

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Stroke merupakan salah satu penyakit kardiovaskular yang menjadi penyebab kematian utama di dunia, termasuk di Indonesia. Menurut data terbaru, stroke merupakan penyebab disabilitas nomor satu secara global, di mana pemulihan fungsi tangan menjadi tantangan terbesar bagi penderitanya (Martey dkk., 2026). Di Indonesia, data dari jurnal lokal menunjukkan bahwa pemulihan fungsi ekstremitas atas (tangan) sangat krusial bagi pasien pasca-stroke untuk dapat kembali mandiri (Prasetyaningsih & Kurniawan, 2021). Salah satu dampak utama stroke adalah hemiparesis, di mana pasien sering mengalami kesulitan dalam melakukan gerakan fleksi-ekstensi jari yang penting untuk aktivitas sehari-hari atau *activities of daily living* (ADL). Tanpa rehabilitasi yang tepat, kondisi ini dapat berkembang menjadi spastisitas dan kontraktur otot yang permanen (Thimabut dkk., 2022).

Secara epidemiologis, World Stroke Organization memperkirakan lebih dari 12,2 juta kasus stroke baru terjadi setiap tahun secara global, dengan angka kematian mencapai 6,5 juta jiwa per tahun, dan beban prevalensi maupun kecacatan akibat stroke terkonsentrasi secara tidak proporsional di negara berpenghasilan rendah dan menengah akibat keterbatasan akses layanan rehabilitasi (Ezejimofor dkk., 2016). Di Indonesia, data Riskesdas 2018 mencatat prevalensi stroke meningkat dari 7,0 per 1.000 penduduk (2013) menjadi 10,9 per 1.000 penduduk, dengan lebih dari 70% penyintas mengalami gangguan fungsi ekstremitas atas. Fakta ini menegaskan urgensi pengembangan solusi rehabilitasi yang terjangkau dan dapat diakses di tingkat rumah tangga, khususnya di wilayah-wilayah dengan rasio tenaga fisioterapis yang rendah.

Penelitian ini relevan dengan Astacita Prabowo-Gibran ke-7 (Penguatan pembangunan sains dan teknologi) dalam konteks pengembangan prototipe teknologi medis berbasis komponen lokal. Pada tahap ini, penelitian baru mencapai pengujian fungsional prototipe pada subjek sehat—sehingga klaim dampak yang lebih luas seperti pemerataan akses layanan atau implementasi lapangan memerlukan tahapan penelitian lanjutan yang belum tercakup dalam

lingkup studi ini. Kontribusi yang dapat diklaim secara langsung adalah tersedianya bukti teknis awal (proof-of-concept) bahwa sistem rehabilitasi tangan berbiaya rendah berbasis Arduino dan PID dapat diwujudkan dan diuji secara kuantitatif menggunakan komponen yang tersedia di pasar Indonesia.

Masalah utama perangkat wearable rehabilitasi tangan saat ini mencakup tiga dimensi yang saling terkait: (1) biaya sistem yang tidak terjangkau (USD 80–500 untuk prototipe yang ada dalam literatur), (2) ketergantungan pada aktuator atau material yang tidak tersedia secara lokal (pneumatik, EMG electrode, 3D-printed rigid frame), dan (3) tidak adanya data performa kontrol yang diukur pada kondisi komponen lokal Indonesia. Ketiga masalah ini secara bersamaan menghambat replikasi dan adopsi teknologi rehabilitasi di Indonesia. Selain itu, perangkat *wearable* saat ini meliputi biaya tinggi dan desain yang kurang ergonomis. Di Indonesia, pengembangan alat rehabilitasi yang terjangkau (*low-cost*) menjadi sangat penting mengingat metode konvensional seringkali kurang efektif karena rendahnya konsistensi latihan mandiri pasien di rumah (Ismail dkk., 2024). Penggunaan material lunak seperti kain atau *soft robotics* ditawarkan sebagai solusi inovatif untuk menciptakan alat yang lebih ringan dan nyaman digunakan dibandingkan kerangka kaku (*rigid exoskeleton*) (Zhu dkk., 2022).

Sistem *wearable* berupa *soft robotic glove* ini dikendalikan menggunakan metode kontrol PID untuk mengatur gerakan jari secara presisi. Implementasi PID pada sistem rehabilitasi terbukti mampu menghasilkan respon sistem yang stabil dengan akurasi pelacakan gerakan (*motion tracking*) yang tinggi (Cheng dkk., 2018). Penggunaan kontrol PID memungkinkan sistem menyesuaikan keluaran aktuator secara halus melalui pengaturan parameter K_p , K_i , dan K_d , yang sangat penting untuk menjaga keamanan pasien selama terapi guna menghindari risiko cedera akibat gerakan yang berlebihan atau *overshoot* (Lone dkk., 2021).

