

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Flatfoot (pes planus), yaitu kondisi dimana sebagian atau seluruh telapak kaki menyentuh permukaan tanah akibat penurunan lengkungan kaki. Kondisi ini dapat menyebabkan perubahan distribusi tekanan pada telapak kaki serta berdampak pada fungsi biomekanik, seperti keseimbangan tubuh dan lain lain [1].

Pada kondisi normal, kaki umumnya stabil, ritmis, dan menunjukkan distribusi tekanan *plantar* yang seimbang, serta orientasi kaki yang tidak menyimpang. Sebaliknya, *flatfoot* muncul ketika terdapat ketidakseimbangan tekanan, atau orientasi kaki bergeser dari pola ideal. Deteksi dini terhadap *flatfoot* sangat penting karena berkaitan dengan potensi cedera, gangguan mobilitas, hingga penurunan fungsi gerak dalam jangka panjang [2].

Perkembangan teknologi *wearable* mendorong pemanfaatan sistem berbasis sensor dalam bidang kesehatan, salah satunya untuk analisis kondisi kaki dan pola berjalan manusia. Kaki memiliki peran penting dalam menopang berat badan serta menjaga keseimbangan tubuh selama aktivitas statis maupun dinamis. Salah satu struktur utama pada kaki adalah lengkungan (*arch*), khususnya *medial longitudinal arch*, yang berfungsi untuk mendukung distribusi beban dan membantu efisiensi gerakan saat berjalan maupun berdiri [1].

Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa distribusi tekanan *plantar* (*plantar pressure distribution*) merupakan parameter penting dalam menganalisis kondisi kaki. Distribusi tekanan ini tidak hanya mencerminkan beban yang diterima oleh telapak kaki, tetapi juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi kondisi abnormal seperti *flatfoot* [3].

Analisis distribusi tekanan *plantar* dilakukan ada kondisi berdiri (*static weight-bearing*), yang dimana tekanan yang terdistribusi pada area telapak kaki dapat menggambarkan struktur dan fungsi kaki secara langsung, termasuk kondisi lengkungan kaki. Pengukuran pada kondisi statis ini dinilai lebih stabil dan mudah dilakukan, sehingga cocok digunakan sebagai metode awal dalam deteksi kelainan kaki seperti *flatfoot* [3]. Kemajuan teknologi *wearable* yang mendorong

berkembangnya perangkat *smart insole*, yaitu *insole* pintar yang dilengkapi sensor tekanan untuk merekam parameter secara langsung dari kaki pengguna. *Smart insole* mampu menghasilkan data biomekanik seperti *Ground Reaction Force* (GRF) dan distribusi tekanan *plantar* yang sangat berguna dalam mendeteksi pola berjalan yang tidak normal.

Sensor tekanan, khususnya *Force Sensitive Resistor* (FSR), banyak digunakan karena memiliki ukuran yang kecil, biaya yang relatif rendah, serta mampu memberikan respons yang cukup baik dalam pengukuran tekanan *plantar* secara *real-time* [4]. Bahkan, beberapa studi terbaru memanfaatkan sensor seperti *triboelectric sensors* yang mampu meningkatkan akurasi pembacaan, terutama pada sistem yang terintegrasi dengan kecerdasan buatan [5]. Selain itu, *dataset* seperti *Smart-Insole Dataset* menunjukkan bahwa sensor tekanan *plantar* saja sudah mampu merekam pola berjalan secara efektif pada berbagai kelompok pengguna, seperti orang sehat, lansia, dan pasien Parkinson [6].

Pada penelitian ini, digunakan sensor utama, yaitu *Force Sensitive Resistor* (FSR) untuk mendeteksi tekanan *plantar* sensor ini telah digunakan secara luas dan terbukti mampu menggambarkan pola langkah pengguna dengan cukup baik dalam mendeteksi adanya gangguan kaki [7], [8].

Seluruh rangkaian sensor dikendalikan menggunakan mikrokontroler ESP32, yang dikenal memiliki kemampuan pemrosesan yang cepat, konsumsi daya yang rendah, serta modul Wi-Fi yang sudah terintegrasi sehingga cocok digunakan pada perangkat *wearable*. ESP32 dapat memproses data sensor sekaligus mengirimkannya ke server atau *Web monitoring* tanpa memerlukan perangkat tambahan lainnya [9]. Teknologi *Internet of Things* (IoT) juga diimplementasikan agar data dapat dikirim secara otomatis melalui jaringan internet sehingga kaki pengguna dapat dipantau dari jarak jauh dan dianalisis secara *real-time* [10].

