

# Pengembangan Sistem Pengujian Keseimbangan Berdiri Menggunakan *Force Platform* Dan *Wearable IMU Sensor*

1st Muhammad Alief Fikri Sukarno  
Putra

Fakultas Teknik Elektro  
Universitas Telkom  
Bandung, Indonesia

alieffikri@student.telkomuniversity.ac.id

2<sup>nd</sup> Husneni Mukhtar  
Fakultas Teknik Elektro  
Universitas Telkom  
Bandung, Indonesia

husnenimukhtar@telkomuniversity.ac.id

3<sup>rd</sup> Dien Rahmawati  
Fakultas Teknik Elektro  
Universitas Telkom  
Bandung, Indonesia

dienrahmawati@telkomuniversity.ac.id

**Abstrak**— Manusia adalah makhluk hidup yang terus bergerak untuk menjalankan aktivitasnya sehari – hari. Kemampuan manusia untuk menjalankan aktivitas juga dipengaruhi salah satunya oleh keseimbangan tubuh. Keseimbangan tubuh didefinisikan sebagai kemampuan seseorang untuk menjaga keadaan seimbang saat sikap tegak tanpa harus mengubah base of support. Keseimbangan tubuh sering dinilai sebagai jumlah postural goyangan (disebut juga *body sway*) dari tubuh manusia.

Perancangan suatu sistem untuk menguji keseimbangan tubuh manusia dengan mengukur nilai *body sway*, di antaranya menggunakan sensor IMU (Inertial Measurement Unit) dan *force platform*. Pengukuran *body sway* dilakukan dengan posisi berdiri tegak dengan beberapa scenario. Sensor IMU digunakan pada bagian tulang kering dan pangkal paha untuk merepresentasikan kaki dan panggul. Sensor load cell memiliki range error sebesar (2,02 – 7,42) % dan range error dari sensor IMU sebesar (0,04 – 3,2) %. Nilai range error yang kecil menunjukkan hasil pengukuran tidak jauh dari massa referensi dan sudut referensi. Pada pengujian keseimbangan tubuh diperoleh hasil pengukuran dari sensor IMU memberikan arah goyangan pada kaki dan panggul dalam bentuk sudut. Hasil dari IMU memvalidasi pengukuran dari *force platform*, bahwa kaki dan panggul juga mempengaruhi keseimbangan tubuh.

**Kata kunci** : *body sway*, base of support, *force platform*

## I. PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Manusia adalah makhluk hidup yang terus bergerak untuk menjalankan aktivitasnya sehari – hari. Kemampuan manusia untuk menjalankan aktivitas juga dipengaruhi salah satunya oleh keseimbangan tubuh. Keseimbangan tubuh secara umum didefinisikan sebagai kemampuan seseorang untuk menjaga atau mengembalikan keadaan keseimbangan saat sikap tegak tanpa harus mengubah *base of support* [1]. Keseimbangan tubuh juga sering dinilai sebagai jumlah postural goyangan (disebut juga *body sway*) dari tubuh manusia. *Body sway* didefinisikan sebagai gerakan postural ringan yang dilakukan oleh seorang individu untuk mempertahankan posisi seimbang [1]. Hasil pengukuran dari *body sway* dapat digunakan untuk memantau perkembangan penyakit *parkinson* dan penilaian risiko jatuh pada manusia.

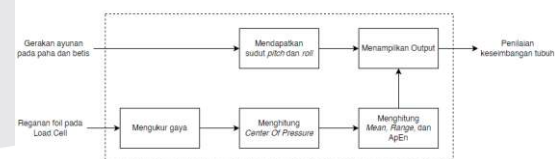
Pemantauan perkembangan penyakit *parkinson* dilakukan dengan mengukur *body sway* dari 13 orang terjangkit *parkinson* dan 12 orang sehat menggunakan sensor IMU [2]. Hasil pengukuran yang di dapat dari sensor IMU berupa dispersi *sway*, kecepatan *sway*, frekuensi *sway*, dan  *jerkiness of sway*.

Salah satu penelitian, menjelaskan saat tubuh manusia bergoyang, manusia bergerak seperti pendulum di sekitar sendi pergelangan kaki. Pada riset yang lain juga menyelidiki sendi pergelangan kaki, panggul, dan bagian tubuh yang lain ikut mempengaruhi keseimbangan tubuh. Sensor IMU digunakan pada bagian tulang kering dan pangkal paha untuk merepresentasikan kaki dan panggul [3].

Pada salah satu penelitian menyajikan penggunaan sensor IMU untuk mendeteksi gangguan keseimbangan pada atlet. Diperoleh metode pengukuran ini berguna untuk atlet yang berisiko mengalami gangguan keseimbangan dalam mengambil keputusan untuk turun ke lapangan atau tidak [4]. Sehingga, pada tugas akhir ini, saya merencanakan untuk membuat sistem pengujian keseimbangan tubuh yang diukur menggunakan *force platform* dan sensor IMU.

## II. KAJIAN TEORI

### A. Prinsip Kerja Alat



GAMBAR 2.1  
Desain Konsep Solusi

### B. Center Of Pressure

*Center of pressure* adalah parameter sederhana yang terdiri dari deret waktu dua koordinat di bidang X-Y. Untuk menghitung COP, sistem koordinat Cartesian 3D dapat dibuat di tengah atas pelat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, di mana X adalah arah medial-lateral (ML), Y adalah arah anterior-posterior (AP), dan Z adalah arah vertikal [5].

Dengan asumsi bahwa pembacaan keempat *load cell* pada keempat sudut platform gaya adalah  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ , dan  $f_4$  maka

momen terhadap sumbu y dapat direpresentasikan sebagai  $M_y = (F_1 + F_2 - F_3 - F_4) \cdot l/2$ , COP X sama dengan momen terhadap sumbu y dibagi penjumlahan gaya-gaya dalam arah Z adalah  $F_1 + F_2 + F_3 + F_4$ . Oleh karena itu, koordinat COP dalam arah X dan Y dapat dihitung masing-masing menggunakan Persamaan (2.1) dan (2.2).

$$X_{cop} = \frac{(F_1+F_2-F_3-F_4) \cdot l/2}{F_1+F_2+F_3+F_4} \quad (2.1)$$

$$Y_{cop} = \frac{(F_2+F_3-F_1-F_4) \cdot w/2}{F_1+F_2+F_3+F_4} \quad (2.2)$$

Keterangan :

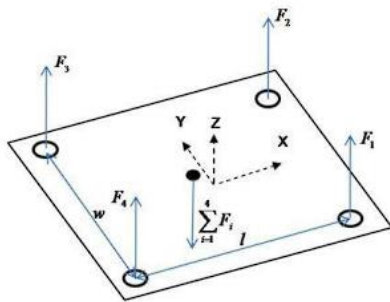
Xcop = COP pada koordinat sumbu X

Ycop = COP pada koordinat sumbu Y

F1, F2, F3, F4 = Hasil Pengukuran masing-masing *load cell*

l = Jarak antara dua *load cell* berdasarkan sumbu X

w = Jarak antara dua *load cell* berdasarkan sumbu Y



GAMBAR 2.2

Perhitungan *Center Of Pressure* dalam 3D sistem koordinat cartesian

### C. Center Of Pressure

*Approximate Entropy* (ApEn) adalah algoritma matematika yang dibuat untuk menghitung pengulangan atau prediktabilitas dalam deret waktu. Pada riset sebelumnya, ApEn didemonstrasikan untuk mengukur kompleksitas dalam kumpulan data yang relatif singkat (antara 75 sampai 100) [6]. ApEn umumnya bernilai antara 0 – 2, semakin nilainya mendekati 0 maka anggota di dalam deret waktu berulang, jika nilainya semakin mendekati 2 maka anggota di dalam deret waktu memiliki anggota random. Berikut ini adalah rumus ApEn yang digunakan pada riset ini.

$$ApEN(N, m, r) = \sum \ln(\Phi_m(r)) - \sum \ln(\Phi_{m+1}(r)) \cdot N - m + 1$$

Keterangan :

N = Jumlah Data

m = Panjang segmentasi data

r = *Threshold* toleransi untuk menerima pola yang sama antara segmen yang bertetangga

Parameter jumlah data (N) yang digunakan pada riset sebelumnya adalah 150 sampel data [5], namun menurut salah satu penelitian direkomendasikan untuk pengukuran ApEn menggunakan sample data yang lebih panjang [7]. Pada tugas akhir ini nilai jumlah data yang digunakan sebanyak 300 data, dikarenakan saat pengambilan data untuk pengukuran keseimbangan postur tubuh dilakukan tepat sampai mencapai 300 sampel data dengan waktu pengukuran selama 47-50 detik, Parameter panjang segmentasi data (m) = 2 dipilih karena sudah dibuktikan pada riset sebelumnya bahwa hasil yang diperoleh cukup baik untuk data riset medis [11], dan untuk nilai *threshold* (r) yang digunakan adalah 0.2

yaitu nilai *threshold* yang digunakan pada riset sebelumnya [5].

