

Pengembangan Prototipe Nirkabel EEG Satu Kanal Menggunakan ESP32

Irsan Dviktur Panjaitan
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia

irsandv@student.telkomuniversity.ac.id

Hilman Fauzi
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia

hilmanfauzitsp@telkomuniversity.ac.id

Fathur Rahman
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia

rahfathur@telkomuniversity.ac.id

Abstrak—Elektroensefalografi (EEG) merupakan teknologi non-invasif untuk merekam aktivitas listrik otak yang banyak digunakan dalam riset neurosains dan aplikasi klinis. Namun, perangkat EEG komersial umumnya berbiaya tinggi dan berukuran besar sehingga sulit diakses untuk aplikasi pendidikan. Penelitian ini mengembangkan prototipe nirkabel EEG satu kanal berbasis ESP32 dengan komunikasi Bluetooth Low Energy untuk monitoring fokus kognitif. Sistem menggunakan modul akuisisi BioAmp EXG Pill (gain 1000×, bandwidth 0,5-50 Hz), mikrokontroler ESP32 untuk pemrosesan FFT dan transmisi BLE, serta aplikasi mobile untuk visualisasi real-time. Elektroda ditempatkan pada posisi frontal (Fp1-Fp2) dengan Focus Index dihitung dari rasio Beta/(Alpha+Theta). Pengujian dilakukan pada lima mahasiswa laki-laki usia 21-22 tahun dengan dua kondisi: melihat objek acak dan membaca buku, masing-masing selama 60 detik. Hasil menunjukkan 100% subjek mengalami peningkatan Focus Index saat membaca. Rerata Focus Index meningkat 116,1% dari 7,181 menjadi 15,520, sedangkan nilai median meningkat 136,5% dari 5,918 menjadi 13,999. Prototipe terbukti efektif membedakan kondisi kognitif dan berpotensi sebagai alat pemantauan fokus belajar untuk mendukung self-regulated learning.

Kata kunci— *Elektroensefalogram, ESP32, Bluetooth Low Energy, Focus Index, Pemantauan Kognitif*

I. PENDAHULUAN

Perekaman aktivitas listrik otak melalui elektroensefalografi (EEG) telah menjadi modalitas penting dalam diagnosis dan penelitian neurosains. Metode non-invasif ini mendeteksi potensial postsinaptik dari neuron kortikal yang tersinkronisasi, menghasilkan sinyal dengan amplitudo mikrovolt yang dapat dianalisis untuk mengidentifikasi pola aktivitas otak [1]. Berbagai kondisi kognitif menunjukkan karakteristik gelombang otak yang berbeda pada pita frekuensi delta, theta, alpha, beta, dan gamma [2].

Evolusi teknologi embedded systems telah membuka peluang baru untuk miniaturisasi perangkat biomedis. Mikrokontroler ESP32 menawarkan kapabilitas pemrosesan sinyal yang memadai dengan konsumsi daya rendah—karakteristik ideal untuk aplikasi wearable [3]. Chip dual-core dengan clock speed hingga 240 MHz ini mampu menjalankan algoritma Fast Fourier Transform (FFT) secara real-time untuk analisis spektral gelombang otak, sementara modul Bluetooth Low Energy (BLE) terintegrasi memungkinkan transmisi data nirkabel dengan overhead daya minimal [4].

Dalam domain pendidikan tinggi, pemahaman objektif terhadap dinamika kognitif mahasiswa dapat memberikan insight berharga untuk optimalisasi strategi pembelajaran. Aktivitas theta di region prefrontal anterior telah terbukti menjadi biomarker yang reliable untuk fungsi memori dan eksekutif [5]. Pengukuran kuantitatif tingkat fokus melalui analisis rasio daya gelombang beta terhadap alpha dan theta memberikan indikator objektif yang dapat digunakan mahasiswa untuk self-assessment.

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengevaluasi prototipe nirkabel EEG satu kanal menggunakan ESP32, menganalisis performa sistem, dan mengukur kemampuan sistem dalam membedakan kondisi kognitif berbeda. Sistem dirancang dengan pendekatan single-channel pada posisi frontal untuk menyeimbangkan antara informasi yang diperoleh dengan kemudahan penggunaan.

