

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Dalam bidang biomekanika, kebutuhan alat perangkat ukur yang mampu mendeteksi serta menganalisis gaya reaksi tanah (*Ground Reaction Force/GRF*) dan posisi titik pusat tekanan (*Center of Pressure/CoP*) semakin meningkat seiring dengan berkembangnya penelitian pada analisis gerakan manusia. *Force plate* merupakan alat yang secara luas digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari evaluasi pola berjalan, pengujian performa atlet, hingga pemantauan proses industri karena kemampuannya memberikan data yang akurat dan presisi. Namun di Indonesia, pengembangan *force plate* ekonomis tetap presisi belum banyak dilakukan, padahal alat ini sangat penting untuk menunjang riset dan aplikasi rehabilitasi medis, olahraga, maupun ergonomi kerja. Untuk itu, penelitian ini berfokus pada pengembangan dan validasi model estimasi GRF dan CoP menggunakan *Twin Force Plate* yang dilengkapi dengan susunan *loadcell* jamak, agar dapat menyediakan solusi instrumentasi biomekanika yang terjangkau namun akurat bagi kebutuhan akademis dan industri. *Force plate* merupakan standar emas dalam pengukuran *ground reaction force* (GRF) dan *center of pressure* (CoP) yang dihasilkan dari gerakan seseorang, di mana data yang diperoleh sangat berguna untuk analisis biomekanika. GRF merepresentasikan gaya eksternal yang bekerja pada tubuh manusia dari permukaan tanah, sedangkan CoP menunjukkan posisi titik tumpuan di mana gaya tersebut bekerja. *Force plate* laboratorium umumnya terdiri atas *loadcell* enam sumbu dalam sebuah kotak berbentuk persegi panjang yang datar, digunakan untuk mengukur GRF dan momen dalam tiga dimensi. Posisi CoP kemudian dihitung berdasarkan data GRF dan momen yang terekam. Kedua parameter ini sangat penting untuk mengetahui besarnya gaya dan torsi yang diterima oleh berbagai bagian tubuh manusia pada analisis biomekanika. Selain itu, *force plate* berperan penting dalam pengambilan berbagai metrik GRF atau CoP yang digunakan untuk menilai kondisi kesehatan lansia maupun pasien di lingkungan klinis. Berbagai aplikasi tersebut menunjukkan pentingnya *force plate* dalam bidang biomekanika dan klinis (Engineering and Campus, 2025).

Force plate merupakan perangkat yang banyak digunakan dalam biomekanika, rekayasa struktur, dan berbagai industri untuk mendeteksi gaya yang bekerja pada permukaan. Dalam penggunaannya, seperti analisis pola berjalan, pengujian performa atlet, hingga pemantauan proses di sektor industri, perangkat ini berperan penting dalam menyediakan data yang akurat

dan presisi. Salah satu parameter di dalam rancangannya adalah defleksi, yaitu penampang material yang terjadi karena aplikasi gaya, hal ini sangatlah penting karena defleksi yang besar dapat mereduksi akurasi dari pengukuran. Ketika gaya bekerja pada pelat, sensor tersebut mengalami distorsi, sehingga mengubah tegangan secara langsung dengan gaya yang diterapkan, dengan memasang sensor dalam berbagai orientasi, gaya dalam tiga dimensi, baik arah maupun besarnya dapat diukur dengan efektif. (Lamkin-Kennard and Popovic, 2019).

Pengembangan dan validasi *Force Plate* untuk mengukur *Ground Reaction Force* (GRF) dan *Center of Pressure* (COP) merupakan langkah kritis dalam pengembangan alat ukur biomekanika yang sangat penting untuk analisis gerakan manusia. *Force Plate* adalah alat yang sering digunakan untuk mengukur gaya reaksi tanah (*Ground Reaction Force*) dalam analisis *gait* yang diperlukan di bidang rehabilitasi medik (Widagda and Lestari, 2024).