### D. Sensor *load cell*

*Load cell* merupakan transduser yang dikelompokkan sebagai transduser gaya (*force transducer*). Alat ini dapat mengubah gaya atau beban atau berat menjadi sinyal listrik. Konversi terjadi secara tidak langsung dalam dua tahap. Lewat pengaturan mekanis, gaya tekan dideteksi berdasarkan deformasi dari matriks pengukur regangan (*strain gauge*) dalam bentuk resistor planar. Regangan ini mengubah hambatan efektif (*effective resistance*) dua pengukur regangan yang disusun dalam konfigurasi jembatan Wheatstone (*Wheatstone Bridge*) yang kemudian dibaca berupa tegangan. Bagian utama dari *load cell* adalah *strain gauge*. *Strain gauge* adalah alat yang memiliki tahanan yang dapat berubah apabila alat mengalami penekanan [8].

### E. Sensor IMU

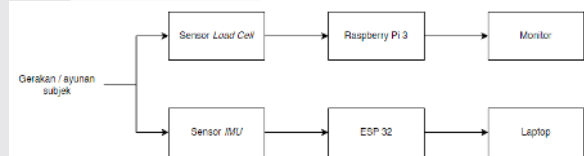
*Inertial Measurement Unit (IMU)* adalah suatu sensor yang digunakan untuk mengukur kecepatan, orientasi dan gaya gravitasi menggunakan sensor *accelerometer* dan *gyroscope*. Salah satu komponen penyusun sensor *IMU* adalah sensor *accelerometer*, sensor ini digunakan untuk mengukur percepatan dari suatu benda dengan cara melakukan integral percepatan benda tersebut terhadap waktu [9]. Sensor *IMU* ini digunakan sebagai sensor untuk mendeteksi goyangan tubuh terhadap sumbu x (*pitch*) atau sumbu y (*roll*) [10]. Pembacaan dari sensor *IMU* berupa data akselerometer, kemudian data akselerometer difilter menggunakan *low pass filter*. Data yang telah difilter dirubah ke dalam bentuk *pitch* dan *roll* [11]. Untuk mencari sudut *pitch* dan *roll* menggunakan Persamaan (2.3) dan (2.4).

$$Pitch = \arctan\left(\frac{ax}{\sqrt{(ay)^2+(az)^2}}\right) \times \frac{(180)}{\mu} \quad (2.3)$$

$$Roll = \arctan\left(\frac{ay}{\sqrt{(ax)^2+(az)^2}}\right) \times \frac{(180)}{\mu} \quad (2.4)$$

## III. METODE

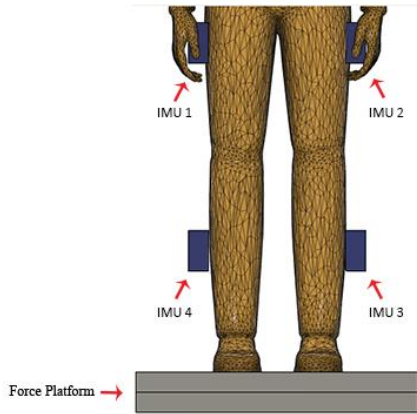
### A. Desain Sistem



GAMBAR 3.1  
Diagram Blok Sistem

Gambar 3.1 merupakan desain sistem dari seluruh komponen-komponen. Dirancang sebuah sistem pengujian keseimbangan tubuh menggunakan sensor *IMU* dan sensor *load cell*. Pada perancangan ini terdapat input berupa gerakan / ayunan tubuh subjek, kemudian *load cell* akan menghasilkan gaya dari gerakan / ayunan tubuh subjek. Lalu, raspberry pi akan menghitung X COP, Y COP, plotting COP, dan perhitungan ApEn, *mean*, dan *range*. Setelah itu, diukur oleh sensor *IMU* untuk pengukuran keseimbangan tubuh berdasarkan nilai *pitch* dan *roll*. Output dari sistem ini berupa grafik COP, grafik *pitch* dan *roll*, dan nilai keseimbangan tubuh.

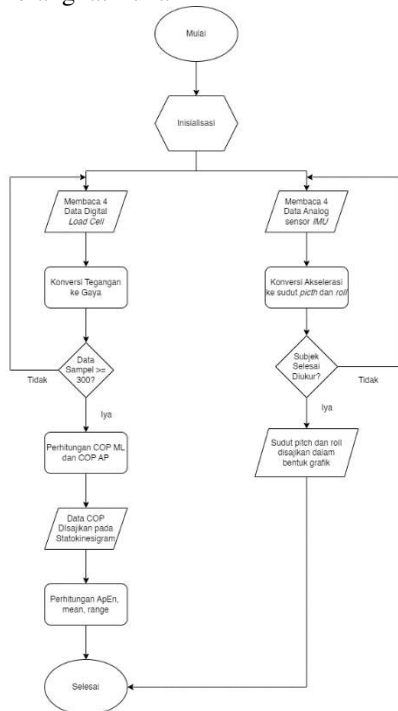
B. Desain Perangkat Keras



GAMBAR 3.2 Desain Perangkat Keras

Pada gambar 3.2 merupakan desain perangkat keras Hidroponik sistem NFT, Bak penampungan air, pipa penempatan sensor.

C. Desain Perangkat Lunak



GAMBAR 3.3 Desain Perangkat Lunak

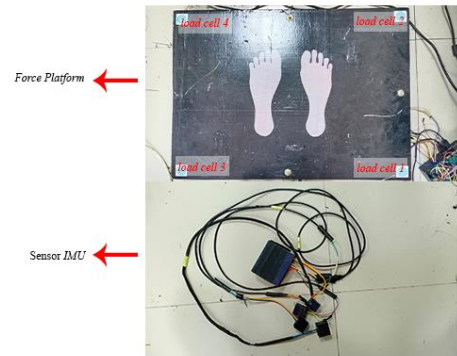
Dengan menggunakan diagram alir atau flowchart maka dapat mengetahui algoritma dari sistem. Proses diagram alir seperti berikut :

Tahap pertama, tahap ini menginisiasikan sistem. Sensor *load cell* dan sensor *IMU* akan menyala dan membaca goyangan dari subjek. Ketika pengukuran COP telah mencapai 300 sample data maka pengukuran COP dan sensor *IMU* dihentikan. Nilai yang diperoleh sensor *load cell* lalu digunakan untuk menghitung X COP dan Y COP menggunakan persamaan (1) dan (2). Kemudian data dihitung nilai *mean*, *range*, dan *ApEn* sebagai representasi penilaian keseimbangan tubuh. Nilai yang diperoleh sensor *IMU* lalu digunakan untuk menghitung sudut *pitch* dan *roll*. Data-data

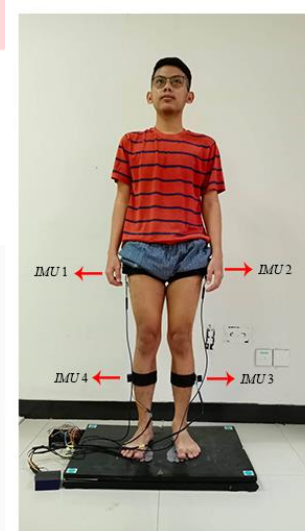
tersebut serta grafik COP dan grafik *pitch* dan *roll* kemudian ditampilkan pada display monitor dan data COP tersimpan pada memory Raspberry Pi

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Realisasi Alat



GAMBAR 4.1 Realisasi Alat



GAMBAR 4.2 Alat ketika digunakan partisipan

Pada gambar 4.1 merupakan realisasi alat dari Sistem Pengujian Keseimbangan Berdiri. Gambar 4.2 merupakan foto alat ketika digunakan oleh partisipan. *Force platform* terdiri dari empat buah *load cell* yang terletak di ujung-ujung papan dan sensor *IMU* digunakan pada bagian pangkal paha dan betis partisipan. Proses *dimulai* dengan subjek berdiri di atas *force platform* sambil menggunakan sensor *IMU* pada bagian pangkal paha dan betis, kemudian data pembacaan dari sensor *load cell* ditampilkan pada monitor dan sensor *IMU* ditampilkan pada laptop.

