

Akuisisi dan Pemrosesan Sinyal Elektromiografi Untuk Deteksi Kelelahan Otot Bicep

¹Sulung Alivian Syah, ²Irmalia Suryani Faradisa, ³F. Yudi Limpraptono

^{1,2,3}Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Malang, Malang, Indonesia

¹sulungaliviansyah@gmail.com, ²irmalia_suryani_faradisa@lecture.itn.ac.id, ³

yudil@lecturer.itn.ac.id

Abstract—Skeletal muscle fatigue, particularly in the biceps, can trigger chronic musculoskeletal disorders if not detected early. This study aims to design a Surface Electromyography (sEMG) signal acquisition and processing system using an ESP32 microcontroller and an AD8221 instrumentation amplifier IC to monitor muscle conditions precisely and portably. The proposed method includes designing hardware to read and digitize muscle electrical signals, alongside integrating Python-based software to process data through segmentation, preprocessing, normalization, and time-domain feature extraction in real-time. The test results show that the system is capable of acquiring signals with high responsiveness and maintaining a stable baseline voltage at 0 Volts during the relaxation phase. The ESP32 microcontroller successfully recorded an average sampling rate of 993.4 Hz, fulfilling the Nyquist Theorem and thereby preventing signal aliasing. Furthermore, the feature extraction results proved capable of clearly identifying the transition from the relaxation phase to the initiation of muscle contraction, making this system viable as a foundation for a muscle fatigue detection system.

Keywords — *sEMG, ESP32, Muscle Fatigue, Feature Extraction.*

Abstrak—Kelelahan otot rangka, khususnya pada otot bicep, dapat memicu gangguan muskuloskeletal kronis jika tidak terdeteksi sejak dini. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem akuisisi dan pemrosesan sinyal *Surface Electromyography* (sEMG) menggunakan mikrokontroler ESP32 dan penguat instrumentasi IC AD8221 guna memantau kondisi otot secara presisi dan portabel. Metode yang diusulkan mencakup perancangan perangkat keras untuk membaca sinyal kelistrikan otot, serta integrasi perangkat lunak berbasis Python untuk memproses data melalui tahapan segmentasi, *preprocessing*, normalisasi, dan ekstraksi fitur domain waktu secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengakuisisi sinyal dengan responsivitas tinggi dan mempertahankan tegangan *baseline* yang stabil di titik 0 Volt selama fase relaksasi. Mikrokontroler ESP32 berhasil mencatat rata-rata *sampling rate* sebesar 993,4 Hz, yang telah memenuhi Teorema Nyquist sehingga sinyal terhindar dari *aliasing*. Selain itu, hasil ekstraksi fitur terbukti mampu mengidentifikasi transisi dari fase relaksasi menuju inisiasi kontraksi otot dengan sangat jelas, menjadikan sistem ini layak sebagai landasan sistem pendeteksi kelelahan otot.

Kata Kunci—*sEMG, ESP32, Kelelahan Otot, Ekstraksi Fitur.*

I. PENDAHULUAN

Sistem muskuloskeletal merupakan landasan utama fungsi gerak tubuh, namun rentan terhadap berbagai gangguan mekanis. Menurut WHO, terdapat lebih dari 150 jenis gangguan muskuloskeletal [1], yang secara global memengaruhi sekitar 1,71 miliar orang, dengan prevalensi di Indonesia mencapai 7,9% pada tahun 2018 [2]. Kondisi yang sering menjadi pemicu awal gangguan ini adalah kelelahan otot rangka yang diabaikan, terutama pada otot bicep yang sangat aktif berperan dalam gerakan fleksi siku dan supinasi [3] [4]. Secara fisiologis, kelelahan otot lokal menurunkan kapasitas kerja sebelum terjadi kegagalan fungsi total akibat hipoksia dari kontraksi statis berkepanjangan [5] [6]. Jika tidak terdeteksi sejak dini, tubuh akan melakukan kompensasi gerakan yang mengalihkan beban mekanis ke ligamen dan sendi, sehingga secara signifikan meningkatkan risiko cedera seperti tendonitis [7]. Oleh karena itu, strategi deteksi dini sangat krusial untuk mencegah penurunan produktivitas, khususnya pada usia produktif.

