

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Permasalahan pada kaki, khususnya pronasi dan supinasi, perlu mendapat perhatian karena dapat memengaruhi pola berdiri, berjalan, dan kestabilan tubuh secara keseluruhan. *Foot pronation*, yaitu penurunan lengkung medial longitudinal akibat abduksi dan dorsofleksi *forefoot*, dialami oleh sekitar 20 persen populasi global dan berkontribusi terhadap cedera seperti *plantar fasciitis* serta *patellofemoral pain syndrome* [1], [2]. Pada kondisi sebaliknya berupa *cavus foot* (lengkung tinggi) yang memicu kecenderungan supinasi berlebihan dialami sekitar 10 persen populasi umum akibat berkurangnya luas kontak kaki dengan tanah [2]. Kedua kondisi struktural yang berlawanan ini menunjukkan bahwa gangguan kaki berpotensi terjadi pada masyarakat umum, tidak hanya kelompok klinis tertentu.

Perubahan pola tumpuan inilah yang tercermin pada *plantar pressure* atau distribusi tekanan telapak kaki. Parameter ini menjadi salah satu aspek penting yang sering luput dari perhatian, padahal perubahan distribusi ini telah diketahui sebagai pemicu awal gangguan postural yang berdampak pada performa fisik seseorang. Tekanan yang tidak merata pada telapak kaki dapat memunculkan pola beban *abnormal*, memperbesar risiko cedera ataupun gangguan biomekanik jangka panjang. Faktor-faktor tersebut semakin relevan ketika dikaitkan dengan tingkat aktivitas harian yang makin padat dan tuntutan produktivitas yang tinggi [3].

Wearable sensor seperti FSR dan IMU efektif dalam memantau distribusi tekanan kaki. Pengembangan algoritma sensor juga bergantung terhadap penempatan sensor yang optimal agar dapat mendeteksi kondisi *abnormal* kaki maupun *postural imbalance* dalam aplikasi sehari-hari [4]. Inovasi ini kini digantikan solusi berbasis *Internet of Things (IoT)*, di mana prototipe *smart shoes* dengan sensor *pressure* dan *accelerometer* memungkinkan pemantauan distribusi beban dan orientasi kaki secara *real-time* dan objektif tanpa observasi manual, sehingga menjembatani kebutuhan pemantauan pada pengguna umum, pekerja, maupun pelajar dengan aktivitas dinamis sehari-hari [5]. Bentuk alas kaki dipilih karena memastikan posisi sensor tetap konsisten terhadap titik anatomis kaki setiap

kali digunakan, berbeda dengan platform sensor statis yang mengharuskan pengguna memposisikan kaki secara manual pada setiap sesi pengukuran.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini akan merancang dan membangun prototipe *smart shoes* berbasis IoT untuk mendeteksi *postural imbalance*. Sistem ini memanfaatkan empat sensor FSR pada titik *heel*, *navicular*, *metatarsal-1*, dan *metatarsal-5* untuk mempresentasikan distribusi tekanan pada area utama telapak kaki dan sensor IMU MPU6050 pada masing-masing kaki untuk memperoleh sudut *pitch* dan *roll* pergelangan kaki secara *real-time* sehingga dapat membantu mendeteksi kecenderungan kaki normal, pronasi, dan supinasi. Data tersebut kemudian diolah menjadi parameter kuantitatif pola pembebanan medial-lateral dan deviasi sudut orientasi kaki terhadap rentang normal. Selanjutnya, parameter tersebut digunakan sebagai masukan pada model *decision tree* berbasis *CART* (*Classification and Regression Tree*) untuk mengklasifikasikan kondisi kaki menjadi normal, pronasi, atau supinasi sebagai indikasi risiko postural imbalance di luar lingkungan klinis. Algoritma CART dipilih dibandingkan algoritma *decision tree* lain seperti C4.5, karena CART menggunakan *Gini Index* dengan struktur percabangan biner yang lebih sederhana secara komputasi, sedangkan C4.5 menggunakan *information gain ratio* dengan percabangan *multiway* yang relatif lebih kompleks, sehingga CART lebih efisien diterapkan pada dataset numerik berskala kecil hingga menengah seperti pada penelitian ini [6].

1.2. Kajian Riset Terdahulu

Penelitian terdahulu adalah jenis penegasan keabsahan karya logis yang dibuat agar dapat direpresentasikan sehingga tidak ada demonstrasi pemalsuan sebagai jenis pembajakan karya orang lain, serta membuat pemikiran baru dalam ranah inovasi. Adapun rinciannya dijelaskan pada Tabel 1.1 di bawah ini.

