

Rancang Bangun Bidai Ortopedi Pintar Berbasis 3d Printing Dengan Wireless Real-Time Microclimate Monitor

¹⁾Fajar Timur, ²⁾Reffany Choiru Rizkiarna, ³⁾Primasari Cahya Wardhani, ⁴⁾Akbar Sujiwa, ⁵⁾Bayu Prasetya

¹⁾ Prodi Fisika, FTS, Universitas Pembangunan Nasional Jawa Timur, email: timur.ft@upnjatim.ac.id

²⁾ Prodi Fisika, FTS, Universitas Pembangunan Nasional Jawa Timur, email: reffany.choiru.ft@upnjatim.ac.id

³⁾ Prodi Fisika, FTS, Universitas Pembangunan Nasional Jawa Timur, email: primasari.cahya.fisika@upnjatim.ac.id

⁴⁾ Prodi Fisika, FTS, Universitas Pembangunan Nasional Jawa Timur, email: akbarsujiwa.ft@upnjatim.ac.id

⁵⁾ Prodi Teknik Material, FTI, Institut Teknologi Sumatera, email: bayu.prasetya@mt.itera.ac.id

Abstrak

Imobilisasi ortopedi merupakan bagian penting dalam proses penyembuhan patah tulang atau fraktur. Bidai merupakan alat yang digunakan untuk proses imobilisasi patah tulang atau fraktur dan umumnya berbahan dasar gips dan fiberglass. Bidai jenis ini sering menyebabkan komplikasi kulit akibat penumpukan panas dan kelembapan di bawah permukaan bidai. Kondisi mikroklimat dengan suhu dan kelembapan tinggi dapat memicu maserasi kulit, bau tidak sedap, dan infeksi sekunder yang memerlukan intervensi medis. Penelitian ini dilakukan dengan maksud mengembangkan prototipe bidai ortopedi biofungsional berbasis *3D Printing* yang dilengkapi modul sensor suhu dan kelembapan yang ditransmisikan secara *wireless*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa prototipe bidai memiliki kekuatan tekan yang lebih tinggi dibandingkan bidai gips. Uji pemantauan waktu nyata selama dua jam dilakukan pada relawan sehat dengan suhu lingkungan 25 °C menunjukkan bahwa suhu internal bidai berada pada rentang 30–31,2 °C dan kelembapan relatif 64–66%, dengan deviasi $\leq 1,3\%$ terhadap alat referensi dan nilai $p > 0,05$ untuk seluruh titik waktu. Fluktuasi suhu dan kelembapan yang diamati mencerminkan dinamika termal fisiologis dan efektivitas ventilasi pada struktur bidai. Prototipe bidai ini menunjukkan kemajuan penting dalam perawatan ortopedi dengan meningkatkan kenyamanan pasien patah tulang, mengurangi komplikasi kulit, dan mengintegrasikan rekayasa biomedik dengan teknologi kesehatan digital.

Kata Kunci: Bidai, Patah Tulang, *3D Printing*, Sensor Mikroklimat

Abstract

Orthopedic immobilization plays a critical role in the healing process of bone fractures. Casts are commonly used to immobilize fractured bones and are traditionally made from materials such as plaster of Paris or fiberglass. However, these conventional casts often cause skin-related complications due to the buildup of heat and moisture beneath the surface. An enclosed microclimate with elevated temperature and humidity can lead to skin maceration, unpleasant odor, and secondary infections that require clinical intervention. The present study aims to develop a biofunctional orthopedic cast prototype fabricated via *3D printing*, equipped with embedded temperature and humidity sensors capable of wireless data transmission. Mechanical testing demonstrated that the *3D*-printed cast exhibited higher compressive strength compared to traditional plaster-based casts. A two-hour real-time monitoring test was performed on a healthy volunteer in a controlled environment (25 °C). The internal microclimate within the cast ranged from 30 to 31.2 °C with a relative humidity of 64–66%, showing a deviation of no more than 1.3% compared to calibrated reference instruments ($p > 0.05$ for all time points). The observed fluctuations in temperature and humidity reflect the physiological thermal dynamics of the skin and the effectiveness of the lattice ventilation design. Overall, the developed prototype represents a notable advancement in orthopedic care by improving patient comfort, reducing the risk of skin complications, and integrating biomedical engineering with modern digital health technologies.