Meskipun berbagai metode telah digunakan untuk mendeteksi kondisi *flatfoot*, proses klasifikasi kondisi kaki normal dan *flatfoot* pada praktik klinis masih banyak mengandalkan pengamatan visual maupun pengukuran manual terhadap parameter anatomi kaki. Pendekatan tersebut berpotensi menimbulkan variasi hasil antar pemeriksa (*inter-observer variability*) serta belum memiliki standar yang

konsisten, sehingga dapat memengaruhi objektivitas proses identifikasi. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan yang mampu melakukan klasifikasi secara otomatis, konsisten, dan mudah diinterpretasikan untuk membantu proses pengambilan keputusan dalam mendeteksi kondisi *flatfoot* [11].

Seiring berkembangnya teknologi *machine learning*, proses klasifikasi kondisi kaki dapat dilakukan secara otomatis berdasarkan pola data yang diperoleh dari sensor. Salah satu algoritma yang banyak digunakan adalah *decision tree* karena memiliki struktur yang sederhana, mudah dipahami, serta menghasilkan proses pengambilan keputusan yang transparan. Selain itu, algoritma *decision tree* memiliki kompleksitas komputasi yang relatif rendah sehingga sesuai untuk diimplementasikan pada sistem *embedded* maupun perangkat *wearable*. Dengan karakteristik tersebut, *decision tree* menjadi salah satu metode yang berpotensi digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi telapak kaki berdasarkan distribusi tekanan plantar yang diperoleh dari sensor FSR [11].

Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa data tekanan *plantar* yang diperoleh dari sensor *Force Sensitive Resistor* (FSR) yang ditanam pada *insole* dapat digunakan secara efektif untuk mengidentifikasi kaki manusia apabila diproses menggunakan metode *machine learning*. Sebuah penelitian yang memanfaatkan FSR *embedded insole* untuk deteksi *flatfoot* menunjukkan bahwa algoritma klasifikasi, termasuk *Decision tree*, mampu membedakan kaki disaat berdiri secara akurat berdasarkan pola perubahan tekanan *plantar* [12]. Pendekatan *machine learning* telah banyak digunakan untuk menangani data seperti ini di berbagai studi karena kemampuannya mempelajari pola *nonlinier* dari data sensor yang kompleks [13]. Selain itu, *Decision tree* dipilih karena memiliki struktur yang sederhana, mudah diinterpretasikan, serta memiliki kompleksitas komputasi yang rendah, sehingga sesuai untuk diimplementasikan pada sistem *embedded* seperti mikrokontroler dan juga *decision Tree* termasuk algoritma non-parametrik yang telah banyak diterapkan pada bidang medis karena memiliki kemampuan yang baik dalam melakukan klasifikasi dan prediksi berdasarkan pola data. Jung *et al.* menyatakan bahwa metode *Classification and Regression Tree* (CART), yang merupakan salah satu jenis *decision tree*, merupakan algoritma yang efektif dan

praktis untuk tugas klasifikasi serta menghasilkan model yang mudah digunakan dalam proses pengambilan keputusan. Oleh karena itu, pada penelitian ini dipilih algoritma *decision tree* untuk mengklasifikasikan kondisi telapak kaki berdasarkan distribusi tekanan plantar yang diperoleh dari sensor *Force Sensitive Resistor* (FSR) [14], [15]. Dengan demikian, penggunaan *decision tree* memungkinkan sistem melakukan klasifikasi kaki secara efisien tanpa membutuhkan sumber daya komputasi besar, namun tetap memberikan transparansi dalam proses pengambilan keputusan.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini berfokus pada pengembangan *smart insole* berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk mendeteksi *flatfoot* dengan memanfaatkan sensor *Force Sensitive Resistor* (FSR) yang diolah menggunakan mikrokontroler ESP32. Data hasil pembacaan sensor selanjutnya diproses menggunakan pendekatan *machine learning* dengan algoritma *Decision tree* untuk mengklasifikasikan kaki normal dan *flatfoot* dengan cara berdiri. Sistem ini diharapkan mampu memberikan solusi pemantauan kaki yang *flatfoot* atau normal dengan berdiri yang lebih objektif dan akurat serta membantu pengguna umum dalam mendeteksi kelainan kaki secara dini tanpa perlu melakukan pemeriksaan klinis secara berulang.

