



Penerbit
Yayasan Pendidikan Bima Berilmu

Model Brain-Based Deep Learning:

Teori dan Aplikasi dalam Pendidikan



Adi Apriadi Adiansha, M.Pd.
Asriyadin, M.Pd.Si.
Azra Fauzi, M.Pd.
Dr. Nanang Diana, M.Pd.

Model Brain-Based Deep Learning: Teori dan Aplikasi dalam Pendidikan

Penulis:

Adi Apriadi Adiansha, M.Pd.

Asriyadin, M.Pd.Si.

Azra Fauzi, M.Pd.

Dr. Nanang Diana, M.Pd.



2026

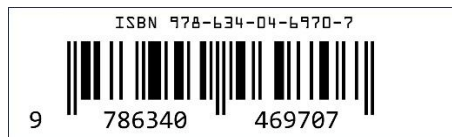
Model Brain-Based Deep Learning: Teori dan Aplikasi dalam Pendidikan

Penulis:

Adi Apriadi Adiansha, M.Pd.
Asriyadin, M.Pd.Si.
Azra Fauzi, M.Pd.
Dr. Nanang Diana, M.Pd

ISBN:

978-634-04-6970-7



Editor:

Dr. Syarifudin, M.Pd

Desain Sampul dan Tata Letak:

M. Ibnusaputra, M.Pd.

Penerbit:

Yayasan Pendidikan Bima Berilmu

Redaksi:

Jalan Lintas Sumbawa Bima, desa Leu, RT. 009, RW.
004, kecamatan Bolo, kabupaten Bima, Nusa
Tenggara Barat, Kode post. 84161
Email: bimaberilmu@gmail.com

Cetakan Kedua, Januari 2026

i-xv + 1-283 hlm, 17.6 x 25 cm

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa ijin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala, Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan buku referensi ini yang berjudul "Model Brain-Based Deep Learning: Teori dan Aplikasi dalam Pendidikan". Kehadiran buku ini berangkat dari sebuah gagasan bahwa pendidikan pada era revolusi industri 4.0 dan menuju society 5.0 tidak cukup lagi hanya menekankan pada aspek kognitif semata, melainkan perlu mengintegrasikan dimensi neurosains, teknologi, serta strategi pembelajaran berbasis riset untuk menghasilkan proses pendidikan yang lebih bermakna. Brain-Based Learning sebagai model pembelajaran yang menekankan pada kerja otak dan mekanisme kognitif peserta didik terbukti memiliki dampak signifikan terhadap efektivitas belajar. Sementara itu, perkembangan teknologi Deep Learning dan kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) membuka peluang baru dalam menciptakan ekosistem pembelajaran yang lebih personal, adaptif, dan inovatif. Oleh karena itu, penulis merasa perlu menghadirkan sebuah buku yang tidak hanya menguraikan teori dan landasan konseptual, tetapi juga aplikasi praktis yang dapat digunakan pendidik, peneliti, dan mahasiswa dalam mengembangkan pembelajaran yang relevan dengan tuntutan zaman. Buku ini diharapkan mampu menjadi referensi

akademik yang handal sekaligus inspirasi praktis bagi dunia pendidikan.

Penyusunan buku ini tidak terlepas dari perkembangan kajian neurosains dan teknologi pendidikan yang semakin pesat. Neurosains memberikan dasar ilmiah tentang bagaimana otak bekerja dalam menerima, mengolah, menyimpan, dan mengingat informasi. Temuan-temuan terbaru dalam bidang neurosains menunjukkan bahwa lingkungan belajar yang sesuai dengan mekanisme kerja otak akan lebih efektif dalam menumbuhkan motivasi, kreativitas, serta kemampuan berpikir kritis peserta didik. Di sisi lain, teknologi Deep Learning yang berkembang dalam dunia kecerdasan buatan mampu menghadirkan model analisis dan prediksi yang dapat dimanfaatkan dalam dunia pendidikan. Integrasi dua aspek penting ini, yakni neurosains dan deep learning, bukan hanya akan memperkuat kualitas pembelajaran, melainkan juga akan melahirkan model baru yang relevan dengan kebutuhan pendidikan masa depan. Oleh karena itu, buku ini mencoba menghadirkan pemikiran dan kerangka konseptual baru tentang Model Brain-Based Deep Learning sebagai salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk membangun ekosistem pendidikan yang lebih adaptif, inovatif, dan humanis. Penulis berusaha menyajikan gagasan ini secara komprehensif agar pembaca dapat memperoleh pemahaman yang utuh, mulai dari teori dasar, prinsip, hingga strategi implementasinya dalam konteks nyata pendidikan.

Buku ini disusun dengan struktur sistematis, dimulai dari pengantar konsep, kajian teori, hingga penerapan model dalam dunia pendidikan. Pada bab-bab awal, pembaca akan diajak untuk memahami secara mendalam landasan konseptual terkait teori belajar, prinsip neurosains, dan teknologi Deep Learning. Selanjutnya, pembaca akan diperkenalkan pada kerangka konseptual model, komponen utama, serta karakteristik model Brain-Based Deep Learning yang diusulkan. Setelah memperoleh pemahaman konseptual, pembaca akan diajak untuk mengeksplorasi bagaimana model ini dapat diimplementasikan secara praktis dalam pembelajaran, khususnya dalam bidang matematika dan sains yang menuntut kemampuan berpikir logis, kritis, dan kreatif. Buku ini juga membahas peran guru, peserta didik, serta media pembelajaran dalam mendukung keberhasilan implementasi model. Tidak kalah penting, penulis menyertakan bagian khusus yang membahas tentang evaluasi, tantangan implementasi, serta prospek pengembangan model ini di masa depan. Dengan demikian, buku ini tidak hanya bersifat teoritis, tetapi juga aplikatif, sehingga dapat digunakan oleh kalangan akademisi, pendidik, maupun mahasiswa yang sedang melakukan penelitian dalam bidang pendidikan.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa lahirnya buku ini tidak lepas dari bantuan, dukungan, dan kontribusi berbagai pihak. Oleh karena itu, melalui kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada

lembaga pendidikan tinggi tempat penulis mengabdikan yang telah memberikan dorongan moral maupun fasilitas dalam proses penulisan buku ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada para dosen, peneliti, dan rekan sejawat yang telah berbagi ilmu, gagasan, serta diskusi yang konstruktif dalam mengembangkan ide-ide yang tertuang di dalam buku ini. Tidak lupa, penulis juga memberikan apresiasi yang mendalam kepada para mahasiswa yang senantiasa menjadi mitra belajar sekaligus sumber inspirasi dalam pengembangan model pembelajaran yang lebih baik. Tanpa adanya interaksi langsung dengan mahasiswa di kelas, mungkin penulis tidak akan mampu merasakan secara nyata tantangan sekaligus peluang yang ada dalam dunia pembelajaran modern. Oleh sebab itu, buku ini sesungguhnya merupakan hasil dari proses panjang interaksi akademik, refleksi pengalaman, serta sintesis dari berbagai penelitian yang telah dilakukan baik oleh penulis sendiri maupun oleh peneliti lain yang menjadi rujukan utama dalam buku ini.

Meskipun penulis telah berupaya menyajikan buku ini dengan sebaik-baiknya, penulis menyadari sepenuhnya bahwa buku ini tentu tidak luput dari berbagai keterbatasan dan kekurangan. Keterbatasan tersebut dapat muncul baik dari segi cakupan teori, kelengkapan data, maupun kedalaman analisis pada beberapa aspek tertentu. Hal ini disebabkan oleh luasnya bidang kajian yang melibatkan neurosains, teknologi deep learning, serta pendidikan sebagai disiplin ilmu yang sangat

kompleks. Namun, penulis berharap bahwa keterbatasan ini tidak mengurangi nilai manfaat dari buku ini. Justru sebaliknya, keterbatasan ini diharapkan dapat menjadi ruang bagi para pembaca, peneliti, maupun praktisi pendidikan untuk melakukan kajian lanjutan, pengembangan, serta penyempurnaan gagasan yang telah ditawarkan dalam buku ini. Kritik dan saran yang konstruktif dari pembaca sangat penulis nantikan demi penyempurnaan edisi berikutnya. Dengan demikian, buku ini dapat terus diperbaiki dan dikembangkan agar lebih relevan, lebih komprehensif, serta lebih aplikatif dalam menjawab tantangan pendidikan modern.