B. Validasi Sensor *load cell*

Tujuan validasi ini untuk mengetahui tingkat akurasi dari sensor *load cell*. Validasi dilakukan dengan melakukan perbandingan nilai yang dibaca oleh sensor *load cell* dengan massa referensi yang diperoleh dari beban.

TABEL 4.1 Pengukuran massa berulang

| No | Massa yang | Massa yang | Massa yang | Error m-ref | Error m-ref | Error m-ref |
|----|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
|----|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|

|    | terukur dari m-ref = 1000 (g) | terukur dari m-ref = 2000 (g) | terukur dari m-ref = 3000 (g) | = 1000 g (%) | = 2000 g (%) | = 3000 g (%) |
|----|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| 1  | 997,5                         | 1817,5                        | 2712,5                        | 0,25         | 9,12         | 9,58         |
| 2  | 972,5                         | 1882,5                        | 2800                          | 2,75         | 5,87         | 6,67         |
| 3  | 1035                          | 1860                          | 2740                          | 3,50         | 7,00         | 8,66         |
| 4  | 982,5                         | 1882,5                        | 2772,5                        | 1,75         | 5,87         | 7,58         |
| 5  | 1007,5                        | 1842,5                        | 2770                          | 0,75         | 7,87         | 7,66         |
| 6  | 1020                          | 1882,5                        | 2780                          | 2,00         | 5,87         | 7,33         |
| 7  | 992,5                         | 1850                          | 2727,5                        | 0,75         | 7,50         | 9,08         |
| 8  | 982,5                         | 1812,5                        | 3157,5                        | 1,75         | 9,37         | 5,25         |
| 9  | 1050                          | 1812,5                        | 2867,5                        | 5,00         | 9,37         | 4,41         |
| 10 | 1037,5                        | 1872,5                        | 2920                          | 3,75         | 6,37         | 2,66         |

Dari Tabel 4.1 terlihat error dari validasi sensor *load cell* berada di *range* (2,02 % – 7,42 %), menandakan hasil pembacaan massa oleh sensor *load cell* tidak jauh berbeda dengan massa referensi.

C. Validasi Sensor *IMU*

Tujuan validasi ini untuk mengetahui tingkat akurasi dari sensor *IMU*. Validasi dilakukan dengan melakukan perbandingan nilai yang dibaca oleh sensor *IMU* dengan sudut referensi yang diperoleh dari busur.

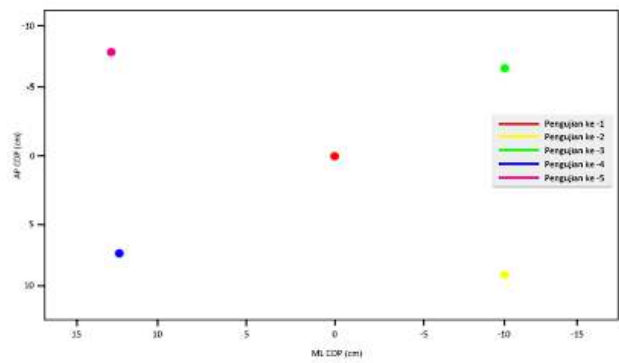
TABEL 4.2  
Validasi variabel sudut pada sensor *IMU*

| No | Sudut referensi (°) | <i>pitch</i> | <i>roll</i> | Error <i>pitch</i> | Error <i>roll</i> |
|----|---------------------|--------------|-------------|--------------------|-------------------|
| 1  | 0                   | 0,11         | 0,04        | 0,11               | 0,04              |
| 2  | 10                  | 10,51        | 10,32       | 5,10               | 3,20              |
| 3  | 20                  | 20,42        | 19,89       | 2,10               | 0,55              |
| 4  | 30                  | 30,64        | 30,27       | 2,13               | 0,90              |
| 5  | 40                  | 40,31        | 39,94       | 0,77               | 0,15              |
| 6  | 50                  | 50,22        | 50,93       | 0,44               | 1,86              |
| 7  | 60                  | 59,83        | 60,21       | 0,28               | 0,35              |
| 8  | 70                  | 70,54        | 69,88       | 0,77               | 0,17              |
| 9  | 80                  | 80,21        | 80,42       | 0,26               | 0,52              |
| 10 | 90                  | 88,90        | 89,10       | 1,22               | 1,00              |

Dari Tabel 4.2 terlihat error dari validasi sensor *IMU* berada di *range* (0,04 % – 3,20 %), menandakan hasil pembacaan sudut oleh sensor *IMU* tidak jauh berbeda dengan sudut referensi.

D. Pengujian Pengukuran COP

Pengujian nilai ApEn dan *mean* dilakukan dengan cara meletakkan benda yang sama pada tempat yang berbeda. Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali di 5 tempat yang berbeda. Parameter pertama yang diuji adalah ApEn, nilai ApEn bernilai 0 jika benda tidak mengalami goyangan saat pengujian. Parameter kedua yang diuji adalah *mean*, nilai *mean* adalah titik pusat benda yang diukur. Pada Gambar 4.3 merupakan posisi benda saat pengujian pengukuran COP. Hasil pengujian ApEn dan *mean* dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4.



GAMBAR 4.3  
Posisi Pengujian COP Benda

TABEL 4.3  
Hasil pengujian ApEn

| Pengujian ke- | ApEn ML COP      |              |           | ApEn AP COP      |              |           |
|---------------|------------------|--------------|-----------|------------------|--------------|-----------|
|               | Nilai Sebenarnya | Hasil Sensor | Error (%) | Nilai Sebenarnya | Hasil Sensor | Error (%) |
| 1             | 0                | 0,12         | 1,2       | 0                | 0,08         | 0,8       |
| 2             | 0                | 0,10         | 1,0       | 0                | 0,04         | 0,4       |
| 3             | 0                | 0,09         | 0,9       | 0                | 0,05         | 0,5       |
| 4             | 0                | 0,13         | 1,3       | 0                | 0,08         | 0,8       |
| 5             | 0                | 0,11         | 1,1       | 0                | 0,07         | 0,7       |

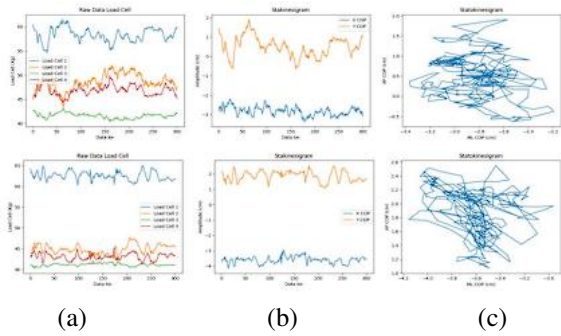
TABEL 4.4  
Hasil pengujian *mean*

| Pengujian ke- | <i>Mean</i> ML COP    |                   |              | <i>Mean</i> AP COP    |                   |              |
|---------------|-----------------------|-------------------|--------------|-----------------------|-------------------|--------------|
|               | Nilai Sebenarnya (cm) | Nilai Sensor (cm) | Selisih (cm) | Nilai Sebenarnya (cm) | Nilai Sensor (cm) | Selisih (cm) |
| 1             | 0                     | -0,122            | 0,122        | 0                     | 0,241             | 0,241        |
| 2             | -10                   | -10,353           | 0,353        | 8,3                   | -8,021            | 0,279        |
| 3             | -10                   | 9,810             | 0,190        | -7,5                  | 7,320             | 0,180        |
| 4             | 12,5                  | -12,304           | 0,196        | 7,3                   | -7,045            | 0,255        |
| 5             | 13,5                  | 13,840            | 0,340        | -8,58                 | 8,892             | 0,312        |

E. Pengukuran COP

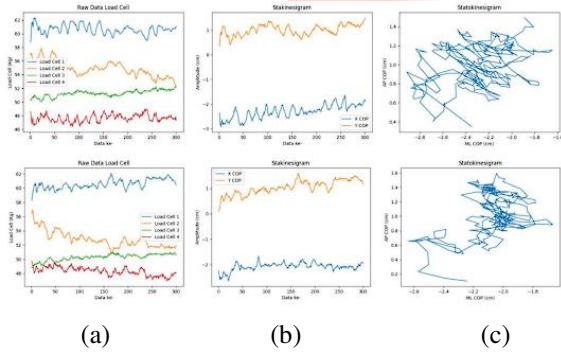
Pengukuran menggunakan *force platform* dilakukan dengan pose berdiri tegak dan pandangan mata ke depan di atas *force platform*. Tabel 4.5 menunjukkan hasil sensor *load cell* selama 48 - 50 detik. Tiap subjek melakukan pengukuran sebanyak 10 kali menggunakan *force platform*, Gambar 4.4, Gambar 4.5, Gambar 4.6 merupakan dua data dari masing – masing subjek yang diambil dari 10 kali pengukuran menggunakan *force platform*.





