

Perancangan *Hardware Wearable Device* Berbasis Sensor ADXL345 Untuk Monitoring Postur Tubuh

1st Sakura Larasaty

*School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia*

sakuralarasaty@student.telkomuniversit
y.ac.id

2nd Levy Olivia Nur

*School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia*

levyolivia@telkomuniversity.ac.id

3rd Inung Wijayanto

*School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia*

iwijayanto@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Beraktivitas dengan posisi duduk yang buruk dalam waktu yang lama dapat menimbulkan gangguan seperti nyeri otot bahkan masalah kesehatan tulang belakang. Seringkali perilaku tersebut dihiraukan karena sudah menjadi pola kebiasaan sehari-hari yang akan membuka peluang masalah kesehatan jika dilakukan dalam jangka waktu yang lama. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengembangkan *wearable posture monitoring system* (WPMS) berbasis sensor ADXL345 untuk membaca pergerakan kemiringan postur tubuh supaya meningkatkan *awareness* terhadap pen jagaan postur yang baik saat beraktivitas duduk dalam jangka waktu yang lama. Sensor ADXL345 akan membaca data yang akan dihasilkan menjadi sudut derajat untuk dikirim dan ditampilkan di aplikasi mobile pendukungnya. Beberapa pengujian dilakukan untuk mengevaluasi keakuratan dan kekonsistenan untuk mewujudkan nilai fungsionalitas yang baik. Berdasarkan hasil pengujian ini, perancangan *wearable device* memiliki tingkat akurasi 90,16% dan presisi $\leq 1^\circ$, data menunjukkan akurasi yang tinggi terhadap nilai sebenarnya dari alat busur pembanding yang digunakan serta menampilkan kekonsistenan data yang tinggi sehingga *wearable device* mampu memberikan performa fungsionalitas yang baik dalam memantau postur tubuh sebagai langkah preventif meminimalkan dari gangguan kesehatan tulang belakang yang berpeluang terjadi.

Kata kunci— masalah kesehatan tulang belakang, *wearable device*, ADXL345, fungsionalitas, pemantauan postur

I. PENDAHULUAN

Produktivitas bekerja yang ideal berkisar 40-48 jam seminggu yang terbagi di 5-6 hari[1]. Banyak pekerja kantor yang menghabiskan waktu kerjanya pada aktivitas duduk yang monoton baik itu di dalam maupun di luar ruangan. Seringkali banyak pekerja yang beraktivitas dalam keadaan duduk tetapi kurang memperhatikan kesehatan postur tubuhnya karena tuntutan pekerjaan yang tinggi hingga menimbulkan masalah kesehatan, terutama postur tubuh yang tidak ergonomis. Selain pekerja, mahasiswa juga rentan mengalami masalah kesehatan karena kurang memperhatikan postur tubuhnya dan sudah terbiasa pada aktivitas postur yang tidak ergonomis, seperti halnya saat mengerjakan tugas di laptop dan kuliah daring yang mana

mahasiswa menghabiskan waktu yang lama pada kondisi duduk. Terdapat studi *cross-sectional* di Arab Saudi yang menunjukkan bahwa prevalensi *low back pain* (LBP) mencapai 57,4% pada mahasiswa yang duduk lama sebagai faktor yang bisa memperparah kondisi tersebut[2]. Kondisi *low back pain* ini disebabkan gangguan pada muskuloskeletal dikarenakan sisi ergonomi yang salah atau diabaikan[3]. Ergonomi yang kurang tepat pada sikap duduk, seperti membiarkan duduk membungkuk atau bahu terkulai ke belakang inilah yang bisa menyebabkan masalah tersebut timbul, seperti nyeri otot, nyeri punggung, hingga gangguan postur yang berpeluang terjadi.

Penelitian sebelumnya telah mengembangkan berbagai sistem untuk pemantauan postur. Seperti halnya, menggunakan sensor induktif, sistem optik, akselerometer, pakaian pelacak, dan *Inertial Measurement Unit* (IMU)[4]. Namun, penggunaan dari sistem tersebut masih memiliki keterbatasan dalam hal monitoring, fleksibilitas, hingga biaya pemakaian sehingga memerlukan penyesuaian kembali agar tidak membatasi penerapan praktis sebagai *wearable device*.

