

Received: Maret 2025

Accepted: April 2025

Published: April 2025

Eksplorasi Pemanfaatan Teknologi *Brain-Computer Interface (BCI)* untuk Media Pembelajaran Anak dengan ADHD (*Attention Deficit Hyperactivity Disorder*)

Kurnia Santi^{1*}, Fahmi Arsyad² Mahmud Sahroni³

¹Universitas Islam An-Nur Lampung

²Universitas Islam An-Nur Lampung

³STAI Al Ma'arif Kalirejo

*✉: kurniasanti@an-nur.ac.id

Abstract

This study examines the potential application of Brain-Computer Interface (BCI) technology as an adaptive learning medium for children with Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD). ADHD is a neurodevelopmental disorder that affects attention, hyperactivity, and impulsivity, often hindering the learning process of children. Using a qualitative approach through literature review and expert interviews, the study found that the brain activity patterns of children with ADHD—particularly the increased theta/beta wave ratio—can be utilized as a focus indicator in EEG-based BCI systems. Interviews with neuroscience experts, special education teachers, and BCI developers revealed the need for a responsive system (latency <1 second), resistant to motion artifacts, and equipped with a simple, educational visual interface. Literature analysis also highlighted that existing learning media have yet to integrate neurophysiological data in real time. The findings reveal a research gap in the use of BCI for children with ADHD, especially within inclusive education settings. This study recommends the development of an affordable, intuitive BCI-based adaptive learning prototype tailored to the needs of local users.

Keywords: ADHD, Brain-Computer Interface, adaptive learning, EEG, neurofeedback, inclusive education.

Abstract

Penelitian ini mengkaji potensi penerapan teknologi *Brain-Computer Interface (BCI)* sebagai media pembelajaran adaptif untuk anak dengan *Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD)*. ADHD merupakan gangguan *neurodevelopmental* yang mempengaruhi perhatian, hiperaktivitas, dan impulsivitas, yang sering menghambat proses pembelajaran anak. Melalui pendekatan kualitatif dengan metode studi literatur dan wawancara ahli, ditemukan bahwa pola aktivitas otak anak ADHD khususnya peningkatan rasio gelombang theta/beta dapat dimanfaatkan sebagai indikator fokus dalam sistem BCI berbasis EEG. Hasil wawancara dengan ahli neurosains, guru SLB, dan pengembang BCI menunjukkan kebutuhan akan sistem yang responsif (<1 detik latency), tahan gangguan gerak, serta memiliki antarmuka visual yang sederhana dan edukatif. Analisis literatur juga mengungkapkan bahwa media pembelajaran eksisting masih belum mengintegrasikan data neurofisiologis secara real-time. Temuan menunjukkan adanya kesenjangan riset dalam konteks pemanfaatan BCI untuk anak ADHD, khususnya di lingkungan pendidikan inklusif. Penelitian ini merekomendasikan pengembangan prototipe media pembelajaran adaptif berbasis BCI yang terjangkau, intuitif, dan sesuai dengan kebutuhan pengguna lokal.

Kata Kunci: ADHD, *Brain-Computer Interface*, pembelajaran adaptif, EEG, neurofeedback, pendidikan inklusif.

PENDAHULUAN

ADHD (*Attention Deficit Hyperactivity Disorder*) adalah gangguan neurodevelopmental yang ditandai dengan tiga gejala utama: kesulitan memusatkan perhatian (*inattention*), hiperaktivitas, dan impulsivitas. Gejala ini sering muncul pada usia dini dan dapat berlanjut hingga dewasa, memengaruhi fungsi eksekutif otak seperti perencanaan, pengorganisasian, dan pengendalian diri. Anak dengan ADHD sering kali mengalami kesulitan memusatkan perhatian dan fokus dalam mengikuti instruksi, duduk diam, dan mengatur waktu, yang dapat berdampak negatif pada prestasi akademik dan hubungan sosial mereka (Shah et al., 2014). ADHD merupakan salah satu gangguan neurodevelopmental yang paling umum terjadi pada anak-anak, dengan prevalensi global mencapai 5-7% dari populasi anak usia sekolah (Polanczyk et al., 2015; Thomas et al., 2015). Di Indonesia sendiri, data Kementerian Kesehatan mencatat bahwa angka kejadian ADHD terus meningkat dari tahun ke tahun, meskipun belum ada survei nasional komprehensif yang memetakan secara menyeluruh (Kemenkes RI, 2022).