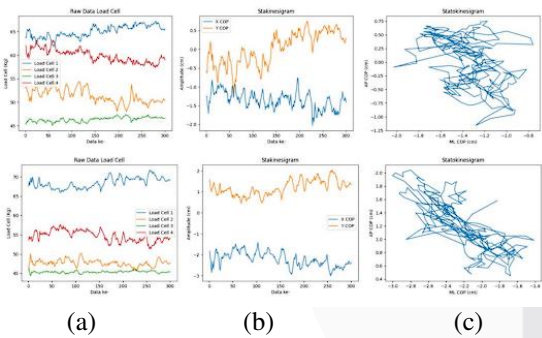
GAMBAR 4.4

(a) Grafik Raw Data Load cell Subjek 1, (b) Stokinesigram, Subjek 1, (c) Statokinesigram Subjek 1



GAMBAR 4.5

(a) Grafik Raw Data Load cell Subjek 2, (b) Stokinesigram, Subjek 2, (c) Statokinesigram Subjek 2



Gambar 4.6

(a) Grafik Raw Data Load cell Subjek 3, (b) Stokinesigram, Subjek 3, (c) Statokinesigram Subjek 3

TABEL 4.5 Tabel Mean, Range, dan ApEn metode COP

| Subjek ke- | Mean   |         | Range  |        | ApEn   |        |
|------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
|            | AP COP | ML COP  | AP COP | ML COP | AP COP | ML COP |
| 1          | 0,500  | - 2,826 | 2,538  | 1,173  | 0,428  | 0,358  |
| 1          | 1,865  | - 3,609 | 1,482  | 1,195  | 0,390  | 0,312  |
| 2          | 0,997  | - 2,300 | 1,146  | 1,268  | 0,132  | 0,228  |
| 2          | 1,038  | - 2,070 | 1,489  | 0,972  | 0,123  | 0,100  |
| 3          | 0,023  | - 1,350 | 1,911  | 1,271  | 0,329  | 0,305  |

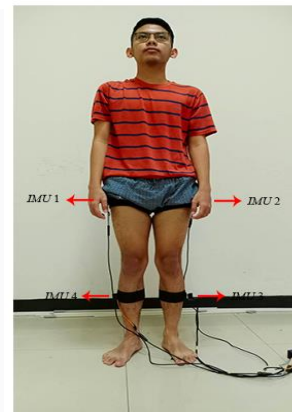
|   |       |         |       |       |       |       |
|---|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
| 3 | 1,198 | - 2,219 | 1,595 | 1,592 | 0,316 | 0,387 |
|---|-------|---------|-------|-------|-------|-------|

Pada Gambar 4.3, Gambar 4.4, dan Gambar 4.5 grafik raw data load cell merupakan grafik hasil pembacaan keempat load cell pada masing-masing sisi force platform untuk ketiga subjek. Sumbu Y merepresentasikan nilai berat yang terukur pada load cell, sedangkan sumbu X merepresentasikan data ke-n. Raw data load cell yang telah diperoleh kemudian dihitung nilai COP pada sumbu X atau ML (Medial-Lateral) dan sumbu Y atau AP (Anterior-Posterior) menggunakan rumus pada persamaan (2.1) dan (2.2). Nilai COP AP dan COP ML terhadap data ke-n, disebut dengan stokinesigram. Hasil COP AP dan COP ML yang telah diperoleh lalu dipetakan dalam sebuah grafik dalam sumbu Kartesian, dapat disebut dengan statokinesigram.

Berdasarkan grafik dan tabel COP, bisa dilihat bahwa grafik dan tabel COP, bisa dilihat bahwa subjek 1 memiliki nilai Range dan ApEn COP pada sumbu AP yang paling besar dibandingkan kedua subjek lainnya, menandakan kalau goyangan tubuh subjek 1 dan ketidakstabilan lebih besar ke arah AP.

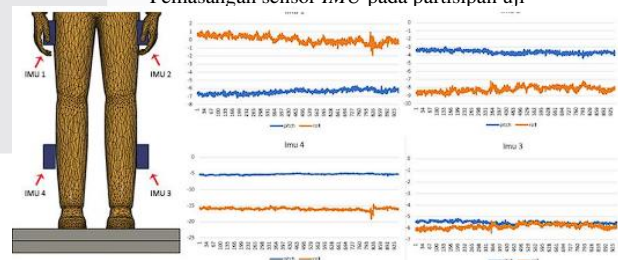
F. Pengukuran IMU

Pengukuran menggunakan sensor IMU dilakukan dengan pose berdiri tegak dan pandangan mata ke depan di atas permukaan datar. Tabel 4.6 menunjukkan hasil sensor IMU selama 50 detik. Satu sensor dipasang masing-masing pada pangkal paha dan betis bagian samping. Pemasangan sensor dapat dilihat pada Gambar 4.7.



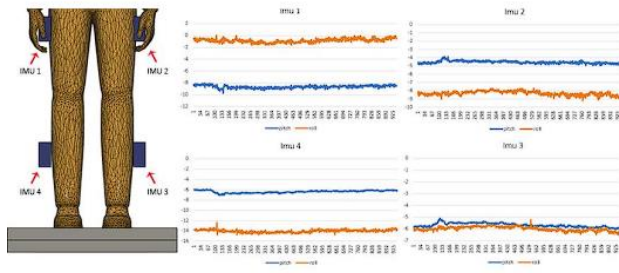
GAMBAR 4.7

Pemasangan sensor IMU pada partisipan uji

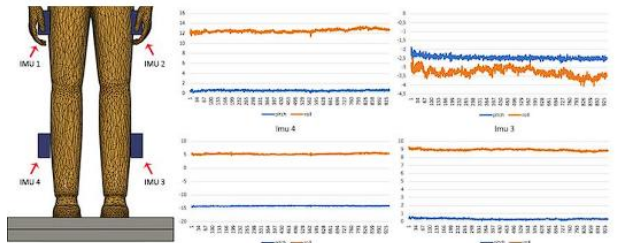


GAMBAR 4.8

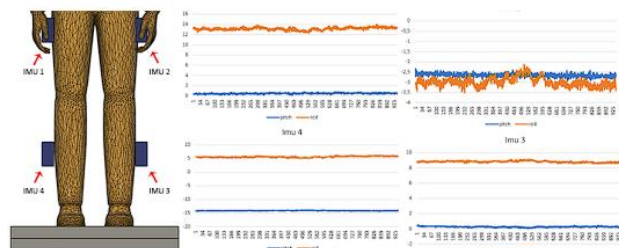
Grafik Subjek 1 Pitch dan Roll Sensor IMU



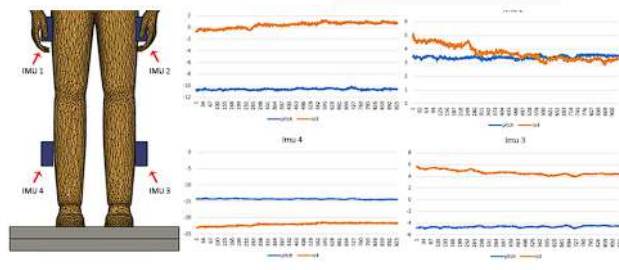
GAMBAR 4.9 Grafik Subjek 1 Pitch dan Roll Sensor IMU