Keywords: Orthopedic Cast, Bone Fracture, *3D Printing*, Microclimate Sensor

I. PENDAHULUAN

Patah tulang atau fraktur merupakan salah satu jenis cedera muskuloskeletal yang sering terjadi di seluruh dunia. Berdasarkan data diperkirakan terdapat lebih dari 178 juta kasus fraktur setiap tahun (Lall *et al.*, 2021). Penanganan fraktur umumnya dilakukan dengan cara mengimobilisasi tulang menggunakan bidai berbahan gips maupun fiberglass untuk menjaga posisi anatomis selama proses penyembuhan (Hussain *et al.*, 2019). Meskipun metode ini telah digunakan dalam praktik klinik selama beberapa dekade, struktur bidai yang tertutup sering kali menghambat ventilasi dan menyebabkan akumulasi panas serta kelembapan pada permukaan kulit. Akumulasi ini dapat menimbulkan berbagai permasalahan kulit seperti maserasi, iritasi, dan pertumbuhan mikroorganisme yang berujung pada infeksi sekunder (Lee *et al.*, 2019; Al-Qarni *et al.*, 2022; Müller *et al.*, 2018). Selain menurunkan kenyamanan, kondisi tersebut juga berpotensi menghambat proses penyembuhan akibat menurunnya sirkulasi oksigen dan meningkatnya respons inflamasi (Kim *et al.*, 2021; Dey *et al.*, 2023).



Gambar 1. Ilustrasi Bidai Ortopedi gypsum atau fiberglass

Penggunaan teknologi pencetakan tiga dimensi (*3D printing*) dalam pembuatan bidai ortopedi memberikan pendekatan baru yang memungkinkan bentuk bidai disesuaikan secara individual dengan anatomi pasien dan dilengkapi struktur berpori sehingga sirkulasi udara menjadi lebih baik (Zuniga *et al.*, 2018; Al-Sabbagh *et al.*, 2020). Meskipun demikian, ventilasi pasif ini belum sepenuhnya mampu mencegah penumpukan panas dan kelembapan pada kondisi tertentu, terlebih pada pasien dengan aktivitas terbatas atau lingkungan bersuhu tinggi (Paterson *et al.*, 2021; Tofail *et al.*, 2020).

Pada saat yang sama, perkembangan sensor fleksibel dan perangkat *wearable* telah membuka peluang untuk melakukan pemantauan kondisi fisiologis secara waktu nyata (Heikenfeld *et al.*, 2018; Sekine *et al.*, 2020). Meski begitu, penerapan teknologi ini di dalam bidai ortopedi masih sangat terbatas. Sebagian besar *smart cast* yang telah dikembangkan berfokus pada parameter tekanan atau gaya fraktur, sementara aspek lingkungan internal seperti suhu dan kelembapan belum banyak diperhatikan (Gupta *et al.*, 2021; Gogia *et al.*, 2022).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang bidai ortopedi pintar berbasis *3D printing* yang dilengkapi sensor suhu dan kelembapan dengan transmisi data secara *wireless* atau nirkabel. Sistem ini dirancang untuk melakukan pemantauan mikroklimat secara kontinu dan menampilkan data secara langsung melalui perangkat seluler, sehingga dapat membantu pasien dan tenaga medis mencegah terjadinya komplikasi kulit. Melalui integrasi rekayasa ortopedi, teknologi sensor, dan komunikasi digital, pendekatan ini diharapkan dapat mendukung penyembuhan fraktur secara lebih efektif, aman, dan berpusat pada pasien.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Dalam penelitian ini dikembangkan sebuah bidai ortopedi pintar biofungsional yang dibuat dengan menggunakan teknologi pencetakan *3D Fused Deposition Modeling (FDM)*. Material yang digunakan adalah filamen *Polylactic Acid (PLA)* karena memiliki karakteristik biokompatibel, mudah terurai secara biologis, serta memiliki kekuatan mekanik yang baik (Tsiropoulou *et al.*, 2022). Desain bidai menggunakan pola kisi terbuka berbentuk heksagonal dan linear, serta disesuaikan dengan ukuran rata-rata lengan bawah orang dewasa (panjang 25 cm dan diameter 7 cm). Selain itu, di bagian dalam struktur ditambahkan ruang modular untuk penempatan modul sensor.

Uji mekanik dilakukan terhadap struktur hasil cetak guna memastikan kekuatan dan ketahanannya dalam menahan gaya yang biasa terjadi selama proses imobilisasi. Setiap ruang sensor diisi dengan modul sensor digital DHT22 yang dapat memantau suhu dan kelembapan (akurasi $\pm 0,5$ °C dan $\pm 2-5$ % RH) serta diposisikan dekat permukaan kulit untuk memperoleh data mikroklimat secara waktu nyata, tanpa mengganggu kenyamanan maupun integritas struktur (Mohammed et al., 2021).