Tabel 1.1 Kajian riset terdahulu.

Nama Peneliti	Tahun	Judul Penelitian
Muhammad Iqbal Tarmizi, Aminuddin Hamid, Ya'akob Yusof	2025	<i>Smart Shoe: Portable Gait Monitoring System Utilizing Inertial Measurement Unit (IMU)</i>

Nama Peneliti	Tahun	Judul Penelitian
Ni Made Mas Manik, dkk	2022	Derajat <i>Flat Foot</i> Memengaruhi Keseimbangan Statis Pada Anak Usia 10-12
Anna M. Joseph, dkk	2025	<i>Enhancing Intelligent Shoes with Gait Analysis: A Review on the Spatiotemporal Estimation Techniques</i>
Rafique Ahmed Lakho, dkk	2022	<i>Smart Insole Based on Flexi Force and Flex Sensor for Monitoring Different Body Postures</i>
Diah Arie Widhining K. dkk	2020	Pendeteksi Gerakan Kaki Menggunakan Normalisasi Warna Pada Citra Untuk Klasifikasi Pola Berjalan

Berdasarkan yang ditunjukkan pada Tabel 1.1. Referensi pertama memiliki topik tentang perkembangan sistem pemantauan rehabilitasi yang memanfaatkan perangkat *wearable*, khususnya sepatu pintar dan insole pintar yang mengintegrasikan sensor tekanan seperti *Force Sensitive Resistor (FSR)* untuk merekam distribusi beban pada kaki, serta sensor giroskop untuk mengukur sudut dan pola gerakan kaki secara *real-time* [7].

Referensi kedua fokus pada pengaruh tingkat kelainan lengkung kaki terhadap kemampuan mempertahankan keseimbangan statis. Hasilnya menunjukkan bahwa peningkatan derajat *flat foot* menyebabkan perubahan distribusi tekanan telapak kaki yang semakin tidak merata, sehingga mengganggu stabilitas postur dan menurunkan kemampuan keseimbangan. Meskipun demikian, penelitian ini masih bersifat klinis dan mengandalkan pengukuran di lingkungan laboratorium [8].

Referensi ketiga adalah pengembangan perangkat sepatu pintar berbasis IMU untuk mengukur parameter *gait* dan karakteristik lintasan kaki. Penempatan IMU pada kaki efektif untuk memperoleh informasi kinematik berjalan pada populasi klinis maupun lansia [9].

Referensi keempat fokus pada pengembangan sistem *smart insole* berbasis sensor *Flexi Force* dan *flex sensor* untuk analisis gaya dan tekukan kaki pada berbagai posisi tubuh. Sistem ini menempatkan beberapa sensor tekanan pada area plantar utama serta satu *flex sensor* pada bagian metatarsal untuk merekam perubahan tekanan dan sudut tekukan kaki, sehingga dapat menganalisis distribusi gaya dan pergeseran pusat gravitasi saat subjek melakukan beberapa postur statis dan gerakan sederhana [10].

Referensi kelima menyajikan perkembangan sistem klasifikasi pola berjalan berbasis pengolahan citra dan kecerdasan buatan, di mana data *gait* direkam dalam bentuk citra kemudian dinormalisasi sebelum diklasifikasikan. Studi ini menegaskan bahwa pemrosesan data berjalan secara komputasi tidak selalu praktis digunakan sehari-hari, serta tidak menghasilkan parameter numerik yang dapat langsung dimaknai sebagai ukuran risiko *postural imbalance* [11].

