

Desain Instruksional Berbasis Neurosains dalam Eksplorasi Dampak Manajemen Beban Kognitif terhadap Hasil Belajar STEM

Supratpi*¹, Lasarus Arintoko², Paulus Oenjoyo³

¹Fakultas Studi Akademik, Universitas Sains dan Teknologi Komputer, Semarang, Indonesia, E-mail: suprapti@stekom.ac.id

²Fakultas Studi Akademik, Universitas Sains dan Teknologi Komputer, Semarang, Indonesia, E-mail: lasarus@politeknik-pratama.ac.id

³Fakultas Studi Akademik, Universitas Sains dan Teknologi Komputer, Semarang, Indonesia, E-mail: paulusoenjoyo@stekom.ac.id

Article Info	Abstract
Keywords: Cognitive Load Neuroscience-Informed Instruction STEM Learning	<i>This study explores the integration of neuroscience-informed instructional design in STEM education, emphasizing the role of cognitive load management in enhancing learning outcomes. Using a quasi-experimental pretest–posttest control group design, the research involved 60 high school students divided into experimental and control groups. The instructional design for the experimental group was developed based on Cognitive Load Theory and neuroscience principles such as chunking, dual coding, and attention-focused scaffolding. Data were collected through standardized tests, EEG headbands, and attention trackers to measure both cognitive performance and neurobiological responses. Results showed that students in the experimental group achieved significantly higher posttest scores, with an average improvement of 25 points compared to the control group ($p < 0.05$; large effect size). EEG data further indicated that the experimental group demonstrated higher and more consistent levels of cognitive focus throughout the learning sessions. These findings highlight the importance of aligning instructional strategies with brain-based principles to optimize STEM learning, particularly in cognitively demanding contexts. The study contributes a practical framework for neuroscience-informed pedagogy and provides empirical evidence of its effectiveness in reducing cognitive overload while improving student engagement.</i>

Submitted: October 2025, Reviewed: October 2025, Accepted: November 2025

*Corresponding Author

I. PENDAHULUAN

Pendidikan abad ke-21 menuntut siswa untuk memiliki keterampilan yang kompleks dan saling terintegrasi, terutama dalam bidang STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*). Keterampilan berpikir kritis, pemecahan masalah, serta literasi digital menjadi faktor utama dalam membentuk generasi yang adaptif terhadap perkembangan teknologi dan inovasi global (Lin et al., 2023). Namun, karakteristik materi STEM yang abstrak dan padat informasi sering menimbulkan tantangan dalam proses belajar. Siswa dituntut untuk memproses konsep-konsep sulit dalam waktu singkat, sehingga risiko terjadinya cognitive overload semakin tinggi (Ssu-Kuang et al., 2023).

Fenomena beban kognitif berlebih muncul ketika kapasitas memori kerja siswa tidak mampu menampung informasi yang disajikan. Kondisi ini menghambat pemahaman materi serta mengurangi kemungkinan informasi tersimpan dalam memori jangka panjang (Alexander & Xu, 2022). Dalam pembelajaran STEM, kompleksitas topik dan kecepatan penyampaian yang kurang sesuai ritme kognitif siswa semakin memperparah situasi (Maulidah et al., 2025). Oleh karena itu, strategi instruksional yang mampu mengelola beban kognitif menjadi kebutuhan penting agar proses pembelajaran lebih efektif dan bermakna (Sari et al., 2024).

Kemajuan *neurosains* kognitif menawarkan perspektif baru dalam memahami cara otak memproses dan menyimpan informasi (Angraeni, 2022; Khoirunnisa et al., 2022). Penelitian *neurosains* pendidikan menunjukkan bahwa faktor-faktor seperti atensi, emosi, serta kapasitas memori kerja berperan penting dalam efektivitas belajar (Brignol et al., 2024). Pendekatan berbasis *neurosains* memungkinkan guru merancang pembelajaran yang selaras dengan mekanisme biologis otak. Strategi ini berpotensi meningkatkan keterlibatan siswa sekaligus mengurangi risiko beban kognitif yang berlebihan (Nelson et al., 2024).

Meskipun *Cognitive Load Theory* (CLT) telah banyak digunakan untuk merancang strategi pembelajaran, sebagian besar penerapannya masih terbatas pada aspek psikologis. CLT membedakan beban kognitif menjadi tiga: intrinsik (kompleksitas materi), ekstrinsik (cara penyajian), dan germane (usaha mental untuk mengolah informasi). Desain pembelajaran yang efektif bertujuan menekan beban ekstrinsik, mengelola beban intrinsik, serta mengoptimalkan beban germane (Barbieri & Rodrigues, 2025). Namun, penelitian yang menggabungkan CLT dengan indikator *neurosains*, seperti data EEG atau pelacak atensi, masih sangat jarang dilakukan, terutama dalam konteks pendidikan STEM di Indonesia.

Studi-studi sebelumnya, misalnya oleh (Jeong et al., 2024), menekankan pentingnya strategi instruksional bertahap untuk menghindari *split-attention effect*. Akan tetapi, sebagian besar penelitian masih mengandalkan instrumen kuesioner atau observasi, tanpa memanfaatkan data neurobiologis secara real-time. Padahal, teknologi seperti EEG *headband* memungkinkan pengukuran fokus dan aktivitas otak secara langsung selama pembelajaran berlangsung, yang dapat memberikan gambaran objektif tentang dinamika beban kognitif siswa (Kirwan et al., 2023). Selain itu, penggunaan perangkat *neurofeedback* dapat membantu guru memantau dan menyesuaikan strategi pembelajaran secara adaptif sesuai kondisi kognitif siswa.