Akhir kata, penulis berharap buku "Model Brain-Based Deep Learning: Model Brain-Based Deep Learning" ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan ilmu pendidikan di Indonesia maupun di kancah internasional. Semoga buku ini dapat menjadi sumber inspirasi, rujukan, dan pedoman bagi para dosen, guru, mahasiswa, serta praktisi pendidikan dalam mengembangkan model pembelajaran yang lebih sesuai dengan cara kerja otak dan perkembangan teknologi. Penulis juga berharap agar buku ini dapat menjadi bagian dari upaya kolektif dalam membangun sistem pendidikan yang lebih adaptif, inovatif, dan berdaya saing global, tanpa kehilangan akar budaya dan nilai-nilai humanis yang menjadi ciri khas bangsa Indonesia. Semoga Allah Subhanahu wa Ta'ala senantiasa meridhai segala ikhtiar ini, serta memberikan manfaat yang seluas-luasnya bagi dunia

pendidikan, penelitian, dan pengembangan sumber daya manusia.

Bima, Januari 2026

Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat, karunia, serta kekuatan yang diberikan-Nya, buku referensi berjudul Model Brain-Based Deep Learning ini akhirnya dapat diselesaikan dengan baik. Penyusunan buku ini tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak yang dengan tulus ikhlas memberikan kontribusi berharga, baik dalam bentuk pemikiran, arahan, bimbingan, maupun dukungan moral yang menjadi energi positif dalam proses penulisan. Dengan kerendahan hati, penulis menyampaikan penghargaan setinggi-tingginya kepada semua pihak yang telah mendukung hingga terwujudnya karya ini.

Ucapan terima kasih yang mendalam penulis sampaikan kepada rekan-rekan sejawat akademisi, para peneliti, serta praktisi pendidikan yang telah memberikan masukan berharga melalui diskusi, kritik konstruktif, dan saran yang memperkaya perspektif penulis dalam mengembangkan konsep Brain-Based Deep Learning. Masukan tersebut menjadi pijakan penting dalam mengintegrasikan neurosains, teknologi, dan pedagogi modern yang relevan dengan tantangan pendidikan abad ke-21.

Apresiasi juga penulis tujukan kepada lembaga pendidikan tinggi, institusi penelitian, serta penerbit yang telah memberikan ruang dan kesempatan untuk merealisasikan ide-ide dalam bentuk buku ilmiah ini. Fasilitas, sumber daya, dan

dukungan kelembagaan yang diberikan telah memperkuat proses riset, penulisan, serta penyempurnaan isi buku ini sehingga dapat mencapai standar akademik yang diharapkan.

Tidak lupa, penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada keluarga tercinta yang senantiasa memberikan dorongan moral, doa, serta pengertian yang tiada henti. Dukungan mereka merupakan pilar utama dalam menjaga semangat dan ketekunan penulis menyelesaikan setiap tahapan penyusunan buku ini.

Akhir kata, penulis berharap agar buku ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang pendidikan berbasis neurosains dan teknologi, serta menjadi inspirasi bagi para pendidik, peneliti, dan mahasiswa untuk terus berinovasi dalam menciptakan model pembelajaran yang lebih relevan, efektif, dan adaptif terhadap perubahan zaman. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat yang luas bagi kemajuan pendidikan di Indonesia maupun di tingkat global.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
KATA PENGANTAR.....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	x
DAFTAR ISI.....	xii
BAB 1 LANDASAN TEORI DAN KAJIAN LITERATUR.....	1
1.1 Konsep Dasar Pembelajaran.....	1
1.2 Teori Belajar Kognitif, Konstruktivisme, dan Neurosains.....	7
1.3 Prinsip-Prinsip Brain-Based Learning	14
1.4 Konsep dan Perkembangan Deep Learning	19
1.5 Integrasi Neurosains dengan Teknologi Pendidikan.....	26
BAB 2 KERANGKA KONSEPTUAL MODEL BRAIN-BASED DEEP LEARNING.....	32
2.1 Definisi Operasional Model Brain-Based Deep Learning	32
2.2 Asumsi Dasar Pengembangan Model.....	37
2.3 Komponen-Komponen Utama Model.....	42
2.4 Karakteristik Model	47
2.5 Perbandingan dengan Model Pembelajaran Lain	53
2.6 Posisi Model dalam Pendidikan Abad 21	58
BAB 3 ASPEK NEUROSAINS DALAM MODEL PEMBELAJARAN	64
3.1 Dasar-Dasar Neurosains dalam Pendidikan	64
3.2 Mekanisme Kerja Otak dalam Belajar	67
3.3 Peran Emosi, Motivasi, dan Memori dalam Pembelajaran	72
3.4 Plasticity Otak dan Implikasinya dalam Pembelajaran.....	77
3.5 Brain-Compatible Learning Environment.....	82
3.6 Hubungan Neurosains dan Brain-Based Deep Learning	87

BAB 4 ASPEK TEKNOLOGI DEEP LEARNING DALAM PENDIDIKAN.....	92
4.1 Definisi dan Konsep Dasar Deep Learning.....	92
4.2 Algoritma dan Arsitektur Deep Learning.....	96
4.3 Potensi Deep Learning dalam Pendidikan	100
4.4 Integrasi Deep Learning dengan Media Pembelajaran	105
4.5 Peran GeoGebra, AI Tools, dan Simulasi Visual.....	111
4.6 Tantangan dan Peluang Deep Learning di Bidang Pendidikan	116
BAB 5 MODEL BRAIN-BASED DEEP LEARNING.....	121
5.1 Struktur Model Pembelajaran	121
5.2 Sintaks (Tahapan) Model	126
5.3 Peran Guru dan Peserta Didik.....	129
5.4 Perangkat Pendukung Pembelajaran.....	134
5.5 Skenario Implementasi di Kelas.....	139
5.6 Keunggulan dan Keterbatasan Model	144
BAB 6 IMPLEMENTASI MODEL DALAM PEMBELAJARAN MATEMATIKA.....	149
6.1 Relevansi Brain-Based Deep Learning dalam Matematika	149
6.2 Pemanfaatan GeoGebra dalam Visualisasi Konsep Matematis.....	154
6.3 Strategi Pengembangan Keterampilan Berpikir Kritis dan Kreatif.....	158
6.4 Pembelajaran Kolaboratif dengan Model Brain-Based Deep Learning	163
BAB 7 EVALUASI DAN PENILAIAN MODEL PEMBELAJARAN	168
7.1 Konsep Dasar Evaluasi dalam Pembelajaran	168
7.2 Indikator Keberhasilan Model.....	173
7.3 Instrumen Penilaian: Tes, Observasi, dan Rubrik	177

7.4 Penilaian Berbasis Kinerja (Performance Assessment)	182
7.5 Evaluasi Efektivitas Model Brain-Based Deep Learning	186
BAB 8 TANTANGAN DAN PROSPEK PENGEMBANGAN MODEL	191
8.1 Hambatan dalam Implementasi di Kelas	191
8.2 Tantangan Integrasi Neurosains dan Teknologi	195
8.3 Faktor Guru, Siswa, dan Lingkungan Belajar	200
8.4 Prospek Pengembangan Model di Era Kecerdasan Buatan	204
8.5 Implikasi bagi Penelitian dan Praktik Pendidikan	208
8.6 Arah Baru Brain-Based Deep Learning di Masa Depan	212
BAB 10 PENUTUP	217
9.1 Kesimpulan Umum	217
9.2 Keterbatasan Model dan Buku	219
DAFTAR PUSTAKA	222
GLOSARIUM	236

BAB 1 LANDASAN TEORI DAN KAJIAN LITERATUR

1.1 Konsep Dasar Pembelajaran

Pembelajaran pada hakikatnya merupakan suatu proses yang kompleks yang melibatkan interaksi antara pendidik, peserta didik, materi pembelajaran, serta lingkungan belajar. Konsep dasar pembelajaran tidak hanya terbatas pada transfer pengetahuan dari guru kepada peserta didik, melainkan mencakup aktivitas membangun pengetahuan melalui pengalaman langsung, interaksi sosial, serta keterlibatan aktif dalam kegiatan kognitif. Dalam konteks pendidikan modern, pembelajaran dipandang sebagai suatu sistem yang menuntut adanya perubahan perilaku, pengetahuan, keterampilan, dan sikap secara menyeluruh. Perubahan tersebut tidak dapat dipahami hanya sebagai hasil dari pemberian informasi, tetapi merupakan hasil dari aktivitas berpikir, refleksi, serta keterlibatan emosi peserta didik dalam setiap tahapan belajar. Oleh karena itu, pembelajaran yang efektif harus mampu mengintegrasikan berbagai aspek, mulai dari kognitif, afektif, hingga psikomotorik, sehingga tujuan pendidikan dapat tercapai secara optimal (Narbuko & Achmadi, 2021).