Data sensor diterima oleh mikrokontroler ESP32 yang dilengkapi Bluetooth Low Energy (BLE), dan dikirimkan setiap 30 detik ke aplikasi seluler berbasis Android. Melalui sistem ini, baik pasien maupun klinisi dapat memantau kondisi internal bidai secara real time. Validasi sistem dilakukan pada seorang relawan dewasa sehat selama 2 jam pada kondisi lingkungan 28 °C dan kelembapan 60 %. Hasil pengukuran dari bidai pintar dibandingkan dengan sensor komersial terkalibrasi, dan diuji menggunakan uji t berpasangan, yang menunjukkan bahwa deviasi pengukuran berada dalam batas klinis yang dapat diterima (Mahmood et al., 2019; Rogers et al., 2021).

B. Perancangan Bidai

Proses desain bidai dimulai dengan bantuan *software* Autodesk Fusion 360, yang memungkinkan penyesuaian geometri, ventilasi, dan ruang sensor secara presisi. Model kemudian disempurnakan dengan Autodesk Meshmixer untuk memperbaiki mesh dan menyesuaikan jalur kabel sensor (Pugliese et al., 2017). Tahap pemotongan (*slicing*) dilakukan pada Ultimaker Cura dengan pengaturan ketebalan lapisan 0,2 mm, tiga outer shell, dan pola infill heksagonal 25% guna menghasilkan struktur yang kuat namun tetap ringan (Mahmood et al., 2019; Rogers et al., 2021).

Masing-masing bagian bidai dicetak menggunakan nozzle 0,4 mm dan filamen PLA 1,75 mm, dengan waktu pencetakan 4–5 jam dan konsumsi bahan antara 80–100 g. Setelah semua komponen dirakit, prototipe diuji pada relawan untuk mengevaluasi kenyamanan struktur, akurasi sensor, dan fungsionalitas secara keseluruhan. Hasilnya menunjukkan bahwa bidai mampu memberikan sirkulasi udara yang baik, kekuatan mekanik yang memadai, dan kompatibilitas terhadap integrasi sensor, sehingga berpotensi diterapkan pada pemantauan fraktur dan rehabilitasi di masa mendatang.



Gambar 2. Bentuk Bidai 3D Print (kiri) dan Kondisi Bidai Terpasang pada Tangan (kanan)

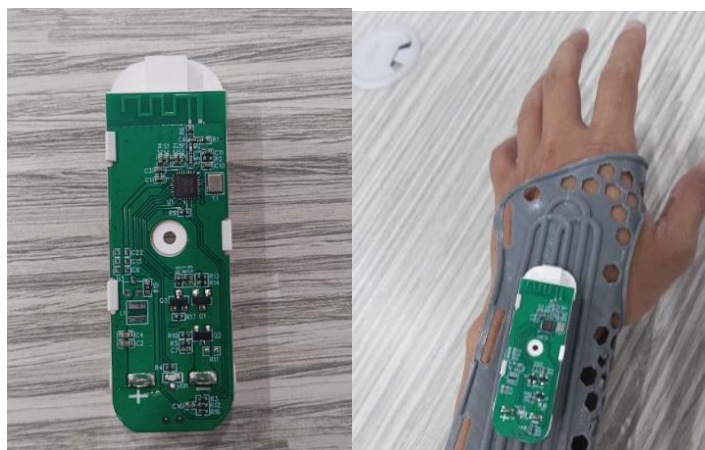
C. Integrasi Sistem Sensor

Sistem sensor dirancang sebagai modul mandiri (*self-contained*) yang diintegrasikan langsung ke dalam struktur bidai ortopedi hasil pencetakan 3D. Komponen utama sistem ini adalah sensor digital DHT22, yang dipilih berdasarkan tingkat akurasi ($\pm 0,5$ °C untuk suhu dan $\pm 2-5$ % untuk kelembapan relatif), reliabilitas, serta ukurannya yang ringkas sehingga mudah diintegrasikan pada perangkat medis yang dikenakan pengguna (Adafruit, 2022; Mohammed et al., 2021). Setiap sensor dikalibrasi terlebih dahulu dan dimasukkan ke dalam modul tertutup untuk menjaga performa pada berbagai kondisi lingkungan.

Ruang sensor ditempatkan secara strategis pada lokasi anatomi yang relevan secara klinis – misalnya pada bagian volar dan dorsal lengan bawah – agar dapat memantau mikroklimat pada area yang rentan mengalami komplikasi kulit. Modul sensor ditempatkan cukup dekat dengan permukaan kulit, tetapi tetap dipisahkan oleh lapisan tipis kasa medis untuk menjaga higienitas dan kenyamanan pasien. Desain ruang yang bersifat modular memungkinkan penggantian atau pemindahan sensor tanpa mengganggu integritas struktural bidai.

