

## **SIMULASI INTERAKTIF SCAFFOLD CHT-HA-LA-MDo BERBASIS MATLAB BERDASARKAN DATA EKSPERIMEN**

***Mira Setiana dan Bangkit Ina Ferawati***

*Program Studi Teknik Biomedis, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas PGRI Yogyakarta, Jalan IKIP PGRI  
I No. 117, Kabupaten Bantul, D.I Yogyakarta, 55182, Indonesia  
E-mail: mirasetiana@upy.ac.id*

### **Abstrak**

*Scaffold berbasis biopolimer banyak digunakan dalam rekayasa jaringan karena kemampuannya dalam mendukung pertumbuhan sel serta memiliki sifat biodegradabel dan biokompatibel. Salah satu kombinasi material yang menjanjikan adalah Chitosan (CHT) dan Hyaluronic Acid (HA), dengan penambahan Oxidized Maltodextrin (MDo) sebagai agen pengikat silang untuk meningkatkan kestabilan dan kekuatan mekanik scaffold. Dalam formulasi ini, Lactic Acid (LA) digunakan sebagai pelarut dengan konsentrasi tetap sebesar 1% untuk membantu proses protonasi chitosan dan menjaga homogenitas larutan. Penelitian ini mengembangkan simulasi interaktif berbasis MATLAB App Designer dengan pendekatan data-driven untuk memvisualisasikan struktur pori scaffold berdasarkan data eksperimen yang tersedia. Parameter ukuran pori ditentukan dari nilai diameter rata-rata dan standar deviasi pada beberapa kombinasi komposisi HA dan MDo. Distribusi ukuran pori dimodelkan menggunakan distribusi normal untuk menghasilkan variasi diameter pori secara statistik. Simulasi menghasilkan visualisasi tiga dimensi struktur pori berbasis geometri bola serta histogram distribusi ukuran pori yang menggambarkan persebaran diameter pori. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu merepresentasikan karakteristik ukuran pori dari data eksperimen dalam bentuk visual yang interaktif dan informatif. Fitur tambahan seperti ekspor ke Excel dan PDF disediakan untuk mendukung dokumentasi hasil secara otomatis. Aplikasi ini berpotensi sebagai alat bantu visualisasi dan edukasi dalam memahami morfologi scaffold biomaterial berbasis data eksperimen..*

**Kata kunci:** *Scaffold biopolimer; analisis ukuran pori; simulasi interaktif; MATLAB App Designer*

### **Abstract**

**[Title: MATLAB-Based Interactive Simulation of Chitosan–HA–MDo Scaffold Validated by Experimental Data]** *Biopolymer-based scaffolds are widely used in tissue engineering due to their ability to support cell growth as well as their biodegradability and biocompatibility. One promising material combination is Chitosan (CHT) and Hyaluronic Acid (HA), with the addition of Oxidized Maltodextrin (MDo) as a crosslinking agent to enhance scaffold stability and mechanical strength. In this formulation, Lactic Acid (LA) is used as a solvent at a fixed concentration of 1% to facilitate chitosan protonation and maintain solution homogeneity. This study develops an interactive simulation based on MATLAB App Designer using a data-driven approach to visualize scaffold pore structures based on available experimental data. Pore size parameters are determined from the average diameter and standard deviation obtained from several HA and MDo composition combinations. The pore size distribution is modeled using a normal distribution to generate statistical variation in pore diameters. The simulation produces a three-dimensional visualization of pore structures using a sphere-based geometric representation, along with a histogram of pore size distribution to illustrate the variation in pore diameters. The results show that the system is capable of representing the pore characteristics derived from experimental data in an interactive and informative visual form. Additional features, such as export to Excel and PDF, are provided to support automatic documentation of simulation results. This application has the potential to serve as a visualization and educational tool for understanding scaffold morphology based on experimental data.*

**Keywords:** *Biopolymer scaffold; pore size analysis; interactive simulation; MATLAB App Designer*

## PENDAHULUAN

Rekayasa jaringan menjadi bidang sangat penting dalam pengembangan solusi medis untuk menggantikan atau memperbaiki jaringan tubuh yang rusak. *Scaffold* berpori merupakan kerangka tiga dimensi yang mendukung proliferasi, migrasi, dan diferensiasi sel dalam lingkungan mikro yang terkontrol[1]. Karakteristik *scaffold* seperti ukuran pori, distribusi pori, dan interkonektivitas pori secara langsung memengaruhi difusi oksigen, transport nutrisi, migrasi sel, vaskularisasi, serta integrasi jaringan baru[2,3].

