

Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 15 Nomor 1 Tahun 2026, hal 1-13

RANCANG BANGUN ALAT DETEKSI DISLEKSIA BERBASIS ELEKTROENSEFALOGRAFI DAN MIKROKONTROLER

¹⁾Dharmayuda Febrianto, ²⁾Muhimmatul Khoiro

¹⁾ Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: dharmayudafebrianto.21020@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: muhimmatulkhoiro@unesa.ac.id

Abstrak

Disleksia adalah gangguan neurobiologis yang memengaruhi kemampuan membaca, menulis, dan mengeja, yang berdampak pada sekitar 19,8% siswa sekolah dasar di Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan alat deteksi disleksia berbasis Elektroensefalografi (EEG) yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32. Sistem ini dirancang untuk memproses sinyal EEG dari subjek normal dan disleksia untuk merekam data aktivitas listrik otak selama pengujian. Dalam penelitian ini, sistem deteksi terdiri dari elektroda EEG, penguat sinyal AD8232, dan mikrokontroler ESP32 yang mengirimkan data ke platform ThingSpeak untuk analisis lebih lanjut. Alat ini dikalibrasi menggunakan input Audio Function Generator (AFG) dan output osiloskop untuk memastikan kemampuan membaca sinyal frekuensi gelombang neuron (4 Hz, 20 Hz, 40 Hz). Proses pengambilan data dilakukan dengan menempatkan elektroda pada titik-titik tertentu di kepala subjek, diikuti dengan pencatatan aktivitas listrik otak saat subjek mengerjakan tugas tertentu. Data yang diperoleh kemudian diproses melalui filter bandpass untuk menyaring sinyal yang tidak relevan, sebelum diubah menjadi amplitudo frekuensi gelombang otak (theta, beta, gamma) yang digunakan untuk analisis. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam amplitudo gelombang theta dan gamma antara subjek disleksia dan subjek normal, yang menandakan adanya gangguan dalam pemrosesan informasi kognitif pada subjek disleksia. Dengan demikian, sistem ini menawarkan solusi yang lebih efisien, portabel, dan terjangkau untuk deteksi dini disleksia. Alat ini berpotensi untuk memperluas aksesibilitas diagnosis dan intervensi yang lebih cepat dan tepat bagi anak-anak dengan disleksia, serta dapat menjadi dasar untuk pengembangan lebih lanjut dalam bidang ini.

Kata Kunci: Disleksia; EEG; Mikrokontroler; Gelombang Neuron; Bandpass Filter

Abstract

Dyslexia is a neurobiological disorder that affects the ability to read, write, and spell, impacting approximately 19.8% of primary school students in Indonesia. This study aims to develop a dyslexia detection tool based on Electroencephalography (EEG), integrated with the ESP32 microcontroller. The system is designed to process EEG signals from both normal and dyslexic subjects to record brain electrical activity during testing. In this study, the detection system consists of EEG electrodes, the AD8232 signal amplifier, and the ESP32 microcontroller, which sends data to the ThingSpeak platform for further analysis. The tool was calibrated using an Audio Function Generator (AFG) input and oscilloscope output to ensure the ability to read neural wave frequency signals (4 Hz, 20 Hz, 40 Hz). Data acquisition was performed by positioning electrodes at specific points on the subject's head, followed by recording brain activity as the subject performed a task. The obtained data was then processed through bandpass filtering to remove irrelevant signals, before being converted into amplitude frequency data for theta, beta, and gamma waves used for analysis. The results show a significant difference in the amplitude of theta and gamma waves between dyslexic and normal subjects, indicating disruptions in cognitive information processing in dyslexic subjects. Therefore, this system offers a more efficient, portable, and affordable solution for early dyslexia detection. The tool has the potential to expand accessibility to diagnosis and enable faster, more accurate interventions for children with dyslexia, and can serve as a foundation for further development in this field.

Keywords: Dyslexia; EEG; Mikrokontroler; Gelombang Neuron; Bandpass Filter

I. PENDAHULUAN

Disleksia adalah gangguan neurobiologis yang memengaruhi kemampuan belajar, terutama dalam membaca, menulis, dan mengeja, yang berdampak pada 5-17% populasi global (Alkhurayyif & Sait, 2023). Di Surabaya, sekitar 19,8% siswa SD mengalami disleksia (Kirana, 2022), yang menunjukkan perlunya perhatian lebih pada diagnosis dan penanganannya. Gangguan ini tidak terkait dengan kecerdasan atau motivasi, namun dapat menyebabkan dampak negatif seperti prestasi akademik rendah, gangguan emosional, dan masalah sosial di masa depan. Anak-anak dengan disleksia cenderung mengalami kecemasan dan depresi yang lebih tinggi, yang memperburuk tantangan akademik dan sosial mereka (Zuppardo dkk., 2023). Disleksia, yang tidak terkait dengan disabilitas intelektual atau sistem pengajaran yang buruk, melibatkan defisit fonologis dan masalah decoding bahasa yang mempengaruhi individu di seluruh rentang IQ, dan ditandai dengan perbedaan pola gelombang otak, terutama pada gelombang theta, beta, dan gamma (Ahmad Zainuddin dkk., 2019; Smirni dkk., 2020; Xue dkk., 2020). Berdasarkan kondisi tersebut, deteksi dini dan intervensi yang tepat sangat penting untuk membantu anak-anak dengan disleksia mengatasi tantangan mereka, sehingga meningkatkan peluang keberhasilan di sekolah dan kehidupan sosial (Kaye dkk., 2022; Sanfilippo dkk., 2020), dengan pengenalan yang lebih baik di kalangan pendidik dan orang tua untuk mendukung strategi intervensi yang lebih efektif (Abed & Shackelford, 2022; Azhar dkk., 2023).

Teknologi elektroensefalografi (EEG) memungkinkan analisis objektif terhadap aktivitas gelombang otak, mengungkapkan perbedaan signifikan antara individu dengan disleksia dan pembaca normal, serta memberikan wawasan mendalam mengenai karakteristik neurologis disleksia (Aldehim dkk., 2024; Guhan Seshadri dkk., 2020). Untuk meningkatkan aksesibilitas dan portabilitas alat deteksi disleksia berbasis EEG, integrasi mikrokontroler seperti ESP32 atau OpenBCI dengan modul penguat sinyal seperti AD8232 atau INA128 telah dikembangkan. Sebuah studi menunjukkan bahwa sistem pelacakan saraf yang efisien biaya dapat dibangun dengan menggunakan papan OpenBCI dan Arduino, memungkinkan pengukuran aktivitas saraf dalam lingkungan non-soundproof dengan akurasi decoder offline sekitar 90% dan real-time sekitar 78% (Ha dkk., 2023).