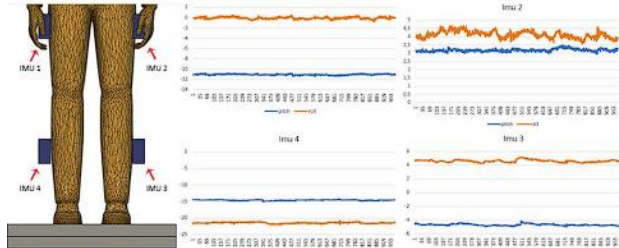
GAMBAR 4.10 Grafik Subjek 2 Pitch dan Roll Sensor IMU



GAMBAR 4.11 Grafik Subjek 2 Pitch dan Roll Sensor IMU



GAMBAR 4.12 Grafik Subjek 3 Pitch dan Roll Sensor IMU



GAMBAR 4.13 Grafik Subjek 3 Pitch dan Roll Sensor IMU

TABEL 4.6 Tabel Pengukuran IMU

| Subjek ke- | Range Sudut IMU 1 (°) | Range Sudut IMU 2 (°) | Range Sudut IMU 3 (°) | Range Sudut IMU 4 (°) |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1          | 1,47                  | 3,04                  | 1,41                  | 1,97                  |
| 1          | 1,70                  | 1,69                  | 1,08                  | 1,58                  |
| 2          | 0,68                  | 2,01                  | 0,90                  | 1,60                  |
| 2          | 0,61                  | 1,65                  | 0,57                  | 1,38                  |
| 3          | 0,85                  | 2,07                  | 0,61                  | 2,35                  |
| 3          | 0,73                  | 1,29                  | 0,55                  | 1,10                  |

|   | Pitch | Roll | Pitch | Roll | Pitch | Roll | Pitch | Roll |
|---|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 1 | 1,47  | 3,04 | 1,41  | 1,97 | 0,74  | 1,04 | 0,89  | 4,54 |
| 1 | 1,70  | 1,69 | 1,08  | 1,58 | 0,94  | 1,29 | 1,25  | 2,43 |
| 2 | 0,68  | 2,01 | 0,90  | 1,60 | 0,50  | 0,69 | 0,66  | 1,30 |
| 2 | 0,61  | 1,65 | 0,57  | 1,38 | 0,49  | 0,58 | 0,53  | 1,12 |
| 3 | 0,85  | 2,07 | 0,61  | 2,35 | 0,70  | 1,87 | 0,51  | 1,88 |
| 3 | 0,73  | 1,29 | 0,55  | 1,10 | 0,87  | 0,95 | 0,80  | 1,43 |

Dari grafik terlihat dan tabel terlihat nilai *range* yang lebih dominan di sumbu *roll*, menandakan bagian kaki dan panggul ketiga subjek cenderung bergerak ke arah *roll* atau AP.

G. Pengukuran *Body Sway* menggunakan metode COP dan sensor IMU

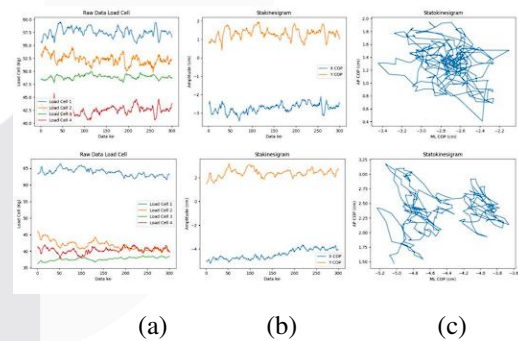
Pengukuran ini dilakukan pada 3 partisipan laki-laki dengan rentang umur (20 - 22) tahun, dimana antropometris partisipan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.7.

TABEL 4.7 Antropometris Partisipan

| Partisipan ke- | TB (cm) | BB (cm) | BM I | Kondisi Mata (L/R) | Postur Kaki (supinasi, normal, pronasi) |
|----------------|---------|---------|------|--------------------|---|
| 1              | 166     | 55      | 20,0 | -2 / -2,5          | normal                                  |
| 2              | 169     | 66      | 23,1 | 0 / 0              | normal                                  |
| 3              | 168     | 58      | 20,5 | 0 / 0              | normal                                  |

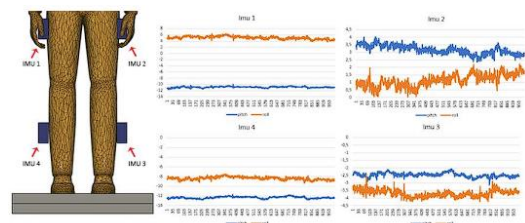
Selanjutnya pengukuran *body sway* menggunakan kedua sensor dilakukan selama 48 - 50 detik pada setiap partisipan dalam keadaan posisi berdiri tegak dan mata terbuka serta mata tertutup.

H. Kondisi Subjek Mata Terbuka



GAMBAR 4.14

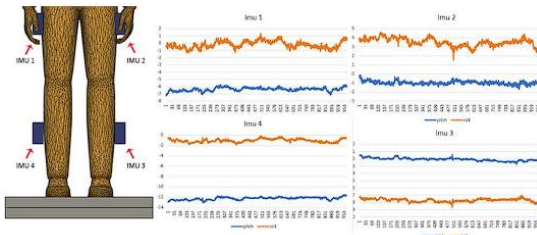
(a) Grafik Raw Data *Load cell* Subjek 1 Mata Terbuka, (b) Stakinesigram Subjek 1 Mata Terbuka, (c) Statokinesigram Subjek 1 Mata Terbuka



GAMBAR 4.15

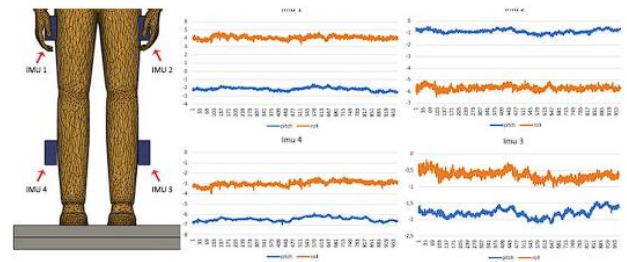
Grafik Subjek 1 Mata Terbuka Pitch dan Roll Sensor IMU





GAMBAR 4.16

Grafik Subjek 1 Mata Terbuka Pitch dan Roll Sensor IMU



GAMBAR 4.18

Grafik Subjek 2 Mata Terbuka Pitch dan Roll Sensor IMU

TABEL 4.8

Nilai Mean, range, dan ApEn Subjek ke-1

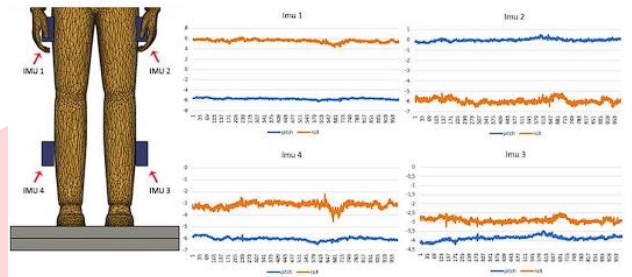
| Subjek ke- | Mean   |        | Range  |        | ApEn   |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|            | AP COP | ML COP | AP COP | ML COP | AP COP | ML COP |
| 1          | 1,318  | -      | 1,535  | 1,341  | 0,343  | 0,314  |
| 1          | 2,397  | -      | 1,708  | 1,574  | 0,286  | 0,182  |
|            |        | 4,461  |        |        |        |        |

TABEL 4.9

Nilai pitch dan roll Subjek ke-1

| Subjek ke- | Range Sudut IMU 1 (°) |      | Range Sudut IMU 2 (°) |      | Range Sudut IMU 3 (°) |      | Range Sudut IMU 4 (°) |      |
|------------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|
|            | Pitch                 | Roll | Pitch                 | Roll | Pitch                 | Roll | Pitch                 | Roll |
| 1          | 1,62                  | 2,70 | 1,69                  | 2,20 | 1,06                  | 1,79 | 1,13                  | 1,84 |
| 1          | 1,58                  | 2,72 | 1,60                  | 3,01 | 1,38                  | 1,61 | 1,51                  | 1,71 |

Berdasarkan Tabel 4.8 terlihat nilai ApEn pada AP COP memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan ML COP, menandakan subjek memiliki ketidakstabilan yang lebih besar di sumbu AP. Range AP COP yang lebih besar, menandakan goyangan tubuh subjek lebih besar ke arah AP. Pada Tabel 4.9 terlihat sensor IMU memiliki nilai range sumbu roll lebih besar dibandingkan sumbu pitch, menandakan goyangan bagian kaki dan panggul subjek lebih besar ke arah roll atau AP. Pada grafik statokinesigram terlihat range lebih besar pada sumbu AP COP dan pada grafik IMU terlihat range lebih besar pada sumbu roll atau AP. Nilai yang dihasilkan sensor IMU memvalidasi bahwa bagian kaki dan panggul ikut mempengaruhi keseimbangan tubuh.