Kondisi pendidikan STEM di Indonesia juga menunjukkan urgensi perbaikan. Hasil PISA 2018 melaporkan bahwa skor literasi matematika siswa Indonesia hanya 379, jauh di bawah rata-rata OECD sebesar 489, sedangkan skor literasi sains hanya mencapai 396 (Ulkhay et al., 2024). Fakta ini menunjukkan adanya permasalahan struktural dalam efektivitas desain instruksional di sekolah. Hal ini mengindikasikan perlunya intervensi yang lebih mendalam dalam strategi pengajaran STEM di berbagai jenjang pendidikan.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan mengintegrasikan prinsip *neurosains* dengan CLT dalam merancang desain instruksional STEM. Secara teoretis, penelitian ini memperkuat hubungan antara pedagogi berbasis beban kognitif dengan indikator neurobiologis. Secara metodologis, studi ini menggunakan pendekatan kuasi-eksperimen dengan *pretest-posttest*, melibatkan 60 siswa, serta memanfaatkan EEG headband untuk memantau fokus belajar. Secara praktis, penelitian ini menghasilkan model instruksional yang dapat digunakan guru untuk mengelola beban kognitif siswa.

Novelty dari penelitian ini terletak pada penggunaan data EEG secara langsung untuk mengevaluasi efektivitas desain instruksional STEM dalam konteks Indonesia. Sejauh pengetahuan penulis, penelitian ini merupakan salah satu yang pertama menggabungkan CLT dengan indikator neurobiologis dalam lingkungan kelas nyata di Indonesia. Dengan demikian, studi ini tidak hanya menawarkan kontribusi teoritis, tetapi juga memberikan solusi praktis yang relevan bagi peningkatan mutu pembelajaran STEM di sekolah. Inovasi ini membuka peluang bagi pengembangan sistem pembelajaran berbasis data yang lebih presisi dan terukur.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Neurosains dalam Pendidikan dan Relevansinya terhadap STEM

Perkembangan *neurosains* dalam dua dekade terakhir telah memberikan kontribusi besar terhadap pemahaman mekanisme belajar manusia. *Neurosains* pendidikan—sebuah bidang interdisipliner yang menggabungkan prinsip *neurosains*, psikologi kognitif, dan pedagogi—memberikan kerangka kerja baru untuk merancang pengalaman belajar yang lebih selaras dengan fungsi otak. Pendekatan ini mengkaji bagaimana otak memproses informasi, menyimpan memori, mengarahkan atensi, dan mengelola beban kognitif dalam situasi pembelajaran nyata (Cian et al., 2022). Dalam konteks pendidikan STEM yang bersifat kompleks dan abstrak, pendekatan berbasis *neurosains* memberikan potensi besar untuk merancang strategi pembelajaran yang tidak hanya efektif secara kognitif, tetapi juga mendukung proses biologis pembelajaran.

Pembelajaran STEM sering kali melibatkan pemahaman atas konsep-konsep tinggi yang memerlukan manipulasi simbolik, pemikiran logis, dan visualisasi mental yang kompleks. Hal ini menyebabkan beban kognitif siswa meningkat, terutama ketika materi disampaikan dalam format yang tidak sesuai dengan kapasitas memori kerja otak (Kroeper et al., 2022). Oleh karena itu, memahami bagaimana otak bekerja dalam memproses informasi menjadi kunci untuk merancang pendekatan instruksional yang adaptif. *Neurosains* pendidikan, dalam hal ini, memberikan kontribusi penting dengan mengidentifikasi batasan kapasitas perhatian dan memori kerja, serta memberikan arahan dalam merancang intervensi instruksional berbasis data biologis (Ouyang et al., 2023).

B. Cognitive Load Theory dan Desain Instruksional STEM

Cognitive Load Theory (CLT) yang dikembangkan oleh Sweller (2011) memberikan landasan kuat bagi desain instruksional berbasis ilmiah. CLT menyatakan bahwa memori kerja manusia memiliki kapasitas

yang terbatas, dan jika informasi yang diberikan terlalu kompleks atau terlalu banyak, maka siswa akan mengalami kelebihan beban kognitif (*cognitive overload*) yang menghambat proses belajar (Lui et al., 2023). Teori ini membedakan antara tiga jenis beban: *intrinsik* (kompleksitas materi), *ekstrinsik* (cara informasi disajikan), dan *germane* (usaha mental untuk mengintegrasikan informasi baru). Tujuan desain pembelajaran yang efektif adalah meminimalkan beban ekstrinsik, mengelola beban intrinsik, dan mengoptimalkan beban germane (Alexander & Xu, 2022).

Dalam konteks STEM, beban intrinsik sering kali tidak dapat dihindari karena sifat materi yang memang kompleks. Namun, beban ekstrinsik yang dihasilkan dari desain pembelajaran yang buruk dapat ditekan melalui penggunaan strategi seperti chunking informasi, dual coding (penggunaan teks dan visual secara terintegrasi), *scaffolding*, dan segmentasi materi (Evans et al., 2024). Studi Evans juga menunjukkan bahwa penyajian multimodal yang sinkron dapat meningkatkan pemahaman siswa terhadap materi kompleks. Sayangnya, sebagian besar aplikasi CLT dalam praktik pembelajaran masih terbatas pada prinsip-prinsip kognitif umum dan belum mempertimbangkan indikator *neurosains* secara eksplisit.

C. Integrasi Neurosains dan CLT: Masih Terfragmentasi

Meskipun baik CLT maupun *neurosains* memberikan kerangka kerja yang solid untuk desain pembelajaran, penelitian yang secara sistematis menggabungkan keduanya masih sangat terbatas. Sebagian besar studi hanya mengandalkan teori psikologi kognitif dan instrumen perseptual (seperti angket atau observasi perilaku) untuk mengukur beban kognitif. Sementara itu, pendekatan *neurosains* cenderung terfokus pada eksplorasi konseptual atau eksperimental di laboratorium, dan belum sepenuhnya diimplementasikan dalam desain kurikulum atau materi pembelajaran yang bersifat praktis (Goergen et al., 2023).