Pemantauan kondisi otot yang presisi dapat dilakukan melalui perekaman aktivitas bioelektrik menggunakan *Surface Electromyography* (sEMG), sebuah metode non-invasif yang menjadi standar umum evaluasi otot [8] [9]. Mengingat sinyal sEMG bersifat stokastik, data mentah yang diakuisisi memerlukan tahap ekstraksi fitur. Berbeda

dengan analisis domain frekuensi seperti *Fast Fourier Transform* (FFT), ekstraksi fitur domain waktu memiliki kompleksitas komputasi yang jauh lebih rendah sehingga sangat efisien untuk diimplementasikan pada sistem tertanam [10]. Penelitian ini menggunakan lima fitur domain waktu utama yaitu *Root Mean Square* (RMS) yang berkorelasi langsung dengan tingkat pengerahan unit motorik [11], *Slope RMS* sebagai indikator kuat progresivitas kelelahan, *Mean Absolute Value* (MAV), *Variance* (VAR), dan *Waveform Length* (WL) [12]. Kombinasi kelima fitur ini memberikan representasi komprehensif dari pola aktivasi otot, sehingga berperan penting dalam mengoptimalkan akurasi klasifikasi algoritma *machine learning*.

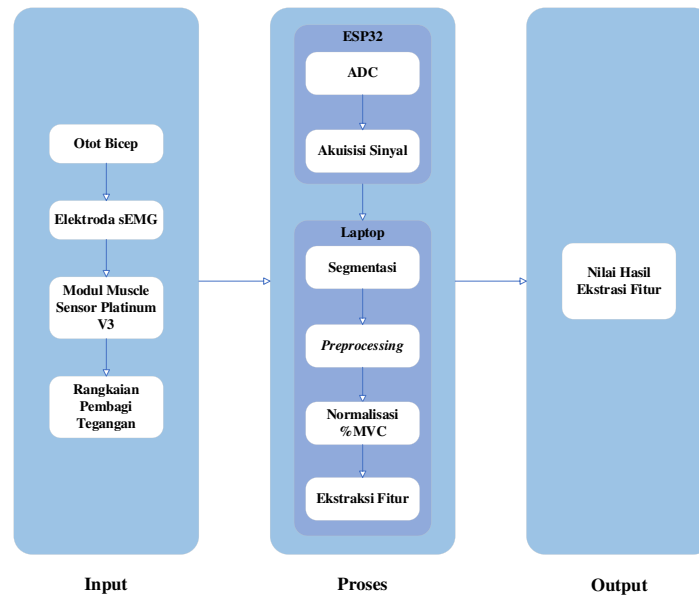
Meskipun sEMG merupakan instrumen klinis yang andal, implementasinya di masyarakat masih terkendala oleh dimensi perangkat standar medis yang besar, berbiaya tinggi, serta tingginya ketergantungan pada tenaga ahli untuk menginterpretasikan batas kelelahan otot [13]. Oleh karena itu, diperlukan inovasi sistem yang mampu menjembatani akuisisi data fisik dengan algoritma *machine learning* sebagai unit pengambil keputusan cerdas [14]. Merespons kesenjangan tersebut, kebaruan dari penelitian ini terletak pada pengembangan sistem pemantauan kelelahan otot yang terjangkau, portabel, dan bekerja secara *real-time*. Berbeda dengan pendekatan konvensional, inovasi ini mengintegrasikan perangkat keras berbiaya rendah, yaitu sensor penguat IC AD8221 dan mikrokontroler ESP32 dengan program komputasi berbasis Python. Melalui optimalisasi lima fitur domain waktu yang ringan secara komputasi, sistem ini mampu secara otomatis mengakuisisi, memproses, dan memprediksi fase kelelahan otot tanpa menuntut pemahaman medis dari penggunaannya. Terobosan ini diharapkan menjadi solusi preventif yang praktis dalam meminimalkan risiko cedera muskuloskeletal secara mandiri.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengusulkan perancangan sistem akuisisi dan pemrosesan sinyal menggunakan modul sensor sEMG untuk mendeteksi kelelahan otot bicep. Sistem ini dirancang untuk mengakuisisi data bioelektrik awal dari otot, yang selanjutnya diproses secara komputasi hingga menghasilkan keluaran berupa nilai ekstraksi fitur.