Dalam teori pendidikan, pembelajaran sering kali dikaitkan dengan berbagai pendekatan dan paradigma yang

berkembang sepanjang sejarah. Teori behaviorisme, misalnya, menekankan pentingnya stimulus-respons dan penguatan dalam pembentukan perilaku belajar, sedangkan teori kognitivisme lebih menyoroti peran aktif individu dalam memproses informasi. Seiring berkembangnya ilmu pengetahuan, teori konstruktivisme kemudian menekankan bahwa pengetahuan dibangun melalui pengalaman individu dan interaksi sosial, bukan hanya ditransmisikan secara pasif. Setiap teori memiliki kontribusi penting dalam memahami proses belajar, namun dalam konteks pembelajaran berbasis otak dan teknologi modern, diperlukan pendekatan yang lebih integratif. Pendekatan ini berusaha memadukan prinsip-prinsip psikologi kognitif dengan temuan-temuan neurosains, sehingga menghasilkan model pembelajaran yang lebih sesuai dengan cara kerja otak manusia (Sugrah, 2020; Habsy et al., 2023).

Pembelajaran berbasis otak (Brain-Based Learning) lahir dari pemahaman bahwa otak manusia merupakan pusat utama dalam mengatur seluruh aktivitas belajar. Dalam perspektif ini, pembelajaran tidak hanya dimaknai sebagai penyampaian informasi, melainkan sebagai upaya untuk menstimulasi berbagai bagian otak agar dapat bekerja secara harmonis. Otak memiliki kemampuan plastisitas, yaitu kemampuan untuk beradaptasi dan membentuk koneksi baru sebagai respons terhadap pengalaman belajar yang diperoleh. Dengan demikian, desain pembelajaran yang baik seharusnya mampu

memanfaatkan prinsip-prinsip kerja otak tersebut, seperti pentingnya perhatian, emosi, pengulangan, serta keterlibatan multisensori. Pemahaman mengenai cara kerja otak ini menjadi sangat penting dalam membangun model pembelajaran yang lebih efektif, inovatif, serta relevan dengan perkembangan zaman (Amjad et al., 2023; Yuwana & Indarti, 2023).

Selain itu, perkembangan teknologi digital memberikan pengaruh signifikan terhadap konsep dasar pembelajaran. Teknologi tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu, melainkan juga sebagai medium yang memungkinkan transformasi cara belajar dan mengajar. Dengan hadirnya teknologi berbasis aplikasi seperti GeoGebra, siswa dapat lebih mudah memvisualisasikan konsep-konsep abstrak, khususnya dalam bidang matematika. Teknologi juga mendukung pembelajaran berbasis proyek, kolaboratif, dan eksploratif yang selaras dengan prinsip pembelajaran berbasis otak. Integrasi teknologi dalam pembelajaran menciptakan ruang bagi siswa untuk mengembangkan keterampilan berpikir tingkat tinggi, seperti berpikir kritis, kreatif, serta kemampuan pemecahan masalah yang kompleks. Dengan demikian, konsep pembelajaran modern tidak bisa dilepaskan dari peran teknologi sebagai katalis inovasi pendidikan (Fang, Ng, & Yuen, 2025; Yildiz & Arpaci, 2024).



Gambar 3. Konsep Dasar Pembelajaran : Integrasi Teori, Neurosains, dan Teknologi

Konsep dasar pembelajaran juga berkaitan erat dengan tujuan pendidikan yang ingin dicapai. Dalam konteks global, pendidikan tidak hanya bertujuan menghasilkan individu yang cerdas secara akademik, tetapi juga pribadi yang adaptif, kreatif, inovatif, serta memiliki karakter yang tangguh. Oleh karena itu, pembelajaran harus dirancang untuk mengembangkan kompetensi yang mencakup literasi kognitif, literasi teknologi, literasi numerasi, serta keterampilan sosial-emosional. Hal ini sejalan dengan kebutuhan peserta didik abad ke-21 yang dituntut untuk mampu menghadapi perubahan cepat akibat globalisasi dan perkembangan teknologi. Dalam hal ini, model pembelajaran berbasis otak yang terintegrasi dengan Deep Learning hadir sebagai solusi yang menjembatani antara teori pendidikan klasik dengan kebutuhan praktis di era digital (Creswell, 2020; OECD, 2023).

Pembelajaran sebagai suatu konsep juga perlu dipahami dalam konteks kurikulum. Kurikulum yang baik bukan hanya

berisi kumpulan materi, tetapi juga mencakup strategi pembelajaran, asesmen, serta pendekatan pedagogis yang selaras dengan kebutuhan peserta didik. Kurikulum yang berorientasi pada kompetensi menekankan pentingnya pengembangan keterampilan berpikir kritis, kreatif, kolaboratif, dan komunikatif. Dengan pendekatan Brain-Based Deep Learning, kurikulum dapat lebih fleksibel karena dirancang berdasarkan prinsip bagaimana otak memproses informasi, sehingga kegiatan pembelajaran lebih kontekstual dan bermakna. Kurikulum yang demikian memberikan peluang bagi peserta didik untuk membangun pemahaman yang lebih mendalam sekaligus mengembangkan keterampilan yang relevan dengan kehidupan nyata (Dwiputra, Azzahra, & Heryanto, 2023; Rahmawati, Madlazim, & Sudibyo, 2024).

Dalam praktiknya, konsep dasar pembelajaran yang berorientasi pada otak juga menekankan pentingnya menciptakan lingkungan belajar yang kondusif. Lingkungan belajar yang kaya akan stimulasi, aman secara emosional, serta mendukung kolaborasi dapat meningkatkan efektivitas pembelajaran. Faktor emosional, seperti motivasi dan rasa ingin tahu, memiliki peran penting dalam menentukan keberhasilan belajar. Hal ini sesuai dengan prinsip neurosains yang menegaskan bahwa emosi merupakan penggerak utama dalam proses pengambilan keputusan dan penyimpanan memori. Oleh karena itu, pembelajaran yang mengabaikan aspek emosional cenderung kurang optimal dalam

menghasilkan perubahan perilaku maupun peningkatan kemampuan kognitif peserta didik (Al-Tarawneh et al., 2021; Kim, Park, & Joung, 2025).

Konsep dasar pembelajaran berbasis otak juga menekankan pentingnya pengalaman belajar yang aktif dan bermakna. Proses belajar tidak hanya terjadi di dalam kelas, melainkan juga melalui aktivitas eksploratif, eksperiensial, dan reflektif yang memberikan kesempatan kepada peserta didik untuk menemukan pengetahuan secara mandiri. Pendekatan ini menuntut peran guru untuk beralih dari sekadar pemberi informasi menjadi fasilitator yang membimbing siswa dalam proses konstruksi pengetahuan. Dengan demikian, pembelajaran tidak hanya menghasilkan individu yang cerdas secara intelektual, tetapi juga pribadi yang mampu mengintegrasikan pengetahuan dengan kehidupan sehari-hari. Pendekatan ini selaras dengan tuntutan pendidikan kontemporer yang mengedepankan konsep *lifelong learning* sebagai bekal menghadapi tantangan global (Subba, Chanunan, & Poonpaiboonpipat, 2025; Gaston, Guffey-McCorrison, & Rand, 2023).