Material sintesis menawarkan keunggulan dalam kestabilan mekanik dan kontrol struktur, namun sering kali memiliki keterbatasan dalam biokompatibilitas dan degradasi yang sesuai dengan lingkungan biologis[4]. Bahan alami seperti *Chitosan* (CHT) dan *Hyaluronic Acid* (HA) menjadi alternatif yang menarik karena sifat biodegradabel, afinitas seluler, dan kemampuan biomimetik terhadap matriks ekstraseluler[5,6]. Penggabungan CHT dengan HA telah dilaporkan meningkatkan bioaktivitas *scaffold* serta mendukung proliferasi dan diferensiasi sel, terutama dalam aplikasi rekonstruksi tulang rawan[7]. Untuk memperkuat sifat mekanik serta menyesuaikan ukuran dan morfologi pori *scaffold*, digunakan agen pengikat silang (*crosslinker*) seperti *Oxidized Maltodextrin* (MDo). Proses pengikatan silang (*crosslinking*) menggunakan MDo pada *scaffold* CHT–HA yang melalui proses *freeze-drying* menghasilkan struktur pori yang lebih sponjiosa, peningkatan kekakuan, serta perlambatan laju degradasi di lingkungan fisiologis[8]. *Lactic Acid* (LA) digunakan sebagai komponen pelarut yang membantu proses protonasi gugus amina pada CHT, menjaga homogenitas larutan, serta mendukung pembentukan struktur berpori yang stabil tanpa memengaruhi sifat mekanik utama *scaffold*.

Karakterisasi eksperimental seperti SEM, mikro-CT, dan analisis distribusi ukuran pori tetap menjadi standar verifikasi *scaffold*, tetapi eksperimen tersebut memerlukan waktu, sumber daya, dan biaya yang signifikan[9,10]. Oleh karena itu, simulasi komputasi dan perangkat lunak interaktif yang memungkinkan visualisasi tiga dimensi serta analisis kuantitatif berdasarkan parameter formulasi (misalnya konsentrasi HA dan MDo) sangat dibutuhkan

untuk meningkatkan efisiensi dalam desain *scaffold*[11,12].

Beberapa studi telah mengeksplorasi formulasi *scaffold* CHT–HA dan sistem berbasis *maltodextrin*, namun platform interaktif yang memungkinkan eksplorasi langsung berbasis data eksperimen seperti visualisasi 3D, histogram distribusi ukuran pori, serta ekspor hasil masih terbatas.

Integrasi antarmuka pengguna seperti *MATLAB App Designer* dapat menjembatani celah antara eksperimen laboratorium dan representasi digital, serta mendukung pemahaman yang lebih intuitif terhadap struktur *scaffold*[13]. *MATLAB App Designer* dipilih sebagai platform pengembangan karena kemampuannya dalam mengintegrasikan komputasi numerik dan visualisasi interaktif secara langsung dalam satu lingkungan. Hal ini memungkinkan proses pengolahan data, pemodelan, dan visualisasi tiga dimensi dilakukan secara terpadu tanpa memerlukan integrasi tambahan dengan perangkat lunak lain. Dibandingkan dengan platform berbasis web seperti *Python Dash* atau *R Shiny* yang umumnya memerlukan konfigurasi tambahan untuk visualisasi tiga dimensi dan integrasi komputasi numerik, *MATLAB* menawarkan pendekatan yang lebih sederhana dan efisien untuk pengembangan *prototipe* simulasi berbasis sains dan rekayasa. Berdasarkan *gap* tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan aplikasi simulasi interaktif berbasis *MATLAB App Designer* untuk memodelkan struktur pori *scaffold* CHT–HA–MDo, mencakup visualisasi tiga dimensi dan analisis distribusi ukuran pori, serta merepresentasikan data eksperimen dalam bentuk visual interaktif untuk mendukung eksplorasi hubungan antara komposisi bahan dan morfologi pori.

## METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi interaktif untuk memvisualisasikan struktur pori *scaffold* berbasis CHT, HA, LA, dan MDo. Komposisi CHT dan LA ditetapkan konstan masing-masing sebesar 5% dan 1%, sedangkan HA dan MDo digunakan sebagai parameter variabel yang dapat diubah oleh pengguna melalui antarmuka aplikasi. Simulasi dikembangkan menggunakan *MATLAB App Designer* yang dijalankan pada platform *MATLAB Online*. Pendekatan ini

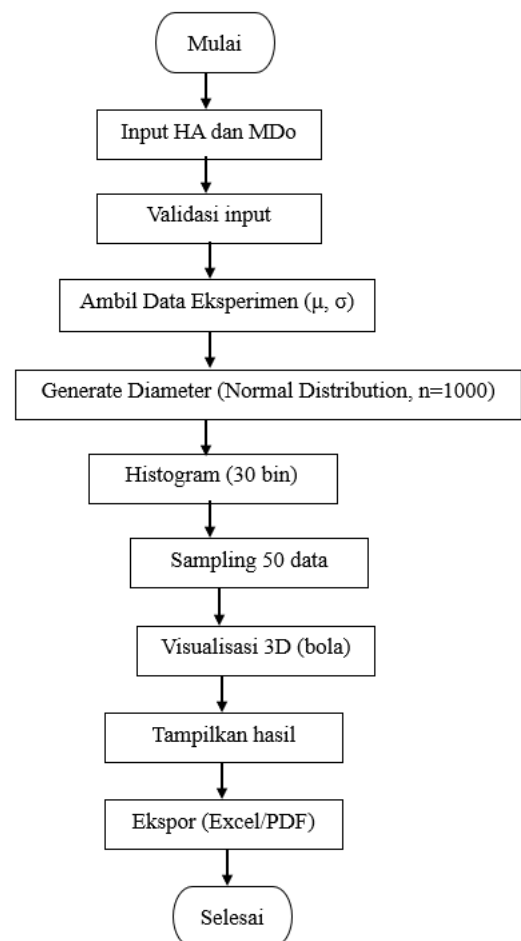
memungkinkan integrasi antara antarmuka pengguna, komputasi numerik, dan visualisasi tiga dimensi dalam satu lingkungan berbasis web. Model simulasi yang digunakan bersifat *data-driven*, yaitu menggunakan data eksperimen yang telah dipublikasikan sebagai basis utama dalam menentukan parameter ukuran pori *scaffold*. Nilai diameter pori rata-rata dan standar deviasi ditetapkan berdasarkan kombinasi komposisi HA dan MDo yang tersedia dalam data eksperimen, yaitu empat kondisi diskrit: (HA = 0; MDo = 0), (HA = 1; MDo = 0), (HA = 0; MDo = 0.4), dan (HA = 1; MDo = 0.4). Dengan demikian, simulasi tidak melakukan prediksi nilai baru, melainkan merepresentasikan data eksperimen dalam bentuk visual interaktif.

Distribusi ukuran pori dalam simulasi dimodelkan menggunakan distribusi normal (*Gaussian*). Secara matematis, nilai diameter pori dibangkitkan menggunakan persamaan:  $x = \mu + \sigma Z$  (1) di mana  $x$  adalah diameter pori yang dihasilkan,  $\mu$  merupakan diameter rata-rata,  $\sigma$  adalah standar deviasi yang diperoleh dari data eksperimen, dan  $Z$  adalah bilangan acak berdistribusi normal. Dalam implementasinya, sebanyak 1000 data diameter pori dibangkitkan untuk setiap kombinasi parameter guna merepresentasikan variasi ukuran pori secara statistik.

Struktur pori *scaffold* divisualisasikan menggunakan pendekatan geometri berupa bola tiga dimensi (3D) untuk merepresentasikan pori. Sebanyak 50 sampel diameter pori dipilih secara acak dari distribusi yang dihasilkan untuk divisualisasikan dalam ruang tiga dimensi. Ukuran radius bola dinormalisasi terhadap diameter maksimum agar proporsi visual tetap terjaga, sedangkan posisi pusat bola ditentukan secara acak menggunakan distribusi uniform untuk mencerminkan penyebaran pori yang tidak teratur. Visualisasi dilakukan menggunakan fungsi grafika tiga dimensi pada MATLAB dengan pengaturan transparansi untuk memperlihatkan interkoneksi antar pori. Distribusi ukuran pori dianalisis menggunakan histogram dengan jumlah kelas (*bin*) sebanyak 30 kelas. Histogram ini menggambarkan frekuensi kemunculan diameter pori berdasarkan data hasil simulasi, serta dilengkapi dengan penanda nilai rata-rata untuk memudahkan interpretasi.

