

RANCANG BANGUN SMART GLOVE PENERJEMAH SIBI BERBASIS ESP32 TERINTEGRASI SISTEM SPEECH SYNTHESIS

Budi Styawan^{1*}, Handy Hartono Setiawan², I Made Candra Girinata³, Arwin Wahyu Saputra⁴, Zaenul Mutaqin⁵

^{1,2,3,4,5}Program Studi Teknologi Rekayasa Komputer Jaringan, ⁵Program Studi Teknologi Informasi
 Politeknik Negeri Tanah Laut

E-mail: budistyawan@politla.ac.id^{1*}, handy.hartono.setiawan@mhs.politla.ac.id²,
candragirinata@politla.ac.id³, arwinwahyu@politla.ac.id⁴, zaenulmutaqin@politla.ac.id⁵

INFO ARTIKEL

Sejarah Artikel

Diterima : 04/06/2026

Direvisi : 29/06/2026

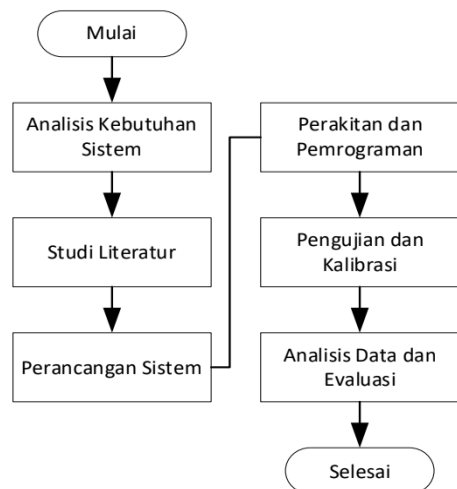
Diterbitkan : 30/06/2026

*Corresponding author

budistyawan@politla.ac.id

DOI: 10.70247/jumistik.v5i1.312

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Communication between individuals with hearing and speech impairments and the general public is often hindered by the limited understanding of the Indonesian Sign System (Sistem Isyarat Bahasa Indonesia/SIBI). This study designs and implements a one-handed smart glove prototype based on the ESP32 microcontroller capable of recognizing SIBI vowel gestures (A, I, U, E, O) in real time. Data acquisition is performed through the fusion of five flex sensors configured with pull-up resistors and an MPU6050 inertial sensor module. Signal processing is carried out locally using an Exponential Moving Average (EMA) filter followed by a deterministic thresholding classification method. Telemetry data are transmitted wirelessly via the MQTT protocol to a Laravel-based web interface for text visualization and conversion into speech output using speech synthesis. Confusion Matrix testing on 500 samples achieved an average accuracy of 94.2% with an average end-to-end latency of 469.4 milliseconds. These results validate the reliability of the prototype as a foundation for the development of a more comprehensive SIBI translation system.

Keywords: Smart Glove, SIBI, ESP32, Speech Synthesis, MQTT

ABSTRAK

Komunikasi antara penyandang disabilitas tunarungu dan tunawicara dengan masyarakat umum kerap terhambat akibat minimnya pemahaman terhadap Sistem Isyarat Bahasa Indonesia (SIBI). Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan purwarupa sarung tangan pintar (smart glove) satu tangan berbasis mikrokontroler ESP32 yang mampu mengenali isyarat huruf vokal SIBI (A, I, U, E, O) secara waktu nyata. Akuisisi data dilakukan melalui fusi lima flex sensor berkonfigurasi pull-up dan modul sensor inersia MPU6050. Pemrosesan sinyal dilakukan secara lokal menggunakan filter Exponential Moving Average (EMA) diikuti metode klasifikasi thresholding deterministik. Data telemetry dikirimkan nirkabel melalui protokol MQTT ke antarmuka web Laravel untuk divisualisasikan sebagai teks dan dikonversi menjadi luaran suara (speech synthesis). Pengujian Confusion Matrix terhadap 500 sampel menghasilkan akurasi rata-rata 94,2% dengan rata-rata latensi end-to-end 469,4 milidetik. Hasil ini memvalidasi keandalan purwarupa sebagai fondasi pengembangan sistem penerjemah SIBI yang lebih komprehensif.

Kata kunci: Smart Glove, SIBI, ESP32, Speech Synthesis, MQTT

PENDAHULUAN

Komunikasi verbal merupakan instrumen fundamental dalam interaksi sosial manusia. Namun bagi penyandang disabilitas tunarungu dan tunawicara, hambatan komunikasi kerap muncul akibat perbedaan cara berbahasa. Pemerintah Indonesia telah menetapkan Sistem Isyarat Bahasa Indonesia (SIBI) sebagai bahasa isyarat resmi, tetapi mayoritas masyarakat umum tidak mampu memahaminya. Kesenjangan linguistik ini dapat menyebabkan penyandang disabilitas mengalami isolasi sosial serta keterbatasan akses terhadap layanan publik [1].

Berbagai alat bantu telah dikembangkan untuk menerjemahkan bahasa isyarat menjadi teks atau suara. Metode berbasis visual (*vision-based*) menggunakan kamera memiliki akurasi tinggi namun sangat bergantung pada kondisi pencahayaan dan membutuhkan komputasi berat [2]. Sebagai alternatif, sistem berbasis sensor menggunakan sarung tangan pintar (*smart glove*) dinilai lebih portabel dan tidak terpengaruh cahaya lingkungan.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa integrasi *smart glove* dengan Internet of Things (IoT) kerap menghadapi kendala latensi akibat penggunaan *cloud database* [3]. Selain itu, sistem dua tangan meningkatkan kompleksitas perangkat keras dan mengurangi kenyamanan pengguna. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan rancang bangun purwarupa *smart glove* penerjemah SIBI berbasis ESP32 yang difokuskan pada pengenalan huruf vokal A, I, U, E, dan O. Pembatasan pada huruf vokal dilakukan sebagai tahap awal untuk menguji kelayakan arsitektur perangkat, proses akuisisi data, stabilisasi sinyal, klasifikasi nilai sensor, serta integrasi keluaran teks dan suara. Sistem dirancang menggunakan mekanisme satu tangan dengan lima *flex sensor* untuk membaca kelengkungan jari dan modul MPU6050 untuk memperoleh orientasi tangan. Untuk meningkatkan kestabilan pembacaan sensor, pemrosesan data dilakukan secara lokal pada mikrokontroler melalui kombinasi penyaringan median sederhana, Exponential Moving Average (EMA), dan *deadband*.

Kontribusi utama penelitian ini meliputi: (1) desain mekanik sarung tangan ergonomis dengan metode *pocket sewing sliding tolerance*; (2) implementasi filter EMA pada firmware mikrokontroler untuk stabilisasi sinyal; (3) arsitektur komunikasi IoT berbasis MQTT dengan latensi rendah; serta (4) sistem *speech synthesis* terintegrasi pada antarmuka web lintas platform.

TINJAUAN PUSTAKA

Perkembangan sistem penerjemah bahasa isyarat berbasis sensor telah menunjukkan kemajuan signifikan dengan dua pendekatan utama: *vision-based* dan *sensor-based*. Pendekatan *vision-based* menggunakan CNN mencapai akurasi >96% namun

membutuhkan komputasi berat dan sensitif terhadap pencahayaan [2]. Sebaliknya, pendekatan *sensor-based* menggunakan *smart glove* lebih portabel dan tidak terpengaruh kondisi visual.