Dengan memahami konsep dasar pembelajaran secara menyeluruh, dapat disimpulkan bahwa pembelajaran yang efektif memerlukan integrasi antara teori pendidikan, hasil penelitian *neurosains*, serta dukungan teknologi. Model *Brain-Based Deep Learning* muncul sebagai pendekatan yang mampu menjawab tantangan ini, karena tidak hanya berfokus

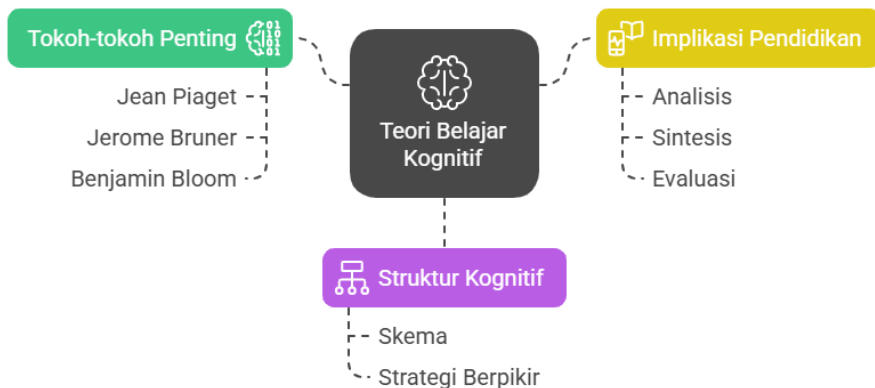
pada aspek kognitif, tetapi juga pada dimensi afektif, sosial, dan teknologis yang melingkupi peserta didik. Konsep dasar pembelajaran ini menegaskan bahwa belajar merupakan proses yang dinamis, multidimensi, dan berkesinambungan. Oleh karena itu, pembelajaran di abad ke-21 harus dirancang secara adaptif, inovatif, serta berbasis pada prinsip kerja otak dan perkembangan teknologi, sehingga dapat menghasilkan generasi yang cerdas, kreatif, dan siap bersaing di tingkat global.

1.2 Teori Belajar Kognitif, Konstruktivisme, dan Neurosains

Teori belajar kognitif berangkat dari pandangan bahwa proses belajar tidak sekadar hasil dari stimulus dan respons, melainkan melibatkan aktivitas mental internal yang kompleks. Menurut pendekatan ini, peserta didik dipandang sebagai individu aktif yang berusaha memahami, mengorganisasi, dan mengolah informasi. Fokus utama teori ini adalah pada bagaimana informasi diterima, diproses, disimpan, serta digunakan kembali ketika dibutuhkan. Dalam konteks pembelajaran, kognitivisme menekankan pentingnya struktur kognitif, skema, serta strategi berpikir yang dapat memfasilitasi pemahaman. Hal ini berimplikasi pada praktik pendidikan bahwa pembelajaran tidak cukup dilakukan dengan hafalan, tetapi harus mengembangkan pemahaman mendalam melalui aktivitas analisis, sintesis, dan evaluasi. Oleh karena itu, guru

dituntut untuk membantu peserta didik dalam mengembangkan keterampilan metakognitif, yaitu kemampuan untuk mengatur, memonitor, dan mengevaluasi proses berpikirnya sendiri (Nafiati, 2021; Mahmudi et al., 2022).

Dalam perkembangannya, teori kognitif banyak dipengaruhi oleh tokoh-tokoh seperti Jean Piaget dan Jerome Bruner. Piaget menekankan tahapan perkembangan kognitif yang menunjukkan bahwa kemampuan berpikir peserta didik berkembang sesuai dengan usia dan pengalaman. Sementara itu, Bruner menyoroti pentingnya representasi mental dalam tiga bentuk, yaitu enaktif, ikonik, dan simbolik. Kedua pandangan tersebut memperkuat gagasan bahwa pembelajaran yang efektif harus mempertimbangkan kesiapan kognitif peserta didik serta menyajikan pengalaman belajar yang sesuai dengan tingkat perkembangan mereka. Sejalan dengan hal tersebut, Bloom melalui taksonominya menekankan hierarki ranah kognitif yang menjadi dasar dalam merancang tujuan pembelajaran mulai dari tingkat pengetahuan hingga evaluasi (Nafiati, 2021; Listiani & Rachmawati, 2022).



Gambar 4. Teori Belajar Kognitif : Proses Mental dalam Pembelajaran

Teori konstruktivisme kemudian melengkapi pandangan kognitif dengan menegaskan bahwa pengetahuan bukanlah sesuatu yang ditransfer secara langsung, melainkan dibangun secara aktif oleh peserta didik. Dalam konstruktivisme, pengalaman belajar menjadi elemen fundamental karena melalui pengalaman itulah peserta didik mengonstruksi pengetahuan baru dengan menghubungkannya pada skema yang telah ada. Pandangan ini menuntut perubahan peran guru dari pemberi informasi menjadi fasilitator yang membimbing proses pembentukan makna. Konstruktivisme menekankan pentingnya keterlibatan peserta didik dalam aktivitas belajar yang kolaboratif, kontekstual, dan berbasis masalah, sehingga pembelajaran menjadi lebih bermakna dan relevan dengan kehidupan nyata (Sugrah, 2020; Habsy et al., 2023).

Dalam praktiknya, konstruktivisme terbagi ke dalam dua aliran besar, yaitu konstruktivisme kognitif dan konstruktivisme

sosial. Konstruktivisme kognitif berfokus pada peran individu dalam mengonstruksi pengetahuan melalui pengalaman personal, sedangkan konstruktivisme sosial menekankan pentingnya interaksi sosial dan budaya dalam proses pembelajaran. Vygotsky, sebagai tokoh penting dalam konstruktivisme sosial, memperkenalkan konsep Zone of Proximal Development (ZPD) yang menunjukkan bahwa pembelajaran akan lebih efektif jika diberikan dukungan atau scaffolding dari guru atau teman sebaya. Konsep ini sangat relevan dalam konteks pembelajaran modern, di mana kolaborasi dan interaksi menjadi bagian penting dalam meningkatkan pemahaman dan keterampilan peserta didik (Sari et al., 2023; Herianto & Lestari, 2021).

Integrasi teori kognitif dan konstruktivisme dalam pembelajaran membawa implikasi penting bagi desain kurikulum. Kurikulum yang berbasis pada kedua teori tersebut harus menekankan pada kegiatan yang mendorong peserta didik untuk berpikir kritis, kreatif, serta reflektif. Selain itu, strategi pembelajaran harus dirancang untuk memberikan pengalaman belajar yang autentik, sehingga peserta didik dapat menghubungkan materi dengan situasi nyata. Hal ini sejalan dengan tuntutan pendidikan abad ke-21 yang mengedepankan penguasaan kompetensi berpikir tingkat tinggi (Higher Order Thinking Skills/HOTS). Dengan demikian, teori kognitif dan konstruktivisme menjadi fondasi penting dalam merancang model pembelajaran inovatif yang sesuai

dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan kebutuhan masyarakat global (Listiani & Rachmawati, 2022; Habsy et al., 2023).