Seiring berkembangnya layanan kesehatan terhadap kemunculan teknologi, kini *wearable device* menjadi sebuah solusi yang membantu pada ranah kesehatan. *Wearable device* merupakan teknologi yang kerap akan terus meningkat peminatnya karena kemudahan dalam pemakaiannya sehingga menjadi daya tarik baik bagi ranah kesehatan maupun calon pengguna untuk pemakaian sehari-hari.

Studi oleh Hills et al. menyeru pentingnya edukasi mengenai postur untuk mencegah dampak jangka panjang[5]. Maka dari itu, pendekatan monitoring preventif diperlukan. Peneliti bertujuan merancang dan mengembangkan *wearable posture monitoring system* (WPMS) yang ergonomis, ringan, dan nyaman. Tentunya dengan memperhatikan aspek teknis dalam penggunaan sensor yang memiliki sensitivitas yang tinggi serta *error margin* yang rendah supaya menjaga tingkat akurasi pembacaan postur tubuh dalam aktivitas duduk. Oleh karena itu, peneliti merancang WPMS berbasis sensor ADXL345 yang mampu mendeteksi kemiringan orientasi postur tubuh secara *real-time*. Proses monitoring didukung oleh sensor akselerometer yang terintegrasi juga dengan platform monitoring. Melalui perancangan ini,

diharapkan menjadi langkah preventif untuk meningkatkan kesadaran ergonomi, baik kepada pekerja kantoran maupun mahasiswa agar mengimplementasikan kebiasaan duduk dengan postur yang baik dalam kehidupan sehari-hari.

II. KAJIAN TEORI

A. *Wearable Device* sebagai Implementasi

Wearable device merupakan perangkat elektronik yang digunakan di tubuh serta mampu melakukan proses sebagai bentuk monitoring karena kemampuannya melakukan pemantauan berkelanjutan tanpa mengganggu aktivitas sehari-hari[6]. Review oleh Huang et al. menunjukkan bahwa sistem *wearable* memiliki efektivitas tinggi untuk mendeteksi perubahan sudut postur tubuh[7]. Saat ini, sudah ada pendekatan berbasis *wearable device* pada ranah kesehatan, seperti untuk mengetahui detak jantung, kualitas tidur, hingga postur tubuh. Pendekatan *wearable* ini akan diimplementasikan lebih sederhana, ekonomis, dan nyaman. *Wearable device* akan menjadi platform yang mengintegrasikan sensor ADXL345 dengan mikrokontroler ESP32 untuk memproses pergerakan tubuh secara berkelanjutan.

B. Sensor ADXL345

Sensor ADXL345 merupakan akselerometer yang dirancang mengukur tiga sumbu (X,Y,Z) dalam mendeteksi kemiringan orientasi tubuh. Sensor inilah yang akan bekerja menghasilkan data dalam bentuk derajat saat pemakaian. Keunggulan sensor ini terdiri dari komponen yang tahan guncangan hingga 10.000g, mendukung komunikasi I²C, ketahanan terhadap suhu ekstrim (-40°C - +85°C), serta daya yang rendah (2V - 3,6V)[8]. Sensor ini memiliki integrasi yang mudah dengan mikrokontroler sehingga sesuai dengan perancangan *wearable device* untuk monitoring postur.

C. Mikrokontroler ESP32 dan Platform Arduino IDE

Mikrokontroler ESP32 menjadi pusat kendali sistem yang akan memproses data sensor dan mengirim ke aplikasi *mobile* secara *real-time*. ESP32 ini juga mendukung protokol komunikasi I²C, konektivitas WiFi, serta mode hemat daya sehingga memberikan ketahanan baterai juga untuk perangkat *wearable*[9]. Mendukung keberjalan ESP32 ini, digunakan platform pemrograman Arduino IDE untuk mengkoneksikan perangkat keras yang digunakan dalam perancangan perangkat *wearable*.

