

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Kerusakan jaringan tulang masih menjadi salah satu permasalahan serius dalam dunia kesehatan global, baik yang disebabkan oleh trauma fisik, infeksi, reseksi tumor, maupun penyakit degeneratif seperti osteoporosis (Xue *dkk.*, 2022). Osteoporosis secara spesifik menyebabkan penurunan densitas serta kerusakan mikroarsitektur tulang secara progresif, sehingga tulang menjadi rapuh dan rentan mengalami fraktur (Perez *dkk.*, 2023). Hingga saat ini, kerusakan tulang dalam ukuran besar atau *critical size defect* umumnya sulit mengalami regenerasi secara alami tanpa bantuan material pendukung. Oleh karena itu, metode penanganan klinis yang umum digunakan masih mengandalkan metode konvensional seperti cangkok tulang melalui teknik autograft dan allograft. Namun, kedua metode tersebut memiliki keterbatasan yang signifikan, meliputi keterbatasan donor, risiko infeksi, kemungkinan reaksi penolakan imun, dan proses pemulihan pascaoperasi yang memakan waktu lama (Zhao *dkk.*, 2021). Sebagai solusi inovatif, pengembangan biomaterial sintetis sebagai *bone graft substitute* menjadi salah satu alternatif yang dikembangkan dalam bidang rekayasa jaringan tulang untuk memfasilitasi pertumbuhan kembali jaringan tulang yang rusak secara lebih efisien (Ratnayake *dkk.*, 2025).

Bone graft substitute merupakan biomaterial yang dirancang untuk membantu proses regenerasi dan perbaikan jaringan tulang dengan menyediakan lingkungan yang mendukung pertumbuhan jaringan baru. Salah satu biomaterial

yang banyak digunakan dalam *Bone graft substitute* adalah *hydroxyapatite* karena memiliki komposisi kimia dan struktur yang menyerupai mineral penyusun tulang alami (Noviyanti dkk., 2023). *Hydroxyapatite* (HA) memiliki sifat biokompatibel, bioaktif, dan osteokonduktif sehingga mampu mendukung adhesi dan proliferasi sel tulang (Hoshi dkk., 2022). Namun penggunaan *hydroxyapatite* (HA) murni memiliki beberapa kelemahan, seperti sifat mekanik yang rapuh, laju degradasi yang rendah, serta bioaktivitas yang terbatas (Noviyanti dkk., 2023).

Substitusi ion silikon ke dalam struktur hidroksiapatit sehingga membentuk *silicon-substituted hydroxyapatite* (Si-HAp) merupakan salah satu metode modifikasi hidroksiapatit yang banyak dikembangkan (Ratnayake dkk., 2025). Penambahan silikon mampu meningkatkan bioaktivitas, mempercepat pembentukan apatit baru, serta meningkatkan osteokonduktivitas material, dengan adanya kandungan gugus silanol (Si-OH) pada material berbasis silika yang berperan dalam memicu nukleasi dan pembentukan lapisan apatit ketika berinteraksi dengan cairan tubuh, sehingga menjadi salah satu indikator bioaktivitas material pada biomaterial tulang (Asadipour dkk., 2019). Selain itu, keberadaan silikon pada struktur hidroksiapatit dapat meningkatkan kristalinitas, luas permukaan, dan morfologi material sehingga berpengaruh terhadap karakteristik biomaterial yang dihasilkan (Kim dkk., 2021).

Dalam penelitian ini, sintesis *silicon-substituted hydroxyapatite* dilakukan menggunakan metode sol-gel dengan prekursor tetraetil ortosilikat (TEOS), kalsium nitrat tetrahidrat $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ dan diamonium hidrogen fosfat $[(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4]$. Metode sol-gel digunakan karena mampu menghasilkan material

dengan homogenitas tinggi, distribusi partikel yang merata, serta ukuran partikel yang relatif kecil (Padmanabhan *dkk.*, 2021). Selain itu, metode ini memungkinkan proses sintesis berlangsung pada suhu lebih rendah dibandingkan metode lainnya sehingga cocok digunakan dalam sintesis biomaterial berbasis kalsium fosfat (Kim *dkk.*, 2021). Penggunaan metode sol-gel pada sintesis *silicon-substituted hydroxyapatite* (Si-HAp) mampu menghasilkan distribusi silikon yang lebih homogen di dalam struktur hidroksiapatit sehingga dapat meningkatkan bioaktivitas material (Kim *dkk.*, 2021).

Selain material keramik, penggunaan polimer alami juga diperlukan untuk meningkatkan fleksibilitas dan kemampuan pembentukan biomaterial. Salah satu polimer yang dapat ditambahkan dalam bidang rekayasa jaringan tulang adalah gelatin. Penambahan gelatin sebagai komponen organik turunan kolagen bertujuan untuk mengoptimalkan interaksi biologis serta karakteristik mekanik pada struktur perancah karena memiliki sifat biokompatibel, *biodegradable* dan mampu membentuk matriks yang menyerupai jaringan ekstraseluler alami (Biru *dkk.*, 2022). Penambahan gelatin pada komposit Si-HAp berfungsi sebagai matriks polimer dan agen pengikat antarpartikel yang membantu pembentukan granul serta meningkatkan homogenitas material (Kim *dkk.*, 2021). Kombinasi Si-HAp dan gelatin juga diketahui mampu meningkatkan interaksi biologis, osteoinduksi, dan mineralisasi dibandingkan penggunaan material tunggal (Hoshi *dkk.*, 2022).