1.2. Tinjauan Penelitian Terdahulu

Penelitian ini mencakup teknologi dan pengetahuan terbaru mengenai pengembang *smart insole* berbasis IoT dan untuk memantau aktivitas dan postur tubuh secara *real-time*. Tinjauan penelitian sejenis yang dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya dapat dilihat pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Penelitian Terdahulu

No	Nama Peneliti	Judul	Tahun Terbit
1.	Manna, S. K. et al	Optimal Locations and Computational Frameworks of FSR and IMU Sensors for Measuring <i>Gait</i> Abnormalities	2023

No	Nama Peneliti	Judul	Tahun Terbit
2.	Jiangtao Shen et al	Prevalence of <i>flatfoot</i> and analysis of <i>plantar</i> pressure distribution in adolescents based on body mass index: a regional study	2024
3.	Yulianti et al	Comparative Analysis of the Components of a Child's <i>Gait</i> Pattern with Flat Foot Disorder	2023
4.	Chatzaki et al	The Smart- <i>Insole Dataset: Gait</i> Analysis Using Wearable Sensors with a Focus on Elderly and Parkinson's Patients	2021
5.	Jang et al	Validation of the Short Physical Performance Battery via Plantar Pressure Analysis Using Commercial Smart <i>Insoles</i>	2024

Berdasarkan hasil *critical review* terhadap beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan analisis pola kaki dan pengembangan *smart insole*, dapat diketahui bahwa penelitian-penelitian tersebut telah memberikan kontribusi penting dalam pengukuran parameter biomekanik kaki menggunakan sensor *wearable*.

Penelitian yang dilakukan oleh Manna *et al.* membahas secara mendalam mengenai penempatan optimal sensor *Force Sensitive Resistor* (FSR) dan *Inertial Measurement Unit* (IMU) untuk mengukur *gait* abnormal [7]. Kekurangan penelitian ini yaitu lebih berfokus pada pemrosesan dan analisis data sensor, serta belum mengintegrasikan sistem ke dalam platform *Internet of Things* (IoT) untuk pemantauan secara *real-time*, sehingga penerapannya dalam sistem monitoring jarak jauh masih terbatas [7].

Penelitian oleh Shen *et al.* membahas analisis distribusi tekanan *plantar* pada remaja berdasarkan Indeks Massa Tubuh (BMI) menggunakan sistem *plantar pressure platform*. Kekurangan pada penelitian ini yaitu masih menggunakan

perangkat *plantar pressure platform* yang bersifat khusus dan kompleks sehingga implementasinya dalam sistem *wearable* sederhana masih terbatas [3].

Sementara itu, penelitian oleh Jang *et al.* memvalidasi penggunaan commercial *smart insoles* untuk menganalisis tekanan plantar dalam pelaksanaan *Short Physical Performance Battery* (SPPB). Penelitian ini menggunakan empat sensor *Force Sensitive Resistor* (FSR) pada *smart insole* untuk memperoleh data tekanan *plantar* yang kemudian dibandingkan dengan pengukuran manual menggunakan *stopwatch*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *smart insole* memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi dengan metode konvensional sehingga berpotensi digunakan sebagai alat pengukuran fungsi fisik secara objektif. Namun, penelitian ini hanya berfokus pada validasi sistem *smart insole* sebagai alat pengukuran fungsi fisik dan belum menerapkan metode *machine learning* untuk melakukan klasifikasi kondisi kaki, khususnya dalam mendeteksi *flatfoot* berdasarkan distribusi tekanan *plantar*.

Sementara itu, penelitian oleh Yulianti *et al.* menganalisis perbedaan *gait pattern* pada anak dengan kondisi normal dan *flatfoot* menggunakan metode *wet footprint test*, *Clarke's angle*, dan parameter *gait* seperti *stride*, *step length*, *cadence*, serta *speed*. Namun, dalam penelitian ini terdapat kekurangan yaitu pada metode yang digunakan masih bersifat konvensional karena identifikasi kondisi kaki dilakukan menggunakan *footprint test* dan pengukuran sudut arkus, sehingga belum memanfaatkan sistem sensor tekanan secara *real-time* [1].