Sebagai contoh, penelitian (Boon et al., 2025) dan (Isacoff, 2024) memberikan wawasan yang sangat berharga tentang struktur otak dan pengaruhnya terhadap perhatian, emosi, dan motivasi dalam belajar. Namun, studi-studi tersebut tidak menyajikan bagaimana wawasan tersebut dapat diterjemahkan ke dalam strategi pembelajaran yang konkret. Hal ini menyebabkan kesenjangan antara teori dan praktik yang masih cukup besar. Padahal, dengan kemajuan teknologi pengukuran aktivitas otak seperti EEG (*electroencephalography*) dan pelacak perhatian (*attention tracker*), kini dimungkinkan untuk secara langsung mengamati beban kognitif dan atensi siswa secara real-time selama proses belajar berlangsung.

D. Studi Terkini: Mengintegrasikan Data Neurofisiologis

Studi yang lebih baru mulai mengeksplorasi penggunaan data fisiologis untuk mendukung proses belajar. (Gholamipourbarogh et al., 2023) mengembangkan sistem pembelajaran adaptif berbasis sinyal neurokognitif siswa yang dikumpulkan melalui EEG dan *eye-tracking*. Sistem tersebut mampu menyesuaikan materi dengan tingkat fokus dan beban kognitif siswa secara *real-time*, dan terbukti meningkatkan engagement serta hasil belajar secara signifikan. Penelitian lain oleh (Kirwan et al., 2023) menggunakan data EEG untuk mendeteksi aktivitas prefrontal cortex siswa selama pembelajaran sains,

dan menemukan bahwa peningkatan fokus berkorelasi langsung dengan keberhasilan menyelesaikan tugas kognitif kompleks. Namun, meskipun menjanjikan, pendekatan ini masih belum banyak diterapkan dalam pengembangan desain instruksional STEM yang terstruktur secara pedagogis.

Dalam kajian lain, (Ren et al., 2022) mengembangkan skala validasi untuk mengukur beban kognitif berbasis persepsi siswa. Meskipun secara psikometrik instrumen ini valid dan reliabel, pendekatan ini tidak cukup untuk mengungkap dinamika beban kognitif secara *real-time* (Zhu et al., 2022). Maka dari itu, dibutuhkan metode triangulasi yang menggabungkan instrumen persepsi dengan data neurobiologis agar pengukuran beban kognitif menjadi lebih holistik dan objektif. Keterbatasan seperti ini yang coba diatasi melalui studi terkini, tetapi hingga kini belum banyak penelitian yang secara eksplisit menghubungkan strategi instruksional, teori CLT, dan pengukuran neurobiologis dalam satu model pembelajaran yang terintegrasi.

E. Perbandingan Studi Sebelumnya dan Identifikasi Kesenjangan

Perbandingan antara berbagai studi menunjukkan bahwa masih terdapat pemisahan yang jelas antara pendekatan berbasis teori kognitif dan pendekatan berbasis data *neurosains*. Studi-studi yang mengadopsi CLT biasanya terbatas pada desain konten dan strategi penyampaian, sementara studi *neurosains* cenderung mengeksplorasi proses mental internal siswa tanpa membentuk kerangka pembelajaran yang terstruktur. Studi oleh (Wu et al., 2022), misalnya, mengkaji beban kognitif dalam pembelajaran matematika dan fisika tingkat lanjut, dan menunjukkan bahwa materi yang tidak disajikan secara bertahap dapat meningkatkan risiko *overload*. Namun, studi ini hanya menggunakan angket dan observasi, tanpa dukungan data neurofisiologis yang lebih objektif. Rangkuman perbandingan beberapa studi relevan yang menunjukkan perbedaan fokus, temuan, serta keterbatasan masing-masing penelitian disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Studi Terkait

Peneliti (Tahun)	Fokus Studi	Konteks Aplikasi	Temuan Utama	Keterbatasan
(Tabatabaee et al., 2024)	Penerapan Cognitive Load Theory (CLT) dalam desain instruksional	Materi pembelajaran kompleks (terutama STEM)	Beban kognitif berlebih dapat menghambat penyimpanan informasi ke memori jangka panjang	Belum mengaitkan secara langsung dengan indikator <i>neurosains</i> seperti aktivitas otak
(Mitsea et al., 2022)	Pengaruh struktur dan fungsi otak dalam strategi pembelajaran	Fungsi kognitif (perhatian, emosi, motivasi) dalam konteks belajar	Pengetahuan tentang otak mendukung strategi pengajaran yang lebih efektif	Studi lebih bersifat konseptual dan belum terintegrasi langsung ke desain pembelajaran STEM
(Wu et al., 2022)	Beban kognitif dalam pembelajaran STEM tingkat lanjut	Materi matematika dan fisika tingkat tinggi	Kompleksitas materi meningkatkan beban kognitif jika tidak ditopang strategi bertahap	Tidak menggunakan pengukuran indikator neurofisiologis seperti EEG atau attention tracker

F. Identifikasi Gap dan Kontribusi Penelitian

Berbagai studi sebelumnya telah menyoroti pentingnya manajemen beban kognitif dalam pembelajaran serta peran *neurosains* dalam mendukung proses pendidikan. Namun, masih terdapat kesenjangan yang signifikan dalam mengintegrasikan kedua pendekatan ini, khususnya dalam konteks pembelajaran STEM. Sebagian besar penelitian hanya membahas aspek beban kognitif dari sudut pandang psikologi kognitif tanpa memasukkan indikator neurobiologis seperti rentang perhatian dan kapasitas memori kerja. Sementara itu, pendekatan *neurosains* dalam pendidikan cenderung bersifat teoretis atau eksperimental dan jarang diaplikasikan secara langsung dalam pengembangan strategi pembelajaran di ruang kelas.

Desain instruksional berbasis temuan *neurosains* masih sangat terbatas dalam literatur terkait pembelajaran STEM. Padahal, materi pembelajaran dalam STEM memiliki karakteristik kompleks dan menuntut pemrosesan informasi yang intensif, yang jika tidak ditangani dengan strategi pengajaran yang tepat, dapat menyebabkan kelebihan beban kognitif. Studi-studi yang secara langsung menghubungkan desain pembelajaran berbasis teori kognitif dengan indikator *neurosains* dalam konteks STEM sangat jarang ditemukan. Hal ini menunjukkan masih kurangnya pemanfaatan data neurobiologis secara real-time dalam menilai efektivitas strategi pembelajaran yang diterapkan. Kondisi ini membutuhkan integrasi pendekatan yang tidak hanya bersifat konseptual, tetapi juga berbasis data empirik untuk meningkatkan efektivitas pembelajaran.