Kontrol PID banyak digunakan pada sistem industri dan robotik karena strukturnya yang sederhana namun efektif untuk mengendalikan berbagai jenis proses dinamis, termasuk pengaturan posisi dan gaya. Metode ini ideal untuk *soft hand exoskeleton* berbasis sarung tangan karena sifatnya yang ringan dan terjangkau bagi pasien di Indonesia (Ismail dkk., 2024). Dengan pemilihan parameter K_p , K_i , dan K_d yang tepat melalui proses tuning, kontrol PID mampu menghasilkan respon yang cepat, overshoot yang terkendali, serta akurasi

pelacakan yang tinggi. Hal ini memastikan gerakan tangan pasien dapat diarahkan secara aman dan stabil selama rehabilitasi tanpa menimbulkan risiko cedera tambahan (Rudd dkk., 2019).

Dalam implementasi PID pada sistem diskrit berbasis mikrokontroler, pemilihan sampling time (T_s) yang tepat menjadi krusial untuk menjamin stabilitas sistem. Pada penelitian ini, T_s ditetapkan sebesar 20 ms (50 Hz) berdasarkan pertimbangan bandwidth mekanik sistem spring-tendon yang diperkirakan tidak lebih dari 5 Hz, sekaligus mempertimbangkan kapasitas komputasi Arduino Mega 2560 Pro Mini yang mampu menyelesaikan lima loop PID dalam kurang dari 15 ms per siklus. Mekanisme anti-windup dan output clamping ditambahkan untuk mencegah akumulasi error integral yang berlebihan dan membatasi sinyal kontrol dalam rentang fisiologis aman, sehingga sistem tidak menghasilkan gaya yang berpotensi menyebabkan cedera pada pasien dengan kondisi spastisitas.

Penelitian mengenai sarung tangan exoskeleton untuk rehabilitasi tangan telah berkembang pesat sebagai platform mekanik dalam membantu gerakan fleksi-ekstensi jari. (Lone dkk., 2021) mengembangkan soft pneumatic exoskeleton untuk rehabilitasi pergelangan tangan dan ibu jari yang menunjukkan bahwa implementasi kontrol PID mampu memberikan respon gerakan yang stabil dan efektif. Lebih lanjut, (Lone dkk., 2021) menekankan bahwa penggunaan kontrol PID yang dioptimalkan pada robot rehabilitasi jari sangat krusial untuk menghasilkan performa pelacakan yang presisi dan dinamis. Berbagai penelitian tersebut membuktikan bahwa pendekatan kendali berbasis PID tetap menjadi standar yang handal untuk pengembangan prototipe sistem rehabilitasi yang praktis dan berbiaya rendah.

Di sisi lain, (Cheng dkk., 2018) merancang sistem rehabilitasi tangan wearable untuk pasien pasca-stroke yang mencakup rancang bangun perangkat keras, integrasi sensor–aktuator, serta strategi pengendalian untuk membantu gerakan fleksi dan ekstensi jari. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu memberikan kendali yang stabil dan responsif, sehingga menjadi referensi yang relevan dengan penelitian ini. Berbagai penelitian tersebut menunjukkan bahwa platform sarung tangan robotik telah berkembang pesat, namun pendekatan pengendali sederhana seperti kontrol PID

tetap penting untuk prototipe yang menargetkan implementasi praktis, berbiaya rendah, dan mudah diterapkan di lingkungan klinis maupun terapi rumah di negara berkembang seperti Indonesia. Tinjauan komprehensif terhadap berbagai teknologi eksoskeleton tangan (Noronha & Accoto, 2022; Tran dkk., 2021) turut mengonfirmasi bahwa mayoritas purwarupa yang dilaporkan dalam literatur masih bergantung pada aktuator atau komponen impor berbiaya tinggi, sehingga dokumentasi performa sistem berbasis komponen lokal berbiaya rendah seperti pada penelitian ini tetap menjadi celah yang relevan untuk diisi.