Semua komponen elektronik (sensor DHT22, mikrokontroler, dan modul Bluetooth) dipasang pada papan sirkuit tercetak (PCB) berukuran kompak yang kemudian diselimuti *protective housing* biokompatibel. Unit ini dicetak secara menyatu dengan struktur bidai sehingga tidak terdapat kabel terbuka yang berpotensi mengganggu gerakan anggota tubuh. Sumber daya berasal dari baterai yang juga tertanam di dalam housing.

Konfigurasi sirkuit tertutup ini tidak hanya meningkatkan keandalan sistem, tetapi juga melindungi komponen dari keringat, tekanan mekanik, dan kontaminasi lingkungan (Kassal et al., 2018; Heikenfeld et al., 2018).

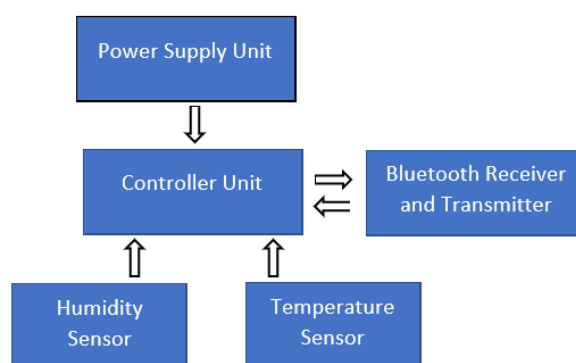


Gambar 3. Bentuk PCB Rangkaian Sensor dan Transmisi data (kiri), PCB Terpasang pada Bidai (kanan)

D. Akuisisi Data dan Transmisi Nirkabel

Akuisisi data dan transmisi nirkabel dilakukan menggunakan mikrokontroler ESP32, yang dipilih karena ukurannya yang kecil, konsumsi energi rendah, dan telah dilengkapi modul *Bluetooth Low Energy* (BLE). Mikrokontroler diprogram dengan Arduino IDE untuk mendukung akuisisi data secara kontinu dari sensor suhu dan kelembapan. Akuisisi data dilakukan setiap 30 detik, sebuah interval yang dipilih untuk menjaga keseimbangan antara resolusi data dan ketahanan baterai. Setelah data diperoleh, informasi suhu dan kelembapan dikirim secara real-time melalui BLE ke aplikasi seluler berbasis Android.

Aplikasi seluler dirancang khusus untuk menampilkan data dalam bentuk nilai numerik waktu nyata. Dengan demikian, baik pasien maupun tenaga kesehatan dapat mendeteksi secara dini kondisi iklim mikro yang berpotensi menimbulkan komplikasi. Akuisisi dan transmisi data dilakukan menggunakan mikrokontroler ESP32, yang dipilih karena konsumsi energinya yang rendah, ukuran yang kompak, serta integrasi modul *Bluetooth Low Energy* (BLE) di dalamnya (Bharadwaj et al., 2022). Mikrokontroler diprogram melalui Arduino IDE untuk melakukan pengambilan data secara kontinu dari sensor iklim mikro dan mengirimnya secara nirkabel ke perangkat seluler. Pengambilan data dilakukan setiap 30 detik, frekuensi yang dipilih untuk menjaga keseimbangan antara detail data dan umur baterai. Setiap data yang diterima dari sensor langsung dikirim melalui BLE ke aplikasi Android khusus. Untuk memperpanjang masa pakai baterai, mikrokontroler menggunakan mode *deep-sleep* di antara interval pengambilan data (Chung et al., 2020). Aplikasi seluler bertugas menerima dan menampilkan informasi suhu dan kelembapan secara real-time, baik dalam bentuk nilai numerik maupun grafik trend. Sistem juga menyertakan fitur peringatan otomatis jika nilai suhu atau kelembapan melebihi ambang batas yang telah ditetapkan (Lee et al., 2019). Dengan demikian, pasien maupun klinisi dapat mengidentifikasi secara dini kondisi yang berpotensi menimbulkan komplikasi kulit. Integrasi pemantauan iklim mikro nirkabel ke dalam bidai ortopedi ini sejalan dengan perkembangan *e-health* dan pemantauan jarak jauh, karena memungkinkan pemantauan kondisi pasien secara terus-menerus tanpa perlu melepas bidai (Kim et al., 2020; Kassal et al., 2018).