D. Power Supply

Wearable device akan ditenagai dengan baterai tipe 18650 sebanyak 2 buah dengan kapasitas 2000 mAh dengan tegangan 3,7V. [10]. Baterai dilindungi kotak pelindung seperti *power bank* yang memiliki *port type-c* sebagai penghubung daya ke mikrokontroler ESP32.

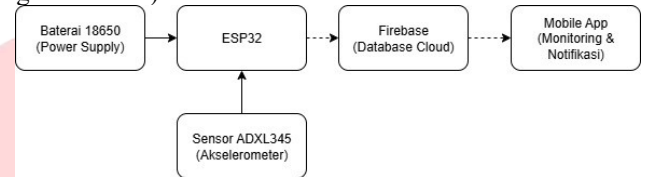
E. Fungsionalitas Sistem

Fungsionalitas merupakan kemampuan *wearable device* dalam menjalankan semua proses yang dirancang, dari kemampuan sensor membaca secara *real-time*, mengolah data, serta kenyamanan saat perangkat digunakan. Evaluasi diperlukan untuk memastikan perangkat bekerja sesuai rancangan dan mudah digunakan[11]. Adapun perangkat

wearable dipastikan memenuhi tujuan desain dan bekerja efektif dalam pemantauan postur tubuh.

III. METODE

Penelitian ini melakukan pendekatan perancangan *hardware* dalam mengembangkan *wearable posture monitoring system* (WPMS) berbasis sensor ADXL345. Sistem dirancang untuk mengetahui kemiringan sudut postur tubuh secara *real-time* yang didukung integrasi sensor ADXL345 dengan mikrokontroler ESP32 yang dihubungkan dengan daya dari baterai tipe 18650 serta dilengkapi oleh vest sebagai media peletakkan perangkat. Data yang diperoleh akan diproses oleh ESP32 dan akan divisualisasikan lebih lanjut di aplikasi *mobile*, seperti proses pada Gambar 1 (Blok Diagram Sistem).



GAMBAR 1
(Blok Diagram Sistem)

Dalam perancangan WPMS ini perlu memenuhi kriteria *wearable*, seperti ringan, fleksibel, dan nyaman digunakan dalam jangka panjang[12]. Perancangan *hardware* WPMS ini diadaptasi terlebih dahulu dengan mengidentifikasi kebutuhan melalui metode wawancara. Tujuan dari wawancara ini untuk menyesuaikan spesifikasi perangkat WPMS sesuai dengan kebutuhan pengguna. Beberapa kriteria yang disampaikan, seperti mengutamakan aspek kenyamanan yang tidak mengganggu aktivitas, penempatan komponen yang aman dan tidak bersentuhan dengan kulit pengguna, dan penggunaan platform yang mendukung untuk monitoring.

Maka, diperlukan spesifikasi yang mendukung untuk membuat *wearable device* sesuai kebutuhan. Spesifikasi yang diberikan untuk perangkat *hardware* WPMS, sebagai berikut:

- *Wearable device*: Pada perancangan ini menggunakan vest sebagai wadah penempatan elektronik yang dirancang dari sensor ADXL345, ESP32, dan baterai. Vest dirancang dengan berat total tidak lebih dari 500 gram untuk memenuhi kategori perangkat *wearable* ringan. Penggunaan vest ini sangat fleksibel dikarenakan mudah dalam pemakaiannya sehingga memberikan kenyamanan dan kemudahan untuk pengguna tanpa mengganggu pergerakan tubuh. Hal ini sesuai dengan regulasi ISO 10993-10 tentang Evaluasi Biokompatibilitas Perangkat medis: Perangkat *wearable* yang bersentuhan langsung dengan kulit harus dirancang agar nyaman digunakan dalam jangka waktu yang lama tanpa memicu iritasi atau ketidaknyamanan pemakaian[13].
- Sensor ADXL345 sebagai pendeteksi sudut: Sensor ini berperan mendeteksi percepatan tiga sumbu (X,Y,Z) dengan keluaran hasil berupa derajat melalui perhitungan sudut *pitch* (kemiringan depan/belakang) dan *roll* (kemiringan ke samping). Dalam penentuan margin error sesuai dengan Studi Giggins et al. *Wearable sensors in rehabilitation*: Kesalahan kurang dari 5 derajat dianggap dapat diterima pada perangkat *wearable* yang memberikan umpan balik postur[14]. Berdasarkan studi

ini, sensor diharapkan mampu memiliki tingkat akurasi yang tinggi dengan *Mean Absolute Error* (MAE) $\leq 5^\circ$ dan rata-rata akurasi $\geq 90\%$ serta presisi yang handal dengan nilai MAE $\leq 1^\circ$. Semakin tinggi nilai akurasi dan presisi, maka perangkat dapat dinyatakan berjalan dengan optimal.