A. Gambaran Umum Sistem

Arsitektur sistem akuisisi dan pemrosesan sinyal sEMG ini terdiri dari dua bagian utama, yaitu perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*). Perangkat keras meliputi elektroda sEMG, modul Muscle Sensor Platinum V3 sebagai pengkondisi sinyal analog, dan mikrokontroler ESP32 untuk akuisisi serta transmisi data ke komputer melalui komunikasi serial USB. Pada sisi perangkat lunak, aliran data tersebut diproses melalui tahapan komputasi yang mencakup segmentasi, *preprocessing*, normalisasi, dan ekstraksi fitur. Hasil akhir pemrosesan kemudian disimpan dalam format CSV. Blok diagram arsitektur sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.

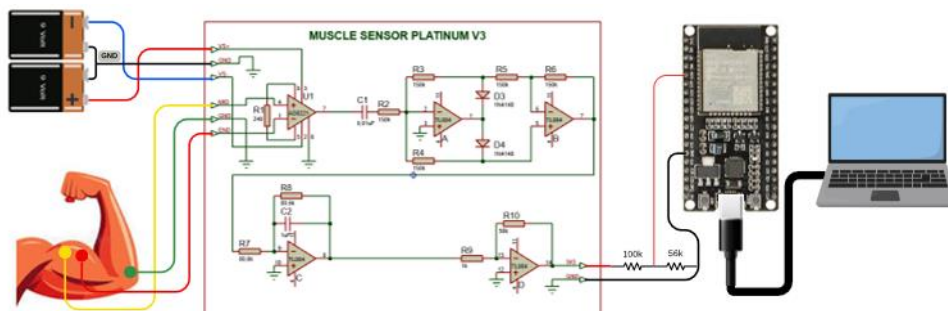


Gambar 1 Blok Diagram Sistem

Berdasarkan Gambar 1, arsitektur sistem secara garis besar dibagi menjadi tiga blok utama, yaitu *input*, *proses*, dan *output*. Blok masukan diawali dari otot bicep sebagai sumber bioelektrik yang ditangkap oleh elektroda sEMG, lalu dikondisikan serta diperkuat oleh modul Muscle Sensor Platinum V3, dan disesuaikan level tegangannya melalui rangkaian pembagi tegangan. Selanjutnya, sinyal memasuki blok pemrosesan yang terbagi ke dalam dua tahap perangkat keras. Pertama, mikrokontroler ESP32 bertugas mengakuisisi sinyal melalui konversi *Analog-to-Digital Converter* (ADC). Kedua, data digital ditransmisikan ke komputer untuk diolah menggunakan bahasa pemrograman Python melalui empat tahapan komputasi sekuensial yaitu segmentasi, *preprocessing*, normalisasi %MVC, dan ekstraksi fitur. Seluruh alur tersebut berujung pada blok keluaran yang menghasilkan nilai akhir ekstraksi fitur.

B. Perancangan Hardware

1) Rangkaian Sistem



Gambar 2 Rangkaian Sistem

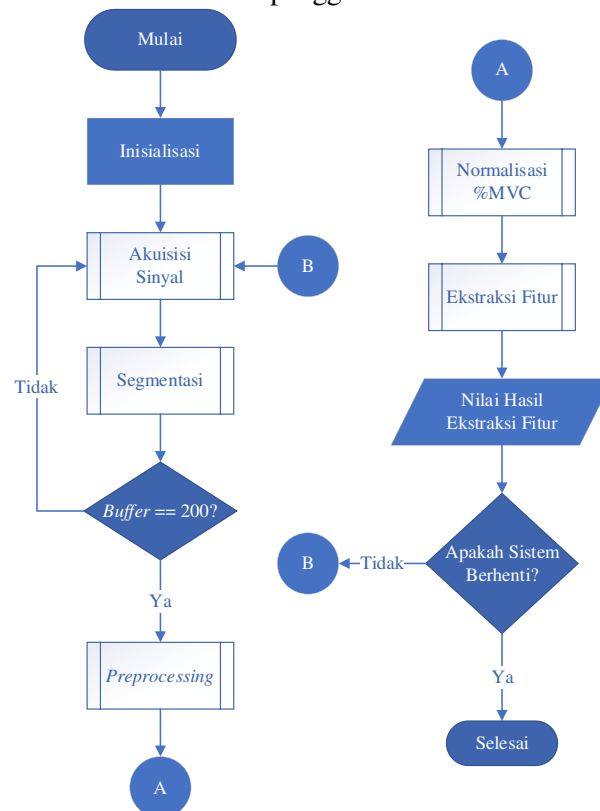
Berdasarkan Gambar 2, skema perangkat keras menggunakan catu daya ganda dari dua baterai 9 V yang diserikan untuk menyuplai tegangan +9 V (pin VS+), -9 V (pin VS-), dan *ground* ke modul Muscle Sensor Platinum V3. Perekaman sinyal dari otot bicep dilakukan melalui tiga elektroda yang terhubung pada pin MID, END, dan GND modul. Selanjutnya, keluaran sinyal analog dari pin SIG dilewatkan pada rangkaian pembagi tegangan (resistor 100 k Ω dan 56 k Ω) guna menyesuaikan level tegangan, sebelum akhirnya diakuisisi oleh ESP32 melalui pin input ADC