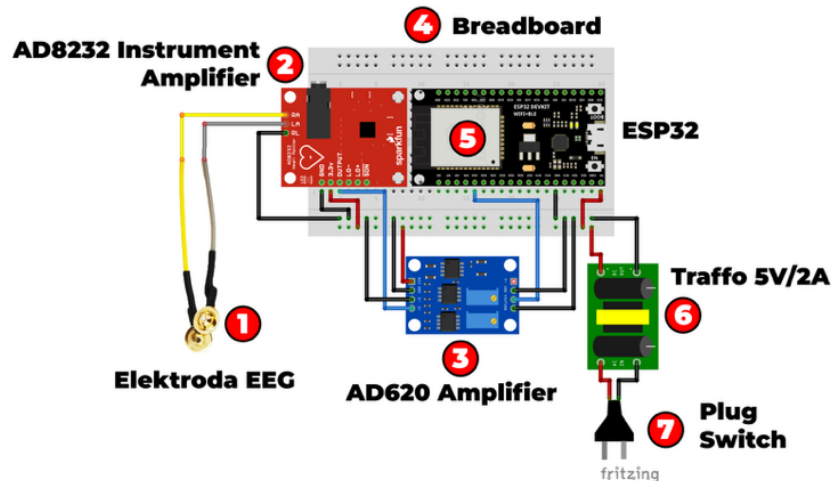
Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian menunjukkan peningkatan penggunaan EEG untuk menangkap aktivitas listrik otak dalam mengidentifikasi gangguan neurologis dengan integrasi penggunaan perangkat mikrokontroler. Meskipun deteksi EEG terbukti efektif untuk gangguan seperti epilepsi, penelitian EEG untuk disleksia masih terbatas, terutama dalam pengembangan perangkat keras terintegrasi. Analisis bibliometrik menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian EEG berfokus pada epilepsi, dengan penelitian tentang disleksia menggunakan EEG jauh lebih sedikit, serta integrasi mikrokontroler dalam sistem alat deteksi (Martinez-Murcia dkk., 2020). Hal ini menunjukkan adanya research gap, terutama dalam pengembangan perangkat keras EEG portabel adalah penguatan sinyal dan penanganan noise, dengan penggunaan amplifier seperti AD8232 atau INA128 yang krusial untuk menghasilkan sinyal berkualitas, meskipun integrasinya dengan mikrokontroler masih membutuhkan penelitian lebih lanjut (Bhattarai dkk., 2022; Mendes Junior dkk., 2023; Zhang dkk., 2024).

Atas dasar urgensi kondisi, penjabaran tren serta research gap, salah satu upaya untuk menjawab hal tersebut adalah melakukan upaya deteksi dini dan peningkatan kesadaran sangat penting, terutama untuk anak-anak yang juga menghadapi kondisi komorbid seperti masalah perilaku atau gangguan emosional (Sturm dkk., 2021). Meskipun berbagai program intervensi pendidikan telah dilakukan, tantangan seperti keterlambatan diagnosis dan rendahnya kesadaran masyarakat masih ada (Nkomo & Dube, 2023). Solusi potensial muncul dengan pengembangan metode deteksi disleksia yang berbasis teknologi, seperti EEG yang diintegrasikan dengan perangkat mikrokontroler. Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan solusi dalam pengembangan alat deteksi disleksia berbasis EEG yang portabel dan terjangkau. Sistem ini mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 dengan modul penguat sinyal seperti AD8232 untuk meningkatkan kualitas sinyal EEG yang diterima, serta menggunakan sistem penyaringan dan pemrosesan data untuk memastikan hasil yang akurat. Melalui pengembangan alat deteksi disleksia berbasis EEG yang portabel dan terjangkau, penelitian ini berpotensi untuk memberikan kontribusi besar terhadap diagnosis dini dan

intervensi yang lebih efektif bagi anak-anak dengan disleksia. Integrasi mikrokontroler dan perangkat EEG yang lebih terjangkau dapat memperluas aksesibilitas alat ini, memungkinkan deteksi yang lebih cepat dan akurat di lingkungan pendidikan, serta memberikan solusi untuk mengatasi tantangan aksesibilitas dan biaya tinggi yang seringkali menghalangi upaya deteksi dan pengobatan dini gangguan disleksia.

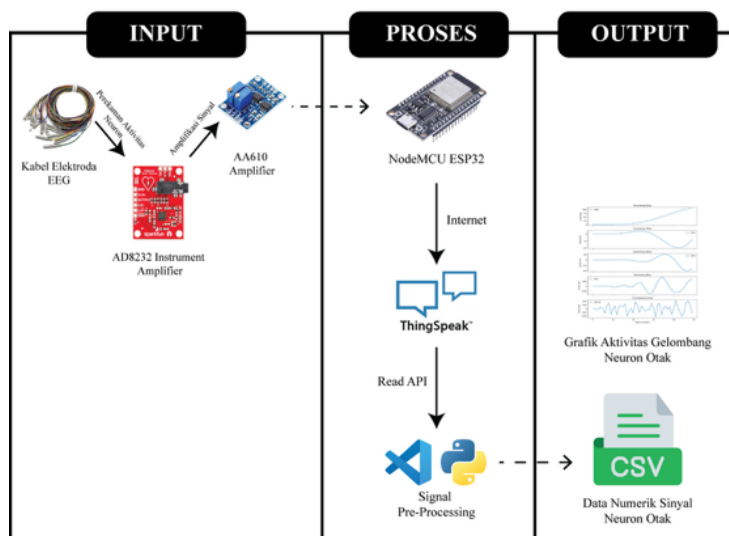
II. METODE

A. Rancangan Penelitian



Gambar 1. Rancangan Alat

Perancangan alat deteksi dilakukan perakitan pada tiap modul komponen, diantaranya kabel elektroda EEG yang dihubungkan ke PIN RA dan LA sebagai input dari perekaman aktivitas Listrik gelombang neuron subjek penelitian yang kemudian akan diproses dan diampifikasi oleh AD8232 yang diikuti AD620 kemudian data sinyal analog tersebut akan diproses oleh NodeMCU ESP32 dan dikirim ke platform ThingSpeak untuk dapat dilakukan pengolahan dan analisis data. Adapun diagram blok proses kerja sistem alat deteksi dan proses penelitiannya sebagai berikut



Gambar 2. Diagram Blok Alat Deteksi Disleksia dengan Elektroensefalografi

Setelah perakitan Hardware, Langkah selanjutnya merupakan proses pengolahan dan analisis data dengan mengekstrak data pada Thingspeak dan dilakukan Pre-Processing Data, yang awalnya data output awal adalah berupa analog tegangan dan nantinya akan diubah menjadi menjadi sinyal gelombang neuron dengan menggunakan library welch dan filterisasi *bandpass-filtering* pada frekuensi sampling $f_s = 250$.

Kemudian didapatkan data numerik berupa amplitudo frekuensi tiap gelombang neuron yang sudah terklasifikasi menjadi gelombang theta, beta dan gamma (4 Hz, 20 Hz, 40 Hz), dari data tersebut akan dilakukan analisis secara manual untuk mengetahui perbedaan dan menjadikannya sebagai pembeda serta pelabelan data antara subjek normal dengan disleksia.