Berbeda dengan kelima penelitian tersebut, tugas akhir ini menawarkan pendekatan yang berbeda pada setiap aspeknya. Dibandingkan referensi pertama yang hanya menggunakan sensor IMU untuk parameter *gait* tanpa mengukur distribusi tekanan plantar, penelitian ini mengintegrasikan sensor FSR dan IMU secara bersamaan untuk menangkap dua dimensi data sekaligus, yaitu tekanan dan orientasi kaki. Dibandingkan referensi kedua yang bersifat klinis dan mengandalkan pengukuran manual di laboratorium, penelitian ini merancang sistem *wearable* portabel yang dapat digunakan secara *real-time* di luar lingkungan klinis. Dibandingkan referensi ketiga yang merupakan kajian literatur tanpa implementasi perangkat nyata, penelitian ini menghasilkan prototipe fungsional yang telah diuji langsung pada subjek. Dibandingkan referensi keempat yang menggunakan *Flexi Force* dan *flex sensor* namun tidak menyertakan data orientasi sudut kaki maupun mekanisme klasifikasi otomatis, penelitian ini menambahkan sensor IMU untuk sudut *pitch-roll* serta model *decision tree* berbasis CART untuk mengklasifikasikan kondisi kaki secara otomatis. Dibandingkan referensi kelima yang mengandalkan pengolahan citra sehingga kurang praktis untuk pemantauan mandiri sehari-hari, penelitian ini memanfaatkan data numerik langsung dari sensor tanpa memerlukan kamera atau proses citra. Dengan demikian, penelitian ini tidak

hanya mengadopsi konsep plantar pressure dan perangkat *wearable* dari studi terdahulu, tetapi juga menawarkan sistem multi-sensor dengan mekanisme klasifikasi otomatis berbasis CART yang mudah diinterpretasikan di luar lingkungan klinis.

1.3. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas dalam penelitian tugas akhir ini rumusan masalah adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana rancang bangun prototipe *smart shoes* yang dapat mendeteksi risiko *postural imbalance* menggunakan sensor tekanan FSR dan IMU dengan model klasifikasi *decision tree* berbasis CART.
2. Bagaimana kinerja dari prototipe *smart shoes* dalam mendeteksi *postural imbalance*.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan tugas akhir ini diantaranya sebagai berikut:

1. Merancang dan membangun prototipe *smart shoes* yang dapat mendeteksi risiko *postural imbalance* menggunakan sensor tekanan FSR dan IMU dengan model klasifikasi *decision tree* berbasis CART.
2. Menguji kinerja dari prototipe *smart shoes* dalam mendeteksi risiko *postural imbalance*.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat tugas akhir ini diantaranya sebagai berikut:

1. Manfaat Akademik

Penelitian ini dilakukan untuk menambah keilmuan dalam mata kuliah Sistem Mikroprosesor, seperti Sistem Kendali, Rangkaian Elektronik, dan Elektronika dasar. Penelitian ini juga memberikan referensi dan landasan ilmiah untuk pengembangan riset lebih lanjut di bidang *Internet of Things (IoT)* terutama pada perangkat *wearable*.

2. Manfaat Praktis

Penelitian ini bermanfaat sebagai solusi untuk membantu tenaga medis dan masyarakat umum dalam mendeteksi gangguan postural secara

real-time. Sistem yang dikembangkan mampu memberikan peringatan dan mudah dimengerti kepada pengguna ketika terdeteksi *postural imbalance*.

1.6. Batasan Masalah

Batasan yang berhubungan dengan masalah ini sangat luas. Agar penelitian lebih fokus, ada beberapa batasan yang ditetapkan yaitu:

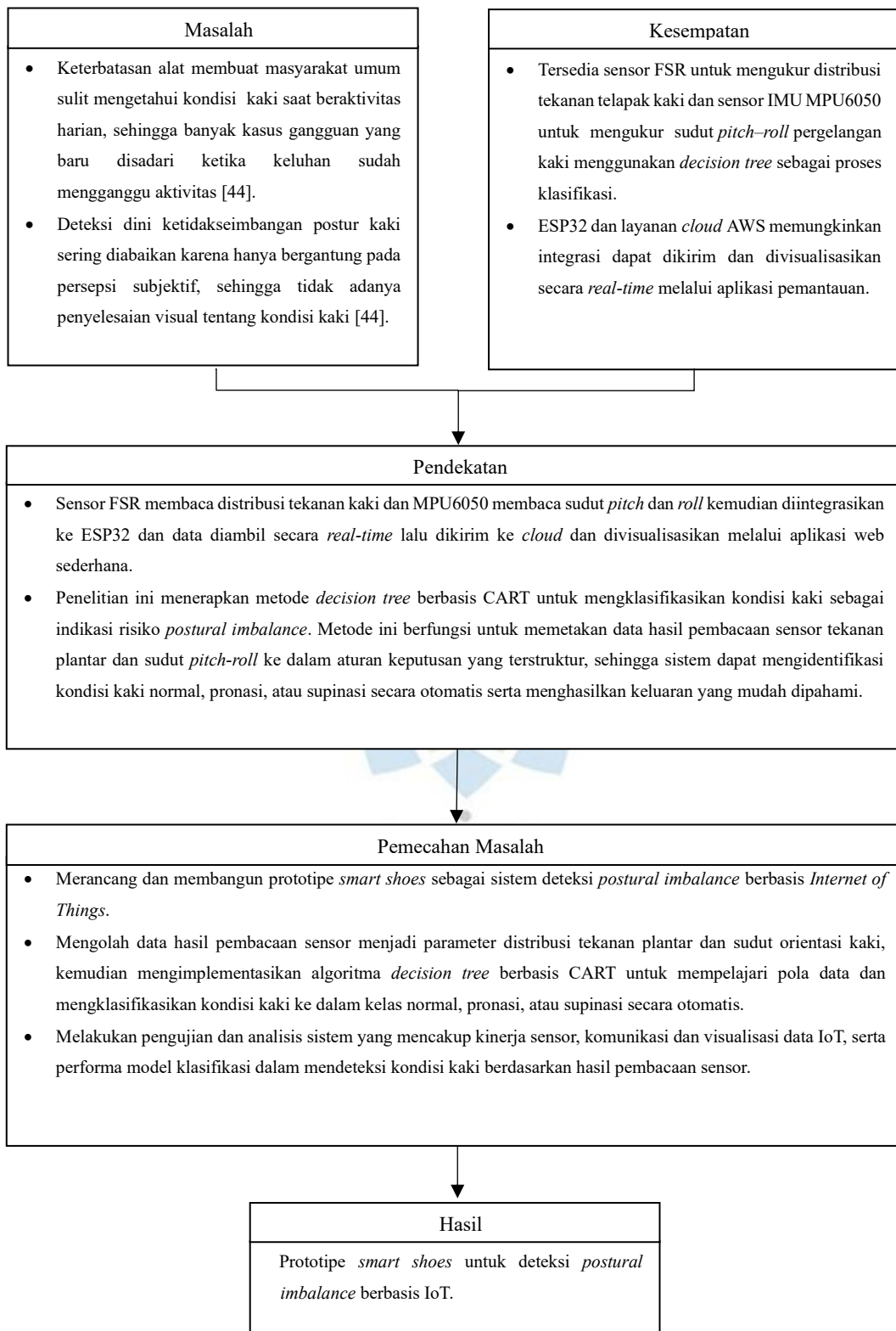
1. Sistem hanya difokuskan untuk mendeteksi indikasi *postural imbalance* (ketidakseimbangan postur) pada kaki, tidak membahas diagnosis medis maupun penanganan klinis.
2. Pengukuran dilakukan menggunakan *smart shoes* dengan empat sensor FSR yang disandingkan dengan resistor 220 ohm dan dibaca melalui modul ADC eksternal ADS1115, serta satu sensor MPU6050.
3. Analisis *postural imbalance* dibatasi pada pengukuran pola distribusi tekanan plantar di beberapa titik FSR dan sudut *pitch-roll* untuk mengklasifikasikan kondisi kaki normal, pronasi, dan supinasi berdasarkan ambang batas yang diadaptasi dari pengambilan dataset, tanpa melakukan penilaian klinis lanjutan.
4. Subjek uji coba dibatasi pada individu dewasa dengan ukuran kaki 43--44, karena prototipe insole yang dirancang hanya disesuaikan untuk satu ukuran tertentu, sehingga belum dapat merepresentasikan variasi bentuk dan ukuran kaki pengguna secara umum. Pengujian dilakukan pada saat berdiri.
5. Sistem IoT hanya mencakup pengiriman data ke platform *cloud* dan tampilan hasil pada aplikasi, tanpa integrasi ke sistem rekam medis rumah sakit.
6. *Dataset* pronasi dan supinasi diperoleh melalui peragaan yang telah divalidasi ahli fisioterapi, bukan dari data pasien klinis, karena keterbatasan akses ke fasilitas rumah sakit.
7. Prototipe *smart shoes* pada penelitian ini diimplementasikan menggunakan alas kaki jenis sandal (Crocs), bukan sepatu tertutup konvensional, karena keterbatasan ruang pemasangan modul MPU6050 dan kabel penghubung

pada struktur sepatu tertutup yang lebih rapat. Pemilihan ini memungkinkan penempatan sensor lebih fleksibel untuk keperluan pengujian prototipe