Penelitian oleh Chatzaki *et al.* melalui *The Smart-Insole Dataset* memberikan kontribusi besar dalam penyediaan *dataset gait* berbasis *smart insole* yang memanfaatkan sensor tekanan [6]. Meski demikian, penelitian ini memiliki kekurangan yaitu lebih menitikberatkan pada penyediaan *dataset* dan analisis data, bukan pada pengembangan sistem *smart insole* berbasis *Internet of Things* (IoT) yang diimplementasikan secara langsung untuk pemantauan mandiri.

Berdasarkan kajian terhadap penelitian-penelitian terdahulu, dapat diketahui bahwa masing-masing penelitian memiliki fokus dan ruang lingkup yang berbeda. Penelitian oleh Manna *et al.* berfokus pada optimasi lokasi sensor *Force Sensitive Resistor* (FSR) untuk mengukur ketidakwajaran pola *gait*, namun belum

mengimplementasikan proses klasifikasi pola *gait* secara otomatis [7]. Sementara itu, penelitian oleh Chatzaki et al. berkontribusi dalam penyediaan *dataset smart insole* untuk analisis pola *gait*, tetapi tidak mengembangkan sistem *monitoring* maupun klasifikasi secara langsung[6]

Berdasarkan kondisi tersebut, dapat disimpulkan bahwa masih terdapat celah penelitian, yaitu belum adanya sistem *smart insole* yang secara terintegrasi menggabungkan pengukuran tekanan *plantar* dan orientasi kaki, melakukan klasifikasi pola kaki secara otomatis menggunakan algoritma *machine learning*, serta menyediakan fitur pemantauan secara *real-time* melalui platform IoT. Oleh karena itu, penelitian ini diusulkan untuk mengisi celah tersebut dengan mengembangkan *smart insole* berbasis IoT yang mengintegrasikan sensor FSR, dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32, serta dilengkapi dengan algoritma *Decision tree* untuk mengklasifikasikan normal dan *flatfoot* secara otomatis. Sistem ini dirancang agar bersifat portabel dan dapat digunakan oleh pengguna umum sebagai alat bantu pemantauan pola kaki.

1.3. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang dan penelitian terdahulu, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana rancangan dan implementasi sistem deteksi normal dan *flatfoot* berdasarkan data pembacaan sensor FSR pada *smart insole*?
2. Bagaimana kinerja sistem deteksi *flatfoot* berbasis IoT yang terintegrasi dengan sensor FSR, dan mikrokontroler ESP32 dalam menampilkan hasil deteksi secara *real-time*?

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan membangun sistem *smart insole* berbasis IoT menggunakan ESP32 dengan sensor FSR untuk mendeteksi kondisi kaki normal atau *flatfoot*.
2. Menganalisis kinerja sistem deteksi *flatfoot* berbasis IoT dalam mengirimkan dan menampilkan hasil deteksi secara *real-time*.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat yaitu

1. Manfaat akademis dalam penelitian ini adalah memberikan kontribusi terhadap pengembangan pengetahuan di bidang teknologi *wearable* dan analisis pada *flatfoot*, khususnya terkait pemanfaatan sensor FSR dalam pendeteksian pola berdiri. Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembangan sistem pemantauan *berbasis Internet of Things (IoT)* serta menjadi acuan bagi mahasiswa atau peneliti lain yang ingin melakukan riset lanjutan mengenai *smart insole* dan analisis dalam pendeteksian *flatfoot*.
2. Manfaat praktis dalam penelitian ini adalah menyediakan prototipe *smart insole* yang mampu membantu pengguna umum dalam memantau pola berjalan secara objektif dan *real-time*. Sistem ini diharapkan dapat digunakan sebagai alat deteksi dini terhadap potensi gangguan pada *flatfoot* serta dapat mendukung tenaga medis atau terapis dalam memperoleh data tekanan *plantar* dan pergerakan kaki tanpa harus melakukan observasi langsung secara berulang. Selain itu, perangkat ini berpotensi dikembangkan lebih lanjut sebagai alat bantu rehabilitasi portabel yang mudah digunakan dalam kehidupan sehari-hari.