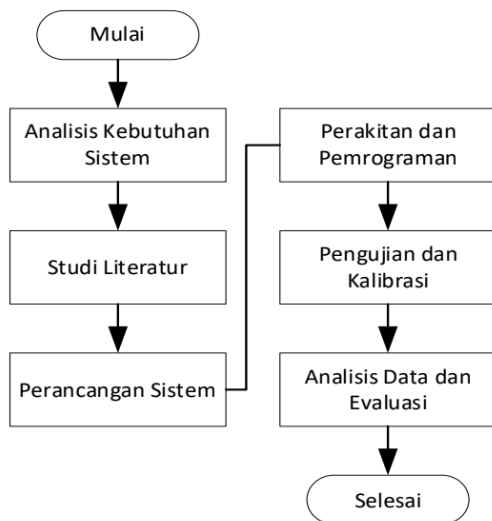
Penelitian berbasis *smart glove* menunjukkan variasi hasil yang beragam. Hazri et al. menggunakan satu sarung tangan dengan 5 *flex sensor* dan Arduino MEGA 2560 mencapai akurasi 76,15%, namun ukuran sarung tangan standar menyebabkan akurasi rendah (40%) pada huruf mirip K dan V [4]. Wungow et al. membandingkan KNN dan ANN pada USB Glove kit, mencapai akurasi tes 99% (KNN) dan 95% (ANN), namun akurasi *real-time* turun drastis di bawah 35% pada abjad tertentu akibat kemiripan gestur [5]. Ahmad Priadiyatna et al. mengembangkan sistem dua tangan berbasis ESP32 dengan 10 *flex sensor* dan 2 MPU6050 terintegrasi Firebase, mencapai akurasi 95% untuk huruf dan 73% untuk kata, namun gestur mirip (M/N) masih bermasalah dan *delay cloud database* menjadi kendala [6]. Nurfadillah Fadil & Stefanie mengintegrasikan Raspberry Pi, Machine Learning, dan Firebase dengan akurasi 50-100%, namun ketergantungan pada koneksi internet stabil dan *delay database IoT* masih menjadi kelemahan utama [3].

Berdasarkan analisis tersebut, terdapat empat tantangan utama: (1) akurasi rendah pada gestur mirip, (2) kompleksitas dan ketidaknyamanan perangkat dua tangan, (3) latensi akibat *cloud database*, dan (4) kebutuhan komputasi berat untuk metode ML. Penelitian ini mengisi celah tersebut melalui arsitektur satu tangan ergonomis, pemrosesan sinyal lokal (EMA) pada ESP32, komunikasi MQTT tanpa *cloud database*, dan validasi konsep SIBI huruf vokal sebagai fondasi pengembangan lebih luas.

METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini disusun secara sistematis dan terstruktur guna memastikan keberhasilan pengembangan purwarupa *smart glove* penerjemah Sistem Isyarat Bahasa Indonesia (SIBI). Rangkaian penelitian dirancang secara berkesinambungan, dimulai dari tahap identifikasi permasalahan mendasar hingga tahap penarikan kesimpulan berdasarkan evaluasi performa sistem secara menyeluruh.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian
Sumber : Hasil Olah Data

Secara garis besar, alur kerja penelitian dilaksanakan melalui tahapan berikut:

1. Melakukan kajian mendalam terhadap kendala komunikasi yang dialami oleh penyandang disabilitas tunarungu dan tunawicara, serta mengidentifikasi keterbatasan pada teknologi asistif yang telah ada.
2. Mengkaji referensi teknis komprehensif mengenai karakteristik operasional *flex sensor* melalui konfigurasi pembagi tegangan (*pull-up voltage divider*), sensor inersia (MPU6050), arsitektur mikrokontroler ESP32, metode pemfilteran sinyal digital *Exponential Moving Average (EMA)*, spesifikasi protokol transmisi *Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)*, serta kaidah pembentukan isyarat huruf vokal SIBI.
3. Membuat rancangan arsitektur perangkat keras yang mencakup skematik elektronik dan struktur mekanik untuk mekanisme satu tangan (*single glove*), merancang topologi jaringan komunikasi nirkabel melalui konektivitas Wi-Fi, serta merumuskan alur logika perangkat lunak berbasis pemetaan nilai batas (*thresholding*).
4. Melaksanakan perakitan komponen fisik yang terintegrasi pada sarung tangan, penulisan kode program (*firmware*) pada unit pemroses ESP32, serta pengembangan aplikasi antarmuka *dashboard* web yang dilengkapi dengan fitur konversi teks ke suara (*Speech Synthesis*).
5. Menguji kinerja fungsional dari seluruh subsistem *hardware* dan *software* melalui pengujian fungsionalitas (*Blackbox testing*), mengkalibrasi nilai dasar pembacaan resolusi sensor (*baseline*), serta menetapkan rentang ambang batas secara deterministik untuk mengidentifikasi pergerakan isyarat huruf vokal secara waktu nyata (*real-time*).
6. Mengumpulkan himpunan data (*dataset*) hasil pengujian dan mengolahnya menggunakan instrumen evaluasi *Confusion Matrix* untuk mengevaluasi tingkat akurasi klasifikasi sistem secara kuantitatif, serta mengukur tingkat latensi transmisi pada infrastruktur komunikasi jaringan.
7. Menyusun kesimpulan akhir berdasarkan analisis komprehensif terhadap hasil evaluasi kinerja operasional purwarupa dalam memenuhi spesifikasi fungsional penerjemahan isyarat.

Parameter Pengamatan

Guna mengevaluasi kinerja dan keandalan operasional dari purwarupa *smart glove*, penelitian ini menetapkan empat parameter pengamatan utama. Parameter ini dirancang untuk memvalidasi fungsionalitas perangkat keras maupun perangkat lunak secara terukur dan sistematis, dengan rincian sebagai berikut:

1. Nilai Resistansi dan Konversi *Analog-to-Digital Converter (ADC)*

Pemantauan difokuskan pada tingkat linearitas perubahan nilai resistansi dari kelima unit *flex sensor* yang dirangkai menggunakan konfigurasi pembagi tegangan (*pull-up voltage divider*). Perubahan tegangan analog tersebut dikonversi menjadi sinyal digital melalui modul *Analog-to-Digital Converter (ADC)* beresolusi 12-bit pada mikrokontroler ESP32, yang menghasilkan nilai diskrit dalam rentang 0 hingga 4095. Selain itu, parameter ini juga mengakuisisi dan mengevaluasi kestabilan pembacaan orientasi spasial, khususnya pada sumbu kemiringan (*pitch*) dan putaran (*roll*) yang diukur oleh modul *Inertial Measurement Unit (IMU)* MPU6050 guna membedakan gestur dengan pola tekukan jari yang identik.

2. Akurasi Penerjemahan

Parameter ini digunakan untuk mengukur persentase tingkat keberhasilan dan kepresisian sistem dalam mencocokkan kombinasi data sensor terhadap karakter huruf vokal Sistem Isyarat Bahasa Indonesia (SIBI) yang sedang diuji. Pengukuran dilaksanakan menggunakan metode pemetaan nilai batas (*thresholding*) murni, di mana tingkat akurasi dievaluasi berdasarkan rasio antara jumlah prediksi yang benar terhadap total keseluruhan sampel pengujian melalui representasi instrumen *Confusion Matrix*.

3. Waktu Respons (*Latency*)

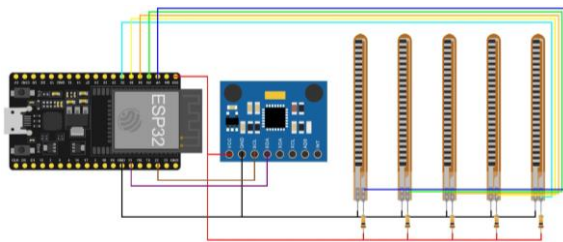
Parameter ini mengukur total durasi waktu jeda (*delay*) dari seluruh rangkaian transmisi jaringan sistem. Waktu respons dihitung sejak gestur pergerakan tangan terbentuk secara stabil, dilanjutkan dengan proses komputasi penghalusan sinyal menggunakan filter *Exponential Moving Average (EMA)* pada mikrokontroler, proses transmisi muatan data (*payload*) berformat JSON melalui protokol *Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)* via konektivitas Wi-Fi, hingga hasil

akhir berupa teks dan luaran suara (*Speech Synthesis*) selesai dieksekusi sepenuhnya pada aplikasi *dashboard web*.

4. Stabilitas Pembacaan (*Reliability*)

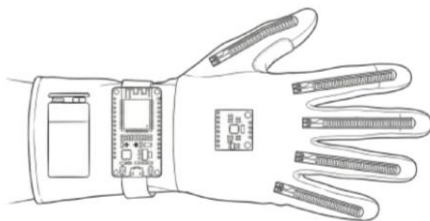
Parameter ini merupakan evaluasi kuantitatif terhadap tingkat kekebalan sistem dari gangguan kelistrikan maupun mekanis (*noise* atau *jitter*) saat postur tangan pengguna ditahan secara statis. Pengamatan keandalan juga mencakup pemantauan terhadap konsistensi laju pengiriman paket data dari mikrokontroler menuju pialang (*broker*) telemetri. Hal ini bertujuan untuk memastikan kelancaran komunikasi tanpa terjadinya kehilangan paket data (*packet loss*) yang dapat mengganggu pengenalan isyarat secara waktu nyata (*real-time*).