Meskipun kontrol PID telah banyak diterapkan pada sistem wearable rehabilitasi, kebaruan penelitian ini terletak pada tiga aspek yang belum dikombinasikan secara bersamaan dalam literatur yang ada: (1) integrasi mekanisme spring skeleton berbahan baja dengan benang pancing sebagai sistem transmisi gaya pasif-aktif yang belum pernah dimodelkan karakteristik kekakuan dinamisnya pada konteks kontrol PID diskrit, (2) implementasi lima loop PID independen berbasis Arduino Mega 2560 Pro Mini dengan tuning parameter menggunakan kombinasi *Root Locus* dan fine-tuning manual yang menghasilkan profil $K_p/K_i/K_d$ spesifik untuk setiap jari sesuai perbedaan morfologi dan rentang gerak, serta (3) validasi sistem pada kondisi biaya produksi lokal Indonesia (target <Rp 2 juta/unit) yang secara empiris belum dilaporkan dalam penelitian wearable rehabilitasi serupa. (Rudd dkk., 2019) Kontribusi utama penelitian ini adalah menghasilkan data kuantitatif performa kontrol PID (rise time, overshoot, settling time, steady-state error) pada sistem tendon-driven berbasis spring skeleton dengan komponen lokal yang terjangkau, sebagai bukti empiris bahwa sistem rehabilitasi berkualitas klinis dapat diwujudkan dengan biaya rendah di Indonesia (Haghshenas-Jaryani dkk., 2020). Dengan demikian, penelitian ini secara spesifik mengisi celah riset yang belum ditangani oleh studi-studi sebelumnya, yaitu tersedianya bukti terukur tentang kelayakan sistem rehabilitasi tangan berbasis PID yang terjangkau dan dapat direplikasi di Indonesia.

Sebagai konteks tambahan, rehabilitasi berbasis teknologi wearable juga didukung oleh perkembangan evidence base yang semakin kuat. Singh dkk. (2021) dalam randomized controlled trial menunjukkan bahwa terapi berbasis robot eksoskeleton tangan selama 20 sesi menghasilkan peningkatan signifikan pada skor Fugl-Meyer Assessment (FMA) dibandingkan kelompok kontrol,

dengan bukti neuroplasticity yang terdeteksi melalui pencitraan otak fMRI. Temuan ini memperkuat dasar ilmiah penggunaan wearable exoskeleton sebagai platform terapi yang tidak hanya membantu gerakan secara mekanis, tetapi juga berpotensi memfasilitasi reorganisasi kortikal yang mendasari pemulihan fungsi motorik jangka panjang. Penelitian ini berkontribusi pada fondasi bukti empiris tersebut, khususnya dalam konteks sistem berbiaya rendah yang dapat diakses oleh populasi pasca-stroke yang lebih luas di Indonesia.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, terdapat sejumlah masalah utama yang dapat diidentifikasi dalam rehabilitasi telapak tangan pasien pasca-stroke, yaitu:

1. Keterbatasan akses dan biaya rehabilitasi konvensional. Rasio fisioterapis terhadap pasien di Indonesia rendah (sekitar 1:10.000) dengan biaya terapi manual Rp 500.000–Rp 1.000.000 per sesi, menyebabkan kurangnya konsistensi latihan dan akses terbatas di daerah pedesaan.
2. Biaya tinggi dan keterbatasan sistem wearable komersial. Alat exoskeleton impor berharga jutaan rupiah per unit, sulit dijangkau oleh masyarakat umum, dan belum ada alternatif sistem rehabilitasi wearable lokal yang terjangkau dan adaptif terhadap kondisi pasien Indonesia.
3. Belum adanya dokumentasi kuantitatif performa kontrol PID diskrit pada sistem tendon-driven berbasis spring skeleton untuk rehabilitasi tangan berbiaya rendah. Studi yang ada mengimplementasikan PID pada aktuator pneumatik atau rigid exoskeleton dengan model dinamik berbeda, sehingga parameter tuning (K_p , K_i , K_d) tidak dapat ditransfer langsung ke sistem spring-tendon yang memiliki karakteristik histeresis mekanik dan compliance berbeda. Akibatnya, tidak tersedia baseline data performa—rise time, overshoot, settling time, steady-state error, dan robustness terhadap gangguan torsi eksternal—yang dapat dijadikan acuan desain sistem rehabilitasi tangan low-cost berbasis spring skeleton di Indonesia.