Selain komposisi material, bentuk fisik biomaterial juga berperan penting dalam keberhasilan proses regenerasi tulang. Salah satu bentuk *bone graft substitute* yang banyak digunakan adalah granul karena mampu mengisi kerusakan tulang

(*bone defect*), pembentukan jaringan baru, dan vaskularisasi pada area implantasi (Simunovic dan Finkenzeller, 2021). Granul juga memiliki fleksibilitas yang tinggi dalam aplikasi klinis karena dapat menyesuaikan bentuk kerusakan tulang (*bone defect*) serta mempermudah proses implantasi dibandingkan biomaterial berbentuk blok atau struktur monolitik (Tang dkk., 2021).

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengembangkan *silicon-substituted hydroxyapatite* (Si-HAp) sebagai biomaterial tulang dan menunjukkan bahwa substitusi silikon mampu meningkatkan bioaktivitas serta osteokonduktivitas material dalam bentuk *scaffold* (Padmanabhan dkk., 2021). Namun, pengembangan granul komposit Si-HAp/Gelatin dengan variasi tingkat substitusi silikon masih jarang dikembangkan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan granul komposit Si-HAp/Gelatin melalui metode sol-gel dan *oven drying* dengan variasi substitusi silikon sebesar 0; 2,5; 5; 7,5; dan 10 mol%. Kebaruan penelitian ini terletak pada sintesis granul komposit Si-HAp/Gelatin dengan variasi substitusi silikon serta evaluasi pengaruhnya terhadap karakteristik material sebagai kandidat *bone graft substitute*.

Pada penelitian ini, digunakan satu sampel kontrol berupa hidroksiapatit (HAp) tanpa substitusi silikon (0 mol% Si) dan empat variasi substitusi silikon (Si) dalam sintesis *silicon-substituted hydroxyapatite* (Si-HAp) sebesar 2,5; 5; 7,5 dan 10 mol% dengan mempertahankan rasio stoikiometri $\text{Ca}/(\text{P}+\text{Si})$ sebesar 1,67. Variasi substitusi silikon dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh keberadaan ion silikat terhadap karakteristik Si-HAp yang meliputi struktur kristal, gugus fungsi, morfologi permukaan, dan komposisi unsur material. Substitusi silikon diketahui

mampu memodifikasi struktur hidroksiapatit sehingga berpotensi meningkatkan bioaktivitas dan karakteristik biomaterial untuk aplikasi regenerasi tulang (Asadipour *dkk.*, 2019).

Proses pembuatan granul pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode *oven drying*. Metode ini dipilih karena memiliki prosedur yang relatif sederhana, mudah diaplikasikan, serta mampu menghasilkan material dengan struktur yang stabil setelah proses penguapan pelarut (Kim *dkk.*, 2021). Pada biomaterial berbasis hidroksiapatit dan polimer alami, proses pengeringan berperan dalam pembentukan struktur material, homogenitas campuran, serta karakteristik morfologi yang dihasilkan (Padmanabhan *dkk.*, 2021). Selain itu, metode *oven drying* banyak digunakan dalam pembuatan *scaffold*, membran, maupun granul biomaterial karena mampu mempertahankan bentuk material dan menghasilkan struktur yang lebih kuat setelah proses pengeringan (Kim *dkk.*, 2021).

Pada penelitian ini, karakterisasi dilakukan menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi, *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk menganalisis struktur kristal dan derajat kristalinitas, serta *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX) untuk mengamati morfologi permukaan dan komposisi unsur material (Noviyanti *dkk.*, 2023).

Berdasarkan uraian tersebut terkait sintesis dan karakterisasi granul *bone graft substitute* berbasis komposit Si-HAp/Gelatin dengan satu sampel kontrol berupa hidroksiapatit (HAp) tanpa substitusi silikon (0 mol% Si) dan empat variasi substitusi silikon (Si) dalam sintesis *silicon-substituted hydroxyapatite* (Si-HAp)

sebesar 2,5; 5; 7,5 dan 10 mol% dengan mempertahankan rasio stoikiometri Ca/(P+Si) sebesar 1,67. Proses ini dilakukan menggunakan metode *oven drying* sebagai upaya pengembangan biomaterial yang berpotensi digunakan dalam aplikasi rekayasa jaringan tulang

I.2 Tujuan Penelitian

1. Memperoleh granul komposit melalui sintesis Si-HAp/Gelatin dengan variasi substitusi silikon menggunakan metode *oven drying*.
2. Menentukan karakteristik granul komposit Si-HAp/Gelatin menggunakan FTIR, XRD, dan SEM-EDX.
3. Mengevaluasi pengaruh variasi substitusi silikon terhadap karakteristik granul komposit Si-HAp/Gelatin.