Aplikasi yang dikembangkan dilengkapi dengan fitur interaktif berupa input parameter HA dan MDo, visualisasi struktur pori dalam bentuk tiga dimensi, analisis distribusi ukuran pori, serta ekspor hasil dalam format Excel dan PDF untuk keperluan dokumentasi. Pengujian sistem dilakukan secara fungsional untuk memastikan bahwa setiap komponen aplikasi berjalan sesuai dengan rancangan. Pengujian mencakup verifikasi input parameter, kesesuaian keluaran visual dengan parameter yang diberikan, serta keberhasilan proses ekspor data.

Alur kerja sistem simulasi yang dikembangkan dalam penelitian ini disajikan dalam bentuk diagram alir pada gambar berikut:



Gambar 1. Alur kerja sistem simulasi

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan aplikasi simulasi interaktif *scaffold* berbasis CHT–HA–MDo–LA menggunakan MATLAB *App Designer* yang mampu memvisualisasikan struktur pori secara tiga dimensi serta menampilkan distribusi ukuran pori secara

kuantitatif. Aplikasi ini dirancang untuk memfasilitasi eksplorasi parameter komposisi *scaffold* secara intuitif melalui antarmuka berbasis grafis.

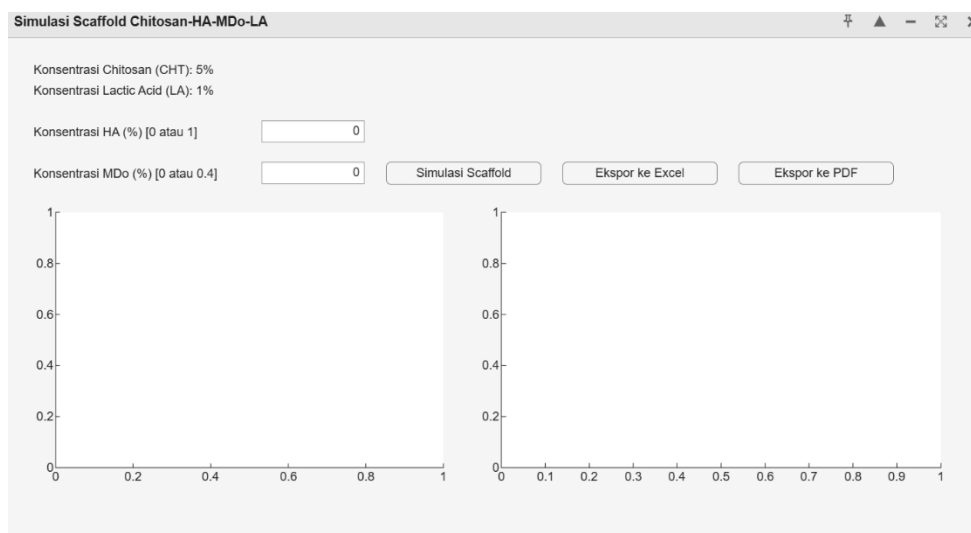
Antarmuka aplikasi simulasi yang dikembangkan ditampilkan pada Gambar 2. Antarmuka aplikasi terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu panel input untuk parameter HA dan MDo, area visualisasi struktur pori tiga dimensi, serta grafik histogram distribusi ukuran pori. Selain itu, aplikasi juga dilengkapi dengan fitur ekspor data ke dalam format Excel dan PDF untuk mendukung dokumentasi hasil simulasi. Data eksperimen ukuran pori *scaffold* yang digunakan sebagai dasar simulasi ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ukuran pori scaffold berdasarkan data eksperimen[14]

Sampel	Ukuran Pori ( $\mu\text{m}$ )
CHT	182,7 $\pm$ 44,1
CHT:HA	190,5 $\pm$ 71
CHT:MDo	215,0 $\pm$ 93,5
CHT:HA:MDo	204,0 $\pm$ 67

Tabel 1 menunjukkan nilai rata-rata diameter pori dan standar deviasi untuk setiap formulasi *scaffold*, yaitu CHT, CHT–HA, CHT–MDo, dan CHT–HA–MDo. Terlihat bahwa masing-masing formulasi memiliki variasi ukuran pori yang cukup besar, yang ditunjukkan oleh nilai standar deviasi yang relatif tinggi. Variasi ini menunjukkan bahwa struktur pori *scaffold* bersifat heterogen. Oleh karena itu, parameter rata-rata dan standar deviasi pada tabel tersebut digunakan sebagai dasar dalam pembangkitan distribusi ukuran pori pada simulasi.

