectable Bone Substitute (IBS) dengan variasi konsentrasi Polyvinyl Alcohol (PVA) selama periode 7 hari.

Konsentrasi PVA (%)	pH Hari Ke-						
	1	2	3	4	5	6	7
0	5	6	6	6	6	6	6
2	6	6	6	6	6	6	6
4	6	6	6	6	6	6	6
6	6	6	6	6	6	6	6
8	6	6	6	6	6	6	6
10	6	6	6	6	6	6	6
12	6	6	6	6	6	6	6

Seluruh formulasi IBS menunjukkan nilai pH yang berada pada rentang 6 hingga sedikit di atas 6, yang masih tergolong aman dan tidak bersifat iritatif bagi jaringan biologis. Teramati bahwa nilai pH cenderung meningkat seiring bertambahnya konsentrasi PVA, terutama pada kisaran 2% hingga 12%, di mana pada konsentrasi 12% pH cenderung stabil. Hal ini mengindikasikan bahwa PVA berperan dalam menetralkan keasaman larutan kitosan yang berasal dari pelarutan dalam asam asetat, sehingga menjaga kestabilan sistem. Stabilitas pH merupakan aspek penting dalam formulasi biomaterial, karena lingkungan yang terlalu asam dapat menyebabkan iritasi jaringan, sedangkan pH yang terlalu basa dapat menghambat pembentukan matriks ekstraseluler (Kumar & Han, 2017). Rentang pH ideal untuk formulasi IBS berkisar antara 6,8 hingga 7,4, karena pH di atas 6 telah terbukti mendukung proses ikatan dan integrasi dengan jaringan tulang (Nur Maulida et al., 2015; Rachmawati et al., 2019). Nilai pH yang diperoleh dalam penelitian ini masih berada dalam kisaran pH fisiologis yang sesuai dengan standar produk IBS komersial seperti Cerament™, yang memiliki rentang pH 6–10. Dengan demikian, seluruh formulasi IBS yang diuji menunjukkan pH yang mendekati kondisi fisiologis dan berpotensi mendukung efektivitasnya dalam aplikasi klinis sebagai bahan injeksi pengganti tulang.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mensintesis dan mengkarakterisasi formulasi Injectable Bone Substitute (IBS) berbasis cangkang *Pinctada maxima* dengan penambahan variasi konsentrasi Polyvinyl Alcohol (PVA) sebagai polimer pengikat. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa

penambahan PVA memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat fisik dan kimia formulasi, termasuk viskositas, densitas, injektabilitas, dan pH. Peningkatan konsentrasi PVA meningkatkan kekentalan dan kestabilan tekstur gel, namun juga menimbulkan variasi dalam densitas dan kemampuan injeksi. Seluruh formulasi memiliki nilai injektabilitas di atas 90%, densitas dalam rentang tulang spons manusia ($0,05\text{--}1,1\text{ g/cm}^3$), dan pH mendekati kondisi fisiologis, sehingga berpotensi aman untuk aplikasi klinis. Di antara variasi yang diuji, formulasi dengan konsentrasi PVA 10% menunjukkan performa paling optimal, dengan viskositas $25,80\text{ dPa}\cdot\text{s}$ dan injektabilitas 98,82%, mendekati spesifikasi ideal untuk material IBS. Dengan demikian, kombinasi biokeramik dan polimer ini menunjukkan potensi sebagai kandidat material injeksi tulang yang kompatibel secara biologis dan stabil secara fisik. Studi lanjutan direkomendasikan untuk mengevaluasi parameter fungsional tambahan seperti waktu pengerasan (setting time), biodegradasi, serta respons biologis in vitro maupun in vivo guna memperkuat validitas formulasi ini dalam aplikasi medis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan hasil kolaborasi riset antara FMIPA dengan FKIK Universitas Mataram. Pendanaan riset bersumber dari dana DIPA BLU Fakultas Ilmu Kedokteran dan Kesehatan No. 3546/UN18.LI/PP/2025 PNPB Universitas Mataram tahun 2025 skema Penelitian Dosen Pemula.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, B., Perkasa, D. P., Erizal, & Lukitowati, F. (2020). Preparation of bio-composite hydrogel of hydroxyapatite based using gamma irradiation for artificial bone. *Journal of Physics: Conference Series*, 1436(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012024>
- Alabaraoye, E., Achilonu, M., & Hester, R. (2018). Biopolymer (Chitin) from Various Marine Seashell Wastes: Isolation and Characterization. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(6), 2207–2218. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-1118-y>
- Alaydrus, M. M., Purnaning, D., Ansyori, M. I., & Septiani, N. (2025). *Jurnal Biologi Tropis The Study of Effectiveness of Chitosan from Pearl Oyster (Pinctada maxima) Shell as Antibacterial in Bone Scaffold Application*. 25(1), 65–71. <https://doi.org/http://doi.org/10.29303/jbt.v25i1.8135>
- Aljarwi, M. A., Pangga, D., & Ahzan, S. (2020). Uji Laju Pembakaran Dan Nilai Kalor Briket Wafer Sekam Padi Dengan Variasi Tekanan. *ORBITA: Jurnal Kajian, Inovasi Dan Aplikasi Pendidikan Fisika*, 6(2), 200. <https://doi.org/10.31764/orbita.v6i2.2645>
- Arifah, S. L., & Cahyaningrum, S. E. (2017). Sintesis Dan Karakterisasi Komposit Hidroksiapatit-Kitosan-Kolagen Sebagai Biomaterial Bone Graft. *UNESA Journal of Chemistry*, 6(2), 94–99.
- Arifiadi, F., Wahyudi, K., Manullang, R. J., Nurhidayati, & Novianti, H. R. (2022). Sintesis dan Karakterisasi Hidroksiapatit-Gibsit. *Jurnal Keramik Dan Gelas Indonesia*, 30(2), 78–89. <https://media.neliti.com/media/publications/453221-synthesis-and-characterization-of-hydrox-85b5f4ed.pdf>
- Bonesupport AB. (2025). CERAMENT™ Bone Void Filler – Product datasheet. Retrieved June 24, 2025, from www.bonesupport.com
- Charron, P. N., Braddish, T. A., & Oldinski, R. A. (2019). PVA-gelatin hydrogels formed using combined theta-gel and cryo-gel fabrication techniques. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 92(October 2018), 90–96. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.01.002>
- Chen, Y., Zhang, F., Fu, Q., Liu, Y., Wang, Z., & Qi, N. (2016). In vitro proliferation and osteogenic differentiation of human dental pulp stem cells in injectable thermo-sensitive