Berdasarkan spesifikasi dan alur sistem di atas, diperlukan penyatuan komponen untuk membuat perangkat *wearable device*. Prosedurnya sebagai berikut:

1. Penyatuan komponen perangkat. Perangkaian komponen untuk menghubungkan sensor ADXL345 dengan ESP32 dibutuhkan bantuan breadboard sebagai tempat penyatuannya dengan kabel jumper sebagai penghubung antar komponen. Ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 2 (Penyatuan Komponen).



GAMBAR 2
(Penyatuan Komponen)

Pada penyatuan komponen tersebut, sensor ADXL345 menggunakan protokol komunikasi I²C yang menggunakan dua jalur data sehingga digunakanlah jalur serial data (SDA) sensor ke pin D21 ESP dan serial clock (SCL) sensor ke pin D22 ESP serta VCC ke *power rails* positif dan ground ke *power rails negatif*.

2. Kalibrasi sensor. Ini dilakukan untuk memastikan sensor berada di titik awal yaitu bernilai 0 supaya pembacaan sudut sesuai. Pada kalibrasi ini, nilai referensi sudut perlu dilakukan perubahan konversi terlebih dahulu ke satuan LSB terhadap sensitivitas sensor (15,6 mg/LSB). Ini proses bawaan dari datasheet sensor yang membaca nilai LSB, yang mana 1 LSB = 15,6 mg. Proses ini untuk membandingkan langsung dengan nilai keluaran raw sensor.
3. Proses pembentukan sudut derajat. Hal ini diproses karena sensor ADXL345 dengan sumbu X,Y,Z setelah dilakukan kalibrasi, data sensor dibaca dan dikonversi ke satuan percepatan (m/s^2) dengan mengalikan nilai konstanta gravitasi bumi ($9,81 m/s^2$) untuk dilanjutkan konversi dalam bentuk derajat. Konversi data ke derajat digunakan rumus sebagai berikut.

Rotasi sumbu X:

$$Pitch = \tan^{-1} \left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

Rotasi sumbu Y:

$$Roll = \tan^{-1} \left(\frac{-a_x}{a_z} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (2)$$

Sumbu rotasi yang diubah dalam bentuk derajat adalah sumbu X dan Y sedangkan untuk sumbu Z tetap karena berkaitan dengan percepatan gravitasi bumi yang bernilai tetap sebesar $9,8 m/s^2$. Visualisasi hasil derajat ini di analisis lebih lanjut oleh aplikasi untuk memberikan visualisasi sudut secara *real-time*.

4. Penyatuan komponen ke vest. Bentuk realisasi dari pembuatan *wearable device*. Penyatuan komponen ke

vest dirancang dengan menambahkan bentuk pocket yang berfungsi melapisi komponen sensor, ESP32, dan baterai. Adapun untuk kabel jumper dilapisi spiral pembungkus untuk menjaga dari kerusakan. Visualisasi vest dapat dilihat pada Gambar 3 (Visualisasi Vest).



GAMBAR 3
(Visualisasi Vest)

Pada visualiasi *wearable device* ini, sensor diletakkan pada bagian *thoracic* atas yaitu di bagian tengah diantara kedua belikat yang berfungsi untuk mendeteksi pergerakan punggung pengguna baik ke arah depan (membungkuk) maupun belakang (mengadiah). Penempatan ini dipilih pada bagian tersebut karena menempatkan sensor pada kondisi tubuh yang aman serta sensitif terhadap pergerakan postur sehingga mudah dibaca. Adapun untuk penempatan *pocket* mikrokontroler ESP32 berada pada bagian kiri atas serta *pocket* baterai berada di bagian kiri bawah untuk memudahkan penghubungan catu daya ke ESP32. Perangkat *wearable* telah terangkai dengan berat 450 gram yang mana memenuhi kondisi *wearable* kategori ringan. Selanjutnya dilakukan beberapa pengujian untuk memastikan sistem *wearable* dapat berjalan dengan semestinya. Diantaranya:

1. Pengujian akurasi. Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui keakuratan sensor dalam membaca pergerakan sudut. Semakin tinggi akurasi, maka sensor dinyatakan akurat untuk monitoring postur. Proses pengujian ini dilakukan untuk mengukur perbedaan antara nilai sudut yang dihasilkan oleh sensor ADXL345 dengan alat ukur konvensional berupa busur derajat besar serta bantuan penggaris sebagai media penghubung punggung pengguna ke busur besar. Nilai sudut *real-time* oleh sensor dibantu ditampilkan saat proses monitoring pada aplikasi saat berlangsung. Peneliti mengarahkan pengguna untuk mengubah postur secara bertahap dari posisi tegak hingga membungkuk untuk melihat nilai sudut yang diperoleh selama 10 kali pengujian. Ilustrasi pada Gambar 4 (Pengujian Akurasi).



GAMBAR 4
(Pengujian Akurasi)

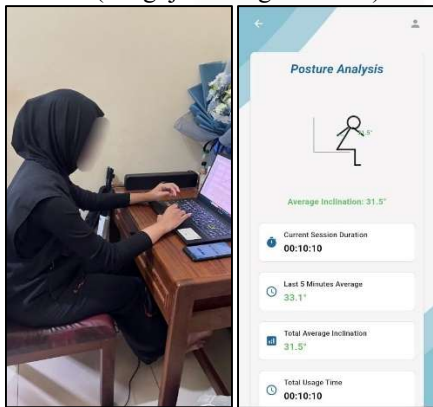
2. Pengujian presisi. Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kekonsistenan data yang diperoleh dengan

melakukan pengukuran berulang kali pada kondisi statis. Semakin tinggi presisi, maka tinggi tingkat konsistennya dalam pengukuran sudut. Peneliti mengarahkan pengguna berada pada 2 posisi duduk yaitu tegak dan membungkuk untuk memperoleh sudut yang dihasilkan oleh sensor pada kondisi tersebut dalam interval waktu setiap 5 detik selama 10 kali pengujian. Ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 5 (Pengujian Presisi).



GAMBAR 5
(Pengujian Presisi)

3. Pengujian Fungsionalitas. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan rancangan *hardware wearable* untuk monitoring postur sesuai saat pemakaian kondisi nyata. Mengetahui bahwa respon sensor dapat bekerja dengan baik serta mengetahui tingkat kenyamanan vest. Pengujian dilakukan terhadap lima orang mahasiswa tingkat akhir yang mana responden memiliki karakteristik yang sesuai dengan target penggunaan WPMS, yaitu aktivitas duduk dalam jangka waktu yang lama. Responden dipersilakan beraktivitas pada kondisi duduk dengan proses pengujian selama 10 menit. Setelah pengujian berakhir, responden diberikan angket berupa *google form* untuk menilai tingkat kenyamanan vest sebagai *wearable device*, baik dari segi kenyamanan penggunaan, bahan dan ukuran vest, serta keleluasaan bergerak. Ilustrasi pengujian dapat dilihat pada Gambar 6 (Pengujian Fungsionalitas).



GAMBAR 6
(Pengujian Fungsionalitas)

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengembangan *hardware* untuk monitoring berbasis sensor ADXL345 merupakan upaya yang dihadirkan sebagai langkah preventif dari timbulnya masalah kesehatan tulang belakang dari kebiasaan postur duduk yang tidak ergonomis. Perangkat *wearable* telah dirangkai dan dilakukan uji coba untuk menunjukkan perangkat dapat berjalan sebagaimana mestinya.

Pengujian akurasi telah dilakukan dan berikut hasil yang diperoleh, pada Tabel 1 (Hasil Pengujian Akurasi).