1.6. Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada:

1. Deteksi kondisi kaki normal dan *flatfoot* pada penelitian ini hanya didasarkan pada parameter tekanan yaitu menggunakan sensor FSR, tanpa melibatkan parameter medis lainnya.
2. Pengujian sistem dilakukan dalam kondisi lingkungan yang terkontrol dan hanya difokuskan pada pengguna umum, bukan pasien dengan kondisi medis tertentu yang membutuhkan parameter tambahan.

3. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Decision tree* untuk mengklasifikasikan kaki pengguna ke dalam kategori normal dan *flatfoot*.
4. Pendeteksian hanya dilakukan dengan kondisi berdiri tegak. Berdasarkan saran dari dokter ortopedi.
5. Pengujian dilakukan dengan kondisi subjek menginjak di atas *insole* yang sudah di *setup* tanpa dimasukan ke dalam sepatu. Hal ini dilakukan untuk menghindari ketidaknyamanan akibat ketidakcocokan kaki subjek terhadap sepatu tersebut.
6. Pengambilan *dataset* dalam penelitian ini tidak membatasi karakteristik responden berdasarkan jenis kelamin, berat badan, ukuran kaki, maupun tinggi badan selama responden dapat menggunakan prototipe *smart insole* yang dirancang.
7. *Dataset* yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas 10 responden dengan kondisi *flatfoot* dan 10 responden dengan kondisi kaki normal. Jumlah tersebut ditetapkan dengan mempertimbangkan keterbatasan waktu dalam proses identifikasi responden serta perolehan izin untuk melakukan pengambilan data pada individu yang memiliki kelainan *flatfoot*.
8. Resistor yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan resistor sebesar 220 ohm.