B. Variabel Operasional Penelitian

Variabel Kontrol mencakup aspek-aspek yang dijaga seperti posisi elektroda EEG pada kepala subjek dikontrol agar data yang diperoleh dapat dibandingkan antar subjek. Kemudian, jenis instrumen sensor EEG yang digunakan adalah AD8232, dengan frekuensi sampling 250 Hz untuk menghindari distorsi data dan menangkap karakteristik gelombang otak seperti delta, theta, alpha, beta, dan gamma (Mendes Junior dkk., 2023).

Variabel Manipulasi melibatkan variasi kondisi tugas yang diberikan kepada subjek, yang bertujuan merangsang pola aktivitas otak yang spesifik. Variasi tingkatan tugas ini diharapkan dapat membedakan pola otak antara subjek dengan dan tanpa disleksia.

Variabel Respon terdiri dari, yaitu tegangan analog yang diproses menjadi sinyal gelombang otak sebagai data utama analisis aktivitas gelombang neuron otak.

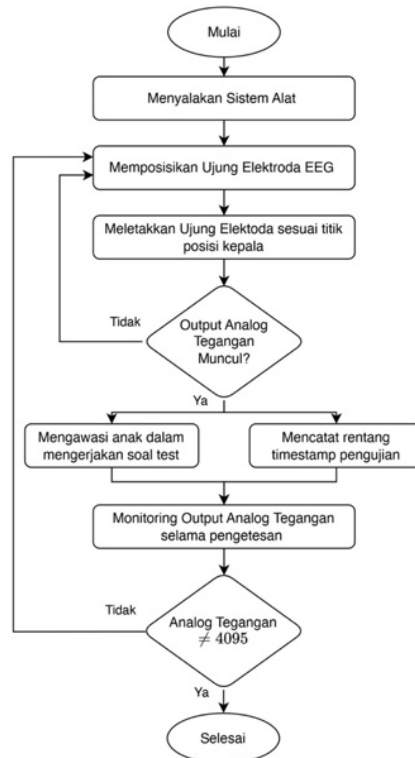
C. Kalibrasi Alat

Proses ini bertujuan untuk memvalidasi kinerja perangkat keras dan lunak serta menyesuaikan modul AD8232 dan AD620 untuk mengurangi noise dan memperkuat sinyal agar siap diproses. Berikut langkah-langkah kalibrasi mengenai sistem alat deteksi disleksia:

- a) Elektroda EEG dipasang secara tepat pada titik parietal kepala sesuai dengan posisi pengukuran yang ditentukan. Pin RA dan LA dihubungkan ke titik pengukuran sinyal, sedangkan pin RL dihubungkan ke ground sebagai referensi. Selain itu, perlu dipastikan bahwa seluruh koneksi ke modul AD8232 terpasang dengan baik dan stabil agar kualitas sinyal yang diperoleh optimal serta meminimalkan gangguan noise selama proses perekaman.
- b) Modul AD8232 dikalibrasi dengan memeriksa tegangan output menggunakan multimeter, memastikan tegangan berada dalam rentang yang dapat dibaca mikrokontroler (0-3,3V) dan menghubungkan output dari AFG ke pin RA, Ground AFG ke RL dan pin LA ke Ground sistem agar sinyal input tidak terpengaruh noise eksternal, kemudian mengatur frekuensi AFG sesuai dengan frekuensi gelombang otak manusia. Selanjutnya, uji sinyal input dengan elektroda yang terpasang ke parietal kepala manusia dan visualisasi gelombang menggunakan Python dengan mengatur frekuensi sampling sebesar 250 Hz. Apabila sinyal terlalu lemah untuk dianalisis maka diperlukan penguat sinyal dengan memutar potensiometer pada modul AD620 agar mendapatkan sinyal yang optimal

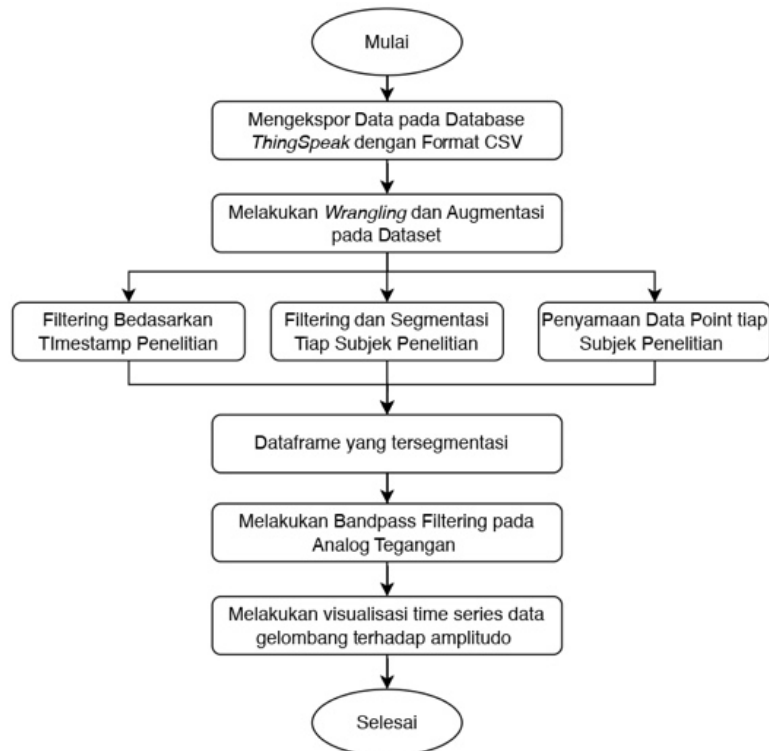
D. Teknik Pengambilan data

Pengambilan data diawali dengan sistem alat diaktifkan, kemudian memposisikan elektroda pada titik titik yang telah ditentukan pada kepala sesuai dengan protocol standar perekaman EEG untuk data yang optimal, kemudian memeriksa sinyal output mengalami aktivitas di ThingSpeak bersamaan dengan pengerjaan soal test oleh subjek penelitian. Pada saat yang sama rentang waktu pengujian (Timestamp) dicatat secara sistematis untuk dilakukan sinkronisasi secara manual antara data EEG yang dihasilkan dari aktivitas tiap subjek selama tes. Selama proses tes, sinyal analog dimonitor secara berkelanjutan dan apabila mendapatkan nilai 4095 maka akan dilakukan proses posisi ulang terhadap elektroda EEG begitu pula sebaliknya dan dapat dikatakan proses pengambilan data selesai.