Tim penelitian Ergonomi Sisman telah berhasil membangun instrumen *motion capture* berbasis *inertial measurement* unit yang diberi nama esMOCA untuk merekam Gerakan subjek manusia, menganalisis variabel-variabel kinematika gerakan subjek untuk asesmen risiko ergonomi dan mengestimasi variabel-variabel biomekanika. Pengukuran variabel-variabel model kinematika gerak dalam instrumen esMOCA telah di validasi dalam penelitian terdahulu. Tetapi pengukuran variabel dinamika seperti gaya dan momen di setiap sendi belum tervalidasi karena keterbatasan alat ukur pembanding. Beberapa variabel dinamika yang diestimasi instrumen esMOCA sejatinya dapat divalidasi dengan alat ukur pembanding, variabel tersebut adalah posisi dan besar gaya tumpuan di kaki kanan dan kaki kiri. Sebagai solusi permasalahan tersebut, tim peneliti Ergonomi-Sisman secara bertahap merancang dan mengembangkan *force plate* yang mampu mengukur besar GRF kaki kanan dan kaki kiri serta mampu menentukan posisi CoP kaki kanan dan kaki kiri menggunakan perangkat sensor *loadcell* yang tersedia di pasaran dan terjangkau. Berbeda dengan desain *force plate* pada umumnya yang *single plate* menggunakan 4 *loadcell*, desain *force plate* yang dikembangkan dalam penelitian ini mengakomodasi estimasi GRF dan CoP kaki kanan dan kiri menggunakan dua *force plate* kembar yang masing-masing dilengkapi tumpuan 3 *loadcell* dengan konfigurasi O (Arendra and Akhmad, 2018).

Sebagai solusi permasalahan tersebut, penelitian ini secara bertahap merancang dan mengembangkan *force plate* yang mampu mengukur besar GRF kaki kanan dan kaki kiri serta mampu menentukan posisi CoP kaki kanan dan kaki kiri menggunakan perangkat sensor *loadcell* yang tersedia di pasaran dan terjangkau. Berbeda dengan desain *force plate* pada umumnya yang *single plate* menggunakan 4 *loadcell*, desain *force plate* yang dikembangkan dalam penelitian ini mengakomodasi estimasi GRF dan CoP kaki kanan dan kiri menggunakan

dua *force plate* kembar yang masing-masing dilengkapi tumpuan 3 *loadcell* dengan konfigurasi X dan O. Dengan dilakukannya penelitian ini maka akan memberikan manfaat berupa model fisik matematik untuk estimasi dari GRF dan koordinat posisi CoP yang teruji secara *teoritis* dan *empiris* dan juga sebagai dasar pengembangan *hardware* dan *software* teknologi pengukuran GRF dan koordinat posisi CoP yang valid.

1.2 Rumusan masalah

Rumusan masalah dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kebenaran akurasi dan presisi pengukuran *loadcell* terhadap alat ukur pembanding?
2. Apakah beban tumpuan *loadcell* dapat dihitung dari pembebanan *vertical* dan koordinat posisi pembebanan pada *force plate*?
3. Bagaimana model untuk mengestimasi GRF dan koordinat posisi CoP berdasarkan pembacaan konfigurasi O *loadcell* tumpuan *force plate* dan bagaimana kebenaran model estimasi GRF dan koordinat posisi CoP?

1.3 Tujuan penelitian

Berdasarkan hasil rumusan masalah yang di sebutkan diatas, dihasilkan tujuan penelitian, sebagai berikut:

1. Menguji kebenaran akurasi dan presisi pengukuran *loadcell* terhadap alat ukur pembanding.
2. Membangun dan membuktikan kebenaran model *inverse dynamic force plate loadcell* susunan penataan O, dengan asumsi berat *platform* diabaikan.
3. Membuktikan kebenaran model estimasi GRF dan koordinat posisi CoP berdasarkan pembacaan beban *loadcell* susunan penataan O, dengan asumsi berat *platform* diabaikan.

1.4 Asumsi dan Batasan masalah

Batasan masalah merupakan hal yang penting dalam penelitian tugas akhir dikarenakan untuk membatasi penelitian agar tidak melebar dari topik yang telah dipilih oleh penyusun. Batasan masalah yang ada dari penelitian yang akan dilakukan yakni sebagai berikut:

1. Asumsi osilasi *load cell* diabaikan. Dengan demikian, penelitian ini tidak membahas respon transien dan respon dinamik pengukuran. Skripsi ini hanya meneliti respon pengukuran *steady-state* atau kondisi *equilibrium statis*.
2. Asumsi gaya yang dominan pengukuran *force plate* adalah gaya vertikal sumbu z. sehingga Batasan masalah gaya-gaya horizontal sumbu X dan sumbu Y tidak dibahas dalam penelitian ini. Untuk memenuhi asumsi ini, kaki *force plate* dilengkapi pengatur

kedataran untuk menjamin permukaan yang datar, meminimalkan proyeksi gaya *horizontal* dan konstruksi beban pembanding diatur supaya dapat berdiri *vertical* seimbang diatas satu kaki karet berdiameter 36 mm.