(GPIO 34). Data digital tersebut kemudian ditransmisikan ke komputer melalui komunikasi serial USB dengan *baud rate* 115200 bps.

C. Perancangan Software

1) Alur Keseluruhan Sistem

Berdasarkan Gambar 3, alur komputasi sistem diawali dengan tahap inialisasi yang kemudian dilanjutkan dengan proses akuisisi sinyal dari mikrokontroler ESP32. Sinyal yang telah diakuisisi selanjutnya masuk ke tahap segmentasi untuk diakumulasikan ke dalam *buffer*. Sistem akan terus mengulang proses akuisisi hingga *buffer* terisi penuh sebanyak 200 sampel data. Setelah *window data* tersebut lengkap, tahap *preprocessing* dilakukan guna menghilangkan *DC offset* serta sisa-sisa *noise*. Data hasil *preprocessing* kemudian diteruskan secara sekuensial ke tahap normalisasi %MVC dan ekstraksi fitur, yang menghasilkan keluaran akhir berupa vektor fitur (RMS, MAV, VAR, WL, dan *Slope*). Pada akhir siklus, sistem mengevaluasi instruksi penghentian program. Apabila tidak ada instruksi berhenti, alur komputasi akan terus berulang (*looping*) ke tahap akuisisi sinyal untuk mengambil data berikutnya hingga sistem dihentikan secara manual oleh pengguna.



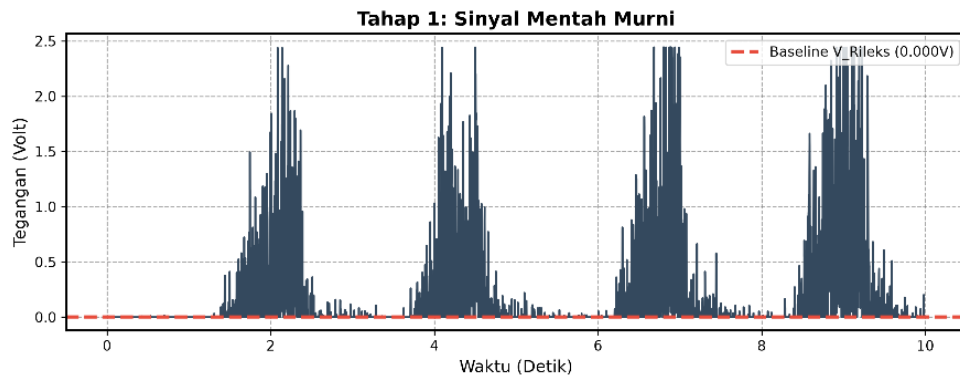
Gambar 3 Flowchart keseluruhan Sistem

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi sistem telah dilakukan berdasarkan tahapan perancangan yang diuraikan pada bagian metode penelitian. Hasil implementasi dan pengujian sistem akuisisi beserta pemrosesan sinyal sEMG untuk mendeteksi kelelahan otot bicep diuraikan sebagai berikut.

A. Akuisisi Sinyal EMG

Pengujian akuisisi sinyal sEMG bertujuan mengevaluasi kinerja mikrokontroler ESP32 dalam mendigitalisasi sinyal analog secara *real-time*. Keberhasilan tahap ini dinilai berdasarkan dua parameter utama yaitu integritas bentuk gelombang kelistrikan otot dan keandalan *sampling rate*.