Rancangan Penelitian



Gambar 2. Skematik Rangkaian Perangkat Keras *Smart Glove*

Sumber : Hasil Olah Data



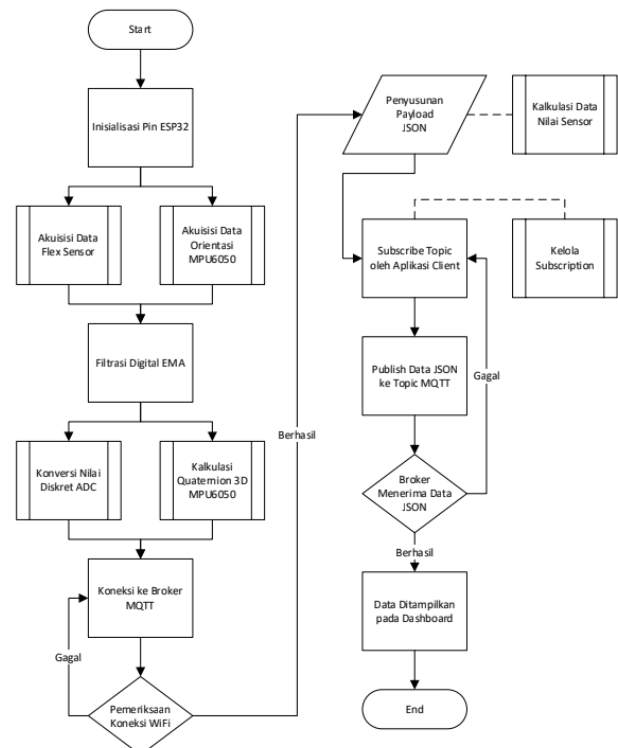
Gambar 3. Rancangan Penempatan Komponen pada Sarung Tangan

Sumber : Hasil Olah Data

Rancangan fisik *smart glove* diimplementasikan secara spesifik pada lengan sebelah kiri menggunakan mekanisme satu tangan. Kelima unit *flex sensor* diposisikan secara presisi pada area punggung setiap sendi jari. Penempatan ini dirancang menggunakan sistem kantong berslot (*sliding tolerance*) yang memberikan ruang gerak mikro pada sensor, sehingga mencegah kerusakan struktural saat jari ditekuk pada sudut maksimum. Dari aspek instrumentasi kelistrikan, sistem ini menerapkan konfigurasi sirkuit pembagi tegangan *pull-up* (*pull-up voltage divider*). Dalam rancangan ini, satu terminal *flex sensor* dihubungkan langsung ke jalur *ground*, sedangkan terminal lainnya dihubungkan ke titik persimpangan pin *Analog-to-Digital Converter* (ADC) mikrokontroler dan sebuah resistor konstan $10k\Omega$ yang terhubung ke jalur catu daya positif (VCC). Konfigurasi

pull-up ini krusial untuk menghasilkan resolusi penurunan tegangan yang linier, selaras dengan rentang resolusi 12-bit pada ESP32, sekaligus meminimalkan fluktuasi bacaan arus akibat resistansi internal komponen.

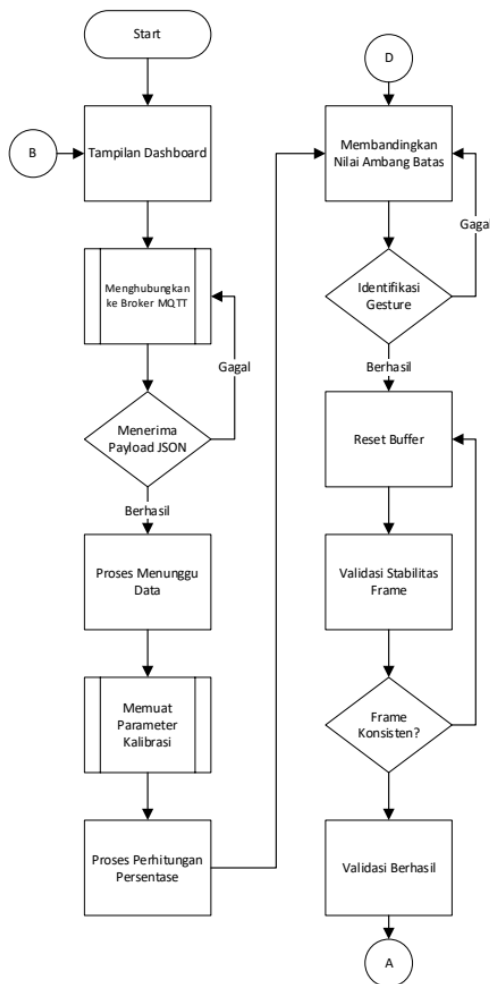
Modul MPU6050 dipasang terpusat pada bidang punggung telapak tangan. Posisi ini dipilih untuk merepresentasikan titik pusat gravitasi pergerakan telapak tangan secara utuh, memungkinkan akuisisi parameter orientasi spasial dieksekusi secara sinkron dengan derajat kelengkungan jari. Seluruh muatan komputasi berat, yang mencakup modul ESP32 beserta kompartemen sumber daya ganda baterai Li-Ion, ditempatkan di dalam struktur pelindung cetakan 3D pada area pergelangan lengan bawah. Strategi penempatan ini bertujuan untuk memastikan titik tumpu beban terdistribusi di luar persendian, sehingga kebebasan gerak dan aspek ergonomis pengguna tetap terjaga secara optimal.



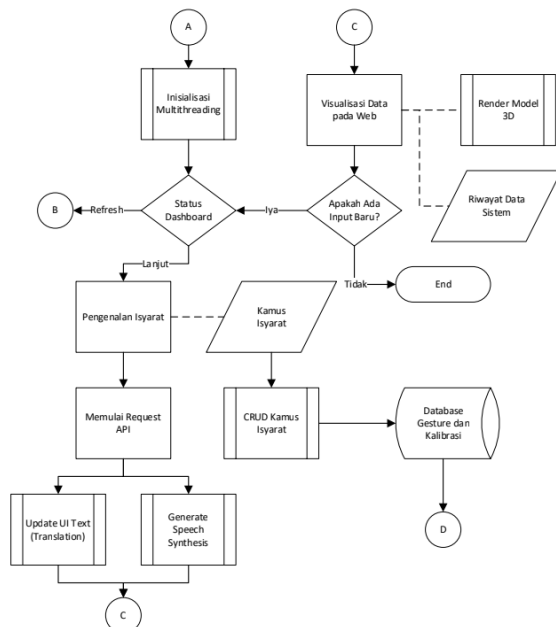
Gambar 4. Flowchart Sistem Kerja Alat

Sumber : Hasil Olah Data

Perangkat keras tersebut mengintegrasikan lima buah *flex sensor* untuk mendeteksi derajat kelengkungan jari serta satu modul sensor inersia MPU6050 untuk menentukan orientasi spasial tangan. Pemrosesan sinyal digital dilakukan secara mandiri pada tingkat mikrokontroler guna menstabilkan data melalui metode pemfilteran sebelum transmisi data dilakukan melalui jaringan nirkabel Wi-Fi.



Gambar 5. Flowchart Alur Kerja Software
Sumber : Hasil Olah Data



Gambar 6. Flowchart Alur Kerja Software
Sumber : Hasil Olah Data

Sistem ini mengimplementasikan arsitektur komunikasi berbasis protokol MQTT guna menjamin integritas data dan mengoptimalkan waktu respons (latensi) dalam pengiriman telemetri secara waktu nyata (*real-time*). Aliran data yang dikirimkan oleh mikrokontroler diteruskan melalui pialang (*broker*) MQTT untuk diproses oleh aplikasi *dashboard* berbasis web. Aplikasi tersebut dibangun menggunakan kerangka kerja Laravel dan didukung oleh basis data MySQL untuk penyimpanan informasi. Sebagai tahap akhir dari alur pemrosesan, sistem mengonversi hasil klasifikasi isyarat menjadi luaran teks visual dan suara secara otomatis melalui integrasi teknologi *Speech Synthesis*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Integrasi Komponen Fisik dan Sensor

Integrasi fisik komponen dilakukan dengan mendedepankan aspek ergonomi dan integritas data sensor. Penempatan kelima sensor *flex* disejajarkan secara presisi dengan anatomi persendian pada bagian punggung jari tangan pengguna untuk mengakuisisi setiap perubahan sudut tekukan secara akurat.