Gambar 5. Teori Konstruktivisme dalam Pendidikan

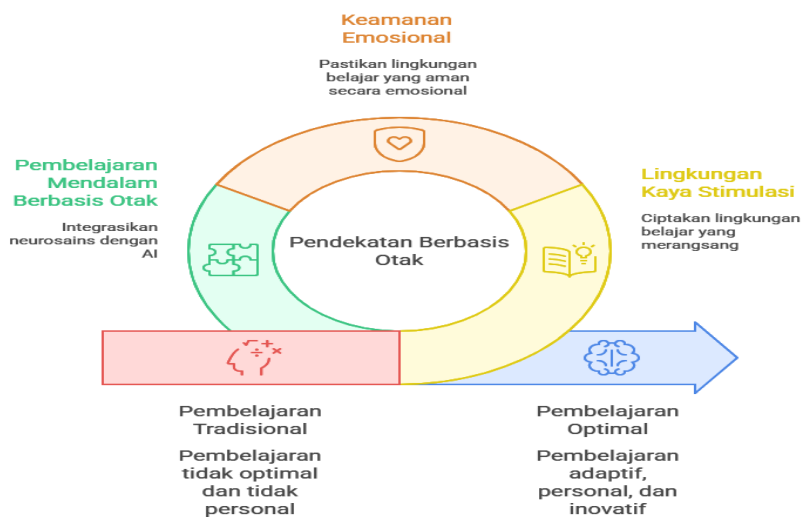
Seiring dengan kemajuan ilmu pengetahuan, teori neurosains kemudian hadir untuk memperkaya pemahaman tentang bagaimana otak bekerja dalam proses pembelajaran. Neurosains memberikan perspektif bahwa belajar pada dasarnya adalah hasil dari perubahan struktur dan fungsi otak akibat pengalaman. Konsep plastisitas otak menunjukkan bahwa pengalaman belajar yang bermakna dapat membentuk jalur sinapsis baru, memperkuat koneksi antar-neuron, serta meningkatkan kapasitas otak dalam menyimpan informasi. Prinsip ini sangat penting dalam membangun model pembelajaran yang berbasis pada cara kerja otak, sehingga

pengalaman belajar dapat lebih optimal. Neurosains juga menekankan bahwa faktor-faktor seperti emosi, motivasi, dan lingkungan berperan besar dalam menentukan efektivitas proses belajar (Amjad et al., 2023; Windari, Prihatin, & Fikri, 2023).

Penerapan neurosains dalam dunia pendidikan melahirkan pendekatan Brain-Based Learning yang menempatkan otak sebagai pusat dalam merancang strategi pembelajaran. Pendekatan ini menekankan pentingnya menciptakan lingkungan belajar yang kaya akan stimulasi, aman secara emosional, dan mendukung keterlibatan multisensori. Hal ini didasarkan pada temuan neurosains bahwa otak bekerja lebih efektif ketika emosi positif terlibat dalam proses belajar. Dengan demikian, pembelajaran yang dirancang berdasarkan prinsip neurosains tidak hanya meningkatkan kemampuan kognitif, tetapi juga memperkuat motivasi dan keterlibatan peserta didik (Subba, Chanunan, & Poonpaiboonpipat, 2025; Mastoni, Sumantri, & Ibrahim, 2019).

Lebih lanjut, neurosains juga memberikan landasan bagi pengembangan Model Brain-Based Deep Learning. Model ini mengintegrasikan prinsip neurosains dengan teknologi kecerdasan buatan, khususnya Deep Learning, untuk menciptakan pembelajaran yang lebih adaptif, personal, dan inovatif. Melalui pemanfaatan teknologi digital dan algoritma pembelajaran mendalam, guru dapat memahami kebutuhan unik peserta didik serta memberikan pengalaman belajar yang

sesuai dengan gaya belajar dan kemampuan masing-masing. Integrasi ini menunjukkan bahwa pembelajaran masa depan tidak hanya akan berfokus pada aspek kognitif, tetapi juga pada pemanfaatan teknologi untuk mendukung perkembangan otak secara optimal (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).



Gambar 6. Pembelajaran dengan Neurosains

Dengan demikian, teori kognitif, konstruktivisme, dan neurosains memberikan kerangka konseptual yang saling melengkapi dalam membangun pemahaman tentang pembelajaran. Teori kognitif menekankan pentingnya pemrosesan informasi, konstruktivisme menegaskan peran aktif peserta didik dalam membangun pengetahuan, sedangkan neurosains menjelaskan mekanisme biologis yang mendasari proses belajar. Ketiganya membentuk fondasi yang kuat bagi pengembangan model Brain-Based Deep Learning, yang tidak

hanya relevan secara teoritis, tetapi juga aplikatif dalam menjawab tantangan pendidikan abad ke-21. Dengan mengintegrasikan ketiga perspektif ini, pembelajaran dapat dirancang secara lebih efektif, holistik, dan berorientasi pada perkembangan potensi peserta didik secara optimal.

1.3 Prinsip-Prinsip Brain-Based Learning

Model Brain-Based Learning (BBL) merupakan pendekatan pembelajaran yang berlandaskan pada pemahaman mengenai cara kerja otak dalam menerima, memproses, dan menyimpan informasi. Prinsip dasar dari model ini adalah bahwa otak manusia memiliki kemampuan plastisitas, yaitu kemampuan untuk berubah dan beradaptasi berdasarkan pengalaman belajar yang dialami. Oleh karena itu, setiap strategi pembelajaran harus dirancang agar sesuai dengan pola alami otak dalam belajar. Salah satu prinsip penting dalam BBL adalah bahwa belajar akan lebih efektif apabila peserta didik berada dalam kondisi emosional yang positif dan lingkungan yang mendukung. Hal ini didukung oleh temuan neurosains yang menegaskan keterkaitan erat antara emosi dan kognisi dalam proses belajar, sehingga pembelajaran berbasis otak tidak dapat dipisahkan dari penciptaan suasana belajar yang aman, nyaman, dan memotivasi (Amjad et al., 2023; Yildiz & Arpaci, 2024).

Prinsip kedua dalam BBL adalah bahwa otak bekerja secara paralel, bukan linear. Artinya, dalam memproses

informasi, otak menggunakan berbagai jalur sekaligus, seperti jalur visual, auditori, kinestetik, dan emosional. Hal ini menunjukkan bahwa pembelajaran yang efektif adalah pembelajaran yang mampu menghadirkan pengalaman multisensori sehingga memfasilitasi kerja otak dalam memproses informasi. Misalnya, penggunaan media visual seperti GeoGebra dapat meningkatkan pemahaman konsep matematika karena memberikan representasi konkret yang dapat dihubungkan dengan konsep abstrak. Dengan demikian, pembelajaran yang dirancang berdasarkan prinsip kerja paralel otak akan lebih mampu membangun pemahaman mendalam serta meningkatkan retensi informasi (Nurhikmah et al., 2023; Fang, Ng, & Yuen, 2025).

Selanjutnya, BBL menekankan bahwa pembelajaran harus bersifat bermakna dan kontekstual. Otak akan lebih mudah menyimpan informasi yang dianggap relevan dengan kehidupan nyata peserta didik. Oleh karena itu, guru perlu merancang pengalaman belajar yang berkaitan langsung dengan situasi sehari-hari sehingga peserta didik dapat menghubungkan pengetahuan baru dengan pengetahuan yang telah dimiliki. Prinsip ini sejalan dengan teori konstruktivisme yang menekankan bahwa pengetahuan dibangun secara aktif oleh peserta didik melalui interaksi dengan lingkungan. Ketika pembelajaran dirancang berdasarkan konteks yang nyata, peserta didik tidak hanya memperoleh pengetahuan teoretis, tetapi juga keterampilan

aplikatif yang relevan dengan kehidupan (Sugrah, 2020; Subba, Chanunan, & Poonpaiboonpipat, 2025).

Prinsip lain dalam BBL adalah pentingnya keterlibatan aktif peserta didik dalam proses belajar. Aktivitas pasif seperti mendengarkan ceramah tidak cukup untuk mengoptimalkan fungsi otak, karena otak membutuhkan pengalaman yang menantang dan merangsang berpikir kritis. Oleh karena itu, strategi BBL mendorong peserta didik untuk terlibat dalam aktivitas seperti diskusi, eksplorasi, simulasi, pemecahan masalah, hingga kolaborasi kelompok. Aktivitas aktif ini dapat memperkuat jalur sinapsis di otak, sehingga meningkatkan pemahaman dan daya ingat. Dengan kata lain, semakin besar keterlibatan peserta didik dalam aktivitas pembelajaran, semakin kuat pula keterhubungan antar-neuron yang mendukung keberhasilan belajar (Permana & Kartika, 2021; Windari, Prihatin, & Fikri, 2023).