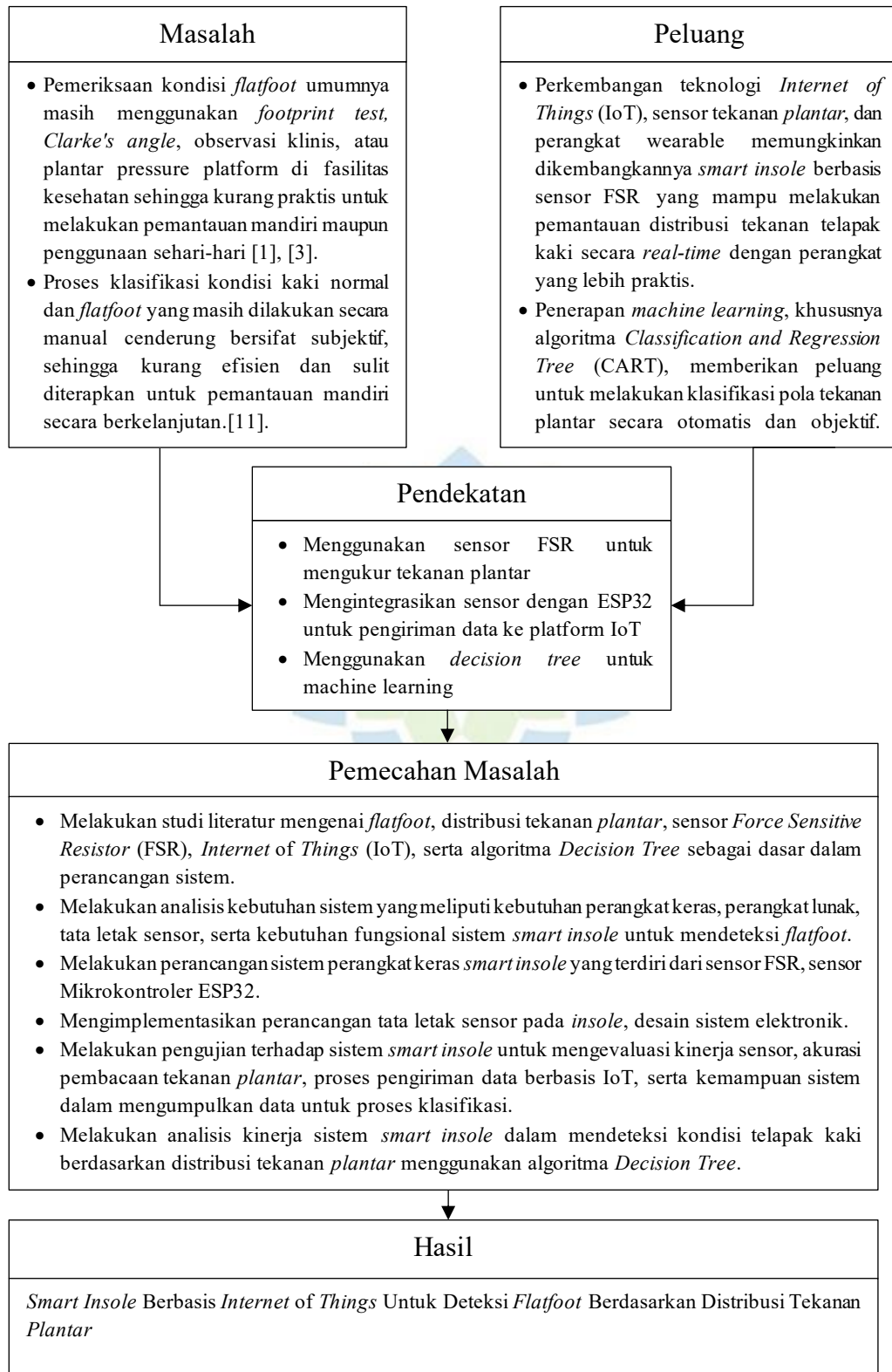
1.7. Kerangka Berpikir

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.

Pada penelitian ini, pendekatan kerangka berpikir bertujuan untuk memberikan gambaran sistematis mengenai bagaimana sistem *smart insole* berbasis *Internet of Things* (IoT) dirancang untuk memantau aktivitas dan postur tubuh secara *real-time*.

Sistem dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan sensor *Force Sensitive Resistor* (FSR) untuk mengukur tekanan kaki. Data dikirim secara *real-time* melalui koneksi Wi-Fi ke *cloud server* untuk divisualisasikan dan dianalisis. Gambar 1.1 merupakan gambar kerangka berpikir.





Gambar 1.1 Kerangka Berpikir

1.8. Sistematika Penulisan

Dalam sistematika penulisan tugas akhir terdapat 6 bab yaitu

1. Bab I Pendahuluan

Berisi latar belakang masalah, tinjauan penelitian terdahulu, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, kerangka berpikir, dan sistematika penulisan. Bab ini menjelaskan alasan penelitian dan posisi penelitian terhadap kajian sebelumnya.

2. Bab II Tinjauan Pustaka

Bab ini membahas teori-teori yang mendukung penelitian, meliputi penjelasan mengenai *flatfoot*, sensor yang digunakan (FSR), konsep *Internet of Things (IoT)*, Konsep *Decision tree*, mikrokontroler ESP32, evaluasi kinerja model yang relevan sebagai landasan dalam pengembangan sistem.

3. Bab III Metodologi Penelitian

Bab ini menjelaskan metode yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian, meliputi jenis dan pendekatan penelitian, diagram alir penelitian, perancangan sistem *smart insole*, analisis kebutuhan sistem, metode pengumpulan data, metode pengolahan data sensor, pengujian sistem, analisis hasil, serta waktu dan lokasi penelitian. Bab ini menjelaskan tahapan teknis yang dilakukan untuk mewujudkan sistem deteksi *flatfoot* berbasis *Internet of Things (IoT)*.

4. Bab IV Perancangan dan Implementasi

Bab ini menjelaskan tentang tahap tahapan perancangan, dari analisis hingga menuju ke pengimplementasian. Selain itu, pada bab ini juga dijelaskan proses akuisisi data tekanan telapak kaki menggunakan sensor FSR dan pengolahan data yang dilakukan oleh mikrokontroler ESP32.

5. Bab V Pengujian dan Analisis

Bab ini memaparkan hasil pengujian sistem *smart insole* yang telah dikembangkan. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja sensor FSR dalam mendeteksi tekanan pada telapak kaki serta mengevaluasi

kemampuan sistem dalam memperoleh data distribusi tekanan *plantar* pada kondisi berdiri. Data hasil pengujian kemudian dianalisis untuk melihat karakteristik distribusi tekanan pada setiap titik pengukuran dan mengevaluasi kesesuaian hasil pengukuran dengan tujuan penelitian.

6. Bab VI Penutup

Bab ini memaparkan kesimpulan dan saran untuk penelitian sistem deteksi *flatfoot* serta lampiran.