Distribusi ukuran pori dalam simulasi dibangkitkan menggunakan pendekatan distribusi normal dengan parameter rata-rata dan standar deviasi yang diambil langsung dari data eksperimen. Sebanyak 1000 data diameter pori dihasilkan untuk setiap kombinasi parameter, sehingga memungkinkan representasi variasi ukuran pori secara statistik. Histogram distribusi yang dihasilkan menggunakan 30 kelas (bin) menunjukkan pola distribusi yang terpusat di sekitar nilai rata-rata, dengan sebaran yang mengikuti karakteristik data eksperimen.



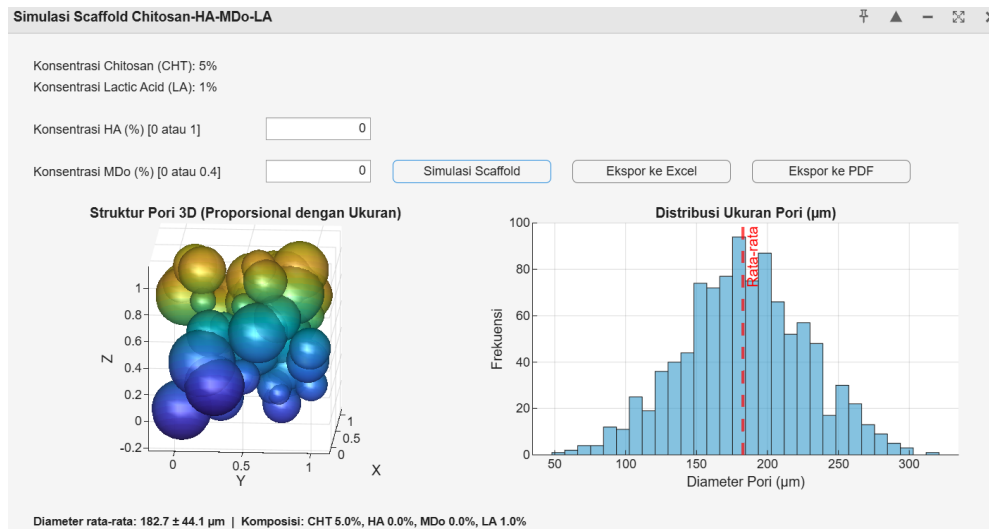
Gambar 2. Tampilan antarmuka utama aplikasi simulasi *scaffold* CHT–HA–LA–Mdo

Contoh hasil visualisasi struktur pori dan distribusi ukuran pori ditunjukkan pada Gambar 3. Visualisasi struktur pori ditampilkan dalam bentuk representasi geometri tiga dimensi berupa bola-bola yang saling beririsan. Sebanyak 50 sampel diameter pori dipilih secara acak dari distribusi untuk divisualisasikan dalam ruang tiga dimensi. Ukuran bola dinormalisasi terhadap diameter maksimum untuk menjaga proporsi visual,

sedangkan posisi pusat bola ditentukan secara acak untuk mencerminkan distribusi pori yang tidak teratur. Warna bola yang digunakan bersifat visualisasi semata dan tidak merepresentasikan parameter fisik tertentu. Simulasi dilakukan pada seluruh kombinasi komposisi yang tersedia dalam data eksperimen, yaitu CHT, CHT–HA, CHT–MDo, dan CHT–HA–MDo. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai rata-rata dan sebaran

distribusi ukuran pori yang dihasilkan konsisten dengan parameter statistik dari masing-masing data eksperimen. Sebagai contoh, pada formulasi CHT–HA–MDo (HA = 1%, MDo =

0.4%), simulasi menghasilkan distribusi diameter pori dengan rata-rata sekitar 204  $\mu\text{m}$  dan sebaran yang sesuai dengan standar deviasi data eksperimen.