Anak-anak dengan ADHD menghadapi tantangan besar dalam dunia pendidikan formal. Mereka kerap mengalami kesulitan dalam menyelesaikan tugas yang memerlukan fokus jangka panjang, tidak mampu mengikuti instruksi kompleks, serta mengalami gangguan dalam regulasi emosi dan interaksi sosial di lingkungan kelas (Kusuma & Pustaka, 2025). Berbagai intervensi telah dikembangkan, mulai dari terapi kognitif perilaku, penggunaan obat-obatan stimulan seperti methylphenidate, hingga pendekatan edukatif khusus (Demetriou, 2014). Namun, sebagian besar pendekatan tersebut masih bersifat general dan belum sepenuhnya menjawab kebutuhan personalisasi dan adaptabilitas pembelajaran anak ADHD.



Gambar 1. Ilustrasi anak dengan ADHD (*Attention Deficit Hyperactivity Disorder*)

Dalam perkembangan teknologi neuro-edukasi terkini, *Brain-Computer Interface* (BCI) muncul sebagai inovasi potensial dalam dunia pendidikan inklusif. BCI adalah sistem yang memungkinkan komunikasi langsung antara otak manusia dan komputer melalui pemrosesan sinyal elektroensefalografi (EEG) tanpa memerlukan perintah fisik atau verbal (Wolpaw, 2013). Dalam konteks pendidikan, teknologi ini dapat merekam pola aktivitas otak anak saat belajar dan memberikan umpan balik (*feedback*) secara real-time untuk meningkatkan fokus dan keterlibatan kognitif (Aricò et al., 2014; Mühl et al., 2014). Beberapa penelitian terbaru menunjukkan bahwa BCI berbasis EEG mampu mendeteksi tingkat atensi dan distraksi pada

anak secara objektif, serta memberikan potensi intervensi yang bersifat adaptif (Hassanien & Azar, 2015; Schaefer et al., 2020).

Sebagai contoh, program seperti CogoLand, yang menggunakan BCI untuk mengendalikan avatar dalam permainan 3D, telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam pelatihan perhatian pada anak-anak dengan ADHD (Lim et al., 2019). Contoh lain MindWave Mobile perangkat BCI portabel yang dapat digunakan di rumah atau di sekolah. Perangkat ini memungkinkan anak-anak untuk terlibat dalam aktivitas yang memerlukan konsentrasi tinggi, seperti permainan edukasi atau tugas akademik, yang dipantau dan dikendalikan oleh gelombang otak mereka. Umpan balik langsung diberikan berdasarkan tingkat konsentrasi anak, yang memungkinkan mereka untuk belajar mengatur fokus mereka secara mandiri (Mallikarjun, 2022).

Meskipun potensi BCI dalam pendidikan untuk anak ADHD sangat besar, sebagian besar penelitian yang ada masih terfokus pada aplikasi medis, seperti untuk pasien dengan stroke atau penyakit ALS, sementara penerapan BCI dalam konteks pendidikan untuk ADHD masih sangat terbatas (Elashmawi et al., 2024). Selain itu, pendekatan pembelajaran yang lebih konvensional, seperti sistem token economy, masih banyak digunakan untuk mengelola perilaku anak ADHD, meskipun teknologi yang lebih maju seperti BCI dapat menawarkan solusi yang lebih adaptif dan berbasis data untuk mendukung proses pembelajaran. Oleh karena itu, ada kebutuhan yang mendesak untuk mengisi gap penelitian ini dengan mengembangkan dan mengeksplorasi aplikasi BCI dalam konteks pendidikan, khususnya untuk anak-anak dengan ADHD, untuk menciptakan solusi pembelajaran yang lebih efektif dan terpersonalisasi.