TABEL 1
(Hasil Pengujian Akurasi)

Pengujian Akurasi					
Mengukur Keakuratan Antara Sudut Sensor dengan Sudut Busur					
Pengujian ke-	Perbandingan (derajat)		Selisih (derajat)	Batas Margin = 5 Y/T	Akurasi
	Aplikasi	Busur			
1	7,6	6	1,6	Y	73,33%
2	13,8	10	3,8	Y	62,00%
3	29,6	31	1,4	Y	95,48%
4	39,5	36	3,5	Y	90,28%
5	41,2	40	1,2	Y	97,00%
6	49,4	51	1,6	Y	96,86%
7	51,1	53	1,9	Y	96,42%
8	58,4	61	2,6	Y	95,74%
9	63,8	65	1,2	Y	98,15%
10	67,4	70	2,6	Y	96,29%
Mean Absolute Error (MAE)			2,14		
Keterangan Batas Margin				Valid	
Rata-Rata Akurasi					90,16%

Pengujian akurasi ini diperoleh nilai *Mean Absolute Error* (MAE) dan rata-rata akurasi dari perbandingan pembacaan sudut dari sensor dengan sudut aktual busur. Berikut formulasi untuk akurasi.

1. Rumus menghitung MAE

$$\text{Selisih} = |\text{sudut aplikasi} - \text{sudut busur}| \quad (3)$$

$$\text{MAE} = \frac{\text{total selisih}}{\text{jumlah pengujian}} \quad (4)$$

2. Rumus menghitung rata-rata akurasi

$$\text{Akurasi} = \left(1 - \left(\frac{|\text{nilai aktual} - \text{nilai yang diperoleh}|}{\text{nilai aktual}}\right)\right) \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{Rata - Rata Akurasi} = \frac{\text{total akurasi}}{\text{jumlah pengujian}} \quad (6)$$

Berdasarkan pengujian, akurasi memperoleh nilai MAE sebesar 2,14°, rata-rata akurasi sebesar 90,16%, dan seluruh selisih pengukuran di bawah batas margin 5°. Hasil pengujian menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi sehingga dapat diindikasikan bahwa sistem *wearable* mampu membaca sudut postur dengan akurat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor ADXL345 yang diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32 mampu membaca sudut kemiringan yang mendekati nilai referensi. Ini membuktikan perangkat *wearable* memiliki tingkat akurasi yang baik.

Selanjutnya, pengujian presisi bertujuan mengevaluasi konsistensi pembacaan sensor dengan kondisi mempertahankan kondisi tubuh dalam kondisi yang sama. Hasil pengukuran presisi dapat dilihat pada Tabel 2 (Hasil Pengujian Presisi).

TABEL 2
(Hasil Pengujian Presisi)

(a) Kondisi Postur Duduk Tegak			
Pengujian ke-	Lama Pengujian	Nilai Sudut (derajat)	Simpangan Absolut (derajat)
1	00:00:0 - 00:00:5	18,4	0,08
2	00:00:0 - 00:00:5	18,1	0,38
3	00:00:0 - 00:00:5	18,5	0,02
4	00:00:0 - 00:00:5	18,4	0,08
5	00:00:0 - 00:00:5	18,4	0,08
6	00:00:0 - 00:00:5	18,3	0,18
7	00:00:0 - 00:00:5	18,6	0,12
8	00:00:0 - 00:00:5	18,7	0,22
9	00:00:0 - 00:00:5	18,7	0,22
10	00:00:0 - 00:00:5	18,7	0,22
Mean Sudut		18,48	
Mean Deviation			0,16
(b) Kondisi Postur Duduk Membungkuk			
Pengujian ke-	Lama Pengujian	Nilai Sudut (derajat)	Simpangan Absolut (derajat)
1	00:00:0 - 00:00:5	61,6	0,86
2	00:00:0 - 00:00:5	61	0,26
3	00:00:0 - 00:00:5	60,9	0,16
4	00:00:0 - 00:00:5	60,8	0,06
5	00:00:0 - 00:00:5	60,5	0,24
6	00:00:0 - 00:00:5	60,8	0,06
7	00:00:0 - 00:00:5	60,7	0,04
8	00:00:0 - 00:00:5	60,6	0,14
9	00:00:0 - 00:00:5	60,3	0,44
10	00:00:0 - 00:00:5	60,2	0,54
Mean Sudut		60,74	
Mean Deviation			0,28

Pengujian presisi ini memperoleh nilai *mean deviation* atau penyebaran sudutnya dari masing-masing kondisi baik posisi duduk tegak maupun membungkuk. Berikut formulasi yang digunakan selama pengukuran presisi.