Selain itu, BBL menekankan prinsip keteraturan dan pengulangan. Otak akan lebih mudah menyerap dan mengingat informasi apabila terdapat pola dan struktur yang jelas. Hal ini sesuai dengan konsep neurologis bahwa jalur sinapsis akan semakin kuat apabila sering digunakan. Oleh karena itu, guru perlu memberikan kesempatan bagi peserta didik untuk mengulang, mereview, dan mempraktikkan kembali materi yang telah dipelajari dalam berbagai konteks. Pengulangan tidak hanya meningkatkan daya ingat, tetapi juga memperdalam pemahaman serta memungkinkan peserta didik

mengembangkan fleksibilitas kognitif. Dengan cara ini, peserta didik tidak hanya menghafal informasi, tetapi mampu menerapkannya pada situasi baru (Al-Balushi & Al-Balushi, 2018; Gözüyecil & Dikici, 2014).

Prinsip penting lainnya adalah bahwa otak memerlukan keterlibatan emosi untuk memaksimalkan pembelajaran. Emosi berperan sebagai pintu gerbang dalam memfasilitasi penyimpanan informasi ke dalam memori jangka panjang. Oleh karena itu, guru perlu menciptakan suasana belajar yang menyenangkan, penuh penghargaan, dan mendorong rasa ingin tahu. Misalnya, penggunaan teknologi interaktif seperti GeoGebra atau media berbasis digital dapat meningkatkan motivasi belajar peserta didik sekaligus menciptakan pengalaman belajar yang positif. Dengan melibatkan emosi secara optimal, peserta didik akan lebih mudah memahami konsep-konsep abstrak dan mengingatnya dalam jangka panjang (Nurhikmah et al., 2023; Za'ba, Ismail, & Abdullah, 2020).

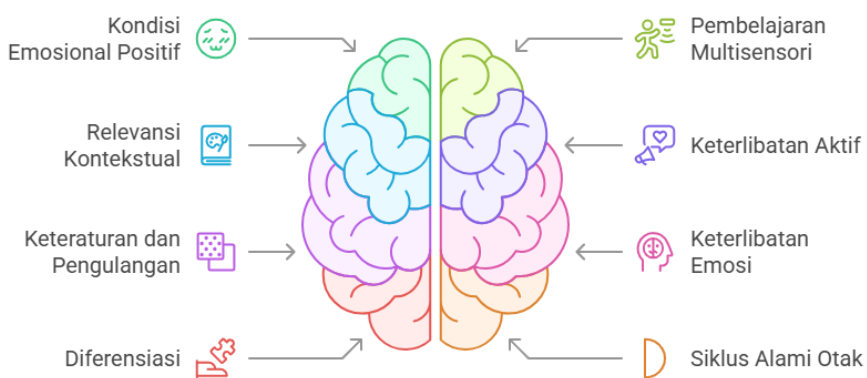
BBL juga mengedepankan prinsip diferensiasi, yaitu setiap individu memiliki cara dan gaya belajar yang berbeda. Otak setiap peserta didik unik, sehingga pembelajaran yang efektif harus memperhatikan keberagaman tersebut. Guru perlu merancang strategi pembelajaran yang adaptif dengan memberikan pilihan berbagai cara belajar, seperti visualisasi, eksperimen, diskusi, atau eksplorasi digital. Dengan demikian, pembelajaran menjadi lebih inklusif dan mampu

mengakomodasi kebutuhan peserta didik yang beragam. Prinsip diferensiasi ini semakin penting di era digital, di mana teknologi memungkinkan personalisasi pembelajaran sesuai dengan kebutuhan kognitif dan emosional individu (Yildiz & Arpaci, 2024; Kim, Park, & Joung, 2025).

Prinsip selanjutnya adalah bahwa pembelajaran berbasis otak harus mempertimbangkan siklus alami otak, termasuk kebutuhan fisiologis seperti tidur, nutrisi, dan aktivitas fisik. Neurosains menunjukkan bahwa otak membutuhkan kondisi fisik yang optimal untuk dapat berfungsi dengan baik. Oleh karena itu, pembelajaran tidak dapat dipisahkan dari pemenuhan kebutuhan dasar peserta didik. Dengan menjaga kesehatan fisik dan keseimbangan emosional, peserta didik akan lebih siap menerima materi dan mengolah informasi secara efektif. Hal ini menegaskan bahwa pendidikan tidak hanya berfokus pada aspek kognitif, tetapi juga mencakup dimensi holistik yang melibatkan fisik, emosi, dan sosial (Amjad et al., 2023; Madale et al., 2025).

Secara keseluruhan, prinsip-prinsip Brain-Based Learning menekankan bahwa pembelajaran harus didesain sesuai dengan cara kerja alami otak, memperhatikan aspek emosional, fisik, sosial, dan kognitif peserta didik. Dengan menerapkan prinsip-prinsip tersebut, pembelajaran dapat menjadi lebih efektif, bermakna, dan berorientasi pada pengembangan potensi optimal peserta didik. Integrasi BBL dengan teknologi digital, seperti aplikasi GeoGebra dan pendekatan Deep

Learning, memberikan peluang baru untuk memperkuat implementasi prinsip ini dalam konteks pendidikan modern. Dengan demikian, Brain-Based Learning tidak hanya menjadi teori, tetapi juga kerangka praktis yang dapat diadaptasi untuk sssmenjawab tantangan pendidikan abad ke-21 (Dwiputra, Azzahra, & Heryanto, 2023; Ambroise et al., 2025).



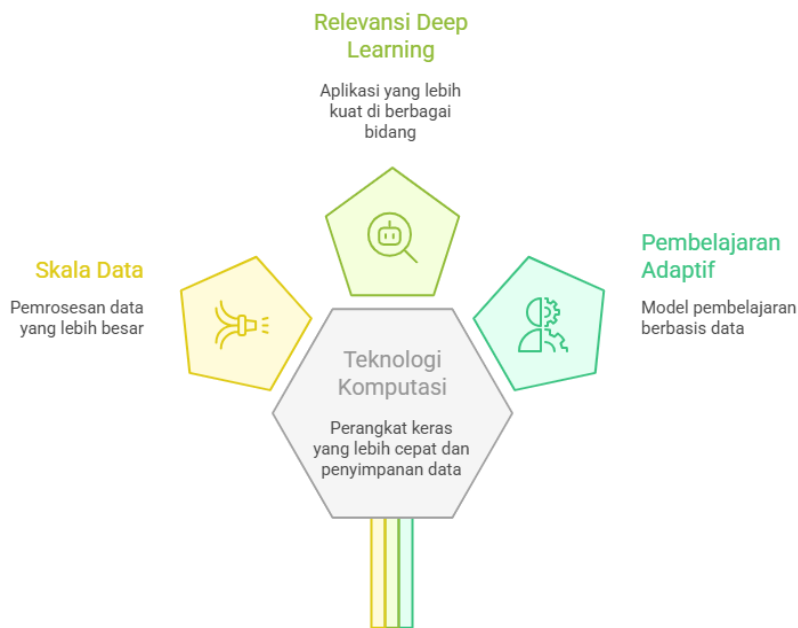
Gambar 6. Prinsip-Prinsip Berbasis Otak

1.4 Konsep dan Perkembangan Deep Learning

Deep Learning merupakan cabang dari machine learning yang berfokus pada pemanfaatan jaringan saraf tiruan berlapis (artificial neural networks) untuk memproses data dalam jumlah besar dan kompleks. Konsep ini terinspirasi dari cara kerja otak manusia dalam mengenali pola, memproses informasi, serta melakukan generalisasi dari pengalaman sebelumnya. Dengan struktur jaringan yang terdiri dari banyak lapisan tersembunyi, Deep Learning mampu mengekstraksi representasi data pada