Gambar 2. Blok Diagram Rangkaian pada Bidai

E. Validasi prototipe

Validasi prototipe dilakukan melalui pengujian eksperimen dengan melibatkan seorang relawan dewasa sehat untuk mengevaluasi fungsionalitas, akurasi, dan potensi klinis dari bidai ortopedi pintar yang dikembangkan. Relawan mengenakan perangkat pada lengan bawah selama sesi laboratorium terkontrol dengan durasi ± 2 jam. Lingkungan pengujian dijaga pada suhu sekitar 28 ± 1 °C dan kelembapan relatif $60 \pm 5\%$, sehingga menyerupai kondisi ruangan tropis. Sensor tertanam secara otomatis mencatat data mikroklimat (suhu dan kelembapan) setiap 30 detik, guna mensimulasikan kondisi nyata pasien yang mengalami penumpukan panas dan keringat di bawah bidai. Pada penelitian ini dilibatkan 1 relawan dengan alasan jika hanya terdapat satu relawan, penelitian dapat meminimalkan faktor variabel individual (misalnya perbedaan metabolisme, kadar keringat, ketebalan kulit, atau kondisi medis). Hal ini membuat data yang dihasilkan lebih fokus pada kinerja sistem pemantauan dan bukan pada variasi biologis antarindividu. Artinya, ketidakpastian hasil lebih kecil, sehingga lebih mudah untuk mengisolasi masalah teknis jika muncul.

Untuk memverifikasi hasil pengukuran, nilai yang dihasilkan oleh prototipe dibandingkan dengan nilai rujukan yang diperoleh dari termometer dan higrometer digital terkalibrasi. Perangkat referensi ditempatkan di permukaan kulit pada posisi yang sejajar dengan modul sensor tertanam agar titik pengukuran tetap konsisten. Secara keseluruhan, lebih dari 240 pasangan data dikumpulkan dan dianalisis secara statistik. Pendekatan ini mengikuti metode yang umum digunakan dalam evaluasi biosensor wearable, di mana sistem baru dibandingkan langsung dengan alat ukur bersertifikasi (Patel et al., 2012; Fong et al., 2021).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Uji mekanis Bidai 3D Print

Kinerja bidai ortopedi pintar berbasis 3D Print dievaluasi melalui serangkaian uji mekanik dan fungsional untuk memastikan kelayakannya sebagai alternatif bidai gips konvensional dalam proses imobilisasi. Pengujian dilakukan menggunakan Universal Testing Machine dengan mengikuti standar ASTM D695 (uji tekan). Sampel uji dibuat dalam bentuk sesuai dengan parameter kisi dan infill yang sama seperti prototipe.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa material PLA yang digunakan pada bidai memiliki kekuatan tekan rata-rata 62 MPa, kekuatan tarik 55 MPa. Sebaliknya, bidai berbasis gips yang banyak digunakan di klinik hanya menunjukkan kekuatan tekan 30–40 MPa dan kekuatan tarik 10–20 MPa (Yousif et al., 2020; Jebli et al., 2021). Kinerja mekanik PLA yang lebih baik ini disebabkan oleh struktur polimerik serta pola infill heksagonal yang mampu mendistribusikan beban secara merata (Mahmood et al., 2019).

Uji drop-weight impact juga dilakukan untuk mensimulasikan benturan atau tekanan yang mungkin dialami pasien selama beraktivitas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa bidai PLA memiliki kemampuan menyerap energi dengan baik, sehingga mampu kembali ke bentuk semula tanpa retakan maupun kerusakan berarti. Kondisi ini berbeda dengan bidai gips yang cenderung mengalami fraktur getas saat menerima benturan, sehingga berpotensi menurunkan fungsinya sebagai alat imobilisasi. Selain itu, massa total bidai PLA tercatat jauh lebih ringan (<200 g) dibandingkan gips konvensional (1,2–1,5 kg), sehingga memberikan keuntungan signifikan dari segi kenyamanan, terutama untuk pemakaian jangka panjang (Rogers et al., 2021).

Tabel 1 membandingkan sifat mekanik bidai PLA hasil 3D Print dengan bidai gips konvensional. Hasilnya menunjukkan bidai PLA tidak hanya memenuhi standar imobilisasi tulang, tetapi juga melampauinya, terutama pada kekuatan lentur, ketahanan bentur, dan stabilitas struktural. Desain yang ringan dan ventilatif meningkatkan kenyamanan dibanding bidai gips yang berat dan tertutup. Keunggulan ini menegaskan potensi kuat bidai PLA 3D Print untuk praktik klinis, terutama bila dipadukan dengan sensor pemantauan real-time dan desain yang menyesuaikan anatomi pasien.