Gambar 3. Tahapan Pengambilan Data Analog Tegangan Tiap Subjek Penelitian

E. Teknik Pengolahan Data



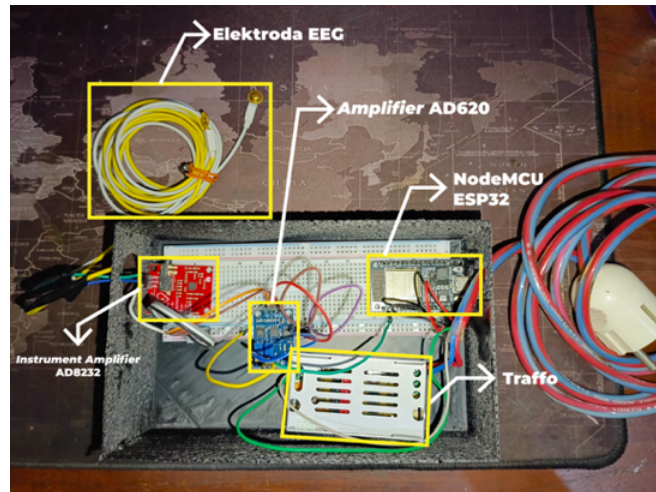
Gambar 4. Pengolahan Data dan Analisis Data

Proses pengolahan data pada data analog berupa sinkronisasi data dengan timestamp tiap subjek, kemudian mengsegmentasi data analog ke dalam dataframe untuk tiap subjek penelitian serta penyamaan datapoint, yang akan menghasilkan dataframe yang sudah tersegmentasi tiap subjeknya dengan jumlah data point yang sama dan dilanjutkan dengan konversi data analog menjadi amplitudo frekuensi gelombang

neuron berdasarkan frekuensi sampling 250 Hz, teorema Nyquist pada library welch dan penerapan bandpass filtering yang sudah dikategorikan ke beberapa gelombang yaitu Theta (4 Hz), Beta (20 Hz) dan Gamma (40 Hz). Dari data yang sudah terkonversi tersebut akan dilakukan visualisasi amplitude frekuensi gelombang neuron terhadap time series berupa sample data yang terekam oleh alat dan dapat merepresentasikan aktivitas gelombang neuron pada subjek penelitian.

III.HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil



Gambar 5. Rangkaian Sistem Alat Deteksi Disleksia

Tabel 1. Hasil Kalibrasi Sistem Alat Deteksi Disleksia

No	Frekuensi	Hasil Osiloskop
1	Gelombang Theta (5 Hz)	
2	Gelombang Beta (20 Hz)	
3	Gelombang Gamma (40 Hz)	

Gambar 5 memperlihatkan konfigurasi komponen elektronik yang disusun di atas breadboard, dengan kabel-kabel jumper yang menghubungkan masing-masing modul. Elektroda EEG berwarna putih dan kuning menjadi titik awal pengambilan sinyal aktivitas listrik dari otak. Modul AD8232 instrument amplifier berwarna merah menjadi komponen pertama yang berperan dalam penguatan dan filter awal sinyal bioelektrik, yang kemudian diteruskan ke modul amplifier AD620 untuk penguat sinyal sekunder. NodeMCU ESP32 difungsikan sebagai pusat pemrosesan dan transmisi data, yang akan mengirimkan sinyal terproses ke

platform ThingSpeak melalui koneksi Wi-Fi. Trafo 5V berperan memberikan suplai daya stabil kepada seluruh komponen sistem.

Pada pengujian gelombang theta (5 Hz), tampak bahwa sistem mengalami fluktuasi amplitudo dan distorsi bentuk gelombang pada awal input. Hal ini menunjukkan adanya respons transien dari rangkaian penguat dan filter yang masih beradaptasi terhadap sinyal frekuensi rendah. Namun demikian, seiring berjalannya waktu, sistem menunjukkan proses stabilisasi yang ditandai dengan bentuk gelombang sinus yang semakin bersih di bagian tengah dan akhir osilasi, serta hilangnya derau (*noise*) atau tonjolan acak yang mengganggu. Hasil ini menandakan bahwa sistem membutuhkan waktu pemanasan (*settling time*) untuk mencapai kondisi *steady-state* saat membaca sinyal 5 Hz, yang mencerminkan kondisi sebenarnya dari gelombang theta pada otak manusia.

Sementara itu, untuk input gelombang beta (20 Hz), hasil pengujian menunjukkan respons yang sangat stabil sejak awal sinyal masuk. Gelombang yang ditampilkan pada osiloskop berbentuk sinusoidal murni, simetris, dan bebas dari gangguan *noise*, yang mengindikasikan bahwa sistem telah bekerja secara optimal memproses sinyal beta, tanpa mengalami gangguan transien. Ini menunjukkan bahwa bandpass filter dan gain amplifier telah dikalibrasi dengan baik untuk menangani sinyal berfrekuensi menengah, yang relevan dengan gelombang beta.

Pada input gelombang gamma (40 Hz), sistem menunjukkan pola osilasi yang cepat dan amplitudo yang stabil, sesuai dengan karakteristik gelombang gamma yang berada di frekuensi tinggi. Hasil visualisasi menunjukkan sinyal memiliki respons cepat terhadap inputan, dengan *noise* relatif rendah dan tidak menunjukkan fluktuasi berlebihan, menandakan bahwa sistem telah mampu memproses sinyal frekuensi tinggi dengan akurasi tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa respon dinamis sistem terhadap gelombang gamma sudah tepat. Secara keseluruhan, hasil kalibrasi menunjukkan bahwa alat yang telah dirancang memiliki performa yang baik dan responsif dalam membaca berbagai jenis gelombang otak pada frekuensi berbeda. Sistem mampu mengenali gelombang theta dengan proses stabilisasi yang wajar, dan membaca gelombang beta serta gamma dalam kondisi steady state dengan sinyal yang bersih dan minim *noise*, yang mengindikasikan kesiapan alat untuk digunakan dalam pengambilan data EEG nyata pada subjek manusia.

Tabel 2 dan **Tabel 3** menunjukkan data aktivitas amplitudo frekuensi gelombang otak yang direkam pada tiga subjek disleksia dan tiga subjek normal selama tes soal dari keseluruhan data yang berjumlah 20 subjek disleksia dan 20 subjek normal, dengan fokus pada gelombang theta, beta, dan gamma yang berperan dalam proses kognitif terkait membaca dan menulis. Pada Tabel 2 (subjek disleksia), nilai theta yang tercatat lebih tinggi, terutama pada subjek pertama (39,57 dan 219,20), menunjukkan peningkatan aktivitas yang dapat mengindikasikan kesulitan dalam pemrosesan informasi. Nilai beta bervariasi, dengan subjek pertama mencatatkan nilai yang lebih tinggi (47,61), mengindikasikan aktivitas otak yang berhubungan dengan pemrosesan kognitif. Gamma yang tercatat negatif pada subjek pertama dan ketiga (-175,16 dan -194,40 μV) mengindikasikan gangguan dalam pemrosesan informasi visual dan verbal, yang sering ditemukan pada individu dengan disleksia.

Pada **Tabel 3** (subjek normal), nilai theta menunjukkan variasi yang lebih rendah dibandingkan dengan subjek disleksia, meskipun terdapat lonjakan pada subjek pertama (189,94). Gelombang beta menunjukkan nilai yang lebih stabil dan rendah pada semua subjek, yang mencerminkan pemrosesan kognitif yang efisien. Gamma juga menunjukkan variasi, dengan nilai positif pada subjek pertama (41,39 μV) dan nilai negatif pada subjek kedua (-147,09 μV), yang menunjukkan perbedaan dalam pemrosesan informasi tingkat tinggi antara subjek normal. Data pada kedua tabel tersebut merupakan tiga subjek pertama dan tiga titik data pertama dari total 50 titik data yang dikumpulkan untuk setiap subjek dengan jumlah subjek sebanyak 20 disleksia dan 20 normal.

