

Perancangan Sistem Imobilisasi Tulang Berbasis PA12 dengan Desain Berongga dan Mekanisme Adjustable

Martina Puspita Sari^{1*}, Alven Pratama Ginting², Adi Yusuf Kirana³, Mohammad Alfatih⁴, and Sharul Sadewa⁵

^{1,2,3,4,5}Teknik Mesin, Institut Teknologi Kalimantan

Abstrak

Fraktur tulang merupakan salah satu masalah muskuloskeletal dengan prevalensi tinggi, yang umumnya ditangani melalui metode imobilisasi eksternal menggunakan gips konvensional. Namun, gips berbahan dasar plaster of Paris memiliki berbagai keterbatasan, seperti ventilasi buruk, tidak tahan air, dan tidak dapat diatur keketatannya, sehingga berisiko menimbulkan komplikasi klinis seperti iritasi kulit dan compartment syndrome. Penelitian ini bertujuan merancang sistem imobilisasi tulang berbasis material Polyamide 12 (PA12) dengan desain berongga dan mekanisme adjustable menggunakan pendekatan desain berbantuan komputer (CAD). Metode penelitian meliputi studi literatur, analisis kesenjangan desain, perancangan model CAD, dan validasi konseptual berbasis simulasi numerik menggunakan kriteria tegangan von Mises. Hasil simulasi menunjukkan bahwa PA12 memiliki performa mekanik paling sesuai dibandingkan PLA dan fiberglass, dengan nilai tegangan maksimum $1,36410^5 \text{ N/m}^2$ dan *elongation-at-break* tinggi yang memungkinkan deformasi elastis tanpa kegagalan struktural. Selain itu, desain lattice memberikan ventilasi optimal dan pengurangan massa, sementara sistem adjustable memungkinkan adaptasi tekanan selama fase penyembuhan. Secara keseluruhan, model desain yang diusulkan menunjukkan potensi sebagai alternatif modern yang lebih ergonomis dan adaptif dibandingkan sistem imobilisasi konvensional, serta mendukung arah pengembangan orthosis berbasis manufaktur aditif.

Kata kunci: Adjustable; CAD; Lattice; PA12; Sistem Imobilisasi

Abstract

Bone fractures are among the most prevalent musculoskeletal problems worldwide, commonly treated using conventional plaster casts. However, plaster of Paris casts present significant limitations, including poor ventilation, brittleness, inability to adjust tightness, and risks of clinical complications such as skin irritation and compartment syndrome. Recent studies have explored alternatives such as fiberglass and PLA-based 3D-printed casts, yet these materials remain rigid and prone to cracking under dynamic loads. This research aims to design an innovative bone immobilization system based on Polyamide 12 (PA12), integrating a lattice structure for ventilation and weight reduction, and an adjustable tightening mechanism for clinical adaptability. The study employed a conceptual design approach using Computer-Aided Design (CAD), supported by literature review, gap analysis, and numerical simulation with von Mises stress criteria. Simulation results revealed that PA12 exhibited the highest maximum stress 1.36410^5 N/m^2 compared to PLA and fiberglass, yet remained well below its yield strength due to its superior elongation-at-break, enabling controlled elastic deformation without structural failure. Clinically, PA12's flexibility allows safer stress distribution during edema, while its biocompatibility supports orthopedic applications. The lattice design enhances patient comfort by improving ventilation, and the adjustable mechanism enables gradual pressure adaptation during healing. Overall, the proposed CAD-based design demonstrates PA12 as the most suitable material for modern immobilization systems, offering mechanical reliability, ergonomic comfort, and clinical safety beyond conventional casts and rigid 3D-printed alternatives.