Pada tahap implementasi, metode penempelan sensor menggunakan perekat langsung tidak digunakan karena menyebabkan distribusi gaya tekan yang tidak merata. Hal tersebut mengakibatkan sensor melengkung secara tidak presisi dan berisiko merusak lapisan resistif di dalamnya. Sebagai solusi teknis, sensor diintegrasikan menggunakan teknik jahitan kantong (*pocket sewing*) dengan sistem toleransi geser (*sliding tolerance*). Pendekatan ini memungkinkan ujung sensor bergerak dinamis mengikuti kelengkungan jari tanpa mengalami deformasi mekanis yang ekstrem, sehingga akurasi data tetap terjaga dan umur pakai sensor menjadi lebih panjang.



Gambar 7. Implementasi Pocket Sewing dan Integrasi Komponen
Sumber : Hasil Olah Data

Modul sensor inersia MPU6050 diposisikan secara terpusat pada area punggung telapak tangan untuk mengakuisisi parameter orientasi spasial secara sentral. Sementara itu, unit mikrokontroler ESP32 diletakkan pada area pergelangan tangan untuk memastikan titik berat perangkat tidak membebani jemari, sehingga kebebasan gerak pengguna tetap optimal selama proses peragaan isyarat SIBI.

Konfigurasi Rangkaian Instrument dan Kelistrikan

Rangkaian instrumen sensor *flex* diimplementasikan menggunakan konfigurasi pembagi tegangan (*voltage divider*) dengan metode *pull-up*. Dalam konfigurasi ini, setiap sensor *flex* dipasangkan dengan sebuah resistor statis bernilai 10k Ω yang dihubungkan langsung ke jalur catu daya positif (VCC). Terminal keluaran dari titik persimpangan antara resistor dan sensor dihubungkan menuju pin *Analog-to-Digital Converter* (ADC) pada mikrokontroler ESP32. Berdasarkan struktur kode program, pin ADC yang digunakan meliputi pin VP (36), VN (39), D34, D35, dan D32.



Gambar 8. Implementasi Rangkaian Pembagi Tegangan pada Sensor
Sumber : Hasil Olah Data

Manajemen Sumber Daya

Manajemen sumber daya sistem ditenagai oleh sel ganda baterai *Lithium-Ion* (Li-Ion) 3.7V berkapasitas 2000mAh. Konfigurasi ini dirangkai untuk menyediakan suplai daya yang stabil bagi mikrokontroler ESP32 beserta seluruh instrumen sensor. Pemilihan baterai Li-Ion didasarkan pada pertimbangan dimensi fisiknya yang padat, sehingga memungkinkan integrasi yang lebih ringkas ke dalam struktur (*3D-printed case* pada area pergelangan tangan. Integrasi ini juga mencakup penempatan *toggle switch* untuk mempermudah kontrol daya aktif dan mati pada sistem. Dengan memusatkan distribusi beban di pergelangan tangan, purwarupa ini berhasil mencapai keseimbangan antara keandalan teknis dan kenyamanan pakai, sesuai dengan prinsip *wearable device* yang inklusif.

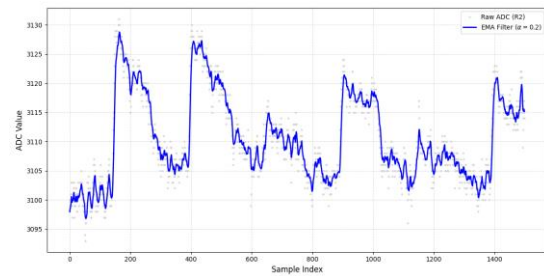


Gambar 9. Modul Power Supply Portabel
Sumber : Hasil Olah Data

Akuisisi Sinyal dan Filter Digital

Proses akuisisi data dilakukan melalui pin *Analog-to-Digital Converter* (ADC) beresolusi 12-bit pada mikrokontroler ESP32. Resolusi tersebut mengonversi tegangan analog dari variasi resistansi *flex sensor*

menjadi nilai diskrit dalam rentang 0 hingga 4095. Pada implementasi perangkat keras, sinyal mentah (*raw data*) sangat rentan terhadap gangguan mekanis maupun fluktuasi kelistrikan (*jitter*), terutama ketika jari pengguna berada pada postur statis.



Gambar 10. Grafik Hasil Penerapan Filter EMA pada Sinyal ADC
Sumber : Hasil Olah Data

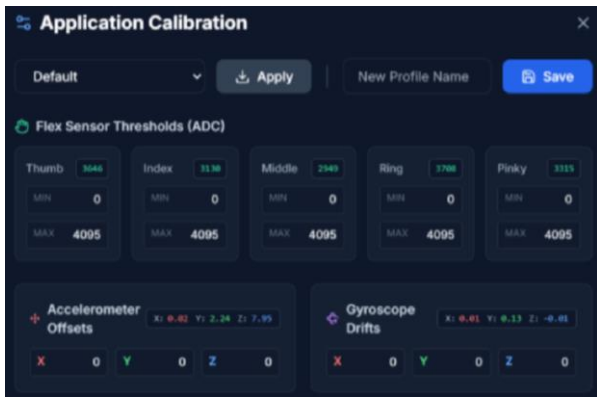
```
float ema[5] = {0, 0, 0, 0, 0};
int lastOutput[5] = {0, 0, 0, 0, 0};
const float ALPHA = 0.2;
const int DEADBAND = 15;

uint16_t getFilteredADC(uint8_t i) {
    buffers[i][bufferIdx] = analogRead(pins[i]);
    int t[5]; for(int j=0; j<5; j++) t[j] = buffers[i][j];
    for(int k=0; k<4; k++) for(int l=k+1; l<5; l++) if(t[k] > t[l]) {
        int tmp = t[k]; t[k] = t[l]; t[l] = tmp;
    }
    ema[i] = (ALPHA * t[2]) + ((1.0 - ALPHA) * ema[i]);
    if(abs((int)ema[i] - lastOutput[i]) >= DEADBAND)
        lastOutput[i] = (int)ema[i];
    return (uint16_t)lastOutput[i];
}
```

Guna menstabilkan pembacaan data sebelum proses klasifikasi, sistem menerapkan algoritma penghalusan sinyal *Exponential Moving Average* (EMA) secara lokal pada kode program (*firmware*) ESP32. Berdasarkan kalibrasi empiris, parameter faktor penghalusan (*smoothing factor* atau *alpha*) ditetapkan sebesar 0,2 untuk memberikan bobot optimal, dikombinasikan dengan toleransi nilai batas mati (*deadband*) sebesar 15 digit guna meredam fluktuasi minor. Konfigurasi algoritma ini terbukti efektif dalam menyaring derau frekuensi tinggi tanpa menimbulkan jeda waktu pemrosesan (*processing lag*) yang signifikan saat pengguna menggerakkan jari secara cepat.

Pipa Pemrosesan Data (Data Processing Pipeline)

Setelah sinyal dihaluskan oleh filter digital EMA, sistem melanjutkan komputasi dengan mengonversi nilai resolusi absolut ke dalam representasi persentase kelengkungan (0% hingga 100%). Proses normalisasi ini dilakukan dengan memetakan nilai batas dasar (*baseline*) ambang atas saat jari direntangkan lurus terhadap batas ambang bawah saat jari menggenggam secara maksimal.