II. KAJIAN TEORI

Menyajikan dan menjelaskan teori-teori yang berkaitan dengan variabel-variabel penelitian. Poin subjudul ditulis dalam abjad.

A. Sistem Saraf dan Aktivitas Listrik Otak

Otak manusia terdiri dari miliaran neuron yang menghasilkan aktivitas listrik melalui depolarisasi dan repolarisasi membran sel. EEG merekam aktivitas listrik spontan otak melalui elektroda yang ditempatkan pada kulit kepala, dengan sinyal merepresentasikan penjumlahan temporal dan spasial dari potensial pascasinaptik [6]. Amplitudo sinyal EEG berkisar antara 10–100 μV dengan bandwidth frekuensi dari 0,5 Hz hingga 70 Hz.

Gelombang otak diklasifikasikan menjadi lima kategori: delta (0,5–3 Hz), theta (4–7 Hz), alpha (8–13 Hz), beta (14–30 Hz), dan gamma (30–50 Hz) [2]. Aktivitas Beta meningkat signifikan saat subjek terlibat dalam tugas kognitif yang membutuhkan atensi, sementara Alpha dan Theta cenderung meningkat pada kondisi relaksasi..

B. Mikrokontroler ESP32 dan BLE

ESP32-WROOM-32 mengintegrasikan dual-core processor Xtensa LX6 240 MHz, ADC 12-bit, dan modul BLE 4.2 dalam satu chip. Platform ini telah terbukti mampu melakukan sampling dengan rate 500 samples per detik untuk aplikasi photoplethysmography [7]. Arsitektur dual-core memfasilitasi task scheduling berbasis FreeRTOS untuk memastikan operasi time-critical seperti sampling ADC tidak terinterupsi oleh proses komunikasi wireless [8].

BLE merupakan protokol komunikasi wireless yang dirancang khusus untuk aplikasi low-power dengan konsumsi daya minimal. Implementasi BLE pada ESP32 untuk sistem SSVEP brain-computer interface mencapai decoding accuracy 95.56% dengan information transfer rate 102 bits/min [9].

C. Focus Index

Focus Index merupakan metrik kuantitatif berbasis rasio daya pita EEG yang dirancang untuk mengukur tingkat konsentrasi kognitif, dengan formula Focus Index = $P\beta / (P\alpha + P\theta)$ [10]. Rasionalisasi neurofisiologis dari formula ini didasarkan pada observasi bahwa aktivitas Beta dikaitkan dengan atensi visual dan tugas memori jangka pendek, sementara daya Alpha dan Theta meningkat pada kondisi relaksasi [11].

III. METODE

A. Desain Sistem

Sistem terdiri dari empat subsistem utama yang terintegrasi: (1) akuisisi sinyal melalui elektroda, (2) kondisioning sinyal analog menggunakan BioAmp EXG Pill, (3) pemrosesan digital dengan ESP32, dan (4) antarmuka pengguna melalui aplikasi mobile. Elektroda recording (Fp1) dan reference (Fp2) ditempatkan di area frontal, dengan ground (A1) di cuping telinga sesuai standar International 10-20 System.

B. Implementasi Hardware

BioAmp EXG DIY menggunakan IC TL074IN dengan dua stage: Instrumentation Amplifier (gain 11x) dan active bandpass filter (gain 91x), menghasilkan total gain 1000x. ESP32 dikonfigurasi dengan resolusi ADC 12-bit dan sampling rate 256 Hz menggunakan timer hardware interrupt. Sistem daya menggunakan baterai Li-Po 3,7V 2000 mAh yang dikonversi menjadi ±5V untuk BioAmp dan 3,3V untuk ESP32.