Keywords: Adjustable; CAD; Lattice; PA12; Bone Immobilization System

Article Info Open Access

Submitted 2 Dec 2025

Accepted 24 July 2026

*Corresponding author
martina.sari@lecturer.itk.ac.id

Citation
Volume 1 No. 2 (2026)
Journal of Mechanical and
Industrial
doi: 000.0000/a00000

1 Pendahuluan

Fraktur tulang merupakan kondisi terputusnya kontinuitas jaringan tulang akibat trauma mekanik, beban berlebih, atau proses patologis yang melemahkan struktur tulang [1]. Kasus fraktur termasuk salah satu masalah muskuloskeletal dengan prevalensi tinggi di Indonesia dan dunia, terutama akibat kecelakaan lalu lintas, jatuh, dan aktivitas olahraga [2]. Penanganan utama fraktur di fasilitas kesehatan umumnya dilakukan melalui metode imobilisasi eksternal menggunakan gips (cast) untuk mempertahankan posisi tulang agar stabil selama proses penyembuhan [1].

Gips konvensional yang umum digunakan hingga saat ini berbahan dasar plaster of Paris ($CaSO_4 \cdot H_2O$) karena mudah dibentuk, murah, dan memiliki kekakuan yang cukup untuk menahan pergerakan [3]. Namun, berbagai studi menunjukkan bahwa penggunaan gips konvensional memiliki keterbatasan signifikan, baik dari aspek kenyamanan pasien, efisiensi perawatan, maupun keselamatan jaringan [4]. Gips tradisional memiliki ventilasi buruk, sehingga menyebabkan akumulasi kelembapan yang dapat menimbulkan iritasi, infeksi kulit, hingga luka tekan (pressure sore) [5].

Selain itu, gips tidak tahan air dan tidak dapat diatur keketatannya setelah pemasangan, sehingga meningkatkan risiko compartment syndrome saat terjadi pembengkakan jaringan. Setelah pembengkakan menurun, gips menjadi longgar dan kehilangan kestabilan posisinya, berpotensi menyebabkan malunion atau penyatuan tulang yang tidak sempurna [6]. Dari sisi teknis, gips konvensional juga memiliki massa jenis tinggi, proses pengerasan lama (hingga 48 jam), serta bersifat rapuh (brittle) setelah mengering, yang menyulitkan mobilitas pasien dan proses pelepasan [3]. Kondisi tersebut menimbulkan kebutuhan akan sistem imobilisasi yang lebih ringan, tahan air, nyaman, dapat diatur keketatannya, dan tetap memiliki kekuatan mekanik memadai untuk menjaga kestabilan fraktur. Berbagai penelitian telah mencoba menggantikan gips konvensional dengan material seperti fiberglass, PLA (polylactic acid), dan ABS (acrylonitrile butadiene styrene) menggunakan teknologi pencetakan 3D [4]. Fiberglass memiliki keunggulan dalam bobot dan kekuatan, tetapi tetap memiliki ventilasi buruk serta sulit didaur ulang [3]. Sementara itu, PLA dan ABS memungkinkan pembuatan cast berongga, tetapi cenderung kaku dan mudah retak pada beban dinamis [7]. Material Polyamide 12 (PA12) atau Nylon 12 kini menjadi perhatian karena memiliki kombinasi ideal antara kekuatan, fleksibilitas, dan ketahanan terhadap kelembapan. PA12 merupakan termoplastik semi-kristalin dengan densitas rendah ($1,01 \text{ g/cm}^3$), kekuatan tarik hingga 50 MPa, dan elongasi putus mencapai 200% [8]. Selain itu, PA12 bersifat biokompatibel, tahan sinar UV, dan banyak digunakan dalam pembuatan orthosis serta prosthesis [9]. Dalam teknologi additive manufacturing seperti Selective Laser Sintering (SLS), PA12 memungkinkan pembuatan desain berongga (lattice structure) yang meningkatkan ventilasi dan mengurangi berat struktur tanpa mengorbankan kekuatan [10].

Penelitian terbaru memang telah mengeksplorasi penggunaan 3D printed cast berbahan PLA dan PETG, yang terbukti mampu meningkatkan kenyamanan pasien karena desainnya yang berpori dan ringan [4]. Namun, studi-studi tersebut seringkali masih memiliki keterbatasan; PLA dan PETG cenderung kaku dan mudah retak [7], dan fokusnya lebih pada aspek manufaktur. Yang lebih penting, terdapat kesenjangan desain (design gap) yang signifikan: belum ada penelitian yang mengintegrasikan tiga elemen solusi secara komprehensif dalam satu rancangan. Yaitu: (1) material superior Polyamide 12 (PA12) yang fleksibel namun kuat, (2) struktur lattice (berongga) untuk ventilasi optimal, dan (3) sistem pengaturan keketaan (adjustable tightening system) untuk menjawab masalah klinis seperti compartment syndrome dan malunion [6]. Sebagian besar studi mungkin telah meneliti satu atau dua aspek tersebut, tetapi belum ada yang mengusulkan konsep desain holistik yang menggabungkan ketiganya [11].