Penelitian ini hadir untuk menjawab gap tersebut dengan menggabungkan pendekatan desain instruksional dan *neurosains* pendidikan dalam satu kerangka kerja yang menyeluruh. Secara teoretis, penelitian ini memperkaya literatur dengan menawarkan konsep desain pembelajaran yang mempertimbangkan cara kerja otak secara ilmiah. Dari sisi metodologi, studi ini mengembangkan pendekatan evaluasi yang tidak hanya mengandalkan hasil tes, melainkan juga mempertimbangkan indikator kognitif seperti fokus dan kapasitas memori siswa. Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat membantu guru dan pengembang kurikulum dalam menciptakan strategi pengajaran yang sesuai dengan kapasitas kognitif siswa, khususnya dalam menghadapi kompleksitas materi STEM.

Kontribusi penelitian ini tidak hanya memperkuat hubungan antara teori kognitif dan *neurosains* pendidikan, tetapi juga menawarkan solusi praktis untuk meningkatkan efektivitas pembelajaran STEM. Dengan memanfaatkan pendekatan berbasis data dan pemahaman mendalam mengenai proses kerja otak, studi ini diharapkan dapat menjadi fondasi bagi pengembangan strategi pembelajaran yang lebih responsif, personal, dan berbasis pada cara otak manusia memproses informasi secara optimal. Pendekatan ini juga menekankan pentingnya validasi empirik dalam pengembangan model pembelajaran berbasis *neurosains*. Hal tersebut memberikan peluang bagi inovasi pendidikan yang lebih terukur dan adaptif terhadap dinamika kelas.

III. METODOLOGI

A. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain kuasi-eksperimen pretest–posttest control group. Sebanyak 60 siswa kelas XI dari dua sekolah menengah di Kota X dilibatkan dalam penelitian ini. Partisipan dipilih secara acak dari populasi siswa yang memiliki kemampuan akademik setara berdasarkan nilai rapor, kemudian dibagi secara random ke dalam kelompok eksperimen dan kelompok kontrol. Untuk mengendalikan variabel luar, penelitian memastikan bahwa kedua kelompok diajar oleh guru yang sama, dengan alokasi waktu pembelajaran yang identik, serta menggunakan kurikulum yang setara.

B. Materi Pembelajaran STEM

Materi pembelajaran STEM yang digunakan dalam intervensi difokuskan pada topik matematika (fungsi kuadrat) dan fisika (hukum Newton). Topik ini dipilih karena tingkat abstraksinya tinggi, membutuhkan representasi visual dan verbal, serta sering menimbulkan beban kognitif berlebih pada siswa. Modul pembelajaran dikembangkan dengan prinsip *chunking*, *dual coding*, *scaffolding konseptual*, serta pengelolaan beban informasi secara bertahap. Pemilihan topik ini juga mempertimbangkan relevansinya terhadap konteks pembelajaran dunia nyata yang membutuhkan pemecahan masalah lintas disiplin.

C. Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian terdiri atas tes hasil belajar terstandar, EEG *headband*, dan pelacak atensi. EEG digunakan untuk memantau aktivitas *prefrontal cortex* yang berkaitan dengan perhatian dan memori kerja, sedangkan attention tracker mengukur distribusi fokus visual siswa selama sesi belajar. Perlu dicatat bahwa EEG yang digunakan merupakan perangkat consumer grade dengan resolusi terbatas, sehingga akurasi datanya lebih rendah dibandingkan perangkat laboratorium. Informasi ini penting untuk memahami keterbatasan metodologi.

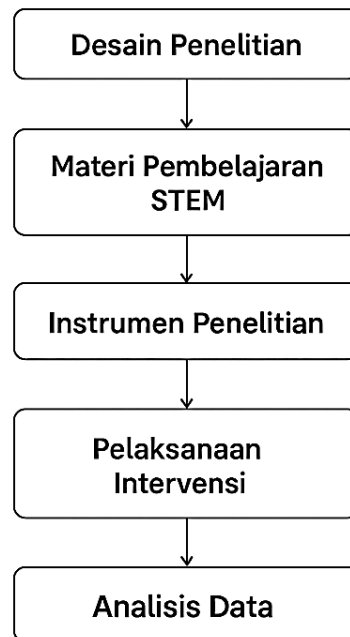
D. Pelaksanaan Intervensi

Intervensi dilaksanakan selama tiga minggu dengan total enam sesi pembelajaran. Kelompok eksperimen mendapatkan pembelajaran berbasis desain instruksional berlandaskan CLT dan *neurosains*, sementara kelompok kontrol diajar dengan metode konvensional berbasis ceramah dan latihan soal. Sebelum intervensi, seluruh siswa menjalani pretest. Selama sesi berlangsung, partisipan kelompok eksperimen mengenakan EEG dan pelacak atensi. Setelah program selesai, seluruh partisipan menjalani posttest dan mengisi kuesioner kognitif.

E. Analisis Data

Analisis data dilakukan secara kuantitatif menggunakan uji ANOVA untuk membandingkan perbedaan hasil antara kelompok eksperimen dan kontrol. Paired t-test digunakan untuk melihat peningkatan dalam masing-masing kelompok. Selain itu, dihitung pula nilai p-value, effect size, dan confidence interval untuk memperkuat validitas temuan. Data EEG dianalisis menggunakan visualisasi temporal dan spektral untuk melihat tren perubahan fokus, serta diuji korelasinya dengan capaian akademik siswa. Gambar 1 menampilkan tahapan penelitian mulai dari studi literatur, perancangan desain instruksional,

pengembangan media pembelajaran, uji coba, hingga analisis data dan rekomendasi. Penjelasan tiap langkah juga ditambahkan agar lebih mudah dipahami.