1. Mencari nilai mean sudut masing-masing kondisi posisi

$$\text{Mean Sudut} = \frac{\text{total sudut posisi duduk}}{\text{jumlah pengujian}} \quad (7)$$

2. Mencari nilai simpangan absolut setiap pengujiannya

$$\text{Simpangan Absolut} = |\text{nilai sudut} - \text{mean sudut}| \quad (8)$$

3. Mencari nilai *mean deviation* masing-masing kondisi

$$\text{Mean Deviation} = \frac{\sum |\text{nilai sudut} - \text{mean sudut}|}{\text{jumlah pengujian}} \quad (9)$$

Berdasarkan pengujian, presisi memperoleh nilai *mean deviation* posisi duduk tegak sebesar 0,16° dan *mean deviation* posisi duduk membungkuk sebesar 0,28°. Hal tersebut menyatakan bahwa alat memiliki presisi yang tinggi dengan *mean deviation* masing-masing pengukuran $\leq 1^\circ$. Pengulangan pengukuran pada kondisi posisi yang sama dan menghasilkan nilai sudut yang relatif stabil menunjukkan bahwa sensor ADXL345 dapat bekerja secara konsisten yang mana telah terintegrasi dengan perangkat wearable. Hal ini menunjukkan perangkat *wearable* mampu menjaga kestabilan dalam pengoperasiannya.

Selanjutnya, tahap pengujian fungsionalitas. Pada tahap ini untuk menilai bahwa perancangan *wearable* bekerja sesuai rancangan. Uji ini akan menunjukkan respon sensor terhadap pembacaan sudut yang akan berjalan ketika proses monitoring dimulai serta mengamati kenyamanan penggunaan alat *wearable* oleh pengguna. Pada proses pengujian pertama terkait respon sensor, sensor berhasil mendeteksi sudut postur responden dengan mengetahui dari rata-rata sudut kemiringan yang ditindaklanjuti dalam tampilan aplikasinya, seperti pada Gambar 7 (Hasil Respon Sensor).

GAMBAR 7
(Hasil Respon Sensor)

Berikut disajikan hasil yang menunjukkan perangkat *wearable* berhasil membaca sudut selama proses monitoring, pada Tabel 3 (Hasil Pengujian Monitoring Postur).

TABEL 3
(Hasil Pengujian Monitoring Postur)

No	Responden	Total Average Inclination (derajat)
1	Responden 1	31,5
2	Responden 2	3,3
3	Responden 3	18,5
4	Responden 4	3,3
5	Responden 5	20,6

Keberhasilan tingkat akurasi dan presisi yang tinggi pada uji coba sebelumnya menjadi pokok untuk mengetahui juga bahwa alat sudah siap digunakan untuk monitoring postur posisi duduk. Pada tahap uji fungsionalitas ini, perangkat *wearable* dibuktikan bahwa alat mampu mendeteksi postur dalam interval waktu yang ditentukan sesuai perancangan. Hal tersebut ditunjukkan dengan respon sensor yang baik terhadap perubahan gerakan postur duduk.