GAMBAR 4.19

Grafik Subjek 2 Mata Terbuka Pitch dan Roll Sensor IMU

TABEL 4.10

Nilai Mean, range, dan ApEn Subjek ke-2

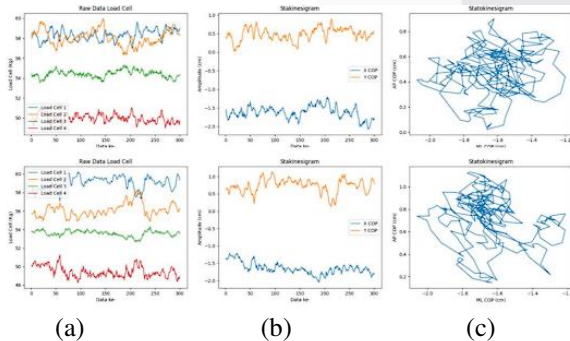
| Subjek ke- | Mean   |        | Range  |        | ApEn   |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|            | AP COP | ML COP | AP COP | ML COP | AP COP | ML COP |
| 2          | 0,485  | -      | 0,877  | 0,875  | 0,149  | 0,144  |
| 2          | 0,732  | -      | 0,986  | 0,847  | 0,165  | 0,088  |
|            |        | 1,619  |        |        |        |        |
|            |        | 1,649  |        |        |        |        |

Tabel 4.11

Nilai pitch dan roll Subjek ke-2

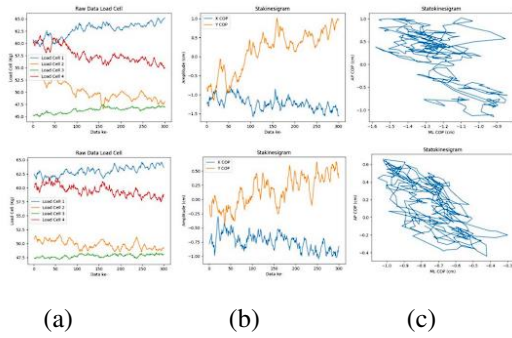
| Subjek ke- | Range Sudut IMU 1 (°) |      | Range Sudut IMU2 (°) |      | Range Sudut IMU 3 (°) |      | Range Sudut IMU 4 (°) |      |
|------------|-----------------------|------|----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|
|            | Pitch                 | Roll | Pitch                | Roll | Pitch                 | Roll | Pitch                 | Roll |
| 2          | 1,10                  | 1,48 | 0,87                 | 1,31 | 0,67                  | 0,84 | 1,09                  | 1,56 |
| 2          | 0,96                  | 2,09 | 0,87                 | 1,39 | 0,77                  | 0,79 | 0,86                  | 2,36 |

Berdasarkan Tabel 4.10 terlihat nilai ApEn pada AP COP memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan ML COP, menandakan subjek memiliki ketidakstabilan yang lebih besar di sumbu AP. Range AP COP yang lebih besar, menandakan goyangan tubuh subjek lebih besar ke arah AP. Pada Tabel 4.11 terlihat sensor IMU memiliki nilai range sumbu roll lebih besar dibandingkan sumbu pitch, menandakan goyangan bagian kaki dan panggul subjek lebih besar ke arah roll atau AP. Pada grafik statokinesigram terlihat range lebih besar pada sumbu AP COP dan pada grafik IMU terlihat range lebih besar pada sumbu roll atau AP. Nilai yang dihasilkan sensor IMU memvalidasi bahwa bagian kaki dan panggul ikut mempengaruhi keseimbangan tubuh.



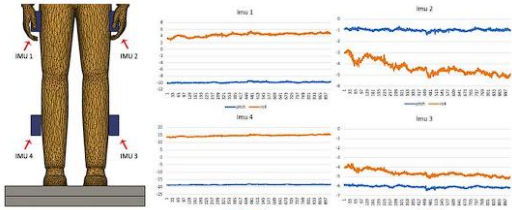
GAMBAR 4.17

(a) Grafik Raw Data Load cell Subjek 2 Mata Terbuka, (b) Stakinesigram Subjek 2 Mata Terbuka, (c) Statokinesigram Subjek 2 Mata Terbuka



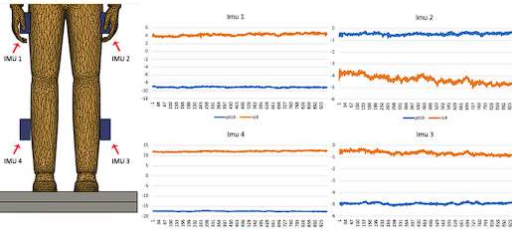
GAMBAR 4.20

(a) Grafik Raw Data Load cell Subjek 3 Mata Terbuka, (b) Stakinesigram Subjek 3 Mata Terbuka, (c) Statokinesigram Subjek 3 Mata Terbuka



GAMBAR 4.21

Grafik Subjek 3 Mata Terbuka Pitch dan Roll Sensor IMU



GAMBAR 4.22

Grafik Subjek 3 Mata Terbuka Pitch dan Roll Sensor IMU

TABEL 4.12  
Nilai Mean, range, dan ApEn Subjek ke-3

| Subjek ke- | Mean   |            | Range  |        | ApEn   |        |
|------------|--------|------------|--------|--------|--------|--------|
|            | AP COP | ML COP     | AP COP | ML COP | AP COP | ML COP |
| 3          | 0,150  | -<br>1,223 | 2,165  | 0,740  | 0,215  | 0,141  |
| 3          | 0,153  | -<br>0,745 | 1,104  | 0,751  | 0,186  | 0,131  |

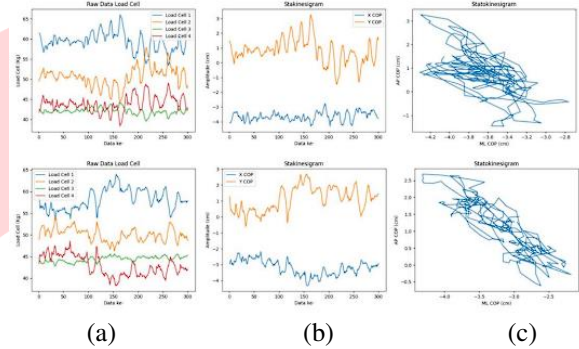
TABEL 4.13  
Nilai pitch dan roll Subjek ke-3

| Subjek ke- | Range Sudut IMU 1 (°) |      | Range Sudut IMU 2 (°) |      | Range Sudut IMU 3 (°) |      | Range Sudut IMU 4 (°) |      |
|------------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|
|            | Pitch                 | Roll | Pitch                 | Roll | Pitch                 | Roll | Pitch                 | Roll |
| 3          | 0,88                  | 2,73 | 0,79                  | 2,55 | 0,71                  | 1,64 | 0,88                  | 2,84 |
| 3          | 0,67                  | 1,59 | 0,56                  | 1,63 | 0,44                  | 0,75 | 0,69                  | 1,42 |

Berdasarkan Tabel 4.12 terlihat nilai ApEn pada AP COP memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan ML COP,

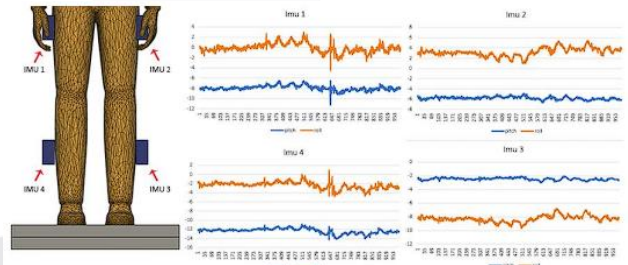
menandakan subjek memiliki ketidakstabilan yang lebih besar di sumbu AP. Range AP COP yang lebih besar, menandakan goyangan tubuh subjek lebih besar ke arah AP. Pada Tabel 4.13 terlihat sensor IMU memiliki nilai range sumbu roll lebih besar dibandingkan sumbu pitch, menandakan goyangan bagian kaki dan panggul subjek lebih besar ke arah roll atau AP. Pada grafik statokinesigram terlihat range lebih besar pada sumbu AP COP dan pada grafik IMU terlihat range lebih besar pada sumbu roll atau AP. Nilai yang dihasilkan sensor IMU memvalidasi bahwa bagian kaki dan panggul ikut mempengaruhi keseimbangan tubuh.