Gambar 1. Flowchart Metode Penelitian

Keterangan: *Flowchart* ini menunjukkan alur penelitian dari awal hingga akhir, dengan penekanan pada integrasi *Cognitive Load Theory* dan indikator *neurosains* dalam desain instruksional STEM. Setiap tahapan mencerminkan proses sistematis mulai dari studi literatur hingga analisis data. Visualisasi ini membantu menggambarkan bagaimana pendekatan berbasis *evidence* diterapkan secara konkret dalam kegiatan belajar-mengajar. Selain itu, *flowchart* ini dapat menjadi acuan bagi peneliti atau praktisi pendidikan yang ingin mereplikasi model serupa dalam konteks lain.

IV. HASIL DAN DISKUSI

Hasil

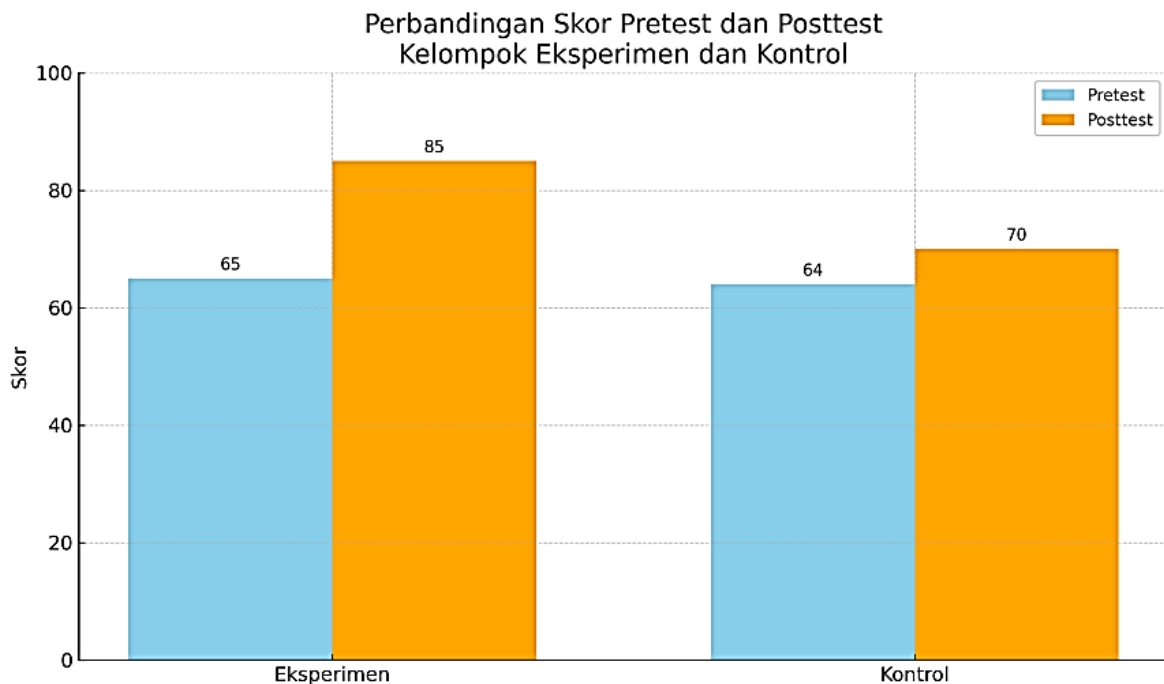
A. Hasil Tes Kognitif

Hasil pretest menunjukkan bahwa rata-rata skor awal kelompok eksperimen (58) dan kontrol (59) relatif setara, dengan perbedaan yang tidak signifikan secara statistik ($p = 0,71$). Setelah intervensi, terdapat peningkatan signifikan pada skor posttest kelompok eksperimen dibandingkan kelompok kontrol. Rata-rata skor posttest kelompok eksperimen mencapai 83, sedangkan kelompok kontrol hanya 69. Uji ANOVA menunjukkan perbedaan signifikan antar kelompok ($F = 12,47$, $p < 0,01$), dengan effect size (Cohen's d) sebesar 0,82 yang termasuk kategori besar. Interval kepercayaan 95% menunjukkan rentang peningkatan skor 22–28 poin pada kelompok eksperimen. Temuan ini menegaskan efektivitas desain instruksional berbasis *neurosains* dalam meningkatkan hasil belajar STEM. Tabel 2 menyajikan data rata-rata pretest dan posttest untuk masing-masing kelompok.

Tabel 2. Rata-Rata Skor Pretest dan Posttest Antara Kelompok Eksperimen dan Kontrol

Kelompok	Rata-rata Pretest	Rata-Rata Posttest	Skor
Eksperimen	58	83	+25
Kontrol	59	69	+10

Selanjutnya, untuk memperjelas perbedaan skor antara kedua kelompok, dilakukan analisis visual yang menggambarkan perubahan skor *pretest* dan *posttest*. Data menunjukkan adanya peningkatan skor *posttest* pada kedua kelompok setelah intervensi. Peningkatan yang lebih signifikan terjadi pada kelompok *eksperimen* dibandingkan kelompok *kontrol*. Hal ini mengindikasikan efektivitas perlakuan yang diberikan kepada kelompok *eksperimen*. Perbandingan skor *pretest* dan *posttest* antara kedua kelompok tersebut dapat dilihat secara visual pada Gambar 2.