3. Penelitian ini dibatasi tidak membahas pengembangan rangkaian papan *circuit* elektronik dan pengembangan *user interface software* aplikasi. Diasumsikan bahwa konsep pengukuran masih perlu diuji secara *teoritis* dan *empiris*, sebelum mengembangkan *prototype* teknologi instrumentasi berdasarkan model konsep ini.
4. Asumsi berat *platform* dapat diabaikan dalam model mekanika gaya-gaya yang bekerja pada *force plate*, sehingga penelitian ini dibatasi tidak menyertakan berat *force plate* dalam persamaan.

1.5 Manfaat penelitian

Sebagai penelitian *fundamental* tahap awal perancangan dan pembuktian konsep instrumentasi *force plate*, penelitian ini bermanfaat untuk;

1. Memberikan model fisik matematik untuk estimasi GRF dan koordinat posisi CoP yang teruji secara *teoritis* dan *empiris*, sebagai dasar pengembangan *hardware* dan *software* teknologi pengukuran GRF dan koordinat posisi CoP yang valid.
2. Memberikan model dan data pembanding untuk analisis komparasi dengan Model Estimasi *Ground Reaction Force* (GRF) dan Posisi *Center of Pressure* (CoP) menggunakan Susunan *LoadCell* Jamak Konfigurasi O.
3. Memberikan basis data awal untuk kurva kalibrasi setup pengukuran GRF dan koordinat posisi CoP.
4. Memberikan basis data awal untuk penilaian karakteristik statis setup pengukuran GRF dan koordinat posisi CoP.
5. Memberikan setup awal pengumpulan data untuk penilaian karakteristik dinamis pengukuran GRF dan koordinat posisi CoP.

1.6 Sistematika penulisan

Skripsi model estimasi *ground reaction force* (GRF) dan posisi *of preassure* (CoP) menggunakan *Twin Force Plate*, disusun dalam sistematika berikut:

1. Bab pertama menjelaskan secara ringkas identifikasi celah penelitian dalam topik biomekanika dan kebutuhan solusi Estimasi GRF dan Posisi Cop untuk mengisi celah penelitian tersebut. Dalam bab ini juga dinyatakan 3 tujuan penelitian, kontribusi penelitian ini dalam mengisi celah penelitian tersebut, asumsi yang digunakan dan Batasan masalah yang tidak dicakup dalam skripsi Model Estimasi GRF dan Posisi Cop Menggunakan *Twin Force plate*.
2. Bab kedua, Dasar teori dan kajian Pustaka terbagi dalam dua bagian, sub-bab konstruksi teori dan sub-bab kajian Pustaka. Dalam sub-bab konstruksi teori ini membahas teori yang mendasari Model Estimasi GRF dan posisi Cop menggunakan *Twin Force Plate*. Dibagian konstruksi teori ini dijelaskan bagaimana model estimasi yang digunakan dalam skripsi ini dirangkai dan dibangun dari teori-teori mekanika Teknik, dan teori-teori pengukuran Teknik, hingga memberikan kerangka konsep teori Estimasi GRF Dan Posisi Cop Menggunakan *Twin Force Plate* dan memberikan tiga hipotesis penelitian sebagai solusi teoritis atas masalah dan tujuan penelitian. Di sub-bab konstruksi teori ini kajian Pustaka, dibahas lebih terperinci identifikasi celah penelitian dalam topik biomekanika dan perbedaan solusi Estimasi GRF dan Posisi Cop yang ditawarkan dari penelitian ini dibanding penelitian terdahulu, sekaligus menunjukkan posisi penelitian ini diantara penelitian-penelitian terdahulu.
3. Bab ketiga yaitu menjelaskan bagaimana menjalankan percobaan untuk membuktikan hipotesis penelitian skripsi Model Estimasi *force* dan posisi Cop Menggunakan *Twin Force Plate*. Dimulai perancangan percobaan berdasarkan teori-teori *metrology* statistik dan pengambilan *sample* yang diperlukan untuk uji hipotesis Estimasi GRF dan posisi Cop. Perancangan dan perakitan sensor *loadcell* dan akuisisi data digital berdasarkan teori dan keterampilan Teknik elektronika industri, instrumentasi dan *control*. Perancangan setup percobaan *twin force plate* berdasarkan teori dan keterampilan proses manufaktur dan perancangan alat bantu kerja. Hingga pengumpulan data percobaan Estimasi GRF dan posisi Cop menggunakan setup percobaan *Twin force plate*.
4. Bab IV Hasil Penelitian dan Pembahasan menyajikan hasil pengumpulan data, pengolahan data, serta pembahasan hasil penelitian yang diperoleh dari seluruh tahapan pengujian dan validasi model estimasi *Ground Reaction Force* (GRF) dan koordinat posisi *Center of Pressure* (CoP) menggunakan *Twin Force Plate*. Penyajian hasil dilakukan secara