Berdasarkan uji fungsionalitas ini, dalam pengujiannya juga untuk mengetahui pengalaman pengguna dalam pemakaian vest sebagai *wearable device* untuk monitoring postur. Penilaian terkait aspek kenyamanan vest ini menggunakan skala Likert yang bertujuan mengukur persepsi responden dari suatu pertanyaan [15]. Skala Likert menggunakan pernyataan dengan nilai 1 dengan persepsi sangat tidak setuju dan nilai 5 sebagai persepsi sangat setuju. Berdasarkan hasil analisis *Mean Opinion Score* (MOS), diperoleh rata-rata nilai 5 dari skala 5 yang mengindikasikan bahwa responden tidak merasa terganggu atau tidak terbatas pergerakan aktivitasnya dari vest yang merupakan media *wearable device* ini. Maka, berdasarkan hasil uji fungsionalitas, perangkat *wearable* dapat bekerja sesuai rancangan sehingga dapat dinyatakan keberhasilan fungsionalnya sebagai sistem pemantauan postur.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian baik dari akurasi, presisi, dan fungsionalitas ini, dapat disimpulkan bahwa sensor ADXL345 yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32 yang dirangkai menjadi perangkat *wearable* ini mampu dan bekerja dalam pemantauan postur sesuai rancangan. Perangkat *wearable* dengan berat 450 gram ini memiliki performa yang baik yang diketahui dari nilai akurasi dengan MAE sebesar 2,14°, rata-rata akurasi sebesar 90,16%, dengan batas margin yang berada di bawah 5°. Nilai presisi dengan *mean deviation* masing-masing pengukuran $\leq 1^\circ$, serta MOS

kenyamanan vest dengan nilai yang sangat baik. Perangkat wearable ini berpeluang dapat membantu pengguna dalam menjaga postur tubuh yang baik di kesehariannya serta menjadikan langkah preventif dari permasalahan yang timbul dari kebiasaan duduk tidak ergonomis pada waktu yang lama.

REFERENSI

- [1] Kementerian Perindustrian Republik Indonesia, Undang-Undang Republik Indonesia No.13 Tahun 2003 Tentang Ketenagakerjaan, 2003.
- [2] M. M. Alshehri, A. M. Alqhtani, S. H. Gharawi, R. A. Sharahily, W. A. Fathi, S.G. Alnamy, S. A. Alothman, Y. S. Alshehri, A. S. Alhowimel, B. A. Alqahtani, and A. M. Alenazi, "Prevalence of lower back pain and its associations with lifestyle behaviors among college students in Saudi Arabia: A cross-sectional study," *BMC Musculoskeletal Disorders*, vol. 24, Art. no. 646, 2023.
- [3] A. Pradita, "Korelasi Fleksibilitas Otot Lumbal dengan Keluhan Nyeri Punggung Bawah," *Khairun Medical Journal*, vol. 4, no. 2, 2022.
- [4] A. Rodriguez, J. R. Rabuñal, A. Pazos, A. Rodríguez Sotillo, and N. Ezquerro, "Wearable postural control system for low back pain therapy," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, 2021.
- [5] P. C. Hills et al., "The effects of feedback on computer workstation posture habits," *Work*, vol. 41, Suppl. 1, pp. 5254–5258, 2012.
- [6] S. Patel et al., "A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 9, no. 21, 2012.
- [7] Y. Huang et al., "Wearable posture monitoring systems: A review," *Sensors*, vol. 23, no. 22, Art. no. 9047, 2023.
- [8] Analog Devices, "ADXL345: Digital Accelerometer Datasheet," datasheet, 2022. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf>
- [9] Espressif Systems, "ESP32 Series Datasheet: ESP32-WROOM-32," datasheet, 2023. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [10] Honcell Energy Co., Ltd., "Li-ion Rechargeable Battery: ICR18650-2000 Datasheet," datasheet, 2018. [Online]. Available: <https://www.batteryspace.com/productimages/li-ion/LC18650-2000.pdf>
- [11] Sandesara, M., Bodkhe, U., Tanwar, S., dan Alshehri, S., "Wearable Device Evaluation for Real-Time Posture Monitoring," *International Journal of Sensor Networks*, vol. 12, no. 3, 2023.
- [12] International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector, ITU-T Recommendation G.1010: End-user multimedia QoS categories, Standar ITU, 2001
- [13] International Organization for Standardization, "Biological evaluation of medical devices – Part 10: Tests for irritation and skin sensitization," ISO 10993-10:2010, 2010.
- [14] C. Giggins, U. Persson, and B. Caulfield, "Biofeedback in rehabilitation," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 10, no. 1, p. 60, 2013. doi: 10.1186/1743-0003-10-60.
- [15] P. B. A. A. Putra, "Pengembangan aplikasi kuesioner survey berbasis web menggunakan skala Likert dan Guttman," *Jurnal Sains dan Informatika*, 2019.