Tabel 2. Data Aktivitas Amplitudo Frekuensi Gelombang Neuron Subjek Disleksia

Subjek	Nilai	Theta	Beta	Gamma
--------	-------	-------	------	-------

	Analog	$(\theta \times 10^{-5} \mu V)$	$(\beta \times 10^{-1} \mu V)$	(μV)
1	523	3,53	1,25	43,12
	800	39,57	11,37	472,32
	473	219,20	47,61	-175,16
2	580	3,920	1,38	47,82
	572	41,75	11,85	26,40
	850	224,70	47,87	-156,12
3	604	4,08	1,44	49,80
	850	45,20	12,95	48,45
	610	248,75	53,80	-194,40

Tabel 3. Data Aktivitas Amplitudo Frekuensi Gelombang Neuron Subjek Normal

Subjek	Nilai Analog	Theta $(\theta \times 10^{-5} \mu V)$	Beta $(\beta \times 10^{-1} \mu V)$	Gamma (μV)
1	502	3,40	1,20	41,39
	443	35,79	10,14	18,55
	568	189,94	40,09	-147,09
2	551	3,72	1,31	45,43
	506	39,41	11,17	21,98
	487	208,85	44,04	-173,40
3	466	3,14	1,11	38,42
	475	33,65	9,56	22,47
	473	180,12	38,24	-143,30

Pada Tabel 4, hasil uji t pada rata-rata amplitudo gelombang theta menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan antara kelompok disleksia dan normal ($t = -9,810$; $p < 0,001$). Variabilitas yang signifikan pada gelombang theta di antara kedua kelompok dengan garis dasar frekuensi yang berbeda. Pada parameter Std ($t = 12,018$; $p < 0,001$) menunjukkan variabilitas yang sangat signifikan sehingga ditemukan adanya ketidakstabilan aktivitas otak gelombang theta pada subjek disleksia. Parameter power theta juga menunjukkan perbedaan signifikan yang sangat kuat ($t = 10,1274$; $p < 0,001$). Parameter Power yang lebih rendah pada kelompok disleksia mengindikasikan rendahnya sinkronisasi neuron dalam frekuensi theta, yang berkaitan dengan integrasi memori fonologis, perhatian, dan pembelajaran bahasa pada subjek yang menjadikan gelombang theta sebagai parameter utama dalam pendeteksian disleksia.

Pada gelombang beta tidak menunjukkan perbedaan signifikan antara kedua kelompok, hal ini mengindikasikan bahwa garis dasar aktivitas beta relatif serupa di kedua kelompok. Namun, terdapat perbedaan yang sangat signifikan pada standar deviasi ($t = 8,4057$; $p < 0,001$). Nilai Std yang jauh lebih tinggi pada kelompok disleksia menunjukkan bahwa meskipun rata-rata amplitudo serupa, aktivitas beta kelompok disleksia lebih fluktuatif dan kurang stabil. Fluktuasi ini mengarah pada hipotesis bahwa individu disleksia mengalami lebih banyak ketidakstabilan neural dalam domain atensi dan kontrol visual motorik. Parameter power gelombang beta juga menunjukkan perbedaan signifikan yang kuat ($t = 7,1271$; $p < 0,001$). Power yang lebih rendah pada kelompok disleksia dapat mengindikasikan penurunan efisiensi jaringan neural dalam pengolahan informasi visual dan koordinasi motorik halus yang relevan dalam proses membaca, sehingga dari beberapa hal tersebut menjadikan gelombang beta sebagai parameter pendukung dalam pendeteksian disleksia.

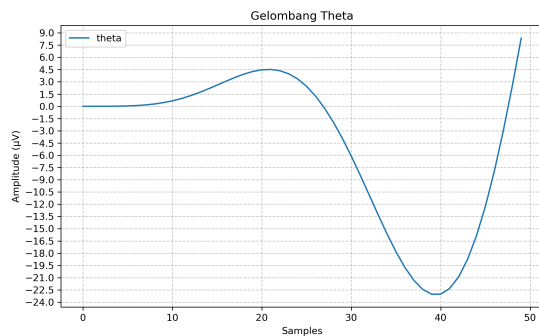
Pada gelombang gamma menunjukkan pola statistik yang hampir sama dengan gelombang beta, pada parameter mean gamma tidak signifikan, sehingga rata-rata amplitudo gamma bukan pembeda kelompok. Sedangkan parameter Std gelombang gamma ($t = 5,2650$; $p < 0,001$) mengindikasikan bahwa aktivitas gelombang gamma kelompok disleksia lebih fluktuatif, sesuai dengan hipotesis bahwa gangguan integrasi

sensorik-visual dapat terkait dengan kesulitan membaca. Pada parameter power gelombang gamma ($t = 3,0744$; $p < 0,001$) Power gamma yang lebih rendah dalam kelompok disleksia dapat menandakan adanya disfungsi dalam sinkronisasi neural frekuensi tinggi yang berperan dalam integrasi informasi cepat, terutama dalam pemrosesan simbol huruf.

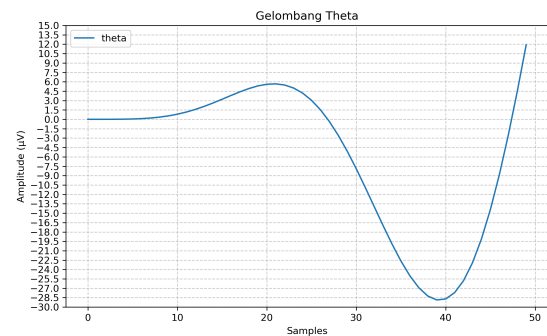
Tabel 4. Hasil Uji Statistik Aktivitas Frekuensi Gelombang Neuron Antara Subjek Disleksia dan Normal

Frekuensi Gelombang	Parameter	<i>t-value</i>	<i>p-value</i>
Theta	Mean	-9,8108	$5,12 \times 10^{-9}$
	Std	12,0180	$1,36 \times 10^{-10}$
	Median	3,2573	$3,38 \times 10^{-3}$
	Power	10,1274	$3,34 \times 10^{-9}$
Beta	Mean	-0,9124	$3,72 \times 10^{-1}$
	Std	8,4057	$3,89 \times 10^{-8}$
	Median	-1,4758	$1,51 \times 10^{-1}$
	Power	7,1271	$6,92 \times 10^{-7}$
Gamma	Mean	-1,3605	$1,88 \times 10^{-1}$
	Std	5,2650	$4,23 \times 10^{-5}$
	Median	-1,9572	$6,29 \times 10^{-2}$
	Power	3,0744	$6,23 \times 10^{-3}$