I. Kondisi Subjek Mata Tertutup



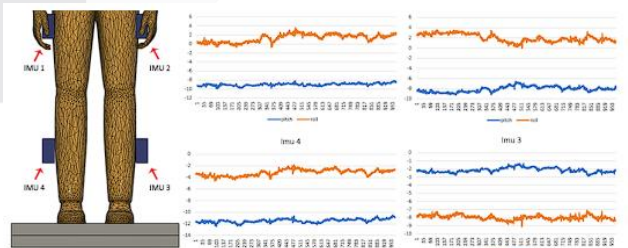
GAMBAR 4.23

(a) Grafik Raw Data Load cell Subjek 1 Mata Tertutup, (b) Stakinesigram Subjek 1 Mata Tertutup, (c) Statokinesigram Subjek 1 Mata Tertutup



GAMBAR 4.24

Grafik Subjek 1 Mata Tertutup Pitch dan Roll Sensor IMU



GAMBAR 4.25

Grafik Subjek 1 Mata Tertutup Pitch dan Roll Sensor IMU

TABEL 4.14  
Nilai Mean, range, dan ApEn Subjek ke-1

| Subjek ke- | Mean  | Range | ApEn  |
|------------|-------|-------|-------|
| 1          | 0,150 | 1,223 | 0,215 |
| 1          | 0,153 | 0,745 | 0,186 |

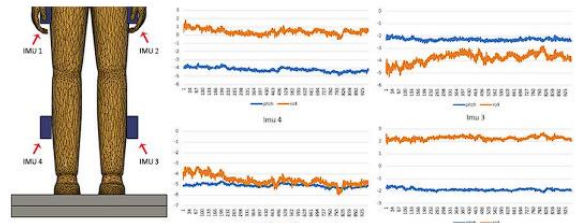


|   |        |            |        |        |        |        |
|---|--------|------------|--------|--------|--------|--------|
|   | AP COP | ML COP     | AP COP | ML COP | AP COP | ML COP |
| 1 | 0,886  | -<br>3,646 | 4,725  | 1,545  | 0,655  | 0,450  |
| 1 | 1,115  | -<br>3,182 | 3,301  | 2,147  | 0,558  | 0,429  |

TABEL 4.15  
Nilai *pitch* dan *roll* Subjek ke-1

| Subjek ke- | Range Sudut IMU 1 (°) |             | Range Sudut IMU2 (°) |             | Range Sudut IMU 3 (°) |             | Range Sudut IMU 4 (°) |             |
|------------|-----------------------|-------------|----------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------------------|-------------|
|            | <i>Pitch</i>          | <i>Roll</i> | <i>Pitch</i>         | <i>Roll</i> | <i>Pitch</i>          | <i>Roll</i> | <i>Pitch</i>          | <i>Roll</i> |
| 1          | 4,71                  | 7,47        | 1,83                 | 4,50        | 0,95                  | 2,93        | 3,35                  | 5,86        |
| 1          | 1,76                  | 4,38        | 2,69                 | 3,56        | 1,56                  | 2,01        | 1,92                  | 2,72        |

Berdasarkan Tabel 4.14 terlihat nilai ApEn pada AP COP memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan ML COP, menandakan subjek memiliki ketidakstabilan yang lebih besar di sumbu AP. *Range* AP COP yang lebih besar, menandakan goyangan tubuh subjek lebih besar ke arah AP. Pada Tabel 4.15 terlihat sensor *IMU* memiliki nilai *range* sumbu *roll* lebih besar dibandingkan sumbu *pitch*, menandakan goyangan bagian kaki dan panggul subjek lebih besar ke arah *roll* atau AP. Pada grafik statokinesigram terlihat *range* lebih besar pada sumbu AP COP dan pada grafik *IMU* terlihat *range* lebih besar pada sumbu *roll* atau AP. Nilai yang dihasilkan sensor *IMU* memvalidasi bahwa bagian kaki dan panggul ikut mempengaruhi keseimbangan tubuh.



GAMBAR 4.28

Grafik Subjek 2 Mata Tertutup *Pitch* dan *Roll* Sensor *IMU*

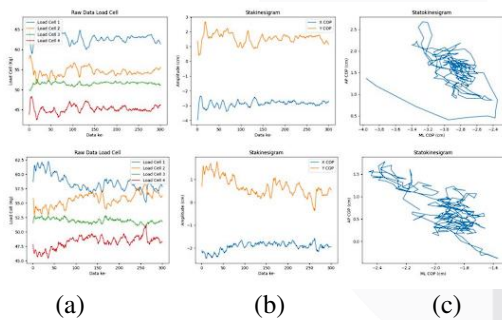
TABEL 4.16 Nilai *Mean*, *range*, dan ApEn Subjek ke-2

| Subjek ke- | <i>Mean</i> |            | <i>Range</i> |        | ApEn   |        |
|------------|-------------|------------|--------------|--------|--------|--------|
|            | AP COP      | ML COP     | AP COP       | ML COP | AP COP | ML COP |
| 2          | 1,561       | -<br>2,862 | 2,271        | 1,614  | 0,283  | 0,195  |
| 2          | 0,692       | -<br>1,934 | 2,163        | 0,891  | 0,269  | 0,102  |

TABEL 4.17 Nilai *pitch* dan *roll* Subjek ke-2

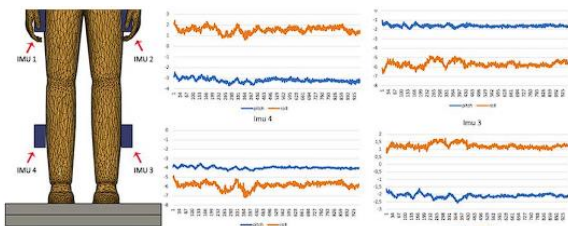
| Subjek ke- | Range Sudut IMU 1 (°) |             | Range Sudut IMU2 (°) |             | Range Sudut IMU 3 (°) |             | Range Sudut IMU 4 (°) |             |
|------------|-----------------------|-------------|----------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------------------|-------------|
|            | <i>Pitch</i>          | <i>Roll</i> | <i>Pitch</i>         | <i>Roll</i> | <i>Pitch</i>          | <i>Roll</i> | <i>Pitch</i>          | <i>Roll</i> |
| 2          | 1,27                  | 1,82        | 0,96                 | 1,88        | 0,99                  | 0,96        | 0,85                  | 2,31        |
| 2          | 1,52                  | 2,29        | 0,71                 | 2,48        | 0,60                  | 0,93        | 0,84                  | 2,63        |

Berdasarkan Tabel 4.16 terlihat nilai ApEn pada AP COP memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan ML COP, menandakan subjek memiliki ketidakstabilan yang lebih besar di sumbu AP. *Range* AP COP yang lebih besar, menandakan goyangan tubuh subjek lebih besar ke arah AP. Pada Tabel 4.17 terlihat sensor *IMU* memiliki nilai *range* sumbu *roll* lebih besar dibandingkan sumbu *pitch*, menandakan goyangan bagian kaki dan panggul subjek lebih besar ke arah *roll* atau AP. Pada grafik statokinesigram terlihat *range* lebih besar pada sumbu AP COP dan pada grafik *IMU* terlihat *range* lebih besar pada sumbu *roll* atau AP. Nilai yang dihasilkan sensor *IMU* memvalidasi bahwa bagian kaki dan panggul ikut mempengaruhi keseimbangan tubuh.