berbagai tingkat abstraksi, sehingga dapat menghasilkan prediksi dan keputusan yang lebih akurat. Perkembangan Deep Learning tidak hanya relevan dalam bidang kecerdasan buatan, tetapi juga memberikan kontribusi signifikan pada kajian pendidikan, khususnya dalam pengembangan model pembelajaran berbasis otak. Integrasi antara teori neurosains dan Deep Learning memungkinkan lahirnya strategi pembelajaran yang lebih personal, adaptif, dan berbasis pada pola kerja otak manusia (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Perkembangan teknologi komputasi yang semakin cepat menjadi salah satu faktor utama dalam pesatnya kemajuan Deep Learning. Dengan dukungan perangkat keras seperti GPU (Graphic Processing Unit) dan TPU (Tensor Processing Unit), serta peningkatan kapasitas penyimpanan data, model Deep Learning kini mampu mengolah data dalam skala yang jauh lebih besar dibandingkan era sebelumnya. Di sisi lain, ketersediaan big data dari berbagai bidang, mulai dari kesehatan, transportasi, bisnis, hingga pendidikan, semakin memperkuat relevansi dan potensi penerapan Deep Learning. Dalam konteks pendidikan, data yang diperoleh dari aktivitas belajar peserta didik dapat diolah untuk menemukan pola perilaku, gaya belajar, dan kesulitan yang dihadapi, sehingga memungkinkan pengembangan model pembelajaran adaptif berbasis Brain-Based Learning (Halkiopoulou et al., 2025).



Gambar 7. Kemajuan Teknologi Mempercepat Deep Learning

Salah satu kekuatan utama dari Deep Learning adalah kemampuannya dalam melakukan pembelajaran representasi (representation learning). Dengan mekanisme ini, sistem tidak hanya belajar berdasarkan fitur yang dirancang secara manual, tetapi mampu mengekstraksi sendiri fitur penting dari data yang kompleks. Misalnya, dalam pengenalan citra, lapisan awal jaringan saraf tiruan dapat mendeteksi garis dan bentuk sederhana, sementara lapisan lebih dalam mampu mengenali objek secara keseluruhan. Dalam konteks pendidikan, Deep Learning dapat dimanfaatkan untuk menganalisis tulisan tangan siswa, ekspresi wajah saat belajar, hingga interaksi dengan media pembelajaran digital. Analisis ini dapat memberikan

gambaran mendalam mengenai kondisi emosional, motivasi, serta tingkat keterlibatan siswa dalam proses belajar (De Vries et al., 2025).

Konsep Deep Learning juga sangat erat kaitannya dengan bidang neurosains. Jaringan saraf tiruan yang menjadi inti dari Deep Learning dirancang dengan meniru cara kerja neuron biologis dalam otak manusia. Setiap neuron buatan menerima input, melakukan perhitungan, dan menghasilkan output yang dapat diteruskan ke neuron lain pada lapisan berikutnya. Proses ini mencerminkan bagaimana sinapsis dalam otak mengirimkan sinyal listrik antar-neuron. Hubungan antara neurosains dan Deep Learning ini membuka peluang besar bagi pengembangan model pembelajaran yang selaras dengan prinsip-prinsip Brain-Based Learning, sehingga strategi pembelajaran yang dihasilkan lebih mendekati pola alami otak dalam belajar (Ambroise et al., 2025).

Aspek	Penjelasan	Contoh Penerapan
Pembelajaran Representasi	Sistem dapat mengekstraksi fitur dari data kompleks tanpa harus dirancang manual.	Analisis tulisan tangan, ekspresi wajah, interaksi digital siswa.
Keterkaitan dengan Neurosains	Meniru cara kerja neuron biologis; relevan dengan Brain-Based Learning.	Strategi pembelajaran selaras dengan pola alami otak.
Arsitektur Utama	- CNN → citra/video- RNN → teks/data sekuensial- Transformer → bahasa alami & GPT	Pengenalan objek, analisis teks, chatbot pendidikan.
Fungsi dalam Pendidikan	- Analisis data siswa- Personalisasi pembelajaran- Umpan balik otomatis	Sistem adaptif yang menyesuaikan materi dengan kemampuan siswa.
Kontribusi pada Penelitian	Membantu menemukan pola tersembunyi dari data pembelajaran.	Analisis kesalahan siswa dalam matematika untuk intervensi tepat sasaran.
Tantangan	- Membutuhkan data besar & berkualitas- Interpretabilitas model yang rendah	Transparansi dalam keputusan pendidikan.
Implikasi & Peluang	Membentuk sistem pembelajaran cerdas, adaptif, personal, dan berbasis bukti.	Integrasi dengan GeoGebra, kelas digital, big data.

Tabel 1. Ringkasan Peran Deep Learning dalam Pendidikan

Seiring berjalannya waktu, Deep Learning telah mengalami perkembangan signifikan dalam arsitektur dan algoritmanya. Beberapa arsitektur penting seperti Convolutional Neural Networks (CNN), Recurrent Neural Networks (RNN), dan Transformers telah membawa lompatan besar dalam performa pemrosesan data. CNN misalnya, sangat efektif digunakan dalam pengolahan citra dan video, sementara RNN banyak dimanfaatkan dalam analisis teks dan data sekuensial. Transformasi terbaru dengan arsitektur Transformer telah merevolusi bidang pemrosesan bahasa alami, termasuk dalam pengembangan model bahasa besar seperti GPT. Perkembangan ini semakin memperkaya potensi Deep Learning dalam penerapannya di berbagai bidang pendidikan, khususnya dalam membangun sistem

pembelajaran cerdas yang mampu memahami kebutuhan unik setiap peserta didik (Halkiopoulous et al., 2025).

Dalam konteks integrasi dengan pendidikan, Deep Learning tidak hanya berfungsi sebagai alat analisis data, tetapi juga dapat digunakan untuk menciptakan lingkungan belajar yang lebih interaktif dan responsif. Sebagai contoh, sistem pembelajaran berbasis Deep Learning dapat menyesuaikan materi ajar sesuai dengan tingkat pemahaman peserta didik, memberikan umpan balik otomatis, serta merekomendasikan strategi belajar yang sesuai. Hal ini sejalan dengan prinsip personalisasi dalam Brain-Based Learning, di mana setiap individu memiliki kebutuhan belajar yang berbeda. Dengan demikian, Deep Learning berperan sebagai penghubung antara teori neurosains, data pembelajaran, dan implementasi praktis dalam kelas digital (Vieira et al., 2025).

Selain itu, perkembangan Deep Learning juga membawa implikasi penting bagi penelitian pendidikan. Analisis data berbasis Deep Learning memungkinkan peneliti untuk menemukan pola tersembunyi yang sulit diidentifikasi dengan metode konvensional. Misalnya, pola kesalahan siswa dalam menyelesaikan soal matematika dapat dianalisis untuk mengungkap keterbatasan pemahaman konsep tertentu. Data ini kemudian dapat dijadikan dasar untuk merancang intervensi pembelajaran yang lebih tepat sasaran. Dengan demikian, Deep Learning memberikan kontribusi tidak hanya dalam praktik pembelajaran, tetapi juga dalam pengembangan teori

pendidikan yang lebih berbasis bukti empiris (De Vries et al., 2025).

Namun, perkembangan Deep Learning juga menghadirkan tantangan yang perlu diperhatikan dalam konteks pendidikan. Salah satunya adalah kebutuhan akan data dalam jumlah besar dan berkualitas tinggi untuk melatih model agar dapat bekerja secara optimal. Selain itu, interpretabilitas atau keterjelasan hasil dari model Deep Learning sering menjadi kendala karena sifatnya yang kompleks dan sulit dijelaskan. Dalam dunia pendidikan, hal ini dapat memunculkan masalah transparansi dalam proses pengambilan keputusan yang terkait dengan peserta didik. Oleh karena itu, penting untuk mengembangkan pendekatan Deep Learning yang tidak hanya kuat dalam prediksi, tetapi juga dapat dipahami dan dipercaya oleh guru serta peserta didik (Ambroise et al., 2025).