Meskipun fasilitas kesehatan di Indonesia masih bergantung pada gips konvensional karena biaya dan ketersediaan teknologi [2], pengembangan konsep desain yang unggul secara fundamental adalah langkah awal yang krusial sebelum membahas implementasi dan evaluasi fisik.

Oleh karena itu, penelitian ini penting untuk dilakukan guna merancang dan mengusulkan (to design and propose) sebuah konsep inovasi sistem imobilisasi tulang berbasis material Polyamide 12 (PA12). Fokus utama penelitian ini adalah mengembangkan sebuah model desain CAD (Computer-Aided Design) yang secara konseptual mampu mengatasi kelemahan gips konven-

sional, dengan mengintegrasikan struktur ringan (lattice) dan mekanisme fungsional (adjustable tightening system) sebagai sebuah solusi desain yang utuh.

2 Metode

Penelitian ini merupakan studi perancangan konseptual (*conceptual design*) menggunakan pendekatan deskriptif-analitis berbasis studi literatur. Tujuan penelitian adalah merancang sistem imobilisasi tulang berbasis material Polyamide 12 (PA12) yang mengintegrasikan struktur berongga (*lattice structure*) dan mekanisme adjustable tightening system dalam satu model desain.

Tahapan penelitian diawali dengan studi pustaka untuk memperoleh data mengenai karakteristik mekanik material, kelemahan gips konvensional, perkembangan 3D-printed orthopedic cast, serta konsep desain sistem imobilisasi modern. Data sifat mekanik material yang digunakan sebagai parameter simulasi, seperti densitas, modulus elastisitas (*Young's modulus*), rasio Poisson, kekuatan luluh (*yield strength*), dan kekuatan tarik, diambil dari literatur ilmiah dan datasheet material yang telah tervalidasi.

Selanjutnya dilakukan analisis kesenjangan (*gap analysis*) untuk mengidentifikasi kekurangan desain imobilisasi yang telah ada dan merumuskan spesifikasi rancangan. Model kemudian dikembangkan menggunakan perangkat lunak *Computer-Aided Design* (CAD) dengan menerapkan tiga konsep utama, yaitu penggunaan material PA12, struktur lattice sebagai sistem ventilasi dan pengurang massa, serta mekanisme pengaturan keketatan (*adjustable tightening system*).

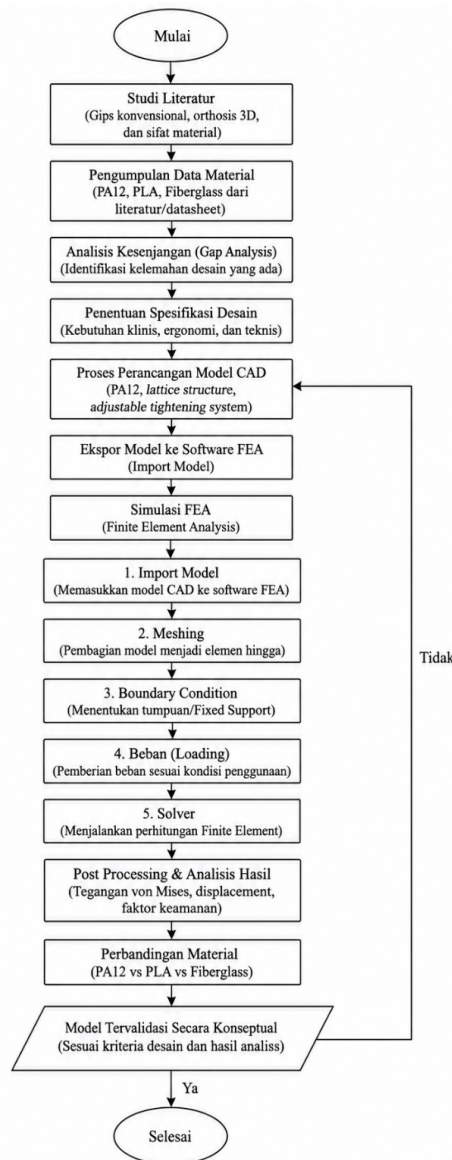
Model CAD selanjutnya dievaluasi melalui simulasi numerik menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) dengan kriteria tegangan von Mises untuk membandingkan respons mekanik beberapa material kandidat, yaitu PA12, PLA, dan fiberglass. Parameter material yang digunakan pada simulasi mengacu pada nilai yang telah dilaporkan dalam literatur sehingga menghasilkan kondisi simulasi yang representatif. Secara visual, keseluruhan tahapan metode penelitian yang telah diuraikan dapat diringkas dalam diagram alir berikut:

3 Hasil dan Pembahasan

Sebelum dilakukan analisis tegangan menggunakan kriteria von Mises, model CAD yang telah dirancang terlebih dahulu diproses melalui tahapan *Finite Element Analysis* (FEA). Tahapan simulasi meliputi proses import model ke perangkat lunak simulasi, meshing untuk membagi geometri menjadi elemen-elemen hingga, penentuan sifat material (*material properties*) berdasarkan data literatur, pemberian boundary condition sebagai kondisi batas model, serta pemberian beban (*loading*) untuk mensimulasikan kondisi kerja sistem imobilisasi. Selanjutnya, proses solver dijalankan untuk memperoleh distribusi tegangan yang kemudian digunakan sebagai dasar evaluasi kinerja material PA12, PLA, dan fiberglass. Penelitian ini berfokus pada analisis komparatif hasil simulasi terhadap ketiga material tersebut. Penelitian ini, sesuai dengan metodologi perancangan konseptual yang telah diuraikan, menghasilkan sebuah model desain inovatif untuk sistem imobilisasi tulang. Bab ini akan memaparkan hasil desain tersebut, diikuti dengan pembahasan mendalam yang menjustifikasi setiap keputusan perancangan berdasarkan sintesis data dari studi literatur yang relevan. Luaran utama dari penelitian ini adalah sebuah model desain CAD 3D untuk orthosis lengan bawah. Model ini ditunjukkan pada Gambar 2, dimana secara fundamental berbeda dari gips konvensional dan orthosis 3D statis yang ada saat ini. Model ini secara holistik mengintegrasikan tiga elemen kunci yang diidentifikasi dalam gap analysis yaitu material polyamide 12 (PA12), struktur desain berongga, dan mekanisme pengaturan keketatan (*adjustable tightening system*).

Analisis simulasi numerik menggunakan metode tegangan von Mises dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik mekanik dari ketiga material, PLA, fiberglass, dan PA-12 yang dipertimbangkan sebagai material sistem imobilisasi berbasis manufaktur aditif. Penggunaan kriteria von Mises dipilih karena metode ini merupakan pendekatan baku dalam memprediksi onset deformasi plastis pada material duktal dalam kondisi pembebanan multiaxial, khususnya pada evaluasi perangkat medis berbasis manufaktur aditif [10].

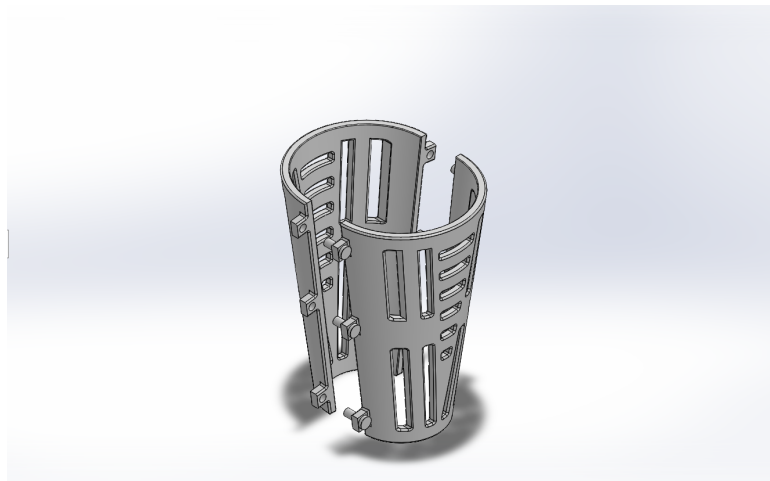
Hasil simulasi pada Gambar 5 menunjukkan bahwa PA-12 menghasilkan tegangan maksimum sebesar $\pm 1,364 \times 10^4 \text{ N/m}^2$, lebih tinggi dibandingkan PLA $2,69810^4 \text{ N/m}^2$ dan fiberglass $2,6610^4$