Gambar 4 Hasil Akuisisi Sinyal

Evaluasi parameter pertama disajikan melalui visualisasi sinyal mentah pada Gambar 4. Grafik menunjukkan responsivitas sistem yang tinggi terhadap perubahan aktivitas fisik subjek. Saat otot bisep relaksasi, tegangan tetap stabil pada *baseline* 0 Volt. Sebaliknya, amplitudo sinyal melonjak secara signifikan saat terjadi kontraksi aktif. Pola yang kontras ini memvalidasi kepresisian sistem dalam merepresentasikan aktivitas kelistrikan unit motorik otot secara utuh. Keberhasilan menjaga integritas gelombang ini dilanjutkan dengan pengujian *sampling rate* sistem.

Tabel 1 Hasil Sampling Rate

Waktu Perekaman	Jumlah Sampel yang Diterima	Frekuensi Cuplik (Hz)
Detik ke-1	1052	1052
Detik ke-2	968	968
Detik ke-3	990	990
Detik ke-4	984	984
Detik ke-5	973	973
Rata-rata	993,4	993,4 Hz

Berdasarkan Tabel 1, kinerja transmisi data secara *real-time* terbukti konsisten selama durasi lima detik perekaman. Meskipun terdapat fluktuasi normal pada rentang 968–1052 Hz akibat latensi transmisi serial, sistem mampu mempertahankan rata-rata frekuensi keseluruhan sebesar 993,4 Hz. Frekuensi akuisisi yang secara konsisten beroperasi jauh di atas batas maksimal karakteristik frekuensi sEMG ini membuktikan bahwa jalur komunikasi serial terhindar dari kendala penumpukan data. Selain itu, frekuensi *sampling* tersebut telah memenuhi kriteria Teorema Nyquist, sehingga keutuhan sinyal sEMG terjamin dan terhindar dari efek *aliasing*.

B. Hasil Ekstraksi Fitur

Waktu (Detik)	RMS (Volt)	RMS (%MVC)	MAV	VAR	WL	Slope
0.2	0.01070854	0.04461892	0.00157076	0.00011242	0.21435892	0.22310194
0.4	0.00041498	0.00172911	0.00003604	0.00000017	0.01128193	-0.21445981
0.6	0.00051298	0.00213741	0.00003604	0.00000026	0.01450503	0.00204150
0.8	0.00112002	0.00466675	0.00009712	0.00000123	0.03062312	0.01264670
1.0	0.00098402	0.00410008	0.00008123	0.00000096	0.03223401	-0.00283335
1.2	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	-0.02050040
1.4	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
1.6	0.01671923	0.06966347	0.00512837	0.00024512	0.51238491	0.34831735
1.8	0.02561937	0.10674737	0.00847291	0.00057102	0.89237461	0.18541950
2.0	0.03847291	0.16030379	0.01257294	0.00128472	123.849.102	0.26778210
2.2	0.04561298	0.19005408	0.01472940	0.00185912	154.920.193	0.14875145
2.4	0.05129482	0.21372842	0.01829471	0.00247294	192.049.102	0.11837434
2.6	0.06284721	0.26186338	0.02102947	0.00319482	239.485.721	0.24067480
2.8	0.07129472	0.29706133	0.02394857	0.00412847	284.920.194	0.17597950
3.0	0.08294712	0.34561300	0.02671947	0.00529482	329.485.721	0.24275835
3.2	0.09120193	0.38000804	0.02847291	0.00628472	372.948.572	0.17195040
3.4	0.09847291	0.41030379	0.03129472	0.00712947	410.294.712	0.15147875
3.6	0.10561937	0.44008071	0.03472940	0.00829471	452.948.572	0.14888460
3.8	0.11284721	0.47019671	0.03847291	0.00912019	482.947.120	0.15058000
4.0	0.12049102	0.50204592	0.04129472	0.01029471	520.193.712	0.15924605

Gambar 5 Hasil Ekstraksi Fitur

Gambar 6 menyajikan data hasil ekstraksi fitur dalam format CSV. Nilai fitur yang terukur rendah pada detik pertama merepresentasikan fase relaksasi otot. Sebaliknya, lonjakan nilai fitur yang signifikan pada detik ke-4 mengindikasikan terjadinya inisiasi kontraksi otot oleh subjek uji.