Penelitian ini bertujuan untuk menggali lebih dalam mengenai potensi BCI sebagai teknologi pembelajaran adaptif bagi anak-anak dengan ADHD. Penelitian ini juga akan meninjau literatur terkini mengenai efektivitas BCI dalam konteks pendidikan, serta mengeksplorasi tantangan dan peluang yang ada dalam implementasi teknologi ini di lingkungan pendidikan anak-anak dengan ADHD. Dengan demikian, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan metodologi pembelajaran yang lebih inklusif dan berbasis teknologi, yang dapat membantu anak-anak dengan ADHD untuk mengatasi hambatan yang mereka hadapi dalam proses pendidikan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain studi literatur, wawancara ahli, dan analisis dokumen untuk mengidentifikasi potensi penerapan Brain-Computer Interface (BCI) dalam media pembelajaran adaptif untuk anak dengan ADHD. Studi literatur dilakukan untuk meninjau teori dan temuan terkini terkait penerapan Brain-Computer Interface (BCI) dalam konteks pendidikan anak dengan ADHD, dengan fokus pada pengaruh gelombang otak terhadap pengaturan fokus. Wawancara ahli dilakukan dengan tiga informan utama: seorang ahli neurosains, guru SLB, dan pengembang BCI edukatif, untuk menggali perspektif praktis dan teknis terkait penerapan BCI pada anak ADHD. Analisis dokumen dilakukan dengan mengkaji artikel ilmiah terkait BCI dalam pendidikan, untuk mengidentifikasi kesenjangan riset dalam aplikasi teknologi BCI pada anak ADHD. Analisis data dilakukan secara tematik melalui proses reduksi, penyajian data, dan penarikan kesimpulan, dengan mengacu pada prinsip keabsahan data seperti triangulasi sumber dan teknik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

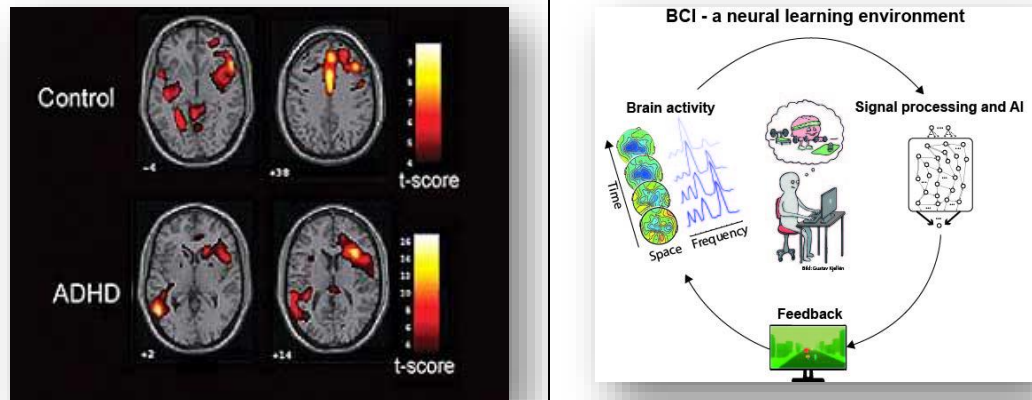
1.1 Korelasi Neurosains ADHD dan Teknologi BCI

Penelitian dalam bidang neuropsikologi dan BCI menunjukkan bahwa pola aktivitas otak anak ADHD khususnya peningkatan rasio gelombang theta/beta dapat dimanfaatkan sebagai indikator fokus dalam sistem BCI berbasis EEG. Karakteristik aktivitas otak anak dengan ADHD memiliki pola khas yang terdeteksi melalui sinyal EEG. Salah satu temuan utama adalah peningkatan rasio gelombang theta/beta, khususnya di area prefrontal cortex (Lee et al., 2023; Montgomery, 2024). Studi terbaru oleh (Guttmann-Flury et al., 2023) mengonfirmasi bahwa pemanfaatan rasio theta/beta sebagai parameter kunci dalam sistem BCI memberikan akurasi tinggi (80-85%) dalam mendeteksi tingkat fokus anak dengan ADHD. Rasio ini digunakan untuk mengendalikan antarmuka pengguna secara real-time, yang menjadi dasar sistem umpan balik pada media pembelajaran adaptif.