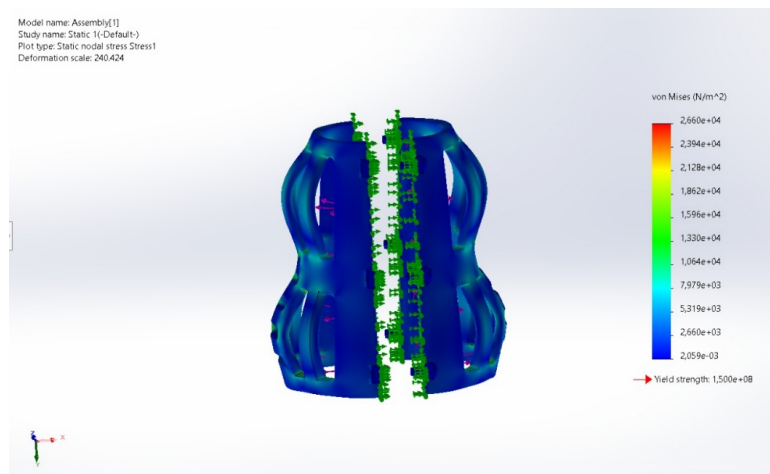
Gambar 1. Diagram Alir

N/m²). Hasil simulasi PLA ditunjukkan pada Gambar 4 dan hasil simulasi fiberglass ditunjukkan pada Gambar 3. Namun, interpretasi tegangan ini tidak dapat dipahami hanya dari nilai absolutnya, karena perilaku material berbeda secara mekanik. PA-12 memiliki elongation-at-break yang jauh lebih tinggi dibanding PLA dan fiberglass sehingga mampu mengalami deformasi elastis tanpa kegagalan struktural [8]. Sebaliknya, PLA dan fiberglass bersifat lebih kaku dan rapuh, sehingga meskipun nilai tegangan yang terukur lebih rendah, risiko fraktur material saat menerima pembebanan dinamis lebih tinggi [7].

Bila dibandingkan dengan nilai yield strength referensi masing-masing material, seluruh model masih berada pada zona aman sehingga secara struktural memenuhi syarat untuk fungsi imobilisasi. Namun, dalam konteks penggunaan klinis, kekakuan material justru dapat menciptakan tekanan terlokalisasi pada jaringan lunak sehingga meningkatkan risiko iritasi kulit dan ketidaknyamanan pengguna [5]. Temuan ini konsisten dengan laporan klinis bahwa perangkat berbahan PLA pada aplikasi cast hasil 3D printing sering menyebabkan rasa tidak nyaman karena tidak mampu menyesuaikan perubahan volume jaringan akibat inflamasi dan edema [4].