B. Pembahasan



(a) Subjek Normal



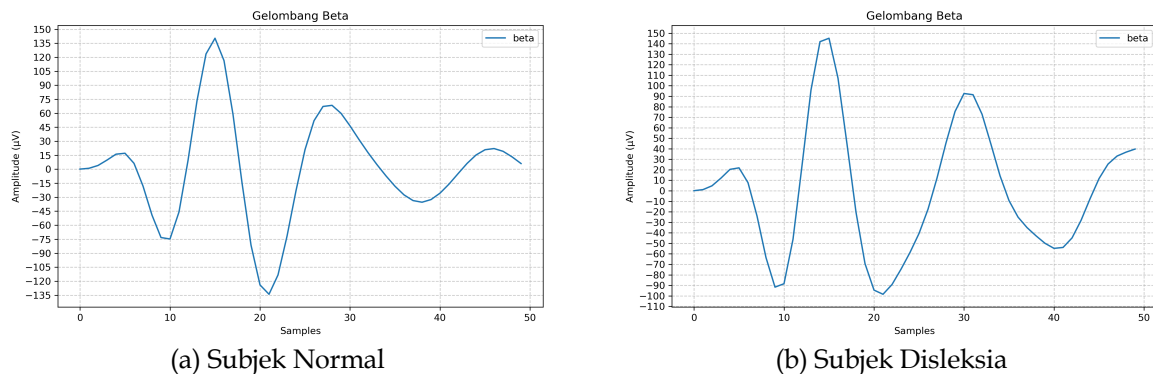
(b) Subjek Disleksia

Gambar 6. Visualisasi Amplitudo Frekuensi Gelombang Neuron Theta (5Hz) pada Subjek Penelitian

Pada Gambar 6a subjek normal, menunjukkan besar amplitudo negatif berada di angka $22,6 \mu\text{V}$ dan amplitudo positif sebesar $4,5 \mu\text{V}$ lebih stabil dibandingkan subjek disleksia yang berhubungan dengan perhatian, memori kerja, dan pengolahan informasi. Aktivitas ini mencerminkan otak yang berfungsi secara efisien dalam kondisi yang relatif tenang atau dalam fase pemulihan, menunjukkan bahwa otak subjek normal memiliki stabilitas yang lebih baik dalam beraktivitas. Namun, pada Gambar 4.4b Subjek Disleksia, pola gelombang theta tampak memiliki amplitudo lebih besar dibandingkan subjek normal dengan amplitudo positif mencapai $5,9 \mu\text{V}$ sementara amplitudo negatif mencapai $-28,57 \mu\text{V}$. Peningkatan amplitudo negatif ini dapat mencerminkan gangguan dalam pemrosesan informasi otak, yang terkait dengan ketidakmampuan otak untuk beradaptasi dengan efisien terhadap rangsangan eksternal ketika memproses pengerjaan soal test. yang merupakan karakteristik umum pada individu dengan disleksia. Perbedaan ini menunjukkan adanya ketidakteraturan aktivitas otak yang dapat memengaruhi fokus dan pemrosesan informasi.

Secara fisis, gelombang theta diproduksi oleh osilasi sinkron neuron yang berfungsi untuk mengatur proses internal otak, termasuk konsentrasi dan perhatian terhadap informasi. Ketika neuron berkomunikasi secara efisien dalam rentang frekuensi theta, gelombang ini mengindikasikan bahwa otak sedang dalam kondisi yang baik untuk menerima dan mengintegrasikan informasi. Namun pada Gambar 6b, terutama

dengan amplitudo bawah yang tinggi untuk gelombang Theta, mencerminkan perubahan dalam konektivitas neural, atau bahkan perubahan dalam efisiensi komunikasi antar-neuron di area-area otak yang terlibat dalam pemrosesan bahasa dan memori kerja. Perbedaan gelombang theta antara subjek normal dan disleksia dapat menjadi indikator yang menunjukkan perubahan dalam aktivitas otak yang berkaitan dengan gangguan tersebut.



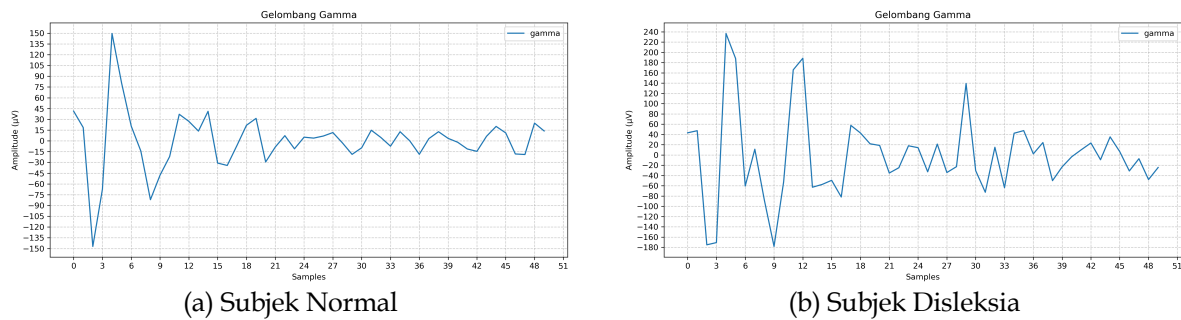
Gambar 7. Visualisasi Amplitudo Frekuensi Gelombang Neuron Beta (20 Hz) pada Subjek Penelitian

Pada Gambar 7, gelombang beta menunjukkan perbedaan amplitudo yang signifikan antara subjek normal dan disleksia. Pada Gambar 7a, gelombang beta memiliki amplitudo yang stabil dan teratur, menunjukkan aktivitas otak yang normal, yang sering kali berhubungan dengan kondisi terjaga, fokus, atau aktivitas mental yang lebih tinggi dengan angka Amplitudo positif 137 μV dan amplitudo negatif 135. Amplitudo positif dan negatif yang relatif sama menandakan subjek memiliki konsentrasi dalam pengerjaan test dan otak berfungsi tanpa intervensi. Sebaliknya, Pada Gambar 7b (Subjek Disleksia), gelombang beta menunjukkan fluktuasi amplitudo yang tidak stabil, dengan nilai mencapai 143 μV (positif) dan 99 μV (negatif). Hal ini mencerminkan gangguan konsentrasi dan fungsi otak yang terganggu. Di samping itu, pada data poin 20–30, grafik gelombang beta menunjukkan kemiringan landai, yang mengindikasikan keterlambatan pengolahan informasi kognitif. Fluktuasi ini mencerminkan perbedaan dalam cara otak merespons rangsangan, yang dapat disebabkan oleh kesulitan dalam pemrosesan informasi. Gelombang beta yang terdistorsi ini menunjukkan adanya disfungsi konektivitas otak, yang menghambat kemampuan otak dalam mengolah tugas-tugas kognitif seperti membaca dan memproses informasi linguistik.