“EEG children with ADHD exhibit elevated theta power (4–8 Hz) and diminished beta power (13–30 Hz), a neurobiological marker that can be leveraged in non-invasive BCI” (Guttmann-Flury et al., 2023)

BCI (*Brain-Computer Interface*) untuk ADHD bekerja dengan mendeteksi aktivitas otak melalui sensor non-invasif seperti EEG (*Electroencephalography*) yang dipasang di kulit kepala. Sensor ini merekam gelombang otak, terutama yang berkaitan dengan fokus dan perhatian (seperti gelombang theta dan beta). Data otak tersebut kemudian dianalisis secara real-time oleh perangkat lunak untuk menilai tingkat konsentrasi anak (Zhuang et al., 2020). Hasilnya digunakan untuk memberikan neurofeedback berupa visual atau suara agar anak belajar mengontrol fokusnya kemudian menyesuaikan aktivitas belajar secara otomatis (misalnya, menyederhanakan materi saat konsentrasi menurun). Dengan latihan rutin, anak ADHD dapat meningkatkan kemampuan mengatur fokus dan mengurangi gejala hiperaktivitas.





Gambar 2. *Brain-Computer Interface (BCI)*

Dalam konteks pendidikan, BCI telah digunakan untuk berbagai keperluan, pertama Neurofeedback, Teknik yang memberikan umpan balik waktu nyata terhadap aktivitas otak. Tujuannya adalah untuk membantu pengguna belajar mengatur pola pikir mereka secara sadar. Dalam kasus ADHD, neurofeedback terbukti dapat meningkatkan perhatian dan menurunkan hiperaktivitas (Patil et al., 2022). Kedua pemantauan beban kognitif, BCI dapat digunakan untuk menilai tingkat kesulitan yang dihadapi siswa dalam pembelajaran secara real time, dan menyesuaikan materi berdasarkan tingkat beban kognitif tersebut (Jamil et al., 2021). Ketiga Intervensi berbasis game, Beberapa sistem pendidikan yang mengintegrasikan BCI menggunakan game edukatif yang merespons gelombang otak siswa untuk meningkatkan *engagement* dan motivasi belajar (Raza et al., 2025).

3.2 Media Pembelajaran Adaptif yang Ada

Media pembelajaran adaptif adalah sistem yang dapat menyesuaikan konten, kecepatan penyampaian, serta bentuk penyajian materi sesuai dengan kebutuhan dan respons pengguna. Sistem ini biasanya didukung oleh teknologi kecerdasan buatan dan sensor umpan balik untuk memahami karakteristik individu, termasuk gaya belajar, tingkat kesulitan yang dihadapi, dan performa waktu nyata (Chen et al., 2020).

Dalam konteks anak ADHD, media pembelajaran adaptif sangat potensial karena mampu merespons perubahan fokus atau minat siswa dengan cepat. Misalnya, ketika sistem mendeteksi turunnya konsentrasi berdasarkan data EEG, materi dapat disederhanakan atau diselingi dengan aktivitas interaktif untuk menarik kembali perhatian siswa.

Hasil literatur menunjukkan bahwa meskipun banyak media pembelajaran adaptif untuk anak ADHD telah dikembangkan (misalnya: Kahoot!, ClassDojo, dan BrainPop), sebagian besar belum memanfaatkan data fisiologis secara real-time. Sistem adaptasi biasanya berbasis input manual (guru/orangtua) atau hasil observasi perilaku (Mouzakitis et al., 2020). Literatur menekankan bahwa sistem pembelajaran berbasis fisiologis seperti BCI belum banyak diterapkan dalam ruang kelas reguler atau SLB, karena kompleksitas teknologi dan minimnya interdisipliner antara teknolog dan pendidik (Van der Meer et al., 2023).

Dalam konteks pendidikan, karakteristik kognitif anak ADHD berdampak signifikan terhadap proses belajar. Kesulitan mempertahankan fokus menyebabkan anak sulit menyelesaikan tugas belajar dalam waktu yang ditentukan, sering berpindah aktivitas, serta gagal menangkap instruksi secara utuh. Sementara itu, perilaku hiperaktif dan impulsif membuat mereka sulit untuk duduk diam, menginterupsi guru, dan sering bertindak tanpa berpikir, yang pada akhirnya mengganggu lingkungan belajar di kelas (DuPaul & Stoner, 2014).

Penelitian menunjukkan bahwa anak dengan ADHD membutuhkan pendekatan belajar yang lebih fleksibel, menarik secara visual, dan dapat memberikan umpan balik secara langsung. Intervensi berbasis teknologi mulai dilirik sebagai alternatif metode pembelajaran yang lebih efektif untuk anak-anak dengan gangguan ini.