Gambar 2. Inovasi Desain

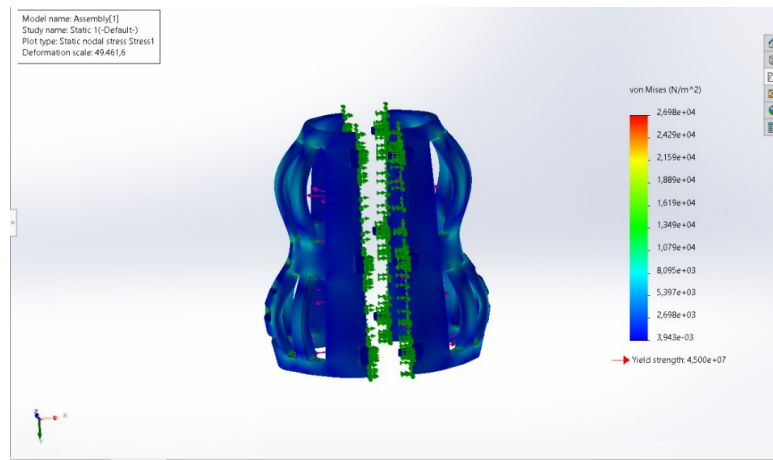


Gambar 3. Simulasi Fiberglass

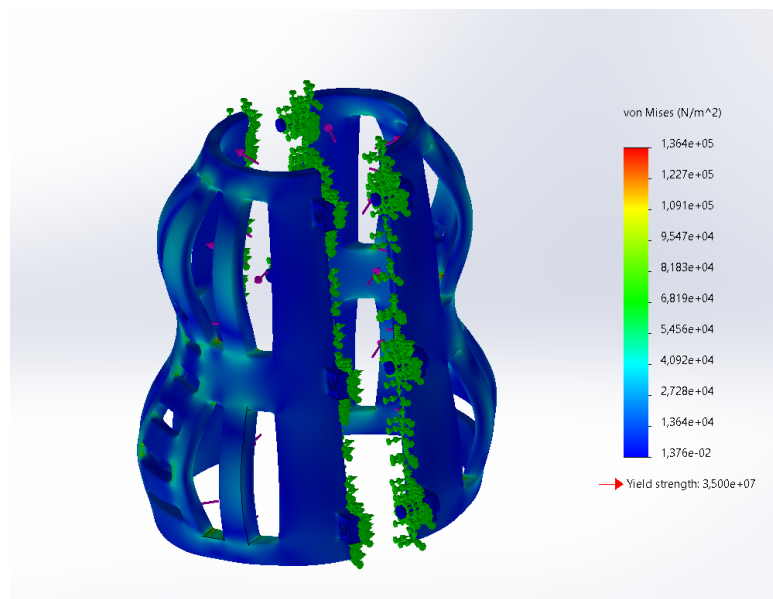
Berbeda dengan PLA dan fiberglass, respons mekanik PA-12 yang lebih fleksibel menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata, yang secara biomekanik lebih aman terhadap edema dan pembengkakan jaringan. Fleksibilitas ini berkontribusi pada kenyamanan pengguna karena tekanan tidak terfokus pada area tertentu, tetapi tersebar secara lebih proporsional sepanjang permukaan imobilisasi [3]. Selain itu, PA-12 telah terbukti biokompatibel dalam aplikasi ortopedik, termasuk sebagai material implan intramedullary rod, sehingga menunjukkan potensi kesesuaian klinis lebih tinggi dibanding PLA dan fiberglass [9].

Pada aspek desain, struktur berongga yang digunakan dalam model ini memberi keuntungan tambahan berupa peningkatan ventilasi kulit dan penurunan bobot perangkat. Strategi desain ini sejalan dengan pendekatan orthosis pasien-spesifik berbasis CAD-AM yang bertujuan meningkatkan kenyamanan fisiologis pengguna [11]. Integrasi mekanisme adjustable tightening juga memberikan keunggulan fungsional karena memungkinkan adaptasi tekanan selama proses penyembuhan, yang tidak dapat dicapai pada gips konvensional [8].

Secara keseluruhan, interpretasi hasil simulasi dan landasan bukti pendukung menunjukkan bahwa PA-12 merupakan material paling sesuai untuk aplikasi sistem imobilisasi berbasis manufaktur aditif. Material ini tidak hanya memenuhi parameter kekuatan mekanik, tetapi juga menawarkan keunggulan klinis, ergonomis, dan biomekanis yang tidak ditemukan pada PLA maupun fiberglass. Temuan ini mendukung arah pengembangan perangkat imobilisasi lebih adaptif, ringan, dan nyaman sesuai tren terkini dalam orthosis berbasis 3D printing [4].