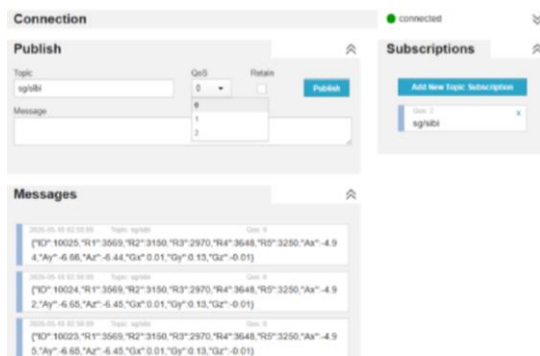


Gambar 11. Antarmuka Kalibrasi Nilai Ambang Batas ADC pada Dashboard
Sumber : Hasil Ouput

Metode pengenalan gestur dikendalikan sepenuhnya melalui logika heuristik berbasis nilai ambang batas statis (*threshold-based logic*). Pendekatan deterministik ini diterapkan untuk menjaga efisiensi komputasi dan mengurangi beban alokasi memori pada mikrokontroler. Proses identifikasi difokuskan pada pengenalan isyarat huruf vokal SIBI (A, I, U, E, O). Sebuah karakter divalidasi sebagai keluaran yang sah apabila persentase pembacaan kelima *flex sensor* secara simultan berada di dalam rentang ambang batas spesifik yang beririsan dengan dua parameter orientasi modul MPU6050 (sudut *pitch* dan *roll*).

Transmisi Data Telemetri Berbasis MQTT

Data spasial dan hasil evaluasi logika yang telah diproses kemudian dikemas (dienkapsulasi) ke dalam format muatan (*payload*) berstandar *JavaScript Object Notation* (JSON). Arsitektur komunikasi sistem dibangun menggunakan protokol *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) melalui infrastruktur jaringan nirkabel (Wi-Fi) menuju sebuah pialang (*broker*) terpusat.



Gambar 12. Pemantauan Telemetri Data Sensor melalui MQTT Web Client
Sumber : Hasil Ouput

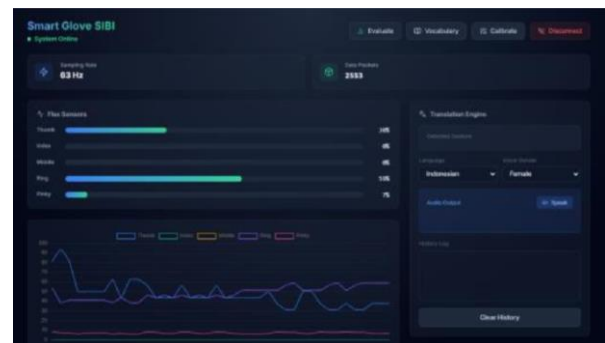
Pemilihan topologi jaringan ini merupakan strategi untuk memastikan aliran data berkecepatan tinggi dapat dieksekusi secara instan. Protokol MQTT

mengadopsi mekanisme publikasi dan langganan (*publish-subscribe*) yang sangat ringan dengan struktur *header* minimalis. Hal ini memungkinkan paket telemetri ditransmisikan secara kontinu pada frekuensi sampel (*sampling rate*) tinggi tanpa membebani lebar pita (*bandwidth*) serta meminimalkan risiko kehilangan paket (*packet loss*). Melalui penerapan komunikasi berbasis MQTT dan Wi-Fi, ketergantungan perangkat keras (*hardware-bound*) terhadap spesifikasi perangkat pengguna dapat dieliminasi guna menciptakan sistem yang lebih mandiri.

Sistem Antarmuka Web dan Speech Synthesis

Pada lapisan ujung penerima (*endpoint*), muatan data MQTT diakses secara asinkron oleh aplikasi *dashboard* berbasis web yang dikembangkan menggunakan kerangka kerja (*framework*) Laravel. Antarmuka tersebut tidak hanya bertindak sebagai media pemantauan visual interaktif untuk menampilkan grafik derajat kelengkungan, tetapi juga terintegrasi secara fungsional dengan basis data

MySQL guna merekam riwayat (*log*) pengujian dan parameter operasional sistem.



Gambar 13. Interface Dashboard Web
Sumber : Hasil Ouput

Ketika aliran masukan terverifikasi dan memenuhi syarat kecocokan ambang batas (*threshold match*), aplikasi web akan mengeksekusi dua tindakan utama. Pertama, sistem menampilkan hasil terjemahan teks karakter secara visual pada layar. Kedua, sistem memicu antarmuka pemrograman aplikasi (API) *Web Speech* bawaan peramban (*browser*) untuk mengonversi teks tersebut menjadi luaran suara (*Speech Synthesis*). Sinkronisasi antara keluaran visual dan umpan balik auditif ini menciptakan putaran komunikasi (*communication loop*) yang utuh, sehingga memungkinkan penyandang disabilitas tunarungu dan tunawicara untuk berinteraksi dua arah secara natural dan inklusif.

Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan dengan melibatkan satu orang pengguna (peneliti utama) yang bertindak sebagai subjek peragaan gestur. Subjek adalah mahasiswa program studi Teknologi Rekayasa Komputer Jaringan berjenis kelamin laki-laki dengan

umur 22 tahun, tangan yang digunakan untuk pengujian adalah tangan kiri. Penulis melakukan pengujian sistem :

1. Pengujian Fungsionalitas (Blackbox): Memverifikasi setiap subsistem bekerja sesuai spesifikasi. Dilakukan pada 10 kali percobaan untuk setiap subsistem (koneksi Wi-Fi, pembacaan flex sensor, MPU6050, MQTT, speech synthesis).
2. Pengujian Akurasi: Dilakukan dengan skenario 500 kali pengulangan (100 kali per huruf vokal). Setiap pengulangan melibatkan:
 - a. Subjek memperagakan gestur huruf vokal sesuai panduan SIBI.
 - b. Posisi tangan dipertahankan statis selama ± 2 detik.
 - c. Data sensor direkam pada kondisi stabil (setelah filter EMA).
 - d. Hasil prediksi sistem dicatat dan dibandingkan dengan gestur aktual.
3. Pengujian Latensi: Dilakukan dengan merekam waktu dari pembentukan gestur hingga keluaran speech synthesis pada 50 paket data. Latensi dipecah menjadi dua komponen: jeda transmisi MQTT dan waktu proses web.

Pengujian Inisialisasi Koneksi Nirkabel

Pengujian ini memvalidasi kemampuan mikrokontroler ESP32 dalam menginisialisasi modul komunikasi dan membangun sambungan dengan jaringan Wi-Fi lokal. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali percobaan secara berurutan dengan memutuskan dan menyambungkan kembali sumber daya perangkat.

Tabel 1. Indikator Otomasi

No	Timestamp	Waktu Koneksi (ms)	Status
1	00:00:43.152	12.182	Connected
2	00:00:59.449	10.591	Connected
3	00:01:09.650	6.807	Connected
4	00:01:47.378	34.126	Connected
5	00:01:59.646	6.371	Connected

Sumber : Hasil Ouput

Berdasarkan pencatatan waktu komputasi, mikrokontroler berhasil membangun sambungan ke jaringan Wi-Fi lokal dan server MQTT dalam waktu rata-rata 24,72 detik setelah unit diaktifkan. Durasi pencatatan tersebut merupakan akumulasi latensi ujung-ke-ujung (*end-to-end latency*), yang terhitung sejak sistem aplikasi diaktifkan hingga paket telemetri pertama divalidasi. Sistem juga secara konsisten mencetak status keberhasilan koneksi ke *serial monitor* pada setiap percobaan.

Pengujian Akuisisi Data Sensor Flex

Pengujian fungsionalitas sensor *flex* dilakukan untuk mengamati tingkat linearitas perubahan nilai

konversi analog ke digital (ADC) serta respons konversinya menjadi persentase kelengkungan pada *dashboard* web. Pengujian dieksekusi pada setiap jari secara independen dengan memvariasikan sudut tekukan dari posisi lurus hingga menggenggam penuh.

Tabel 2. Hasil Pengujian Sensor Flex

No	Target Jari	Nilai Dasar / Baseline (0% - Lurus)	Nilai Puncak / Peak (100% - Menekuk)	Rentan g Deviasi (Δ ADC)
1	Jempol (F1)	3575	3621	46
2	Jempol (F1)	3589	3621	32
3	Telunjuk (F2)	3152	3201	49
4	Telunjuk (F2)	3171	3203	32
5	Tengah (F3)	2975	3023	48
6	Tengah (F3)	2991	3021	30
7	Manis (F4)	3672	3703	31
8	Manis (F4)	3691	3721	30
9	Kelingking (F5)	3264	3500	236
10	Kelingking (F5)	3289	3476	187

Sumber : Hasil Ouput

Penekukan pada setiap jari secara mandiri memicu peningkatan nilai tegangan yang linier akibat konfigurasi *pull-up*. Perubahan ini langsung memengaruhi lonjakan persentase pada *dashboard* web secara mulus tanpa adanya lonjakan drastis (*spike*) berkat implementasi parameter pemfilteran *Exponential Moving Average* (EMA).