3.3 Temuan dari Wawancara Ahli

Penelitian ini melakukan wawancara semi-terstruktur terhadap tiga informan ahli, yaitu seorang ahli neurosains, seorang guru Sekolah Luar Biasa (SLB), dan seorang pengembang *Brain-Computer Interface (BCI)* edukatif.

Dari sudut pandang neurosains, BCI memiliki potensi dalam mendeteksi gejala hiperaktivitas pada anak ADHD melalui pemantauan sinyal otak, khususnya peningkatan gelombang beta (13–30 Hz). Ahli ini menekankan pentingnya pengolahan sinyal (*noise filtering*) yang lebih canggih pada perangkat EEG untuk anak ADHD. Anak ADHD umumnya sulit duduk diam, sehingga menyebabkan artefak gerak yang mengganggu akurasi pembacaan EEG. Sebagaimana dikutip dari wawancara:

“BCI bisa mendeteksi hiperaktivitas melalui peningkatan sinyal beta (13–30 Hz), tapi perlu filter noise untuk anak yang sering bergerak.”

(Wawancara, Neurosains – 2025)

Hal ini penting untuk memastikan bahwa sinyal otak yang terekam mencerminkan aktivitas kognitif anak secara valid, bukan gangguan akibat gerakan fisik yang tidak relevan. Pengembangan perangkat EEG yang mampu mengeliminasi gangguan ini menjadi syarat krusial dalam memastikan efektivitas diagnostik dan responsivitas sistem BCI terhadap kondisi nyata anak ADHD.

Kebutuhan utama dari sisi pengguna akhir (guru) adalah antarmuka visual yang intuitif, guru SLB mengemukakan bahwa antarmuka sistem BCI harus didesain dengan mempertimbangkan kesederhanaan dan keterbacaan. Guru lebih menginginkan indikator visual sederhana seperti indikator fokus (lampu hijau-kuning-merah) dibandingkan data numerik EEG mentah. Guru tidak memiliki latar belakang teknis untuk menginterpretasikan data EEG mentah, sehingga sistem perlu menyediakan representasi visual yang intuitif. Pernyataan guru SLB tersebut terekam dalam kutipan berikut:

“Sistem harus sederhana; guru butuh antarmuka yang jelas, bukan raw EEG data.”
(Wawancara, Guru SLB – 2025)

Sementara itu, dari sisi teknis pengembangan perangkat, Masalah utama dalam desain sistem BCI untuk pendidikan adalah latensi umpan balik, yang saat ini masih berada pada kisaran 2 detik. Prototipe yang ada saat ini, seperti *headband* EEG Muse, masih memiliki keterlambatan umpan balik di atas dua detik. Padahal, untuk anak ADHD, keterlambatan ini terlalu lama dan berpotensi mengurangi efektivitas sistem dalam memberikan reward instan yang dapat mempertahankan fokus mereka. Idealnya,

sistem BCI untuk tujuan edukatif pada anak ADHD harus mampu memberikan umpan balik dalam waktu kurang dari satu detik. Sebagaimana disampaikan dalam wawancara:

“Prototipe headband EEG seperti Muse bisa diadaptasi, tapi latency masih di atas 2 detik – kurang responsif untuk ADHD.” (Wawancara, Pengembang – 2025)

Dari integrasi ketiga sumber data (literatur, wawancara, dan dokumen), diperoleh beberapa poin utama:

Tabel 1. Temuan Penelitian

Fokus	Temuan	Implikasi
Neurobiologis	Rasio theta/beta dapat menjadi parameter kunci sistem BCI	Validasi EEG ADHD membuka peluang sistem deteksi fokus real-time
Teknis	Latensi dan noise menjadi kendala utama BCI untuk anak aktif	Perlu R&D lebih lanjut pada sistem pemrosesan sinyal cepat dan anti-artefak
Pendidikan	Guru butuh antarmuka simpel, bukan data mentah EEG	Desain antarmuka harus berbasis visualisasi sederhana
Penelitian	Kesenjangan studi pada ADHD dan konteks sekolah inklusif	Diperlukan studi lanjutan dengan fokus populasi ADHD dan pendekatan desain partisipatif