Secara fisis, perbedaan amplitudo dalam gelombang beta antara subjek normal dan disleksia dapat dijelaskan dengan adanya perubahan dalam aktivitas listrik neuron. Gelombang beta dihasilkan oleh osilasi sinkron neuron yang berkomunikasi satu sama lain dalam rangka memfasilitasi pemrosesan informasi kognitif yang cepat dan terorganisir. Pada subjek disleksia, terjadi gangguan dalam sinkronisasi atau keterlambatan dalam komunikasi antar-neuron, yang menyebabkan fluktuasi yang lebih besar dalam amplitudo gelombang beta. Selain itu, faktor-faktor seperti koneksi otak yang kurang efisien di wilayah yang terlibat dalam pemrosesan bahasa dan perhatian dapat menyebabkan penurunan stabilitas dalam aktivitas gelombang beta, yang tercermin dalam pola yang lebih tidak teratur.

Gambar 8 menunjukkan perbedaan signifikan antara subjek normal (Gambar 8a) dan subjek disleksia. Pada subjek normal, gelombang gamma menunjukkan fluktuasi amplitudo yang relatif stabil, dengan amplitudo yang relatif rendah pada rentang data point 15–50. Amplitudo gelombang gamma berada dalam rentang 30 μV untuk amplitudo positif dan negatifnya. Hal ini mencerminkan bahwa subjek dapat mempertahankan konsentrasi dan otak subjek dapat memproses informasi kognitif, perhatian, dan memori kerja dalam kondisi normal. Sebaliknya, pada subjek disleksia (Gambar 8b), terdapat peningkatan fluktuasi amplitudo yang tinggi. Pada rentang data point 15–50, terlihat fluktuasi yang mencolok pada data point 28–30, yang berada di luar rentang amplitudo positif 60 μV dan amplitudo negatif 60 μV . Fluktuasi ini mengindikasikan ketidakstabilan dalam aktivitas otak, yang dapat mencerminkan gangguan dalam pemrosesan kognitif pada individu dengan disleksia. Gelombang gamma yang tidak stabil ini bisa mengindikasikan adanya perubahan dalam konektivitas otak, yang memengaruhi kemampuan otak untuk

memproses informasi secara efisien, terutama dalam tugas yang melibatkan perhatian dan pemrosesan bahasa.



Gambar 8. Visualisasi Amplitudo Frekuensi Gelombang Neuron Gamma (40 Hz) pada Subjek Penelitian

Secara fisis, gelombang gamma dihasilkan dari osilasi sinkron neuron yang berkomunikasi satu sama lain dengan frekuensi sangat tinggi. Sifat sinkronisasi neuron yang terjaga sangat penting untuk memastikan pemrosesan informasi yang cepat dan efisien. Ketika sinkronisasi ini terganggu, seperti yang terlihat pada subjek disleksia, maka aktivitas otak menjadi lebih fluktuatif dan tidak teratur, yang tercermin dalam amplitudo gelombang gamma yang lebih besar dan lebih tidak stabil. Fenomena ini dapat disebabkan oleh gangguan dalam konektivitas antar-neuron, yang mempengaruhi komunikasi antar wilayah otak yang diperlukan untuk fungsi kognitif yang efisien. Dalam konteks disleksia, hal ini dapat berkontribusi pada kesulitan dalam pemrosesan bahasa dan perhatian.

Pola ketidakstabilan aktivitas gelombang theta, beta dan gamma yang terlihat pada subjek disleksia tersebut tidak hanya menggambarkan perbedaan dinamika neural, tetapi juga memperkuat pandangan bahwa karakteristik amplitudo dan fluktuasi gelombang EEG dapat mencerminkan kondisi kognitif yang relevan secara klinis. Ketika fenomena serupa juga ditemukan pada gelombang theta dan beta yang masing-masing berperan dalam pemrosesan fonologis, perhatian, dan integrasi sensorik maka rangkaian aktivitas osilatori ini memberikan gambaran kuantitatif tentang fungsi neurokognitif yang umumnya dinilai melalui asesmen klinis. Dalam Penelitian (Keshavarzi dkk., 2024) menemukan perbedaan dalam power frekuensi beta antara anak dengan dysleksia dan kontrol, memperkuat bukti bahwa aktivitas gelombang neuron (termasuk beta) dapat dipakai untuk membedakan status kognitif dan diagnostik, sementara (Martínez-briones dkk., 2025) menemukan pola power EEG yang abnormal pada frekuensi lain, seperti theta, pada populasi yang sama. Secara bersama-sama, temuan ini memperkuat bukti bahwa variabilitas amplitudo dan power gelombang EEG pada berbagai pita frekuensi termasuk theta, beta, dan gamma dapat mencerminkan kondisi klinis disleksia dan menjadi indikator neurofisiologis yang membedakan status kognitif maupun diagnostik antara individu disleksia dan non-disleksia. Lebih jauh lagi, dinamika osilasi neuron tersebut tidak hanya merefleksikan proses neurofisiologis dasar, tetapi juga berfungsi sebagai parameter pembanding yang relevan dalam memvalidasi hasil pemeriksaan klinis, terutama yang terkait dengan fungsi fonologis, pemrosesan bahasa, dan perhatian. Dengan demikian, integrasi analisis EEG ke dalam prosedur diagnosis medis menjadi langkah penting untuk meningkatkan akurasi deteksi disleksia, sekaligus menyediakan dasar neurofisiologis yang objektif sebagai pelengkap *gold standard* diagnostik yang selama ini digunakan dalam praktik klinis.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan alat deteksi disleksia berbasis elektroensefalografi (EEG) yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32. Alat ini mampu memproses sinyal EEG dengan efektif, mengidentifikasi perbedaan amplitudo gelombang otak antara subjek normal dan disleksia, terutama pada gelombang theta, beta, dan gamma yang berkaitan dengan proses kognitif seperti membaca dan menulis. Proses kalibrasi alat menunjukkan kinerja yang optimal, dengan sistem mampu menghasilkan sinyal yang stabil dan minim noise, berkat penggunaan modul penguat seperti AD8232 dan AD620. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa alat ini dapat mendeteksi gangguan dalam pemrosesan informasi pada subjek disleksia,

yang tercermin dalam fluktuasi amplitudo yang lebih besar pada gelombang theta dan gamma. Secara keseluruhan, alat ini menawarkan solusi yang efektif dan terjangkau untuk mendeteksi disleksia pada anak-anak, serta dapat digunakan sebagai dasar untuk pengembangan sistem deteksi disleksia berbasis EEG yang lebih lanjut.