Pengujian Modul IMU MPU6050

Pengujian ini mengukur kapabilitas sistem dalam merekam perubahan orientasi spasial tangan pada berbagai sumbu referensi, khususnya sumbu kemiringan (*pitch*) dan putaran (*roll*).

Tabel 3. Hasil Pengujian Modul MPU6050

No	Skenario Orientasi	Accelerometer (x, y, z) [g]	Gyroscope (x, y, z) [°/s]
1	Vertikal 0°	9.98, 0.24, 1.36	-0.03, 0.11, -0.01
2	Vertikal 0°	9.99, 0.22, 1.27	-0.05, 0.13, -0.02
3	Kemiringan 45°	6.09, 1.21, 6.43	0.02, 0.11, 0.00
4	Kemiringan 45°	5.55, 5.75, 4.70	0.05, 0.15, 0.01
5	Horizontal 90°	-1.18, 1.02, 8.50	0.03, 0.16, -0.03
6	Horizontal 90°	-2.34, 1.59, 7.50	-0.01, 0.12, 0.03

Sumber : Hasil Ouput

Pengujian Komunikasi Publikasi MQTT

Pengujian transmisi jaringan ini bertujuan untuk memvalidasi bahwa sinkronisasi muatan data (*payload*) berformat JSON dari mikrokontroler menuju pialang (*broker*) MQTT berjalan secara periodik tanpa adanya interupsi komunikasi. Pengujian ini mencatat waktu inisiasi pengiriman dari antarmuka serial ESP32 hingga waktu aktual penerimaan paket oleh *broker*.

Tabel 4. Hasil Pengujian Transmisi Payload MQTT

Urutan Paket	Waktu Inisiasi Serial (t_1)	Waktu Penerimaan MQTT (t_2)	Latensi (Δt) (ms)	Status
#300	00:00:10.702	00:00:11.019	317	Valid
#301	00:00:10.713	00:00:11.021	307	Valid
#302	00:00:10.725	00:00:11.021	296	Valid
#303	00:00:10.736	00:00:11.022	286	Valid
#304	00:00:10.748	00:00:11.143	394	Valid
#305	00:00:10.759	00:00:11.154	395	Valid
#306	00:00:10.771	00:00:11.168	396	Valid

Sumber : Hasil Ouput

Berdasarkan hasil pengujian, aliran paket data JSON terkirim secara berurutan menuju topik telemetri sg/sibi. Pengamatan terhadap kolom waktu inisiasi serial (t_1) menunjukkan ritme pengiriman data yang stabil dengan selisih waktu antar paket berkisar antara 10 hingga 13 milidetik. Hal ini secara akurat merepresentasikan frekuensi pengambilan sampel (*sampling rate*) yang telah dideklarasikan di dalam algoritma mikrokontroler.

Observasi lebih lanjut pada selisih antara waktu penerimaan MQTT (t_2) dan waktu inisiasi (t_1) menghasilkan nilai latensi (*End-to-End Latency*) yang berfluktuasi antara 233 milidetik hingga 396 milidetik. Peningkatan latensi pada rentang waktu tertentu, seperti pada paket #304 hingga #306, merupakan hal yang wajar dan diakibatkan oleh mekanisme antrean data (*buffering*) pada jaringan nirkabel serta waktu penyelesaian proses di sisi peladen. Secara keseluruhan, seluruh pengujian transmisi tercatat berstatus valid, mengonfirmasi bahwa arsitektur perangkat keras dan perangkat lunak mampu mempertahankan integritas data tanpa mengalami kehilangan paket (*packet loss*).

Pengujian Integrasi Speech Synthesis

Skenario pengujian pamungkas mengevaluasi kapabilitas Antarmuka Pemrograman Aplikasi (API) peramban web dalam menerjemahkan teks karakter SIBI menjadi keluaran suara sintesis.

Tabel 5. Hasil Pengujian Integrasi Speech Synthesis

Packet ID	Detected Gesture	Receive Time	Compute Delay (ms)	Synthesis Delay (ms)	Total Delay (ms)
#363	A	00:56.899	1.9	3.2	5.1
#387	I	00:57.910	1.7	3.1	4.8
#410	U	00:59.957	3.2	5.4	8.6
#435	E	00:59.889	2.2	5.9	8.1
#472	O	01:01.426	1.5	3.2	4.7

Sumber : Hasil Ouput

Berdasarkan hasil pengujian, kinerja waktu tunda (*delay*) dari sistem menunjukkan tingkat responsibilitas

yang sangat tinggi. Waktu komputasi (*compute delay*) yang mengindikasikan jeda pemrosesan awal berada pada rentang yang sangat rendah, dengan nilai minimum 1,5 ms dan nilai maksimum 3,2 ms. Selanjutnya, waktu sintesis (*synthesis delay*) yang dibutuhkan oleh API peramban web untuk mengonversi teks menjadi keluaran audio tercatat konsisten pada interval 3,1 ms hingga 5,9 ms. Secara keseluruhan, akumulasi total waktu tunda (*Total Delay*) tertinggi terjadi pada transmisi paket karakter U sebesar 8,6 ms, sedangkan latensi terendah tercatat pada karakter O sebesar 4,7 ms.

Tingkat latensi akumulatif yang secara konstan berada di bawah 10 ms memvalidasi bahwa transmisi paket data dan pemrosesan audio beroperasi secara waktu nyata (*real-time*) tanpa hambatan komunikasi yang dapat dirasakan oleh pengguna. Seluruh karakter teks vokal SIBI (A, I, U, E, O) yang divalidasi pada antarmuka web secara asinkron berhasil menjadi pemicu (*trigger*) eksekusi sistem. Teks tersebut secara instan disuarakan oleh sistem operasi pengguna melalui pelantang suara dengan pelafalan dialek bahasa Indonesia yang natural. Pencapaian ini mengonfirmasi keandalan dan keberhasilan integrasi akhir antara pemrosesan gestur mandiri berbasis logika ambang batas (*threshold*) pada mikrokontroler dengan modul Web Speech API.

Pengujian Akurasi Pengenalan Isyarat

Uji kinerja utama diukur berdasarkan metrik kepresisian klasifikasi gestur abjad vokal SIBI. Guna memberikan landasan komparatif yang objektif, analisis kinerja didukung oleh representasi visual dari setiap gestur yang diuji. Representasi ini mencakup postur fisik jari, konversi pembacaan *flex sensor* ke dalam nilai persentase, serta parameter orientasi yang diproses oleh antarmuka *dashboard web*.

Pengambilan sampel eksperimental dilakukan secara terstruktur melalui 500 kali pengulangan iteratif, dengan rincian 100 iterasi untuk masing-masing abjad A, I, U, E, dan O. Setiap iterasi merekam konstelasi pembacaan sensor pada momen statis untuk mengamati pengaruh fluktuasi nilai terhadap hasil akhir prediksi algoritma logika ambang batas (*threshold*) deterministik.