3.4 Desain Konseptual Media Pembelajaran Adaptif Berbasis BCI

Berdasarkan sintesis literatur dari jurnal-jurnal terkini (Gao et al., 2021; Hramov et al., 2021; Zhang et al., 2023), media pembelajaran berbasis BCI dapat dirancang dalam bentuk game neurofeedback adaptif. Berikut ini adalah desain konseptual awal yang disarikan dari studi lintas disiplin:

a. Komponen Inti Desain:

- EEG Headset Non-invasif: digunakan untuk membaca aktivitas otak pengguna secara real-time
- Algoritma Pemantauan Fokus (Attention Detection): mendeteksi gelombang beta dan theta untuk mengukur tingkat konsentrasi
- Adaptive Feedback System: sistem yang mengubah tingkat kesulitan permainan berdasarkan level atensi anak
- Dashboard Analitik untuk Guru dan Orang Tua: menampilkan grafik perkembangan fokus dan area perhatian kritis

b. Contoh Implementasi:

Game edukatif bertema "Petualangan Otak", di mana anak mengendalikan karakter berdasarkan level fokus. Jika fokus tinggi, karakter akan bergerak cepat dan menyelesaikan

tantangan logika; jika fokus rendah, permainan akan menyajikan aktivitas penyegar (recovery loop) seperti permainan suara atau gambar yang menarik perhatian kembali. Desain ini terinspirasi dari proyek-proyek seperti *Focus Pocus* (Jörgens, 2022) dan *NeuroRacer* (Tewthanom et al., 2023), yang terbukti mampu meningkatkan kapasitas atensi anak ADHD secara bertahap dan terstruktur.

3.5 Identifikasi Tantangan Teknis dan Non-Teknis

a. Tantangan Teknis

- a. Akurasi Deteksi EEG di Usia Dini
Banyak perangkat BCI komersial seperti *Emotiv* atau *NeuroSky* masih belum optimal dalam mendeteksi sinyal otak anak karena ukuran kepala dan interferensi gerak (Tewthanom et al., 2023)
- b. Latency dan Kualitas Respons Real-Time
Sistem real-time BCI masih menghadapi latency dalam feedback loop, sehingga tantangan dalam desain game adaptif menjadi signifikan (Ahmed et al., 2025)
- c. Kalibrasi dan Individualisasi
Proses kalibrasi awal untuk masing-masing anak memerlukan waktu dan panduan yang presisi, termasuk pengaturan baseline fokus individu (Alexopoulou et al., 2025)

b. Tantangan Non-Teknis

- a. Biaya Perangkat dan Akses Teknologi
Harga headset EEG dengan spesifikasi edukatif berkisar antara \$300–\$800, yang belum terjangkau untuk sebagian besar sekolah di daerah (Alexopoulou et al., 2025)
- b. Kurangnya SDM Terlatih
Guru di sekolah inklusif umumnya belum familiar dengan teknologi neuroedukasi, sehingga perlu pelatihan intensif (Xia et al., 2024).
- c. Isu Etika dan Keamanan Data
Penggunaan data otak anak menimbulkan kekhawatiran terhadap privasi dan penyalahgunaan informasi biometrik

3.6 Implikasi Hasil dan Rekomendasi Pengembangan

- a. Perlunya kolaborasi antara pengembang teknologi, ahli psikologi anak, dan pendidik dalam membangun sistem yang benar-benar sesuai dengan karakteristik lokal.
- b. Pengembangan prototipe low-cost BCI untuk pendidikan di negara berkembang menjadi prioritas untuk pemerataan akses.
- c. Regulasi nasional perlu mengatur penggunaan teknologi neuro dalam konteks pendidikan untuk melindungi hak-hak anak.

Integrasi neurofeedback sebagai bagian dari kurikulum intervensi bagi anak ADHD patut dikaji lebih lanjut dalam pilot project lintas sekolah inklusif.

SIMPULAN

Penelitian ini mengungkapkan bahwa teknologi Brain-Computer Interface (BCI) memiliki potensi besar sebagai media pembelajaran adaptif bagi anak dengan Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD). Dengan memanfaatkan pola aktivitas otak, khususnya rasio gelombang theta/beta, BCI memungkinkan sistem untuk mendeteksi tingkat fokus anak secara real-time dan memberikan umpan balik yang sesuai. Studi literatur, wawancara ahli, dan analisis dokumen menunjukkan bahwa implementasi BCI dalam pendidikan inklusif masih minim, terutama dalam konteks anak ADHD.