C. Pemrosesan Sinyal

Pipeline pemrosesan sinyal meliputi: (1) konversi ADC ke mikrovolt, (2) DC offset removal, (3) Hamming windowing, (4) FFT 256-point, (5) ekstraksi band power, (6) EMA smoothing ($\alpha=0,25$), dan (7) perhitungan Focus Index. Formulasi matematis Focus Index:

$$FI = P\beta / (P\alpha + P\theta)$$

dimana $P\beta$, $P\alpha$, dan $P\theta$ masing-masing merepresentasikan daya absolut dari pita Beta, Alpha, dan Theta yang telah di-smooth.

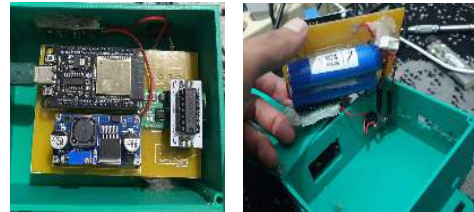
D. Protokol Pengujian

Pengujian dilakukan pada lima mahasiswa laki-laki berusia 21-22 tahun dalam kondisi sehat tanpa riwayat gangguan neurologis. Setiap subjek mengalami dua kondisi: (1) melihat objek acak selama 60 detik, dan (2) membaca buku selama 60 detik, dengan jeda istirahat 15-30 detik. Desain within-subject digunakan untuk analisis perubahan intra-individual. Area frontal dibersihkan dengan alkohol swab, dan impedansi elektroda dijaga <5 kΩ.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Hardware

Pengujian amplifier BioAmp menunjukkan gain terukur $1001 \times$ dengan CMRR >80 dB. Durasi operasi baterai tercatat 148 menit (2 jam 28 menit) dengan konsumsi rata-rata 200 mA. ADC ESP32 beroperasi sesuai spesifikasi dengan resolusi 12-bit dalam range 0-3,3V, memberikan LSB = 0,806 mV, seperti pada Gambar 4.1.



GAMBAR 1

Implementasi Hardware (a) Layout Bagian Atas, (b) Layout Bagian Bawah

B. Hasil Pengujian pada Subjek

Untuk memahami pola individual, data Focus Index setiap subjek perlu dievaluasi secara terpisah. Setiap individu memiliki baseline aktivitas otak yang berbeda akibat variasi *neuroanatomis*, *state mental*, dan faktor fisiologis lainnya. Tabel 4.1 merangkum nilai rata-rata (*average*) dan median Focus Index untuk kelima subjek pada kedua kondisi yang diuji.

TABEL 1

Focus Indeks Rata-Rata dan Median per Subjek

Subjek	Kondisi	Avg. FI	Med. FI	Perubahan	Pola
S1	Objek Acak	0.342	0.339	-	-
	Baca Buku	13.250	13.250	+3753.2%	Naik
S2	Objek Acak	17.431	18.754	-	-
	Baca Buku	24.159	23.000	+38.6%	Naik
S3	Objek Acak	12.162	12.527	-	-
	Baca Buku	14.591	13.999	+19.9%	Naik
S4	Objek Acak	5.042	4.789	-	-
	Baca Buku	18.417	19.678	+265.3%	Naik
S5	Objek Acak	5.828	5.918	-	-
	Baca Buku	8.255	8.021	+41.6%	Naik

Kelima subjek (100%) menunjukkan peningkatan Focus Index saat membaca, mengonfirmasi validitas formula Beta/(Alpha+Theta) untuk deteksi perubahan cognitive load. Secara agregat, rerata Focus Index meningkat 116,1% dari 7,181 menjadi 15,520, dengan median meningkat 136,5% dari 5,918 menjadi 13,999.

C. Analisis dan Pembahasan

Konsistensi 100% melampaui ekspektasi untuk tahap proof-of-concept dan memberikan validasi awal yang kuat terhadap metodologi yang digunakan. Penelitian dengan single-channel frontal EEG untuk attention monitoring typically melaporkan detection rate 70-90%, sehingga hasil 100% menunjukkan performa yang excellent.

Variabilitas magnitude perubahan (19,9% hingga 3753,2%) mencerminkan perbedaan baseline cognitive state

antar subjek. Subjek dengan baseline sangat rendah (S1: 0,342) mampu mencapai peningkatan hampir $39\times$ lipat, sementara subjek dengan baseline tinggi (S2: 17,431) tetap menunjukkan peningkatan signifikan.