B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini terdapat beberapa saran yang dapat dilakukan untuk penelitian selanjutnya, antara lain yaitu Pengembangan Printed Circuit Board sesuai dengan komponen amplifier dan rangkaian alat yang digunakan seperti pada penelitian ini dapat meningkatkan efisiensi dan reliabilitas perangkat, dengan desain layout PCB dapat mengoptimalkan jalur sinyal untuk meminimalkan delay, noise, gangguan eksternal kabel terputus akibat guncangan ketika pengambilan data dan dapat meminimalkan interferensi elektromagnetik, kemudian pengimplementasian deep learning dalam mendeteksi disleksia berdasarkan data gelombang neuron yang sudah didapatkan dari sistem alat ini guna menunjang tingkat akurasi deteksi disleksia dan memangkas waktu pendeteksian yang biasa dilakukan secara manual, dan yang terakhir terkait pengembangan dataset dan sampel yang dipergunakan menjadi pondasi penting untuk meningkatkan ruang eksplorasi data oleh sistem dan dapat meningkatkan variabilitas data yang diharapkan dapat meningkatkan pelebaran deteksi dari sistem alat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abed, M. G., & Shackelford, T. K. (2022). Saudi public primary school teachers' knowledge and beliefs about developmental dyslexia. *Dyslexia*, 28(2), 244–251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/dys.1705>
- Ahmad Zainuddin, A. Z., Mansor, W., Y. Lee, K., & Mahmoodin, Z. (2019). Performance of Extreme Learning Machine Kernels in Classifying EEG Signal Pattern of Dyslexic Children in Writing. *International Journal of Integrated Engineering*, 11(3). <https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/view/4547>
- Aldehim, G., Rashid, M., Alluhaidan, A. S., Sakri, S., & Basheer, S. (2024). Deep Learning for Dyslexia Detection: A Comprehensive CNN Approach with Handwriting Analysis and Benchmark Comparisons. *Journal of Disability Research*, 3(2), 1–8. <https://doi.org/10.57197/jdr-2024-0010>
- Alkhurayyif, Y., & Sait, A. R. W. (2023). Developing an Image-Based Dyslexia Detection Model Using the Deep Learning Technique. *Journal of Disability Research*. <https://doi.org/10.57197/jdr-2023-0057>
- Azhar, A., Paul Carlo, D., & Hassan, Z. (2023). Are dyslexic children involved in delinquency? Issues and recommendations for a more fulfilling life. *Power and Education*, 15(3), 291–308. <https://doi.org/10.1177/17577438221137767>
- Bhattarai, C., Yadav, S. K., & Koirala, S. (2022). IoT Based ECG Using AD8232 and ESP32. *Nepal Journal of Science and Technology*, 21(2), 115–121. <https://doi.org/10.3126/njst.v21i2.62361>
- Guhan Seshadri, N. P., Geethanjali, B., & Singh, B. K. (2020). Resting state EEG signal analysis in Indian Dyslexic children. 2020 *First International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T)*, 404, 300–304. <https://doi.org/10.1109/ICPC2T48082.2020.9071499>
- Ha, J., Baek, S.-C., Lim, Y., & Chung, J. H. (2023). Validation of cost-efficient EEG experimental setup for neural tracking in an auditory attention task. *Scientific Reports*, 13(1), 22682. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49990-6>
- Kaye, E. L., Lozada, V., & Briggs, C. (2022). Early Identification of and Intervention for Children with and without Dyslexia Characteristics: A Comparison Study. *Literacy Research and Instruction*, 61(3), 298–313. <https://doi.org/10.1080/19388071.2022.2059418>
- Keshavarzi, M., Mandke, K., Macfarlane, A., Parvez, L., Gabrielczyk, F., Wilson, A., & Goswami, U. (2024). Atypical beta-band effects in children with dyslexia in response to rhythmic audio-visual speech. *Clinical Neurophysiology*, 160, 47–55. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clinph.2024.02.008>
- Kirana, A. W. (2022). Issues in reading comprehension: A case of an Indonesian bilingual dyslexic student. *Indonesian Journal of Applied Linguistics; Vol 11, No 3 (2022): Vol. 11, No. 3, January 2022* DO - 10.17509/ijal.v11i3.33581. <https://ejournal.upi.edu/index.php/IJAL/article/view/33581>
- Martínez-briones, B. J., Fernández, T., & Silva-pereyra, J. (2025). *Electroencephalographic power spectrum patterns related to the intelligence of children with learning disorders*. 1–24. <https://doi.org/10.7717/peerj.19138>
- Martinez-Murcia, F. J., Ortiz, A., Gorriz, J. M., Ramirez, J., Lopez-Abarejo, P. J., Lopez-Zamora, M., & Luque, J. L. (2020). EEG Connectivity Analysis Using Denoising Autoencoders for the Detection of Dyslexia. *International Journal of Neural Systems*, 30(07), 2050037. <https://doi.org/10.1142/S0129065720500379>
- Mendes Junior, J. J., Campos, D. P., Biassio, L. C., Passos, P. C., Júnior, P. B., Lazzaretti, A. E., & Krueger, E.

- (2023). AD8232 to Biopotentials Sensors: Open Source Project and Benchmark. In *Electronics* (Vol. 12, Nomor 4). <https://doi.org/10.3390/electronics12040833>
- Nkomo, D., & Dube, B. (2023). Crucial Factors in the Implementation of Intervention Programmes for Learners with Dyslexia: An Examination. *The International Journal of Humanities & Social Studies*. <https://doi.org/10.24940/theijhss/2023/v11/i3/hs2301-007>
- Sanfilippo, J., Ness, M., Petscher, Y., Rappaport, L., Zuckerman, B., & Gaab, N. (2020). Reintroducing Dyslexia: Early Identification and Implications for Pediatric Practice. *Pediatrics*, 146(1), e20193046. <https://doi.org/10.1542/peds.2019-3046>
- Smirni, P., Vetri, L., Misuraca, E., Cappadonna, M., Operto, F. F., Pastorino, G. M. G., & Marotta, R. (2020). Misunderstandings about Developmental Dyslexia: A Historical Overview. *Pediatric Reports*, 12(2), 8505. <https://doi.org/10.4081/pr.2020.8505>
- Sturm, V. E., Roy, A. R. K., Datta, S., Wang, C., Sible, I. J., Holley, S. R., Watson, C., Palser, E. R., Morris, N. A., Battistella, G., Rah, E., Meyer, M., Pakvasa, M., Mandelli, M. L., Deleon, J., Hoeft, F., Caverzasi, E., Miller, Z. A., Shapiro, K. A., ... Gorno-Tempini, M. L. (2021). Enhanced visceromotor emotional reactivity in dyslexia and its relation to salience network connectivity. *Cortex*, 134, 278–295. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.10.022>
- Xue, H., Wang, Z., Tan, Y., Yang, H., Fu, W., Xue, L., & Zhao, J. (2020). Resting-state EEG reveals global network deficiency in dyslexic children. *Neuropsychologia*, 138, 107343. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107343>
- Zhang, B., Zhang, Y., Dang, Z., Zhu, H., Chen, Y., & Duan, Z. (2024). A Compact and High-Efficiency 220-GHz Power Amplifier Module Based on TE₁₁-Mode Radial Power Combiner. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 72(5), 3118–3129. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2023.3319825>
- Zuppardo, L., Serrano, F., Pirrone, C., & Rodriguez-Fuentes, A. (2023). More Than Words: Anxiety, Self-Esteem, and Behavioral Problems in Children and Adolescents With Dyslexia. *Learning Disability Quarterly*, 46(2), 77–91. <https://doi.org/10.1177/07319487211041103>