Kendala utama yang ditemukan adalah pada aspek teknis seperti latensi respons (>2 detik) dan gangguan sinyal akibat gerakan fisik anak, serta kebutuhan desain antarmuka yang sederhana dan mudah dipahami oleh guru. Temuan ini menunjukkan bahwa media pembelajaran yang ada belum sepenuhnya memanfaatkan data neurofisiologis secara langsung.

Penelitian ini merekomendasikan pengembangan prototipe media pembelajaran adaptif berbasis BCI yang terjangkau, intuitif, cepat merespons, serta sesuai dengan kondisi anak ADHD di lingkungan lokal. Pengembangan lebih lanjut perlu melibatkan kolaborasi antara ahli neurosains, teknolog pendidikan, dan praktisi sekolah inklusif.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, B., Khan, S., Lim, H., & Ku, J. (2025). Challenges and Opportunities of Gamified BCI and BMI on Disabled People Learning: A Systematic Review. *Electronics*, 14(3), 491.
- Alexopoulou, A., Pergantis, P., Koutsojannis, C., Triantafyllou, V., & Drigas, A. (2025). Non-Invasive BCI-VR Applied Protocols as Intervention Paradigms on School-Aged Subjects with ASD: A Systematic Review. *Sensors*, 25(5), 1342.
- Aricò, P., Borghini, G., Graziani, I., Taya, F., Sun, Y., Bezerianos, A., Thakor, N. V., Cincotti, F., & Babiloni, F. (2014). Towards a multimodal bioelectrical framework for the online mental workload evaluation. *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 3001–3004.
- Chen, L., Chen, P., & Lin, Z. (2020). Artificial intelligence in education: A review. *Ieee Access*, 8, 75264–75278.
- Demetriou, P. (2014). An Exhibition of Hidden Stories: The Young Voices Soundscape-Examining Sound and Silence as a Collective Experience in Sound Art Installation. *HARTS & Minds*, 1(4).
- DuPaul, G. J., & Stoner, G. (2014). *ADHD in the schools: Assessment and intervention strategies*. Guilford Publications.
- Elashmawi, W. H., Ayman, A., Antoun, M., Mohamed, H., Mohamed, S. E., Amr, H., Talaat, Y., & Ali, A. (2024). A Comprehensive Review on Brain-Computer Interface (BCI)-Based Machine and Deep Learning Algorithms for Stroke Rehabilitation. *Applied Sciences*, 14(14), 6347.
- Gao, X., Wang, Y., Chen, X., & Gao, S. (2021). Interface, interaction, and intelligence in generalized brain-computer interfaces. *Trends in Cognitive Sciences*, 25(8), 671–684.
- Guttmann-Flury, E., Sheng, X., & Zhu, X. (2023). Channel selection from source localization: A review of four EEG-based brain-computer interfaces paradigms. *Behavior Research Methods*, 55(4), 1980–2003.
- Hassanien, A. E., & Azar, A. A. (2015). Brain-computer interfaces. *Switzerland: Springer*, 74.
- Hramov, A. E., Maksimenko, V. A., & Pisarchik, A. N. (2021). Physical principles of brain-computer interfaces and their applications for rehabilitation, robotics and control of human brain states. *Physics Reports*, 918, 1–133.
- Jamil, N., Belkacem, A. N., Ouhbi, S., & Guger, C. (2021). Cognitive and affective brain-computer interfaces for improving learning strategies and enhancing student capabilities: A systematic literature review. *Ieee Access*, 9, 134122–134147.