Tabel 6. Data Akuisisi Sensor untuk Gestur "A"

Timestamp	Pembacaan ADC Flex (R1 – R5)	Akselerometer (Ax, Ay, Az)	Prediksi Sistem
00:00:46.120	3571, 3171, 3005, 3687, 3363	10.28, 1.41, -2.15	A
00:01:15.645	3579, 3173, 3005, 3700, 3337	10.27, 1.46, -1.82	A
00:02:04.087	3575, 3178, 3004, 3688, 3342	10.34, 0.74, -2.50	A

Sumber : Hasil Ouput



Gambar 14. Gestur "A"
Sumber : Hasil Ouput

Tabel 7. Data Akuisisi Sensor untuk Gestur "I"

Timestamp	Pembacaan ADC Flex (R1 – R5)	Akselerometer (Ax, Ay, Az)	Prediksi Sistem
00:01:09.93 2	3596, 3228, 2995, 3688, 3267	10.18, -0.87, - 3.46	I
00:01:46.19 9	3592, 3220, 3001, 3688, 3246	10.09, 2.34, - 1.45	I
00:02:16.58 9	3619, 3207, 3012, 3688, 3241	9.93, 2.45, - 0.08	I

Sumber : Hasil Ouput



Gambar 15. Genstur "I"
Sumber : Hasil Ouput

Tabel 8. Data Akuisisi Sensor untuk Gestur "U"

Timestamp	Pembacaan ADC Flex (R1 – R5)	Akselerometer (Ax, Ay, Az)	Prediksi Sistem
00:01:23.18 9	3591, 3163, 2986, 3691, 3365	10.13, 2.28, - 1.85	U
00:01:59.58 6	3612, 3163, 2975, 3699, 3320	9.90, 2.96, - 1.86	U
00:03:17.41 0	3616, 3159, 2980, 3691, 3332	9.67, 3.74, - 1.58	U

Sumber : Hasil Ouput



Gambar 16. Gestur "U"
Sumber : Hasil Ouput

Tabel 9. Data Akuisisi Sensor untuk Gestur "E"

Timestamp	Pembacaan ADC Flex (R1 – R5)	Akselerometer (Ax, Ay, Az)	Prediksi Sistem
00:00:35.40 3	3592, 3180, 3000, 3702, 3331	9.47, 3.79, - 2.30	E
00:01:27.42 0	3602, 3178, 3007, 3688, 3305	9.82, 3.15, - 1.18	E
00:02:05.30 2	3590, 3178, 2992, 3692, 3283	9.49, 3.91, - 1.07	E

Sumber : Hasil Ouput



Gambar 17. Gestur "E"
Sumber : Hasil Ouput

Tabel 10. Data Akuisisi Sensor untuk Gestur "O"

Timestamp	Pembacaan ADC Flex (R1 – R5)	Akselerometer (Ax, Ay, Az)	Prediksi Sistem
00:00:27.58 5	3603, 3172, 2986, 3681, 3298	1.33, 0.88, 8.58	O
00:01:09.48 3	3594, 3170, 2988, 3691, 3272	4.12, 1.60, 7.45	O
00:01:35.47 6	3595, 3177, 3002, 3690, 3279	3.78, 2.90, 7.20	O

Sumber : Hasil Ouput



Gambar 18. Gestur "O"
Sumber : Hasil Ouput

Himpunan data (*dataset*) hasil ekstraksi tersebut kemudian didistribusikan dan dipetakan ke dalam bentuk *Confusion Matrix* untuk mengevaluasi persentase tingkat akurasi secara komprehensif.

Tabel 11. Confusion Matrix Pengenalan Huruf Vokal

Prediksi Aktual	A	I	U	E	O	Akurasi (%)
A	86	4	2	8	0	86%
I	0	99	0	1	0	99%
U	0	0	100	0	0	100%
E	1	13	0	86	0	86%
O	0	0	0	0	100	100%

Sumber : Hasil Ouput

Berdasarkan hasil distribusi pada tabel, tingkat presisi kumulatif (*accuracy*) rata-rata sistem mencapai persentase 94,2% (471 identifikasi sukses dari 500 total observasi). Akurasi terendah terjadi pada klasifikasi huruf "A" dan "E" (masing-masing 86%), di mana gestur huruf "A" secara sistematis sering mengalami tumpang tindih (*overlapping*) ke dalam pemetaan logika huruf "E", sementara huruf "E" mengalami tumpang tindih ke dalam pemetaan logika huruf "I". Anomali ini terjadi akibat konstelasi persentase kelengkungan empat jari utama (telunjuk, tengah, manis, dan kelingking) berada dalam margin *threshold* yang beririsan erat pada gestur-gestur tersebut. Oleh karena itu, kepastian sistem sangat bergantung pada presisi orientasi jari jempol dan kemiringan modul MPU6050 untuk menentukan kelas karakter akhir. Di sisi lain, pembacaan untuk karakter "U" dan "O" menunjukkan tingkat akurasi sempurna (100%) dikarenakan terdapat perbedaan karakteristik yang signifikan pada formasi jari, seperti posisi tegak dua jari pada huruf "U" serta formasi membulat bersudut landai dari seluruh variabel jari pada huruf "O", sehingga menjauhinya dari rentang tumpang tindih dengan karakter lain.

Tabel 12. Metrik Evaluasi Klasifikasi Huruf Vokal SIBI

Karakter	Precision	Recall	F1-Score
A	98,85%	86%	91,98%
I	85,34%	99%	91,68%
U	98,04%	100%	99,01%
E	90,53%	86%	88,20%
O	100%	100%	100%
Rata-rata Makro	94,55%	94,2%	94,17%

Sumber : Hasil Ouput

Berdasarkan Tabel 4.17, sistem menunjukkan performa yang sangat baik dengan rata-rata makro *Precision* mencapai 94,55%, *Recall* 94,2%, dan *F1-Score* 94,17%.

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN}$$

$$Recall = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$

TP (True Positive) = Jumlah data kelas aktual yang diprediksi benar

FP (False Positive) = Jumlah data kelas lain yang diprediksi sebagai kelas tersebut

FN (False Negative) = Jumlah data kelas aktual yang diprediksi sebagai kelas lain

Nilai *F1-Score* sebagai rata-rata harmonik antara *Precision* dan *Recall* memberikan gambaran keseimbangan sistem dalam mengenali setiap gestur secara tepat dan menyeluruh.

Pengujian Performa Jaringan dan Latensi

Hasil pengukuran kuantitatif dievaluasi berdasarkan 10 paket data pengujian sebagai representasi kondisi performa optimal sistem. Berdasarkan hasil agregasi metrik, rata-rata total waktu respons sistem dari ujung ke ujung (*end-to-end*) tercatat sebesar 469,4 milidetik. Analisis komparatif menunjukkan bahwa komputasi pada mesin klien (*Web Processing Time*) beroperasi secara sangat efisien dengan rata-rata hanya 8,2 milidetik. Hal ini menjadikan jeda transmisi jaringan berbasis protokol MQTT sebagai penyumbang latensi utama dengan rata-rata 461,2 milidetik. Dengan akumulasi waktu tunda di kisaran 0,47 detik per karakter, kinerja sistem dinilai responsif dan stabil. Rentang latensi tersebut berada pada batas yang baik untuk mendukung ritme komunikasi berurutan. Kapabilitas ini membuktikan bahwa infrastruktur telemetri berbasis Wi-Fi dan aplikasi web klien secara konsisten mampu merender perubahan karakter menjadi keluaran *Speech Synthesis*, sehingga berhasil memberikan umpan balik auditif yang jelas bagi penyandang disabilitas.

Tabel 13. Data Pengukuran Waktu Respons Transmisi Sistem

Packet ID	Jeda Transmisi Jaringan ($\Delta t_{jaringan}$) (ms)	Waktu Proses Web (Δt_{web}) (ms)	Total Latensi (L_{total}) (ms)
#10670	317	6,8	323,8
#10903	438	6,5	444,5
#11157	436	6,9	442,9
#11394	386	7,8	393,8
#11617	434	6,9	440,9
#13477	313	13,1	326,1
#13583	371	6,8	377,8
#13704	660	14,6	674,6
#13817	717	6,3	723,3
#14032	461,2	6,6	546,6
Rata-rata	461,2	8,2	469,4

Sumber : Hasil Ouput

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan serangkaian proses perancangan, implementasi, pengujian, serta analisis data yang telah dilaksanakan pada purwarupa *smart glove* penerjemah Sistem Isyarat Bahasa Indonesia (SIBI), dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Arsitektur Perangkat Keras: Berhasil merealisasikan mekanisme satu tangan (*single glove*) yang ergonomis dengan mengintegrasikan 5 *flex sensor*, IMU MPU6050, dan baterai Li-Ion 3.7V tanpa membatasi mobilitas pengguna.
2. Pemrosesan Sinyal (*Edge Processing*): Penggunaan algoritma *Exponential Moving Average* (EMA) pada ESP32 efektif menstabilkan derau (*noise*) sensor secara lokal tanpa penundaan komputasi.
3. Akurasi Klasifikasi: Metode pemetaan batas (*thresholding*) berhasil mengidentifikasi huruf vokal SIBI (A, I, U, E, O) dengan tingkat akurasi kumulatif mencapai 94,2%.
4. Konektivitas IoT: Protokol MQTT via Wi-Fi sukses mentransmisikan data ke *dashboard* web dan memicu luaran suara (*Speech Synthesis*) secara *real-time* dengan latensi rata-rata 469,4 ms.