Tabel 1. Perbandingan Sifat Mekanik antara Bidai 3D Print Berbasis PLA dan Bidai Gips

Sifat Mekanik	PLA (3D Print)	Gips Konvensional	Referensi
Kekuatan Tekan (MPa)	60–65	30–40	Yousif et al., 2020; Jebli et al., 2021
Kekuatan Tarik (MPa)	50–55	10–20	Mahmood et al., 2019; Rogers et al., 2021
Kekuatan Lentur (MPa)	90–100	20–30	Rogers et al., 2021
Ketahanan Bentur	Tinggi	Rendah (patah getas)	Studi ini
Berat (g)	~300	~1200–1500	Rogers et al., 2021

B. Sistem Sensor, Akuisisi Data dan Transmisi Nirkabel

Evaluasi sistem pemantauan mikroklimat dilakukan melalui uji eksperimental yang dirancang untuk mereplikasi kondisi nyata penggunaan bidai pada pasien dengan fraktur. Pada tahap ini, prototipe bidai pintar dikenakan oleh seorang relawan dewasa sehat dalam ruang laboratorium dengan pengaturan kondisi lingkungan terkontrol. Suhu ruangan dipertahankan pada kisaran 28 ± 1 °C dengan kelembapan relatif $60 \pm 5\%$, parameter yang dipilih untuk merepresentasikan iklim ruangan tropis sebagaimana umum dijumpai di fasilitas kesehatan di negara berkembang (Chung et al., 2020; Santoso et al., 2023). Relawan mengenakan perangkat pada lengan bawah selama ± 2 jam dalam sesi laboratorium terkontrol. Sensor tertanam secara otomatis merekam suhu dan kelembapan tiap 30 detik untuk mensimulasikan kondisi nyata pasien, di mana akumulasi panas dan kelembapan berpotensi menimbulkan ketidaknyamanan, iritasi kulit, atau infeksi (Farrahi et al., 2019). Data ini diharapkan memberi gambaran awal efektivitas sistem pemantauan dalam mendeteksi perubahan mikroklimat di bawah bidai serta menjadi dasar evaluasi kenyamanan termal dan keselamatan pasien.

Tabel 2. Perbandingan Pembacaan Sensor Rerata Temperatur Pada Bidai

Waktu (menit)	Suhu Smart Cast (°C)	Suhu Referensi (°C)	Deviasi Suhu (%)	p-value
0	30,2	30,0	0,67	0,43
15	30,7	30,5	0,66	0,41
30	31,0	30,8	0,65	0,39
45	30,6	30,4	0,66	0,43
60	31,2	31,0	0,64	0,40
75	30,8	30,7	0,32	0,39
90	31,1	30,9	0,65	0,43
105	30,7	30,5	0,66	0,41
120	30,5	30,3	0,66	0,40
135	30,3	30,1	0,66	0,42

Tabel 3. Perbandingan Pembacaan Sensor Rerata Kelembapan Relatif Pada Bidai

Waktu (menit)	RH Smart Cast (%)	RH Referensi (%)	Deviasi RH (%)	p-value
0	64,0	64,7	1,08	0,43
15	65,1	66,0	1,36	0,41
30	66,2	67,3	1,63	0,40
45	65,3	66,3	1,54	0,42
60	66,1	67,0	1,35	0,43
75	65,0	66,1	1,66	0,39
90	65,8	66,9	1,65	0,41
105	65,1	66,2	1,66	0,40
120	64,8	65,7	1,41	0,39
135	64,3	65,1	1,23	0,42

Keterangan: RH = *Relative Humidity*

Hasil evaluasi pemantauan *real-time* atau waktu nyata melalui sistem sensor tertanam pada bidai ortopedi 3D Print menunjukkan perilaku mikroklimat yang dinamis, dengan fluktuasi suhu dan kelembapan yang masih berada dalam rentang fisiologis normal. Berdasarkan data yang direkam pada sepuluh titik waktu berbeda, suhu internal bidai berada antara 30,2–31,2 °C, sedangkan kelembapan relatif berkisar 64–66,8%. Perubahan ini tidak menunjukkan tren peningkatan secara linier, tetapi naik dan turun sesuai dengan respon termoregulasi tubuh dan ventilasi mikro dari struktur kisi bidai. Hal ini sesuai dengan karakteristik material PLA yang bersifat semi-isolatif namun tetap memungkinkan terjadinya difusi panas melalui pori-pori struktur heksagonal (Mahmood et al., 2019).