Gambar 3. Visualisasi tiga dimensi struktur pori scaffold dan histogram distribusi ukuran pori

Perlu ditekankan bahwa simulasi ini tidak bertujuan untuk memprediksi nilai ukuran pori baru, melainkan untuk merepresentasikan distribusi ukuran pori berdasarkan data eksperimen. Oleh karena itu, analisis error seperti RMSE atau koefisien determinasi tidak diterapkan dalam penelitian ini. Pendekatan ini berbeda dengan model prediktif, karena fokus utama sistem adalah pada visualisasi dan eksplorasi parameter berbasis data yang telah tersedia. Dibandingkan dengan pendekatan deterministik yang hanya menampilkan nilai rata-rata, simulasi ini memiliki keunggulan dalam merepresentasikan variabilitas ukuran pori melalui penggunaan distribusi normal. Hal ini penting mengingat data eksperimen menunjukkan standar deviasi yang cukup besar, sehingga representasi distribusi menjadi lebih relevan dibandingkan hanya nilai rata-rata.

Secara konseptual, variasi komposisi HA dan MDo berkaitan dengan perubahan morfologi pori *scaffold*. Berdasarkan literatur, peningkatan HA cenderung menghasilkan pori yang lebih besar akibat meningkatnya viskositas larutan yang memperlambat pemisahan fase, sedangkan penambahan MDo sebagai agen pengikat silang dapat menghasilkan struktur yang lebih padat melalui pembentukan ikatan *Schiff base*. Dalam simulasi ini, kecenderungan tersebut

direpresentasikan melalui perubahan parameter statistik yang digunakan sebagai input.

Konsentrasi LA dalam penelitian ini ditetapkan konstan sebesar 1% dan tidak divariasikan, sehingga tidak dimasukkan sebagai parameter dalam simulasi. Peran LA difokuskan sebagai pelarut dalam proses formulasi *scaffold* dan tidak secara langsung dimodelkan dalam pembentukan distribusi ukuran pori. Selain sebagai alat visualisasi, aplikasi ini juga memiliki potensi sebagai media pembelajaran dan eksplorasi awal dalam memahami hubungan antara komposisi bahan dan karakteristik morfologi *scaffold*. Pengguna dapat mengamati perubahan distribusi ukuran pori dan struktur visual secara interaktif tanpa melakukan eksperimen fisik.

Meskipun demikian, model yang digunakan masih memiliki keterbatasan, yaitu penggunaan representasi geometri sederhana berupa bola tiga dimensi yang belum sepenuhnya merepresentasikan kompleksitas struktur pori sebenarnya. Selain itu, simulasi ini belum mengintegrasikan parameter mekanik maupun biologis seperti kekuatan mekanik atau laju degradasi *scaffold*. Oleh karena itu, pengembangan selanjutnya dapat diarahkan pada integrasi parameter multiparametrik dan pendekatan pemodelan yang lebih kompleks.

## SIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan aplikasi simulasi interaktif berbasis MATLAB App Designer untuk memvisualisasikan struktur pori scaffold CHT–HA–MDo–LA secara tiga dimensi dan menganalisis distribusi ukuran pori secara kuantitatif. Aplikasi yang dikembangkan mampu menampilkan representasi morfologi pori berdasarkan data eksperimen dalam bentuk visualisasi 3D dan histogram distribusi ukuran pori. Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi ukuran pori yang dihasilkan merepresentasikan karakteristik data eksperimen, dengan contoh pada formulasi CHT–HA–MDo (HA = 1% dan MDo = 0.4%) diperoleh ukuran pori rata-rata sekitar 204  $\mu\text{m}$  dengan sebaran yang sesuai dengan data referensi. Secara konseptual, peningkatan konsentrasi HA cenderung menghasilkan ukuran pori yang lebih besar, sedangkan penambahan MDo sebagai agen pengikat silang menghasilkan struktur yang lebih padat. Dengan demikian, aplikasi ini dapat digunakan sebagai alat bantu visualisasi dan eksplorasi awal dalam memahami hubungan antara komposisi bahan dan karakteristik morfologi scaffold berbasis data eksperimen..

## UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Universitas PGRI Yogyakarta, khususnya Laboratorium Big Data, atas dukungan sarana komputasi dan jaringan internet yang memungkinkan terselenggaranya pengembangan aplikasi serta analisis data dalam penelitian ini. Selain itu, penulis juga mengapresiasi ketersediaan data eksperimen dari publikasi sebelumnya (Hamidi, 2025) yang digunakan sebagai dasar dalam pengembangan model simulasi pada penelitian ini. Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal.

## DAFTAR PUSTAKA

- 1 Habiburrohman MR, Jamilludin MA, Cahyati N, Herdianto N, Yusuf Y. 2025. Fabrication and *in vitro* cytocompatibility evaluation of porous bone scaffold based on cuttlefish bone-derived nano-carbonated hydroxyapatite reinforced with polyethylene oxide/chitosan fibrous structure. RSC Adv. **15**(7): 5135.
- 2 Abdian N, Soltani Zangbar H, Etminanfar M, Hamishehkar H. 2024. 3D chitosan/hydroxyapatite scaffolds containing mesoporous SiO<sub>2</sub>-HA particles: A new step to healing bone defects. Int. J. Biol. Macromol. **278**: 135014.
- 3 Krishna VS et al. 2024. Role of crosslinkers in advancing chitosan-based biocomposite scaffolds for bone tissue engineering: A comprehensive review. Int. J. Biol. Macromol. **283**: 137625.
- 4 Lopes R, Gordo PM, Costa BFO, Alves P. 2024. Formulation and Characterization of Chitosan-Based Mixed-Matrix Scaffold for Tissue Engineering. Macromol. **4**(2): 253.
- 5 Harini G, Bharathi R, Sankaranarayanan A, Shanmugavadivu A, Selvamurugan N. 2023. Nanoceramics-reinforced chitosan scaffolds in bone tissue engineering. Mater. Adv. **4**(18): 3907.
- 6 Zhang Z, Shang W, Lin L. 2025. Hydroxyapatite Chitosan Gradient Pore Scaffold Activates Oxidative Phosphorylation Pathway to Induce Bone Formation. Frontiers in Bioscience-Landmark. **30**(1)
- 7 Zhou Y, Pereira G, Tang Y, James M, Zhang M. 2023. 3D Porous Scaffold-Based High-Throughput Platform for Cancer Drug Screening. Pharmaceutics. **15**(6): 1691.
- 8 Fernández-Solís KG et al. 2024. Synthesis, characterization and stability of crosslinked chitosan-maltodextrin pH-sensitive nanogels. Int. J. Biol. Macromol. **274**: 133277.
- 9 Sularsih S. 2020. The pore size of chitosan-Aloe vera scaffold and its effect on VEGF expressions and woven alveolar bone healing of tooth extraction of Cavia cobaya. Dent. J. **53**(3): 115.
- 10 Afzali M, Esfandiaribayat N, Boateng J. 2025. Medicated and multifunctional composite alginate-collagen-hyaluronate based scaffolds prepared using two different crosslinking approaches show potential for healing of chronic wounds. Drug Deliv. Transl. Res. **15**(7): 2483.
- 11 Sudarta AA, Sari PAP, Halim TC, Setiawati A. 2024. Advances of Chitosan-based Hydrogel Scaffolds for

- Cartilage Tissue Engineering: Preparation, Modification, and Future Perspective. *Trends in Sciences*. **21**(10): 8208.
- 12 Michael Josef Kridanto Kamadjaja, Chandrasasi Berlian Pratiwi, Elmira Zuhuro Putri Afandi, Shima Ayu Nourma Kholifah. 2024. Secretion of osteocalcin in chitosan–hydroxyapatite scaffold with seeding of cryopreserved human adipose derived mesenchymal stem cells. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. **23**(2): 297.
- 13 Patole V, Kavitkar G, Ingavle G, Behere I, Wavhale R, Jha A, Deshkar S, Sanap A, Sakpal P. 2025. Calcium phosphate reinforced chitosan–carrageenan scaffolds: characterization and *in vitro* assessment for wound healing. *RSC Pharmaceutics*. **2**(4): 772.
- 14 Hamidi S, Maton M, Hildebrand F, Gaucher V, Bossard C, Cazaux F, Staelens JN, Blanchemain N, Martel B. 2025. Design and Evaluation of a Crosslinked Chitosan-Based Scaffold Containing Hyaluronic Acid for Articular Cartilage Reconstruction. *Molecules* 2025, Vol. 30, Page 2202. **30**(10): 2202.