Meskipun purwarupa *smart glove* penerjemah isyarat vokal SIBI ini telah beroperasi dengan baik sesuai dengan batasan masalah dan tujuan awal penelitian, masih terdapat ruang yang terbuka untuk penyempurnaan. Oleh karena itu, diusulkan beberapa saran teknis dan operasional untuk pengembangan pada penelitian di masa mendatang:

1. Implementasi Edge AI: Mengganti *thresholding* statis dengan *Machine Learning* ringan langsung di mikrokontroler untuk mengatasi gestur yang tumpang tindih (*overlapping*) dan variasi anatomi tangan.
2. Aplikasi Mandiri (*Standalone*): Mengembangkan aplikasi *native* lintas platform (PC/Android/iOS) untuk menghilangkan ketergantungan operasional pada peladen (*server*) web.
3. Perluasan Kosakata & UAT: Memperluas cakupan deteksi ke seluruh abjad dan gerakan dinamis (kalimat utuh), serta melakukan *User Acceptance Testing* (UAT) langsung dengan penyandang tunarungu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Budhi Widodo, W. Swastika, and A. Bohaswara Haryasena Bohaswara Haryasena, "STUDI SENSOR DAN AKUISISI DATA HAND GESTURE DENGAN SARUNG TANGAN," in *Peranan Strategis Teknologi Dalam Kehidupan di Era New Normal*, Malang: Universitas Widyagama Malang, Desember 2020. [Online]. Available: <https://publishing-widyagama.ac.id/ejournal-v2/index.php/ciastech/article/view/1949>
- [2] J. R. Naraja, C. J. Leyson, and J. R. Fernandez, "Real-Time Sign Language Recognition and Translation: A Mobile Solution Using Convolutional Neural Network," *Isabela State Univ. Link. J. Eng. Comput. Technol.*, p. 20, Jun. 2025, doi: 10.65141/ject.v2i1.n2.
- [3] M. Nurfadillah Fadil and A. Stefanie, "GLOVES TECHNOLOGY (GLOTECH) FOR DEAF AND DUMB," *JATI J. Mhs. Tek. Inform.*, vol. 8, no. 4, pp. 7712–7717, Aug. 2024, doi: 10.36040/jati.v8i4.10454.
- [4] M. H. H. Hazri, Z. Mohd Noh, N. Mohamad Yatim, and N. M. Z. Hashim, "Modelling of Flex Sensor Resistance Value for Fingerspelling Recognition Prototype Using Sensor-Based Signal," *IJUM Eng. J.*, vol. 26, no. 3, pp. 220–237, Sep. 2025, doi: 10.31436/iiumej.v26i3.3633.
- [5] K. Christopher Wungow, R. Budhi Widodo, and M. Subianto, "Studi Klasifikasi dengan KNN dan ANN pada Sarung Tangan Penerjemah Angka dan Alfabet Bahasa Isyarat SIBI," in *Prosiding Seminar Nasional Universitas Ma Chung*, MA CHUNG, Sep. 2022. [Online]. Available: <https://ocs.machung.ac.id/index.php/seminarnasionalm achung/article/view/329>
- [6] W. Ahmad Priadiyatna, H. Hudiono, and A. Rasyid, "RANCANG BANGUN SARUNG TANGAN PINTAR PENERJEMAH BAHASA ISYARAT INDONESIA (BISINDO) BERBASIS IOT," *J. Jartel J. Jar. Telekomun.*, vol. 10, no. 4, pp. 213–219, Dec. 2020, doi: 10.33795/jartel.v10i4.21.
- [7] J. Amanda, S. Destya, and M. Kopravi, "Smart Glove Design to Improve Accessibility Communication for the Deaf," *J. Appl. Inform. Comput.*, vol. 10, no. 1, pp. 984–993, Feb. 2026, doi: 10.30871/jaic.v10i1.12110.
- [8] N. Budhisantosa, N. R. Ramadhan, H. Akbar, and G. Firmansyah, "Sistem Pemantauan EKG 1-Lead Berbasis ESP32 dan Wireless Fidelity dengan Visualisasi Real Time Pada Smartphone," *IKRA-ITH Inform. J. Komput. Dan Inform.*, vol. 10, no. 2, pp. 29–49, Jul. 2026, doi: 10.37817/ikraith-informatika.v10i2.5457.
- [9] S. B. Bhaskoro, H. Supriyanto, B. B. Aji, and B. Pamungkas, "PERBANDINGAN PERFORMANSI LATENCY PROTOKOL KOMUNIKASI HTTP DAN MQTT PADA INTERNET OF THINGS," *JTT J. Teknol. Terap.*, vol. 8, no. 2, p. 82, Oct. 2022, doi: 10.31884/jtt.v8i2.309.
- [10] A. Fikhri, M. Ula, M. Sayuti, Taufiq, and Nurdin, "Perbandingan Kinerja Protokol MQTT dan HTTP Dalam Komunikasi Data Internet of Things," *J. Infomedia Tek. Inform. Multimed. Dan Jar.*, vol. 10, Jun. 2025, [Online]. Available: <https://ejournal.pnl.ac.id/infomedia/article/view/6733/4878>
- [11] R. Muammar, "PENERAPAN METODE EXPONENTIAL MOVING AVERAGE (EMA) SEBAGAI NOISE REDUCTION UNTUK PEMBACAAN SINYAL ANALOG PADA MIKROKONTROLER," *J. EEICT Electr. Electron. Instrum. Control Telecommun.*, vol. 5, no. 1, Apr. 2022, doi: 10.31602/eeict.v5i1.6859.
- [12] I. B. Setyawan, A. K. Huda, F. H. Nashrullah, I. D. Kurniawan, S. I. Frans, and J. Hendry, "Noise Removal in The IMU Sensor Using Exponential Moving Average with Parameter Selection in Remotely Operated Vehicle (ROV)," in *2022 8th International Conference on Science and Technology (ICST)*, Yogyakarta, Indonesia: IEEE, Sep. 2022, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICST56971.2022.10136259.
- [13] H. Hartono and K. Prawioredjo, "Home Automation Berbasis Gesture Control Menggunakan Motion Processing Unit," *Techné J. Ilm. Elektrotek.*, vol. 20, no. 2, pp. 125–142, Oct. 2021, doi: 10.31358/techné.v20i2.269.
- [14] A. R. Wilson, "Event Triggered Analog Data Acquisition Using the Exponential Moving Average," *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no. 6, pp. 2048–2055, Jun. 2014, doi: 10.1109/JSEN.2014.2307878.
- [15] H. Fibriasari, T. R. Soraya, B. Maulana, and H. D. Hutahaean, "Artificial Intelligence Technology as a Communication Aid for Persons with Disabilities in Understanding Foreign Language Learning," *TEM J.*, pp. 2082–2089, Aug. 2025, doi: 10.18421/TEM143-15.
- [16] I. R. Nugraha, W. H. N. Putra, and E. Setiawan, "A Comparative Study of HTTP and MQTT for IoT Applications in Hydroponics," *J. RESTI Rekayasa Sist. Dan Teknol. Inf.*, vol. 8, no. 1, pp. 119–126, Feb. 2024, doi: 10.29207/resti.v8i1.5561.

- [17] V. E. Nurfita Sari, A. Arifin, and F. Arrofiqi, "Design of Two-Way Indonesian Sign Language System based on Smart-Glove with Artificial Neural Network Classification Method," in *2024 International Conference on Computer Engineering, Network, and Intelligent Multimedia (CENIM)*, Surabaya, Indonesia: IEEE, Nov. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/CENIM64038.2024.10882818.
- [18] A. Filipowska et al., "Machine Learning-Based Gesture Recognition Glove: Design and Implementation," *Sensors*, vol. 24, no. 18, p. 6157, Sep. 2024, doi: 10.3390/s24186157.
- [19] H. Arrosida, A. Sudaryanto, and S. B. Setyawan, "Smart Glove for Deaf," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1845, no. 1, p. 012042, Mar. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1845/1/012042.