Gambar 2. Perbandingan Skor Pretest dan Posttest Antara Kelompok Eksperimen dan Kontrol

B. Hasil EEG dan Atensi

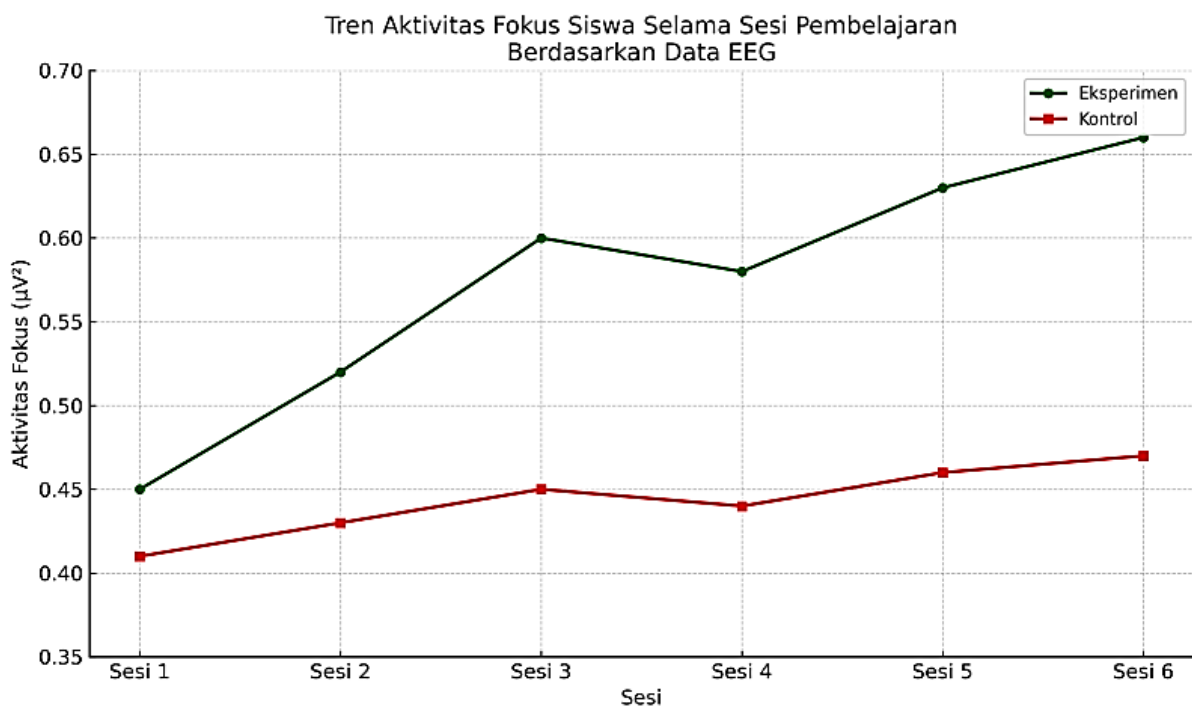
Pengukuran EEG menunjukkan adanya peningkatan fokus yang lebih stabil pada kelompok eksperimen dibandingkan kelompok kontrol. Rata-rata aktivitas fokus (μV^2) kelompok eksperimen meningkat konsisten dari sesi ke-1 hingga sesi ke-6 ($0,45 \rightarrow 0,66 \mu V^2$), sedangkan pada kelompok kontrol peningkatannya stagnan ($0,41 \rightarrow 0,47 \mu V^2$). Analisis korelasi Pearson menunjukkan hubungan positif yang signifikan antara aktivitas fokus EEG dengan skor posttest pada kelompok eksperimen ($r = 0,63$, $p < 0,01$), yang berarti semakin tinggi tingkat fokus siswa, semakin baik pula capaian akademiknya. Tabel 3 menyajikan rata-rata aktivitas fokus siswa berdasarkan pengukuran EEG.

Tren aktivitas fokus selama sesi pembelajaran dapat dianalisis secara lebih rinci melalui visualisasi data. Grafik tersebut menunjukkan pola perkembangan aktivitas fokus siswa di kedua kelompok sepanjang enam sesi. Pada kelompok *eksperimen*, aktivitas fokus meningkat secara signifikan dan konsisten. Untuk

memberikan gambaran visual yang lebih jelas mengenai perubahan ini, Gambar 3 menyajikan grafik perkembangan aktivitas fokus siswa dari sesi pertama hingga sesi keenam.

Tabel 3. Rata-Rata Aktivitas Fokus Siswa Selama Enam Sesi Pembelajaran Berdasarkan Pengukuran EEG

Sesi	Eksperimen (μV^2)	Kontrol (μV^2)
Sesi 1	0,45	0,41
Sesi 2	0,52	0,43
Sesi 3	0,60	0,45
Sesi 4	0,58	0,44
Sesi 5	0,63	0,46
Sesi 6	0,66	0,47



Gambar 3. Tren Aktivitas Fokus Siswa Selama Sesi Pembelajaran Berdasarkan Data EEG

Diskusi

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa desain instruksional berbasis *neurosains* memiliki pengaruh nyata terhadap efektivitas pembelajaran STEM. Peningkatan signifikan pada skor posttest kelompok eksperimen membuktikan bahwa strategi yang mengintegrasikan chunking, dual coding, dan scaffolding konseptual dapat membantu siswa mengelola informasi kompleks secara lebih efisien. Efek yang ditunjukkan tidak hanya signifikan secara statistik ($p < 0,01$), tetapi juga kuat secara praktis, dengan effect size besar ($d = 0,82$). Strategi ini menyesuaikan cara otak memproses informasi dengan memecah materi menjadi bagian-bagian yang lebih mudah dicerna.

Hubungan positif antara data EEG dan capaian akademik memperkuat validitas temuan. Siswa yang menunjukkan peningkatan konsistensi fokus juga memperoleh skor tes lebih tinggi, sehingga data neurobiologis mendukung hasil kognitif. Temuan ini sejalan dengan (Kirwan et al., 2023) yang

menekankan korelasi antara fokus *prefrontal cortex* dan performa kognitif kompleks. Pengukuran aktivitas otak secara langsung memberikan gambaran objektif mengenai keterlibatan kognitif siswa selama pembelajaran.

Dibandingkan dengan studi sebelumnya, penelitian ini menawarkan pendekatan lebih komprehensif. Studi seperti (Lee & Tam, 2024) atau (Stein et al., 2022) cenderung menekankan aspek psikologis tanpa indikator neurobiologis. Penelitian ini mengisi gap tersebut dengan menggunakan triangulasi data tes kognitif dan EEG secara simultan. Metode ini memungkinkan analisis yang lebih mendalam terhadap hubungan antara proses kognitif dan aktivitas otak secara bersamaan.