- Jörgens, J. J. (2022). *Portable EEG neurofeedback training applied at home or school to treat children's symptoms of ADHD*.
- Kemenkes RI, R. I. (2022). Profil kesehatan indonesia 2021. *Pusdatin. Kemenkes. Go. Id*, 63.
- Kusuma, P. J., & Pustaka, D. (2025). *Mengenal Lebih Dekat Anak Berkebutuhan Khusus (ABK)*. Detak Pustaka.
- Lee, C. S. C., Chen, T., Gao, Q., Hua, C., Song, R., & Huang, X. (2023). The effects of theta/beta-based neurofeedback training on attention in children with attention deficit hyperactivity disorder: a systematic review and meta-analysis. *Child Psychiatry & Human Development*, 54(6), 1577–1606.
- Lim, C. G., Poh, X. W. W., Fung, S. S. D., Guan, C., Bautista, D., Cheung, Y. B., Zhang, H., Yeo, S. N., Krishnan, R., & Lee, T. S. (2019). A randomized controlled trial of a brain-computer interface based attention training program for ADHD. *PloS One*, 14(5), e0216225.
- Mallikarjun, H. M. (2022). Mental State Evaluation with Machine Learning by utilizing Brain Signals. *2022 Fourth International Conference on Cognitive Computing and Information Processing (CCIP)*, 1–6.
- Montgomery, R. M. (2024). *ADHD Neuroanatomy and Brain Wave Characteristics: A Comprehensive*.
- Mühl, C., Allison, B., Nijholt, A., & Chanel, G. (2014). A survey of affective brain computer interfaces: principles, state-of-the-art, and challenges. *Brain-Computer Interfaces*, 1(2), 66–84.
- Patil, A. U., Madathil, D., Fan, Y.-T., Tzeng, O. J. L., Huang, C.-M., & Huang, H.-W. (2022). Neurofeedback for the education of children with ADHD and specific learning disorders: a review. *Brain Sciences*, 12(9), 1238.
- Polanczyk, G. V., Salum, G. A., Sugaya, L. S., Caye, A., & Rohde, L. A. (2015). Annual research review: A meta-analysis of the worldwide prevalence of mental disorders in children and adolescents. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 56(3), 345–365.
- Raza, M. Z., Omais, M., Arshad, H. M. E., Maqsood, M., & Nadeem, A. A. (2025). Effectiveness of *Brain-Computer Interface (BCI)*-based attention training game system for symptom reduction, behavioral enhancement, and brain function modulation in children with ADHD: A systematic review and single-arm meta-analysis. *NeuroRegulation*, 12(1), 51.
- Schaefer, M., Cherkasskiy, L., Denke, C., Spies, C., Song, H., Malahy, S., Heinz, A., Ströhle, A., Schäfer, M., & Mianroudi, N. (2020). Empathy-related brain activity in somatosensory cortex protects from tactile priming effects: a pilot study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, 142.
- Shah, A., Banner, N., Heginbotham, C., & Fulford, B. (2014). 7. American Psychiatric Association (2013) Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, 5th edn. American Psychiatric Publishing, Arlington, VA. 8. Bechara, A., Dolan, S. and Hindes, A. (2002) Decision-making and addiction (Part II): myopia for the future or hypersensitivity to reward? *Neuropsychologia*, 40, 1690–1705. 9. Office of Public Sector Information (2005) The Mental Capacity Act 2005. <http://www.Substance Use and Older People>, 21(5), 9.
- Tewthanom, K., Sukasi, S., Lerspalungsanti, S., & Srisawat, F. (2023). The potential competency outcome of vigorous brain training game in the elderly: A systematic review. *Health Science Reports*, 6(7), e1406.
- Thomas, R., Sanders, S., Doust, J., Beller, E., & Glasziou, P. (2015). Prevalence of attention-deficit/hyperactivity disorder: a systematic review and meta-analysis. *Pediatrics*, 135(4), e994–e1001.
- Van der Meer, N., van der Werf, V., Brinkman, W.-P., & Specht, M. (2023). Virtual reality and collaborative learning: A systematic literature review. *Frontiers in Virtual Reality*, 4, 1159905.
- Wolpaw, J. R. (2013). Brain-computer interfaces. In *Handbook of clinical neurology* (Vol. 110, pp.

67-74). Elsevier.

- Xia, Q., Chiu, T. K. F., & Li, X. (2024). A scoping review of BCIs for learning regulation in mainstream educational contexts. *Behaviour & Information Technology*, 43(10), 2096-2117.
- Zhang, J., Li, J., Huang, Z., Huang, D., Yu, H., & Li, Z. (2023). Recent progress in wearable brain-computer interface (BCI) devices based on electroencephalogram (EEG) for medical applications: a review. *Health Data Science*, 3, 96.
- Zhuang, M., Wu, Q., Wan, F., & Hu, Y. (2020). State-of-the-art non-invasive brain-computer interface for neural rehabilitation: A review. *Journal of Neurorestoratology*, 8(1), 12-25.