Penurunan coefficient of variation dari 91,6% (kondisi objek acak) menjadi 49,2% (kondisi membaca) menunjukkan task-induced convergence, di mana aktivitas kognitif fokus membawa subjek ke range yang lebih seragam meskipun baseline mereka sangat berbeda.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan prototipe nirkabel EEG satu kanal berbasis ESP32 yang efektif membedakan kondisi kognitif dengan detection rate 100%. Sistem mengintegrasikan BioAmp EXG Pill (gain $1000\times$, bandwidth 0,5-50 Hz), ESP32 untuk pemrosesan FFT real-time, dan transmisi BLE ke aplikasi mobile. Formula Focus Index Beta/(Alpha+Theta) terbukti sensitif mendeteksi perubahan cognitive load dengan peningkatan agregat 116,1% dari kondisi relaks ke fokus.

Validasi dengan sampel lebih besar ($n>30$), protokol randomized counterbalanced design, dan pengukuran parameter kualitas sinyal (SNR, THD) secara kuantitatif diperlukan untuk penelitian selanjutnya. Pengembangan sistem multi-kanal dan implementasi algoritma preprocessing yang lebih sophisticated dapat meningkatkan performa sistem.

REFERENSI

- [1] H. Zhang *et al.*, "The applied principles of EEG analysis methods in neuroscience and clinical neurology," Dec. 01, 2023, *BioMed Central Ltd.* doi: 10.1186/s40779-023-00502-7.
- [2] G. Ippolito *et al.*, "The Role of Alpha Oscillations among the Main Neuropsychiatric Disorders in the Adult and Developing Human Brain: Evidence from the Last 10 Years of Research," Dec. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/biomedicines10123189.
- [3] K. Ueno *et al.*, "Frontal midline theta rhythm and gamma activity measured by sheet-type wearable EEG device," *Front Hum Neurosci*, vol. 17, 2023, doi: 10.3389/fnhum.2023.1145282.
- [4] Y. Zhang *et al.*, "Shared oscillatory mechanisms of alpha-band activity in prefrontal regions in eyes open and closed state using a portable EEG acquisition device," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-78173-0.
- [5] N. Hamed, J. S. Garcia-Salinas, B. M. Berry, G. A. Worrell, and M. T. Kucewicz, "Anterior prefrontal EEG theta activities indicate memory and executive functions in patients with epilepsy," *Epilepsia*, vol. 66, no. 4, pp. 1274–1287, Apr. 2025, doi: 10.1111/epi.18246.
- [6] C. S. Nayak, ; Arayampambil, and C. A. Affiliations, "EEG Normal Waveforms Continuing Education Activity." [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK539805/?report=printable>
- [7] J. E. Miranda-Vega *et al.*, "ESP32-Powered PPG Signal Acquisition: Open-Source Hardware and Software for Research and Education," *Hardware*, vol. 3, no. 4, p. 15, Nov. 2025, doi: 10.3390/hardware3040015.
- [8] M. Rodolfo Pretel, V. Vidal, D. Kienigiel, C. Forcato, and R. Ramele, "A low-cost and open-hardware portable 3-electrode sleep monitoring device," *HardwareX*, vol. 19, p. e00553, 2024, doi: 10.17605/OSF.IO/RJCHP.
- [9] J. Teversham *et al.*, "Development of an Ultra Low-Cost SSVEP-based BCI Device for Real-Time On-Device Decoding," in *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 208–213. doi: 10.1109/EMBC48229.2022.9871064.
- [10] I. Marcantoni *et al.*, "Ratio Indexes Based on Spectral Electroencephalographic Brainwaves for Assessment of Mental Involvement: A Systematic Review," Jul. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/s23135968.
- [11] B. Raufi and L. Longo, "An Evaluation of the EEG Alpha-to-Theta and Theta-to-Alpha Band Ratios as Indexes of Mental Workload," *Front Neuroinform*, vol. 16, May 2022, doi: 10.3389/fninf.2022.861967.