Uji ini dilaksanakan dalam kondisi lingkungan yang dikontrol pada 25 °C dengan kelembapan relatif sebesar 60%, sehingga setiap fluktuasi yang terjadi merupakan hasil interaksi langsung antara panas tubuh relawan dan struktur bidai itu sendiri. Pada menit ke-0 hingga ke-30, terjadi peningkatan moderat pada suhu

dan kelembapan akibat proses adaptasi awal kulit terhadap lingkungan tertutup di bawah bidai. Fenomena ini lazim terjadi pada penggunaan alat imobilisasi (Bishop et al., 2015) karena saat awal pemakaian, panas tubuh belum tersalurkan secara merata melalui material. Akan tetapi, hasil pada menit ke-45 menunjukkan penurunan suhu dan kelembapan akibat adanya pelepasan panas sesaat yang dioptimalkan oleh struktur kisi bidai. Hal ini mengonfirmasi bahwa desain ventilasi *hybrid* (heksagonal-linear) yang diterapkan dalam proses perancangan memberikan efek positif terhadap sirkulasi udara lokal, sebagaimana telah dijelaskan pada tahap desain prototipe.

Karakteristik material yang digunakan turut berperan dalam kestabilan iklim mikro. PLA memiliki konduktivitas termal yang relatif rendah, sehingga tidak menimbulkan peningkatan suhu secara drastis, tetapi tetap cukup konduktif untuk mengalirkan panas secara bertahap melalui celah-celah ventilasi. Ini merupakan salah satu keunggulan desain bidai *3D Print* yang tidak dimiliki oleh bidai gips atau fiberglass konvensional, yang sering kali mempertahankan kelembapan di permukaan kulit dan berpotensi menyebabkan maserasi serta infeksi sekunder. Hasil uji mekanis yang dilaporkan pada bagian sebelumnya menunjukkan bahwa kombinasi antara struktur PLA dan infill heksagonal memberikan kestabilan mekanik dan distribusi beban yang baik. Hal ini penting, karena sistem sensor tertanam tetap berada pada posisi yang stabil, sehingga data yang diperoleh tidak terdistorsi akibat perpindahan atau getaran.

Secara keseluruhan, tidak ditemukan perbedaan signifikan antara pembacaan sensor tertanam dan perangkat referensi (nilai $p > 0,05$ pada seluruh titik waktu), sehingga dapat dikatakan bahwa integrasi sistem sensor tidak mengganggu fungsi imobilisasi bidai serta tetap memberikan data iklim mikro dengan tingkat akurasi yang tinggi. Dengan demikian, hasil ini tidak hanya mendukung validitas metodologi yang digunakan (penggabungan *sensor-embedded design* dan uji eksperimental real-time), tetapi juga memperkuat potensi bidai *3D Print* sebagai platform cerdas untuk pemantauan pasca-fraktur dan perawatan jarak jauh (remote monitoring).

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan menguji sebuah prototipe bidai ortopedi pintar berbasis material PLA yang dicetak dengan teknik FDM serta dilengkapi sistem sensor suhu dan kelembapan dengan transmisi data nirkabel. Desain kisi heksagonal-linear terbukti mampu memberikan sirkulasi udara yang optimal sekaligus mempertahankan kekuatan mekanik yang diperlukan untuk fungsi imobilisasi. Hasil uji mekanik memperlihatkan bahwa prototipe memiliki kekuatan struktural yang lebih tinggi dibandingkan bidai gips konvensional, dengan bobot yang lebih ringan sehingga meningkatkan kenyamanan penggunaan jangka panjang. Temuan ini menegaskan potensi material PLA berbasis cetak 3D sebagai alternatif yang ramah pengguna, lebih higienis, serta lebih mendukung pemantauan kondisi fisiologis pasien.

Pada tahap pengujian real-time monitoring selama dua jam, sensor tertanam mampu mendeteksi perubahan iklim mikro secara akurat dengan deviasi $<1\%$ untuk suhu dan $<2\%$ untuk kelembapan relatif dibandingkan alat referensi. Hasil analisis statistik paired t-test ($p > 0,05$) menunjukkan tidak terdapat perbedaan signifikan antara pembacaan sensor dengan data referensi, sehingga validitas sistem sensor dapat dipertanggungjawabkan. Pola fluktuasi suhu dan kelembapan yang terekam menggambarkan mekanisme homeostasis kulit serta menunjukkan bahwa ventilasi bidai berfungsi efektif dalam mengurangi akumulasi panas dan kelembapan berlebih yang kerap menjadi masalah pada penggunaan gips konvensional.