Namun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan. Pertama, jumlah partisipan terbatas hanya 60 siswa dari dua sekolah, sehingga generalisasi hasil harus dilakukan dengan hati-hati. Kedua, penggunaan EEG *consumer grade* memiliki keterbatasan akurasi dibandingkan perangkat laboratorium. Ketiga, durasi intervensi hanya enam sesi, sehingga potensi efek jangka panjang belum dapat dipastikan. Selain itu, perlu dipertimbangkan adanya *novelty effect*, yaitu motivasi siswa yang meningkat hanya karena menggunakan perangkat baru, bukan semata-mata karena efektivitas strategi instruksional.

Dari sisi implikasi, penelitian ini memberikan landasan bagi guru untuk mengadopsi prinsip-prinsip *neurosains* tanpa harus menggunakan perangkat EEG. Strategi sederhana seperti menyajikan informasi dalam potongan kecil, menggabungkan teks dan visual secara terintegrasi, serta memberikan scaffolding konseptual sudah dapat membantu mengurangi beban kognitif siswa. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat diadaptasi secara praktis di kelas dengan atau tanpa teknologi tambahan. Pendekatan ini juga mendorong peningkatan kualitas pembelajaran melalui pemahaman yang lebih baik tentang cara kerja otak dalam mengelola informasi.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan desain instruksional berbasis *neurosains* secara signifikan dapat meningkatkan efektivitas pembelajaran STEM melalui pengelolaan beban kognitif yang lebih optimal. Bukti empiris berupa peningkatan skor posttest yang signifikan serta konsistensi aktivitas fokus siswa berdasarkan data EEG memperkuat argumen bahwa strategi pembelajaran yang terintegrasi dengan *Cognitive Load Theory* dan indikator neurobiologis mampu mendukung pemahaman serta retensi siswa terhadap materi kompleks. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi antara data kognitif dan neurofisiologis yang sebelumnya jarang dilakukan, khususnya dalam konteks pendidikan STEM di Indonesia. Hal ini menegaskan bahwa pendekatan berbasis *neurosains* tidak hanya relevan secara teoritis, tetapi juga aplikatif dan berdampak langsung pada kualitas proses belajar.

Berdasarkan hasil yang diperoleh, disarankan agar guru dan pengembang kurikulum mulai mengadopsi prinsip desain pembelajaran berbasis *neurosains*, terutama pada mata pelajaran dengan tingkat abstraksi tinggi seperti matematika dan fisika. Pelatihan guru untuk memahami cara kerja otak dalam memproses informasi menjadi langkah strategis agar strategi instruksional dapat disesuaikan dengan kapasitas

kognitif siswa. Penelitian lanjutan sebaiknya dilakukan dengan jumlah partisipan yang lebih besar, menggunakan perangkat EEG dengan resolusi lebih tinggi, serta mencakup durasi intervensi yang lebih panjang untuk menilai dampak jangka panjang. Selain itu, eksplorasi integrasi pendekatan ini dengan teknologi pembelajaran adaptif berbasis kecerdasan buatan dapat membuka peluang baru dalam menciptakan pengalaman belajar yang lebih personal, responsif, dan berbasis data nyata.

REFERENSI

- Alexander, S., & Xu, K. M. (2022). Understanding Cognitive Load in Digital and Online Learning: a New Perspective on Extraneous Cognitive Load. *Educational Psychology Review*, 34(1), 171–196. <https://doi.org/10.1007/s10648-021-09624-7>
- Angraeni, D. (2022). Analisis Kemampuan Pemecahan Masalah Matematika Siswa pada Materi Persamaan Linier Satu Variable Kelas 7 SMP Darrosta Jakarta Barat. *Education : Jurnal Sosial Humaniora Dan Pendidikan*, 2(2), 54–61. <https://doi.org/10.51903/education.v2i2.135>
- Barbieri, C. A., & Rodrigues, J. (2025). Leveraging Cognitive Load Theory to Support Students with Mathematics Difficulty. *Educational Psychologist*, 60(3), 208–232. <https://doi.org/10.1080/00461520.2025.2486138>
- Boon, P. A. J. M., Berger, T., Leonardi, M., Marson, T., Kallweit, U., Moro, E., Toscano, A., Rektorova, I., Accorroni, A., Scheerens, C., Boesch, A., Crean, M., Sander, A., Lee, S., & Bassetti, C. L. A. (2025). A Roadmap Toward Promoting and Improving Brain Health in Europe and Closing the Awareness and Funding Gap. *European Journal of Neurology*, 32(1), 16589. <https://doi.org/10.1111/ene.16589>
- Cian, H., Dou, R., Castro, S., Palma-D'souza, E., & Martinez, A. (2022). Facilitating Marginalized Youths' Identification with STEM through Everyday Science Talk: The Critical Role of Parental Caregivers. *Science Education*, 106(1), 57–87. <https://doi.org/10.1002/sce.21688>
- Evans, P., Vansteenkiste, M., Parker, P., Kingsford-Smith, A., & Zhou, S. (2024). Cognitive Load Theory and Its Relationships with Motivation: a Self-Determination Theory Perspective. *Educational Psychology Review*, 36(1), 1–25. <https://doi.org/10.1007/s10648-023-09841-2>
- Gholamipourbarogh, N., Prochnow, A., Frings, C., Münchau, A., Mückschel, M., & Beste, C. (2023). Perception-Action Integration During Inhibitory Control is Reflected in a Concomitant Multi-Region Processing of Specific Codes in the Neurophysiological Signal. *Psychophysiology*, 60(2), 14178. <https://doi.org/10.1111/psyp.14178>
- Goergen, M. S., Delgadillo Hernández, A., Cordovilla, P. R. G., Stora, P. J. B., Gradwohl, F. G. Ö., Edlow, M., Uccellini, O., Dowling, J. P., Pripitnevich, D., Richards, S., Tarabanov, A., Hallberg, M., St. John, A., Tolchinsky, A., Biran, I., Langleben, D. C., & Tiberg, K. (2023). 43rd Bulletin of the International Neuropsychoanalysis Society. *Neuropsychoanalysis*, 25(1), 87–97. <https://doi.org/10.1080/15294145.2023.2200413>
- Isacoff, N. M. (2024). Self-Communication in Severed Minds: Perspectives from Neuroscience, Psychology, and Philosophy. In *Reintegrating Severance: Interdisciplinary Insights on Apple TV's Dystopian Thriller* (pp. 261–280). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57448-1_15
- Jeong, S., Rague, J., Litson, K., Feldon, D. F., Lawler, M. J., & Plummer, K. (2024). Effects of Decision-Based Learning on Student Performance in Introductory Physics: The Mediating Roles of Cognitive Load and Self-Testing. *Education and Information Technologies*, 30(4), 4413–4433. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-12962-y>
- Khoirunnisa, W., Syaniyah, N., & Setiabudi, D. I. (2022). Keterkaitan Buku Ajar Matematika dengan