8. Proses akuisisi data untuk pelatihan dan pengujian model klasifikasi *decision tree* pada penelitian ini dilakukan melalui komunikasi serial (USB) antara ESP32 dan komputer, bukan sepenuhnya nirkabel, karena proses klasifikasi dijalankan pada aplikasi Python di sisi komputer akibat keterbatasan kapasitas komputasi ESP32. Power bank digunakan untuk menyuplai daya secara portabel pada jalur pemantauan MQTT ke AWS IoT Core, namun jalur pengambilan dataset dan klasifikasi utama tetap memerlukan koneksi kabel ke laptop, sehingga sistem belum dapat dikatakan beroperasi secara mandiri tanpa perangkat komputer pendamping.
9. Meskipun prototipe dirancang dalam bentuk *smart shoes* yang berpotensi digunakan secara berkelanjutan, pengujian pada penelitian ini dibatasi pada skenario deteksi sesaat dengan subjek berdiri statis, bukan monitoring kontinu selama aktivitas berjalan sehari-hari.

1.7. Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir merupakan susunan logis yang menjelaskan keterkaitan antara konsep atau variabel yang akan diteliti, yang disusun berdasarkan teori serta temuan penelitian sebelumnya. Melalui kerangka ini, peneliti dapat merumuskan hipotesis serta menggambarkan alur pelaksanaan penelitian guna mencapai tujuan yang telah ditetapkan. Dengan adanya kerangka berpikir, penelitian dapat dilakukan secara lebih terarah, sistematis, dan berfokus pada permasalahan utama yang hendak diselesaikan. Gambar 1.1 di bawah ini merupakan kerangka berpikir.



Gambar 1.1 Kerangka berpikir.

1.8. Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas mengenai latar belakang penulisan tugas akhir ini, rumusan masalah, penelitian terdahulu, tujuan, manfaat, batasan masalah, kerangka pemikiran dan sistematika penulisan untuk menjelaskan pokok-pokok pembahasan.

BAB II : TEORI DASAR

Bab ini berisikan teori yang menjadi dasar pembuatan tugas akhir yang dilakukan dengan melakukan studi pustaka. Landasan teori diantaranya membahas mengenai teori dasar.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini menguraikan tentang metode penelitian yang digunakan pada penyusunan tugas akhir ini diantaranya studi literatur, identifikasi masalah, analisis kebutuhan, perancangan, implementasi, pengujian, analisis dan kesimpulan.

BAB IV : PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

Pada bab ini menjelaskan proses perancangan dan implementasi prototipe *smart shoes* untuk mendeteksi *postural imbalance* berbasis *Internet of Things*. Pembahasan pada bab ini meliputi perancangan sistem, perancangan wiring, perancangan penempatan sensor, perancangan perangkat lunak, perancangan model klasifikasi *decision tree*, serta implementasi perangkat keras, implementasi aplikasi *monitoring*, implementasi model klasifikasi, dan integrasi sistem secara keseluruhan.

BAB V : PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab ini menjelaskan hasil pengujian yang dilakukan terhadap sistem *smart shoes*, baik dari sisi perangkat keras maupun perangkat lunak, beserta analisis terhadap data yang diperoleh. Pengujian perangkat keras meliputi pengujian sensor FSR dalam kondisi *loading* dan *unloading*, serta pengujian kinerja keseluruhan prototipe *smart shoes* dalam merekam data tekanan dan orientasi kaki. Pengujian perangkat lunak meliputi pengujian *black box* untuk memastikan setiap fungsi sistem berjalan sesuai rancangan, pengujian dan analisis klasifikasi model *decision tree* menggunakan metrik *accuracy*, *precision*, *recall*, dan *F1-score*, serta pengujian

usability sistem untuk menilai tingkat kemudahan, kenyamanan, dan kepuasan pengguna terhadap keseluruhan sistem yang telah dibangun.

BAB VI : KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menjelaskan kesimpulan yang ditarik berdasarkan hasil perancangan, implementasi, pengujian, dan analisis yang telah dilakukan pada bab-bab sebelumnya, sebagai jawaban atas rumusan masalah dan tujuan penelitian yang telah ditetapkan. Selain itu, bab ini juga memuat saran yang ditujukan untuk pengembangan penelitian selanjutnya, baik dari sisi perangkat keras, algoritma klasifikasi, maupun aplikasi *monitoring*, agar sistem *smart shoes* untuk mendeteksi *postural imbalance* dapat disempurnakan dan diterapkan secara lebih luas pada penelitian berikutnya.