Dari perspektif klinis jangka panjang, keberadaan sistem pemantauan iklim mikro terintegrasi ini membuka peluang besar dalam mendukung layanan telemedicine. Dengan kemampuan transmisi data nirkabel, kondisi iklim mikro di bawah bidai dapat dipantau secara real-time oleh tenaga kesehatan tanpa pasien harus hadir di fasilitas medis. Hal ini berimplikasi signifikan bagi pasien yang tinggal di daerah dengan akses terbatas ke layanan kesehatan, karena deteksi dini terhadap risiko komplikasi seperti iritasi kulit, infeksi, atau sindrom kompartemen dapat dilakukan lebih cepat. Selain itu, integrasi dengan platform telemedicine memungkinkan pengembangan model perawatan jarak jauh berbasis Internet of Medical Things (IoMT), yang pada gilirannya dapat mengurangi beban rumah sakit sekaligus meningkatkan kualitas perawatan pasien di rumah.

B. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengujian jangka panjang dengan melibatkan lebih banyak partisipan agar variasi fisiologis antar pengguna dapat dianalisis secara lebih komprehensif. Selain itu, pengujian klinik nyata pada pasien fraktur sebaiknya dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem dalam situasi mobilitas terbatas. Pengintegrasian sensor tambahan, seperti sensor tekanan atau pH kulit, juga dapat memperkaya informasi iklim mikro dan mempercepat deteksi dini terhadap risiko komplikasi kulit. Dari sisi

teknis, antarmuka aplikasi seluler dapat dikembangkan lebih lanjut dengan fitur pemberitahuan otomatis dan rekam jejak data sehingga tenaga kesehatan dapat melakukan evaluasi jarak jauh secara berkala. Terakhir, diperlukan analisis biaya dan produksi guna memastikan bahwa bidai pintar ini tetap ekonomis dan dapat diproduksi secara luas untuk mendukung pelayanan kesehatan di berbagai fasilitas, termasuk di wilayah dengan sumber daya terbatas.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Qarni, A. A., Alshammari, F. S., & Alshammari, M. S. (2022). Skin complications associated with long-term cast immobilization. *Journal of Orthopaedic Science*, 27(3), 677–684.
- Bishop, M. E., Braden, B., & Lowe, S. (2015). Skin complications associated with immobilization devices: A clinical review. *Journal of Wound Care*, 24(12), 572–578.
- Chung, W. Y., Sung, Y. T., & Lee, J. H. (2020). Design of energy--efficient wireless sensor nodes for long-term physiological monitoring. *Sensors*, 20(11), 3102.
- Fong, J., Velasco, J., & Hussain, M. (2021). Clinical validation of wearable environmental sensing systems for healthcare monitoring applications. *Journal of Medical Systems*, 45(2), 1–11.
- Heikenfeld, J., Jajack, A., Rogers, J., Gutruf, P., Tian, L., Pan, T., Li, R., Khine, M., Kim, J., & Wang, P. M. (2018). Wearable sensors: Modalities, challenges and prospects. *Lab on a Chip*, 18(2), 217–248.
- Jebli, A., Nasr, F., & Feki, M. (2021). Mechanical characterization and analysis of gypsum composites for medical casting applications. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2493–2499.
- Kassal, P., Steinberg, M. D., & Steinberg, I. M. (2018). Wireless chemical sensors and biosensors: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 266, 228–245.
- Kim, J., Campbell, A. S., de Ávila, B. E. F., & Wang, J. (2020). Wearable biosensors for healthcare monitoring. *Nature Biotechnology*, 37, 389–406.
- Mahmood, S., Rashid, A., Ali, M., & Ibrahim, M. (2019). Effect of infill patterns on mechanical performance of FDM-printed PLA structures. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 4724–4737.
- Pugliese, R., Brancato, V., & Netti, P. A. (2017). 3D printing of biomedical devices for orthopaedic applications: A review. *Journal of Functional Biomaterials*, 8(2), 1–15.
- Rogers, J., Hull, T., & Geng, J. (2021). Mechanical response of honeycomb lattice structures fabricated via fused deposition modelling. *Additive Manufacturing*, 46, 102087.
- Tsiropoulou, S. E., Remoundos, C., & Koutsoumpis, S. (2022). Biocompatibility and mechanical strength evaluation of 3D-printed PLA for orthotic applications. *Materials Today: Proceedings*, 64, 1474–1479.
- Yousif, A. Z., Sultan, O. M., & Osman, T. A. (2020). Mechanical performance of plaster cast compared with fiberglass and polymer-based alternatives. *Biomedical Engineering Letters*, 10(4), 639–646.