sistematis sesuai dengan tujuan penelitian dan hipotesis yang telah dirumuskan. Pada Subbab 4.1 Pengumpulan dan Pengolahan Data, disajikan hasil statistik deskriptif dan hasil uji statistik dari setiap tahapan pengujian. Subbab ini diawali dengan penyajian hasil kalibrasi dan validasi *loadcell*, yang mencakup analisis kebenaran, akurasi, dan presisi pengukuran *loadcell* terhadap alat ukur pembanding sebagai pembuktian Hipotesis 1. Selanjutnya disajikan hasil validasi model *inverse dynamic force plate*, yang mengkaji pengaruh pembebanan vertikal dan koordinat posisi pembebanan terhadap pembacaan *loadcell* sebagai dasar pembuktian Hipotesis 2. Pada bagian akhir Subbab 4.1 disajikan hasil validasi model *forward dynamic force plate* dalam mengestimasi GRF dan koordinat posisi CoP, baik pada masing-masing *force plate* maupun pada platform gabungan, sebagai pembuktian Hipotesis 3. Penyajian hasil pada subbab ini dilengkapi dengan tabel, grafik, nilai koefisien determinasi, serta hasil uji hipotesis parametrik maupun nonparametrik sesuai karakteristik data. Pada Subbab 4.2 Analisis dan Pembahasan Hasil Penelitian, dilakukan pembahasan secara mendalam terhadap hasil yang diperoleh pada Subbab 4.1 dengan mengaitkannya pada model fisik-matematik, dasar teori, serta kajian pustaka yang relevan. Pembahasan diawali dengan analisis hasil kalibrasi dan validasi *loadcell*, dilanjutkan dengan evaluasi kinerja model *inverse dynamic force plate*, dan diakhiri dengan analisis kinerja model estimasi GRF dan CoP menggunakan pendekatan *forward dynamic force plate*. Pada bagian ini juga dibahas keterbatasan model, potensi sumber kesalahan pengukuran, serta implikasi hasil pengujian terhadap keandalan sistem *force plate* yang dikembangkan.

5. Bab V Penutup merupakan bagian akhir dari laporan penelitian yang menyajikan rangkuman hasil utama penelitian, temuan yang diperoleh, serta rekomendasi untuk penelitian selanjutnya. Bab ini disusun berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dipaparkan pada bab sebelumnya. Pada Subbab 5.1 Kesimpulan, disajikan kesimpulan penelitian yang disusun secara sistematis sesuai dengan tujuan dan ruang lingkup penelitian. Kesimpulan mencakup hasil kalibrasi dan validasi pengukuran *load cell*, hasil validasi model *inverse dynamic force plate*, serta hasil validasi model estimasi GRF dan koordinat posisi CoP menggunakan *forward dynamic force plate*. Kesimpulan dirumuskan berdasarkan hasil pengujian statistik dan parameter kinerja model yang diperoleh. Pada Subbab 5.2 Temuan dan Implikasi, diuraikan temuan-temuan penting yang dihasilkan dari penelitian ini, baik dari aspek pengembangan model fisik-matematik *force plate* maupun dari aspek kinerja instrumentasi pengukuran biomekanika. Bagian ini juga membahas implikasi teoritis dan praktis dari hasil penelitian terhadap pengembangan alat

ukur GRF dan CoP yang ekonomis, akurat, dan presisi. Pada Subbab 5.3 Saran Penelitian Selanjutnya, disampaikan saran dan rekomendasi untuk pengembangan penelitian lanjutan berdasarkan keterbatasan penelitian yang telah dilakukan. Saran mencakup pengembangan model yang mempertimbangkan respon dinamis, pengukuran gaya multi-sumbu, peningkatan desain mekanik dan instrumentasi, serta integrasi *force plate* dengan sistem analisis gerak manusia.