IV. KESIMPULAN

Sistem akuisisi dan pemrosesan sinyal sEMG berbasis ESP32 berhasil diimplementasikan secara *real-time* dengan responsivitas tinggi, dibuktikan oleh kestabilan tegangan pada *baseline* 0 Volt saat otot berelaksasi. Transmisi data serial berjalan sangat konsisten dengan rata-rata *sampling rate* mencapai 993,4 Hz, yang secara efektif memenuhi kriteria Teorema Nyquist sehingga keutuhan sinyal terjamin dan terhindar dari *aliasing*. Pada tahap akhir, proses komputasi ekstraksi fitur domain waktu menggunakan Python sukses memvalidasi pola aktivitas kelistrikan otot, di mana fase relaksasi terukur pada detik pertama dan transisi inisiasi kontraksi terlihat secara signifikan melalui lonjakan nilai pada detik keempat.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. H. Organization, "Musculoskeletal health." [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions>
- [2] K. K. RI, "Riset Kesehatan Dasar (Riskesdas) 2018," Jakarta, 2018.
- [3] Halodoc, "Otot Bisep & Trisep: Fungsi, Latihan, Cara Kerja!," Halodoc. [Online]. Available: <https://www.halodoc.com/artikel/otot-bisep-dan-trisep-fungsi-latihan-cara-kerja>
- [4] Halodoc, "Mengenal Otot Bisep dan Trisep agar Lengan Kekar," Halodoc. [Online]. Available: <https://www.halodoc.com/artikel/mengenal-otot-bisep-dan-trisep-agar-lengan-kekar>
- [5] C. J. De Luca, "Myoelectrical Manifestations of Localized Muscular Fatigue in Humans.," in *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 11, no. 4, 1984, pp. 251–279.
- [6] Abdurachman, *Indahnya Seirama Kinesiologi dalam Anatomi*. Malang: Cita Intrans Selaras, 2016.
- [7] Kementerian Kesehatan RI, "Kelelahan Kerja dan Cara Mengatasinya," Jan. 2023. [Online]. Available: https://keslan.kemkes.go.id/view_artikel/2027/kelelahan-kerja-dan-cara-mengatasinya
- [8] C. J. De Luca, "SURFACE ELECTROMYOGRAPHY: DETECTION AND RECORDING," 2002.
- [9] A. Corrado Cescon and M. Beretta-Piccoli, "PhD IN BIOMEDICAL SCIENCES DEPARTMENT OF BRAIN AND BEHAVIORAL SCIENCES UNIT OF NEUROPHYSIOLOGY EVALUATION OF NEUROMUSCULAR FATIGUE THROUGH INNOVATIVE SURFACE EMG PARAMETERS IN HUMANS."

-
- [10] D. Pamungkas, S. R. Kurniawan, and B. F. Simamora, "Perbandingan Antara Domain Waktu dan Frekuensi untuk Pengenalan Sinyal EMG," *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. 17, no. 1, pp. 36–41, Mar. 2021, doi: 10.17529/jre.v17i1.16844.
 - [11] A. Z. Daffa, E. R. Widasari, and D. Syauqy, "Analisis Perbandingan Metode Ekstraksi Fitur Mean Absolute Value, Root Mean Square, dan Variance untuk Deteksi Kelelahan Otot Biceps Brachii," 2023. [Online]. Available: <http://j-ptiik.ub.ac.id>
 - [12] H. A. Javaid, N. Rashid, M. I. Tiwana, and M. W. Anwar, "Comparative analysis of EMG signal features in time-domain and frequency-domain using MYO gesture control," in *ACM International Conference Proceeding Series*, Association for Computing Machinery, Feb. 2018, pp. 157–162. doi: 10.1145/3191477.3191495.
 - [13] C. Liu, J. Li, S. Zhang, H. Yang, and K. Guo, "Study on Flexible sEMG Acquisition System and Its Application in Muscle Strength Evaluation and Hand Rehabilitation," *Micromachines (Basel)*, vol. 13, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/mi13122047.
 - [14] U. Brawijaya, T. J. Dasamuka, and E. R. Widasari, "Fakultas Ilmu Komputer Implementasi Wearable Device untuk Sistem Pendeteksi Kelelahan Otot Biceps Menggunakan Metode Support Vector Machine," 2024. [Online]. Available: <http://j-ptiik.ub.ac.id>