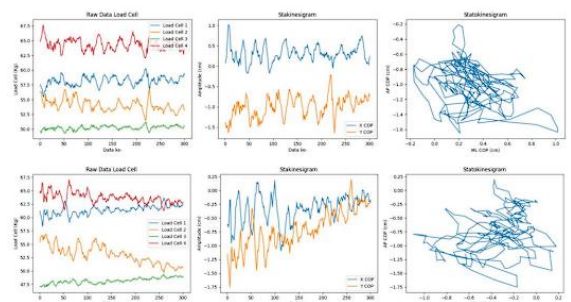
GAMBAR 4.26

(a) Grafik Raw Data *Load cell* Subjek 2 Mata Tertutup, (b) Stakinesigram Subjek 2 Mata Tertutup, (c) Statokinesigram Subjek 2 Mata Tertutup



GAMBAR 4.27

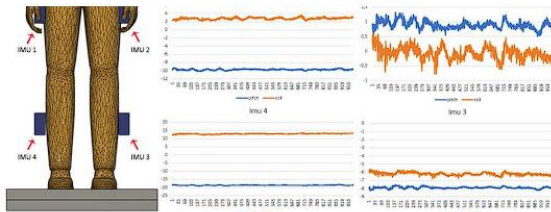
Grafik Subjek 2 Mata Tertutup *Pitch* dan *Roll* Sensor *IMU*



(a) (b) (c)

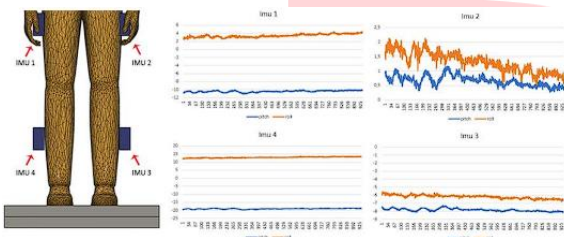
GAMBAR 4.29

(a) Grafik Raw Data *Load cell* Subjek 3 Mata Tertutup, (b) Stakinesigram Subjek 3 Mata Tertutup, (c) Statokinesigram Subjek 3 Mata Tertutup



GAMBAR 4.30

Grafik Subjek 3 Mata Tertutup *Pitch* dan *Roll* Sensor *IMU*



GAMBAR 4.31

Grafik Subjek 3 Mata Tertutup *Pitch* dan *Roll* Sensor *IMU*

TABEL 4.18  
Nilai *Mean*, *range*, dan *ApEn* Subjek ke-3

| Subjek ke- | <i>Mean</i> |        | <i>Range</i> |        | <i>ApEn</i> |        |
|------------|-------------|--------|--------------|--------|-------------|--------|
|            | AP COP      | ML COP | AP COP       | ML COP | AP COP      | ML COP |
| 3          | -0,997      | 0,310  | 1,439        | 1,189  | 0,316       | 0,243  |
| 3          | -0,716      | -0,338 | 1,950        | 1,279  | 0,275       | 0,253  |

TABEL 4.19  
Nilai *pitch* dan *roll* Subjek ke-3

| Subjek ke- | <i>Range</i> Sudut <i>IMU</i> 1 (°) |             | <i>Range</i> Sudut <i>IMU</i> 2 (°) |             | <i>Range</i> Sudut <i>IMU</i> 3 (°) |             | <i>Range</i> Sudut <i>IMU</i> 4 (°) |             |
|------------|-------------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
|            | <i>Pitch</i>                        | <i>Roll</i> | <i>Pitch</i>                        | <i>Roll</i> | <i>Pitch</i>                        | <i>Roll</i> | <i>Pitch</i>                        | <i>Roll</i> |
| 3          | 0,94                                | 1,57        | 0,82                                | 1,38        | 0,72                                | 1,18        | 0,88                                | 1,37        |
| 3          | 1,13                                | 1,95        | 0,89                                | 1,6         | 0,89                                | 1,20        | 1,16                                | 1,77        |

Berdasarkan Tabel 4.18 terlihat nilai *ApEn* pada AP COP memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan ML COP, menandakan subjek memiliki ketidakstabilan yang lebih besar di sumbu AP. *Range* AP COP yang lebih besar, menandakan goyangan tubuh subjek lebih besar ke arah AP. Pada Tabel 4.19 terlihat sensor *IMU* memiliki nilai *range* sumbu *roll* lebih besar dibandingkan sumbu *pitch*, menandakan goyangan bagian kaki dan panggul subjek lebih besar ke arah *roll* atau AP. Pada grafik statokinesigram terlihat *range* lebih besar pada sumbu AP COP dan pada grafik *IMU* terlihat *range* lebih besar pada sumbu *roll* atau

AP. Nilai yang dihasilkan sensor *IMU* memvalidasi bahwa bagian kaki dan panggul ikut mempengaruhi keseimbangan tubuh.

## V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dilakukan desain force platform menggunakan sensor *load cell* dan sensor wearable *IMU* untuk menguji keseimbangan tubuh. Nilai COP diperoleh dari pengujian force platform dan sensor *IMU* memberikan informasi bagian badan mana yang bergerak/ berayun. *Range error* pengukuran dari sensor *load cell* sebesar (2,02 - 7,42) % dan *range error* dari sensor *IMU* sebesar (0,04 - 3,2) %. Nilai *range error* yang kecil menunjukkan hasil pengukuran tidak jauh dari massa referensi dan sudut referensi.

Pengukuran body sway dilakukan untuk posisi berdiri tegak dengan beberapa skenario keadaan mata (tertutup dan terbuka). Pada pengukuran dengan skenario mata tertutup, ketiga subjek terlihat nilai *ApEn* dan *range* pada sumbu AP dan ML COP lebih besar dibandingkan saat pengukuran dengan skenario mata terbuka, menandakan penglihatan berpengaruh untuk manusia dalam menjaga keseimbangan tubuh.

Pengukuran body sway dengan wearable *IMU* digunakan di bagian pangkal paha dan betis sebagai representasi dari kaki dan panggul. Terlihat dari pengukuran ketiga subjek, hasil pengukuran dari sensor *IMU* memvalidasi bahwa bagian kaki dan panggul ikut mempengaruhi keseimbangan tubuh dengan menunjukkan ketidakstabilan dan *range* yang lebih besar pada sumbu yang sama dengan hasil pengukuran dari force platform.

## REFERENSI

- [1] Fang Wang et al, "Body Sway Measurement for Fall Risk Assessment Using Inexpensive Webcams". September, 2010.
- [2] Martina Mancini et al, "Postural sway as a Marker of Progression in Parkinson's disease : a Pilot Longitudinal Study". Gait Posture, vol. 35, no. 3, pp. 471 – 476, Gait posture. July, 2012.
- [3] Noamani Alireza et al, "Validity of using wearable inertial sensors for assessing the dynamics of standing balance". January, 2020.
- [4] T Grafton Scott et al, "Monitoring of postural sway with a head-mounted wearable device : effects of gender, participant state, and conclusion". Medical Devices : Evidence and Research, University of California. May, 2019.
- [5] Nurhakim Abdurrahman, et al. "Pengaruh Sudut Pitch Roll Terhadap Perubahan Sudut Pitch Pada Sensor Accelerometer". UIN SGD Bandung, Januari, 2018.
- [6] Yong Zhu, "Design and Validation of a Low-Cost Portable Device to Quantify Postural Stability", Wilkes University, February, 2017.
- [7] M. Pincus Steven "Approximate entropy as a measure of system complexity". Vol. 88, pp. 2297-2301, March, 1991.
- [8] M. Yentes Jennifer et al, "The Appropriate Use of Approximate Entropy and Sample Entropy with Short Data Sets". Oktober, 2012.

[9] Budiman, Dimas Arif , “Rancang Bangun Sistem Sensor Strain Gauge Alat Percobaan Regangan Dan Tegangan Beam Menggunakan Mikrokontroler Arduino Uno”. Universitas Muhammadiyah Malang, November, 2019.

[10] Abu Hatim Kurniawan, Muhammad Rivai, “Sistem Stabilisasi Nampun Menggunakan IMU Sensor dan Arduino Nano”. Vol. 7 No. 2, 2018.

[11] Treffers Charlotte, Wietmarschen Luc Van, “Position and orientation determination of a probe with use of the IMU MPU9250 and ATmega328 microcontroller”. June, 2016.