Gambar 4. Simulasi PLA



Gambar 5. Simulasi PA-12

4 Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa Polyamide 12 (PA12) merupakan material paling optimal untuk sistem imobilisasi tulang berbasis manufaktur aditif dibandingkan PLA dan fiberglass. Analisis numerik dengan kriteria tegangan von Mises memperlihatkan bahwa PA12 menghasilkan tegangan maksimum sebesar $1,36410^5$ N/m², namun tetap jauh di bawah yield strength-nya. Hal ini menegaskan kemampuan PA12 untuk menahan beban tanpa kegagalan struktural, sekaligus memanfaatkan sifat elastisitasnya yang tinggi untuk mendistribusikan tegangan secara merata.

Keunggulan biomekanik PA12 diperkuat oleh sifat biokompatibilitas dan elongation-at-break yang besar, sehingga lebih aman terhadap edema dan perubahan volume jaringan. Integrasi struktur berongga (lattice) dan mekanisme adjustable tightening dalam desain CAD memberikan nilai tambah berupa ventilasi optimal, bobot ringan, serta fleksibilitas klinis yang tidak dimiliki sistem imobilisasi konvensional.

Secara akademik, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan konsep desain holistik berbasis CAD yang menggabungkan material unggul, strategi struktural, dan mekanisme fungsional dalam satu sistem. Temuan ini dapat menjadi dasar bagi penelitian lanjutan berupa validasi eksperimental

dan penerapan klinis, serta mendukung arah pengembangan orthosis modern yang lebih adaptif, ergonomis, dan nyaman bagi pasien.

Daftar Pustaka

- [1] Szostakowski B, Smitham P, Khan W. Plaster of Paris–short history of casting and injured limb immobilization. *The Open Orthopaedics Journal*. 2017;11:291.
- [2] Pakpahan T, Khu A, Renaldi MR, Mylano TA, Arhamni A, Natali O. Perbandingan Penggunaan Gips Sintetik dan Gips Tradisional pada Pasien Fraktur Tertutup di Rehabilitasi Harapan Jaya Pematang Siantar Tahun 2014-2015. *PRIMER (Prima Medical Journal)*. 2022;7(1):19-24.
- [3] Mitchell BC, Baldwin K. Properties and Pitfalls of Various Casting Materials. *Journal of the Pediatric Orthopaedic Society of North America*. 2025;12:100234.
- [4] Van Lieshout EM, Verhofstad MH, Beens LM, Van Bekkum JJ, Willemsen F, Janzing HM, et al. Personalized 3D-printed forearm braces as an alternative for a traditional plaster cast or splint; A systematic review. *Injury*. 2022;53:S47-52.
- [5] Woo CY, Koh MJ, Fung WK, Chan CS, Chua CB, Tay GT, et al. Effects of cast immobilisation on skin barrier function. *Ann Acad Med Singap*. 2020;49(6):354-9.
- [6] McGraw-Heinrich JA, Wall JC, Rosenfeld SB. Common Cast Complications. *Journal of the Pediatric Orthopaedic Society of North America*. 2025;12:100244.
- [7] Schlégl ÁT, Told R, Kardos K, Szóke A, Ujfalusi Z, Maróti P. Evaluation and comparison of traditional plaster and fiberglass casts with 3D-printed PLA and PLA–CaCO₃ composite splints for bone-fracture management. *Polymers*. 2022;14(17):3571.
- [8] Zakręcki A, Cieślik J, Bazan A, Turek P. Innovative Approaches to 3D printing of PA12 Forearm orthoses: A Comprehensive analysis of mechanical properties and production efficiency. *Materials*. 2024;17(3):663.
- [9] Dias RG, Magalhães GM, Dias LGG, Rocha JR, Dias FG, Facin AC, et al. Biocompatibility of polyamide 12 intramedullary rod after humeral consolidation in white Plymouth Rock birds. *Pesquisa Veterinária Brasileira*. 2018;38(10):1909-12.
- [10] Mobarak MH, Islam MA, Hossain N, Al Mahmud MZ, Rayhan MT, Nishi NJ, et al. Recent advances of additive manufacturing in implant fabrication–a review. *Applied Surface Science Advances*. 2023;18:100462.
- [11] Lin H, Shi L, Wang D. A rapid and intelligent designing technique for patient-specific and 3D-printed orthopedic cast. *3D printing in medicine*. 2016;2(1):4.