1.3 Pembatasan Masalah

Untuk memastikan penelitian ini fokus dan dapat diselesaikan dalam waktu yang ditentukan, maka dilakukan pembatasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian hanya membahas rancang bangun sistem wearable untuk rehabilitasi fleksi-ekstensi tangan (5 jari) pada satu tangan pasien pasca-stroke, tidak mencakup rehabilitasi pergelangan tangan atau lengan atas.
2. Sistem menggunakan mikrokontroler Arduino Mega 2560 Pro Mini, 5 flex sensor untuk mendeteksi sudut fleksi jari, servo motor sebagai aktuator, spring skeleton sebagai kerangka penggerak, benang pancing sebagai media transmisi gaya, dan baterai 6V sebagai sumber daya.
3. Pengendalian sistem terbatas pada implementasi kontrol PID konvensional (K_p , K_i , K_d) dengan satu loop PID per aktuator, tanpa algoritma adaptif atau machine learning.
4. Pengujian sistem terbatas pada subjek sehat untuk validasi kontrol PID dan mekanik sistem, tanpa uji klinis pada pasien stroke. Metrik keberhasilan sistem didefinisikan secara kuantitatif: akurasi posisi ($RMSE \leq 10^\circ$), performa kontrol (rise time < 1 s, overshoot $< 10\%$, settling time < 2 s, steady-state error $< 5\%$), dan kegunaan sistem (skor SUS ≥ 68 , kategori dapat diterima).

1.4 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, fokus penelitian, dan pembatasan masalah yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan membangun sistem wearable berbasis mikrokontroler Arduino Mega 2560 Pro Mini dengan flex sensor, servo motor, spring skeleton, dan benang pancing untuk rehabilitasi fleksi-ekstensi tangan pasien pasca-stroke ?
2. Bagaimana mengimplementasikan kontrol PID konvensional (K_p , K_i , K_d) untuk mengendalikan gerakan jari secara presisi berdasarkan umpan balik sensor posisi pada sistem wearable ?
3. Bagaimana performa sistem wearable dalam hal akurasi posisi jari yang diukur dengan Root Mean Square Error (RMSE) antara sudut target dan sudut aktual, stabilitas kontrol PID yang diukur melalui rise time, overshoot, settling time,

dan steady-state error, serta tingkat kepuasan dan kegunaan sistem yang diukur menggunakan kuesioner System Usability Scale (SUS) pada subjek sehat?

1.5 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang sistem wearable berbasis mikrokontroler Arduino Mega 2560 Pro Mini dengan aktuator servo motor MG90S dan spring skeleton untuk rehabilitasi fleksi-ekstensi telapak tangan pasien pasca-stroke.
2. Membuat implementasi kontrol PID konvensional (K_p , K_i , K_d) untuk mengendalikan gerakan jari secara presisi berdasarkan umpan balik sensor posisi dan gaya gengaman.
3. Menguji performa sistem wearable pada subjek sehat dalam hal akurasi posisi jari (RMSE antara sudut target dan aktual), efektivitas kontrol PID (rise time, overshoot, settling time, steady-state error), dan tingkat kegunaan sistem (System Usability Scale/SUS) melalui pengujian terstruktur pada subjek sehat dengan protokol simulasi kondisi klinis.

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1.6.1 Manfaat Akademis

Manfaat teoritis. Menghasilkan data karakterisasi kuantitatif performa lima loop PID independen diskrit pada sistem tendon-driven berbasis spring skeleton, mencakup: (1) profil parameter tuning $K_p/K_i/K_d$ per-jari hasil kombinasi metode dan fine-tuning manual, (2) model pemetaan nonlinear ADC-to-angle flex sensor berbasis polinomial orde-2 per-jari, dan (3) analisis robustness kontroler terhadap gangguan torsi eksternal—seluruhnya pada sistem berbiaya <Rp 2 juta menggunakan komponen pasar lokal Indonesia. Data ini mengisi celah literatur yang tidak tersedia pada studi eksoskeleton tangan sebelumnya yang berbasis aktuator pneumatik atau rigid frame berbiaya tinggi

1.6.2 Manfaat Praktis

Manfaat praktis. Menghasilkan prototipe sistem wearable berbiaya rendah ($< \text{Rp } 2 \text{ juta/unit}$) yang secara teknis terbukti mampu mengeksekusi gerakan fleksi-ekstensi jari sesuai setpoint dengan performa kontrol PID yang terukur. Prototipe ini berpotensi menjadi dasar pengembangan perangkat terapi home-based bagi pasien pasca-stroke, meskipun validasi klinis dan uji kelayakan penggunaan di luar lingkungan laboratorium masih diperlukan sebelum dapat direkomendasikan untuk implementasi yang lebih luas.