- Pencapaian Hasil Belajar Siswa pada Kelas Rendah Sekolah Dasar. *Education : Jurnal Sosial Humaniora Dan Pendidikan*, 2(1), 52–59. <https://doi.org/10.51903/education.v2i1.149>
- Kirwan, C. B., Vance, A., Jenkins, J. L., & Anderson, B. B. (2023). Embracing brain and behaviour: Designing programs of complementary neurophysiological and behavioural studies. *Information Systems Journal*, 33(2), 324–349. <https://doi.org/10.1111/isj.12402>
- Kroeper, K. M., Muenks, K., Canning, E. A., & Murphy, M. C. (2022). An Exploratory Study of the Behaviors That Communicate Perceived Instructor Mindset Beliefs in College STEM Classrooms. *Teaching and Teacher Education*, 114, 103717. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2022.103717>
- Lee, S. L., & Tam, C. L. (2024). Confounding Analysis with Gaming Aspects in Predicting Psychological Distress of Esports Players. *PsyCh Journal*, 13(4), 541–551. <https://doi.org/10.1002/pchj.728>
- Lin, K. Y., Yeh, Y. F., Hsu, Y. S., Wu, J. Y., Yang, K. L., & Wu, H. K. (2023). STEM Education Goals in the Twenty-First Century: Teachers' Perceptions and Experiences. *International Journal of Technology and Design Education*, 33(2), 479–496. <https://doi.org/10.1007/s10798-022-09737-2>
- Lui, A. L. C., Not, C., & Wong, G. K. W. (2023). Theory-Based Learning Design with Immersive Virtual Reality in Science Education: a Systematic Review. *Journal of Science Education and Technology*, 32(3), 390–432. <https://doi.org/10.1007/s10956-023-10035-2>
- Maulidah, S., Hamdu, G., & Putri, A. R. (2025). Persepsi Guru Sekolah Dasar terhadap Media Pembelajaran STEM di Kota dan Kabupaten Tasikmalaya. *Education : Jurnal Sosial Humaniora Dan Pendidikan*, 5(2), 77–86. <https://doi.org/10.51903/1zkbqv90>
- Mitsea, E., Drigas, A., & Skianis, C. (2022). ICTs and Speed Learning in Special Education: High-Consciousness Training Strategies for High-Capacity Learners through Metacognition Lens. *Technium Social Sciences Journal*, 27(1), 230–252. <https://doi.org/10.47577/tssj.v27i1.5599>
- Ouyang, F., Dinh, T. A., & Xu, W. (2023). A Systematic Review of AI-Driven Educational Assessment in STEM Education. *Journal for STEM Education Research*, 6(3), 408–426. <https://doi.org/10.1007/s41979-023-00112-x>
- Ren, Q., Marshall, A. C., Kaiser, J., & Schütz-Bosbach, S. (2022). Multisensory Integration of Anticipated Cardiac Signals with Visual Targets Affects Their Detection Among Multiple Visual Stimuli. *NeuroImage*, 262, 119549. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119549>
- Sari, R. C., Pranesti, A., Solikhatun, I., Nurbaiti, N., & Yuniarti, N. (2024). Cognitive Overload in Immersive Virtual Reality in Education: More Presence but Less Learnt. *Education and Information Technologies*, 29(10), 12887–12909. <https://doi.org/10.1007/s10639-023-12379-z>
- Ssu_Kuang, C., Ya_Ting Carolyn, Y., ChiuPin, L., & Sunny, L. (2023). Dispositions of 21st-Century Skills in STEM Programs and Their Changes Over Time. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 21(4), 1363–1380. <https://doi.org/10.1007/s10763-022-10288-0>
- Stein, D. J., Shoptaw, S. J., Vigo, D. V., Lund, C., Cuijpers, P., Bantjes, J., Sartorius, N., & Maj, M. (2022). Psychiatric Diagnosis and Treatment in the 21st Century: Paradigm Shifts Versus Incremental Integration. *World Psychiatry*, 21(3), 393–414. <https://doi.org/10.1002/wps.20998>
- Tabatabaee, S. S., Jambarsang, S., & Keshmiri, F. (2024). Cognitive Load Theory in Workplace-Based Learning from the Viewpoint of Nursing Students: Application of a Path Analysis. *BMC Medical Education*, 24(1), 678. <https://doi.org/10.1186/s12909-024-05664-z>
- Ulkhag, M. M., Oggioni, G., & Riccardi, R. (2024). How Efficient are Schools in South-East Asia? An Analysis through OECD PISA 2018 Data. *Educational Research and Evaluation*, 3(3–4), 212–243. <https://doi.org/10.1080/13803611.2024.2426593>

- Wu, C. H., Liu, C. H., & Huang, Y. M. (2022). The Exploration of Continuous Learning Intention in STEAM Education through Attitude, Motivation, and Cognitive Load. *International Journal of STEM Education*, 9(1), 1–22. <https://doi.org/10.1186/s40594-022-00346-y>
- Zhu, S., Qi, J., Hu, J., & Hao, S. (2022). A New Approach for Product Evaluation Based on Integration of EEG and Eye-Tracking. *Advanced Engineering Informatics*, 52, 101601. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101601>