- chitosan/ β -glycerophosphate/hydroxyapatite hydrogel. *Journal of Biomaterials Applications*, 31(3), 317–327. <https://doi.org/10.1177/0885328216661566>
- Chocholata, P., Kulda, V., Dvorakova, J., Supova, M., Zaloudkova, M., & Babuska, V. (2021). In situ hydroxyapatite synthesis enhances biocompatibility of pva/ha hydrogels. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(17). <https://doi.org/10.3390/ijms22179335>
- Effendi, M. D., Suhendar, N., Material-bppt, P. T., & Puspipstek, K. (2019). *Pengaruh Rasio Ha / TCP terhadap Karakteristik Komposit BCP-Gelatin-CMC sebagai Bahan Injectable Bone Substitute. I*, 15–20.
- Ermawati, D. E., & Adi, L. P. (2023). Pengaruh Konsentrasi Polivinil Alkohol terhadap Sifat Fisik dan Kimia Sediaan Peel-off Mask Ekstrak Etanol Kayu Secang (*Caesalpinia sappan* L.). *Journal of Applied Agriculture, Health, and Technology*, 2(1), 43–53. <https://doi.org/10.20961/jaht.v2i1.638>
- Firnanelty, Sugiarti, S., & Charlena. (2017). Synthesis of HAp-chitosan-PVA composite as injectable bone substitute material. *Rasayan Journal of Chemistry*, 10(2), 570–576. <https://doi.org/10.7324/RJC.2017.1021465>
- Inayah, Y., Anggraeni, A. S. P., & Karisma, A. D. (2023). Pembuatan Biokompatibel Komposit dari Nano Hidroksiapatit Berbahan Dasar Cangkang Keong Sawah (*Pila ampullacea*) dengan Kombinasi Biopolimer PVA (Polyvinyl Alcohol) sebagai Bahan Dasar Pembuatan Suture Anchor. *Jurnal Teknologi*, 11(1), 58–66. <https://doi.org/10.31479/jtek.v11i1.278>
- Kumar, A., & Han, S. S. (2017). PVA-based hydrogels for tissue engineering: A review. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 66(4), 159–182. <https://doi.org/10.1080/00914037.2016.1190930>
- Kurniawidi, D. W., Alawiyah, G., Rahayu, S., Masrurroh, Wirawan, R., Destrianingtyas, A. S., Septiani, N., Ardianto, T., & Illahi, R. R. (2024). Modification of Chitosan Isolation Method from Pearl Oyster Shell (*Pinctada maxima* sp) as A Source of Natural Polymer. *Journal of Physics: Conference Series*, 2866(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2866/1/012015>
- Medrano-David, D., Lopera, A. M., Londoño, M. E., & Araque-Marín, P. (2021). Formulation and characterization of a new injectable bone substitute composed pva/borax/caco3 and demineralized bone matrix. *Journal of Functional Biomaterials*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/jfb12030046>
- Megawati, M., Patty, D. J., & Yusuf, Y. (2023). Synthesis and Characterization of Carbonate Hydroxyapatite from *Pinctada Maxima* Shell with Short Aging Time for Bone Biomaterial Candidate. *Engineering Chemistry*, 3, 13–18. <https://doi.org/10.4028/p-08k84g>
- Nur Maulida, H., Hikmawati, D., & Budiatin, A. S. (2015). Injectable Bone Substitute Paste Based on Hydroxyapatite, Gelatin and Streptomycin for Spinal Tuberculosis. *Journal of Spine*, 04(06), 56–66. <https://doi.org/10.4172/2165-7939.1000266>
- Rachmawati, S. A., Hikmawati, D., Budiatin, A. S., & Putra, A. P. (2019). Physicochemical and cytotoxicity characterization of injectable bone substitute based on hydroxyapatite-chitosan-streptomycin for spinal tuberculosis cases. *Materials Science Forum*, 966 MSF, 133–138. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.966.133>
- Rahayu, S., Kurniawidi, D. W., & Gani, A. (2018). Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Mutiara (*Pinctada Maxima*) Sebagai Sumber Hidroksiapatit. *Jurnal Pendidikan Fisika Dan Teknologi*, 4(2), 226–231. <https://doi.org/10.29303/jpft.v4i2.839>
- Rasmiyanti, Amalia, V., & Setiadji, S. (2022). Sintesis dan Karakterisasi Komposit Hidroksiapatit/Kitosan/Alginat sebagai Injectable Bone Substitute. *Seminar Nasional*

- Kimia* 2022, 15, 82–90.
- Rizkayanti, Y., & Yusuf, Y. (2019). Optimization of the temperature synthesis of hydroxyapatite from Indonesian crab shells. *International Journal of Nanoelectronics and Materials*, 12(1), 85–92.
- Taufik, A., Alawiyah, G., Rahayu, S., Kurniawidi, D. W., Triyana, D., Purnaning, D., & Amin, M. (2025). Isolation of Chitosan Biopolymer from Nacre (*Pinctada maxima*) as Bone Scaffold Candidate Isolasi Biopolimer Kitosan dari Nacre (*Pinctada maxima*) sebagai Kandidat Scaffold Tulang. 12(1), 20–26.
- Teterina, A. Y., Minaychev, V. V., Smirnova, P. V., Kobiakova, M. I., Smirnov, I. V., Fadeev, R. S., Egorov, A. A., Ashmarin, A. A., Pyatina, K. V., Senotov, A. S., Fadeeva, I. S., & Komlev, V. S. (2023). Injectable Hydrated Calcium Phosphate Bone-like Paste: Synthesis, In Vitro, and In Vivo Biocompatibility Assessment. *Technologies*, 11(3), 1–17. <https://doi.org/10.3390/technologies11030077>
- Warastuti, Y. (2018). Preparation and Characterization of Polyvinyl Alcohol-Nano Hydroxyapatite using Gamma Irradiation Technique for Biomaterial. *Jurnal Keramik Dan Gelas Indonesia*, 27(1), 51. <https://doi.org/10.32537/jkgi.v27i1.4064>