Secara keseluruhan, konsep dan perkembangan Deep Learning memberikan fondasi yang kuat untuk mendukung pengembangan model pembelajaran berbasis otak yang lebih adaptif, cerdas, dan sesuai dengan kebutuhan pendidikan masa depan. Integrasi antara Deep Learning dan Brain-Based Learning membuka peluang untuk menciptakan pengalaman belajar yang lebih bermakna, personal, dan berorientasi pada potensi optimal peserta didik. Dengan dukungan neurosains, teknologi digital, dan analisis big data, Deep Learning berperan sebagai salah satu kunci utama dalam transformasi

pendidikan abad ke-21. Hal ini sekaligus mempertegas urgensi perlunya kajian lebih mendalam tentang penerapan Deep Learning dalam konteks pendidikan matematika dan pemanfaatannya melalui media interaktif seperti GeoGebra.

1.5 Integrasi Neurosains dengan Teknologi Pendidikan

Integrasi neurosains dengan teknologi pendidikan merupakan sebuah pendekatan yang lahir dari kebutuhan untuk memahami proses belajar secara lebih mendalam melalui mekanisme kerja otak serta memanfaatkannya dalam pengembangan sistem pembelajaran modern. Neurosains, sebagai ilmu yang mempelajari struktur dan fungsi otak, memberikan wawasan penting mengenai bagaimana manusia menerima, memproses, menyimpan, dan mengingat informasi. Pengetahuan ini kemudian dapat dipadukan dengan teknologi pendidikan yang saat ini berkembang pesat, seperti pembelajaran digital, kecerdasan buatan, serta pemanfaatan perangkat lunak interaktif. Dengan adanya integrasi ini, sistem pembelajaran tidak lagi hanya bersifat transfer pengetahuan, melainkan lebih diarahkan pada penciptaan pengalaman belajar yang sesuai dengan cara otak bekerja. Hal ini menjadikan pembelajaran lebih bermakna, adaptif, serta berpotensi meningkatkan motivasi dan hasil belajar peserta didik secara signifikan (Al-Balushi & Al-Balushi, 2018; Amjad et al., 2023).

Neurosains telah membuktikan bahwa otak manusia memiliki kapasitas luar biasa untuk belajar, beradaptasi, serta membentuk koneksi baru melalui proses yang dikenal dengan plastisitas otak. Teknologi pendidikan kemudian hadir sebagai sarana untuk memfasilitasi proses ini dengan menyediakan lingkungan belajar yang interaktif dan dinamis. Misalnya, aplikasi seperti GeoGebra memungkinkan peserta didik untuk memvisualisasikan konsep matematika abstrak menjadi bentuk yang konkret dan interaktif, sehingga memudahkan pemahaman sekaligus memperkuat keterkaitan antar-konsep. Integrasi ini sejalan dengan prinsip Brain-Based Learning, di mana proses belajar sebaiknya dirancang dengan memperhatikan keterlibatan multisensoris, stimulasi otak, serta penguatan pengalaman langsung (Nurhikmah et al., 2023; Yildiz & Arpaci, 2024).

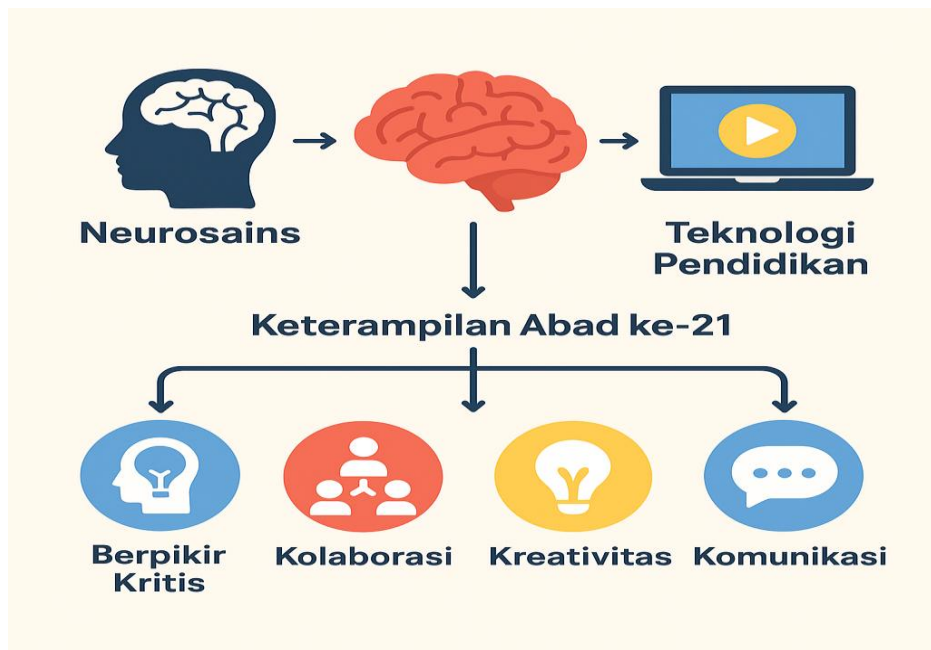
Peran kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) dalam teknologi pendidikan semakin memperkuat relevansi integrasi dengan neurosains. AI berbasis Deep Learning dapat menganalisis data besar yang berasal dari aktivitas belajar peserta didik untuk kemudian memberikan rekomendasi strategi pembelajaran yang sesuai dengan gaya belajar individu. Dari perspektif neurosains, hal ini mendukung pendekatan personalisasi pembelajaran karena setiap otak bekerja dengan cara yang unik. Dengan demikian, teknologi berbasis AI dapat membantu guru merancang pembelajaran yang lebih adaptif, berorientasi pada kebutuhan peserta didik,

serta mendukung perkembangan keterampilan berpikir tingkat tinggi (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Selain itu, integrasi neurosains dan teknologi pendidikan juga sangat bermanfaat dalam menurunkan hambatan kognitif yang sering dihadapi peserta didik. Beban kognitif yang terlalu tinggi dapat menghambat proses belajar karena otak memiliki keterbatasan dalam memproses informasi pada waktu tertentu. Teknologi pendidikan melalui media interaktif dapat membantu mengurangi beban ini dengan menyajikan informasi dalam bentuk visual, audio, maupun simulasi dinamis yang lebih mudah dipahami. Hal ini diperkuat oleh penelitian yang menunjukkan bahwa pemanfaatan GeoGebra mampu menurunkan tingkat kecemasan matematis sekaligus meningkatkan motivasi belajar siswa (Fang et al., 2025).

Integrasi ini juga mendukung pengembangan keterampilan abad ke-21 yang sangat dibutuhkan dalam dunia modern, seperti berpikir kritis, kolaborasi, kreativitas, dan komunikasi. Neurosains menekankan pentingnya keterlibatan emosi dalam proses belajar, sementara teknologi pendidikan mampu menyediakan platform yang mendukung kolaborasi virtual, eksperimen interaktif, serta simulasi berbasis masalah nyata. Dengan menggabungkan kedua aspek ini, peserta didik tidak hanya memperoleh pengetahuan kognitif, tetapi juga keterampilan afektif dan psikomotorik yang selaras dengan tuntutan global. Oleh karena itu, pembelajaran yang terintegrasi dengan neurosains dan teknologi tidak hanya

meningkatkan capaian akademik, tetapi juga membentuk karakter serta kompetensi yang lebih komprehensif (Subba et al., 2025).



Gambar 7. Integrasi Neurosains dan Teknologi Pendidikan untuk Pengembangan Keterampilan Abad ke-21

Dalam implementasinya, integrasi neurosains dengan teknologi pendidikan memerlukan dukungan dari guru yang memiliki pemahaman mendalam mengenai prinsip kerja otak serta keterampilan dalam memanfaatkan teknologi digital. Guru berperan penting sebagai fasilitator yang menghubungkan hasil kajian neurosains dengan strategi pembelajaran berbasis teknologi. Oleh sebab itu, program pengembangan profesional guru perlu mengakomodasi pelatihan yang berfokus pada pemahaman neurosains

pendidikan sekaligus literasi teknologi. Hal ini penting agar guru mampu merancang pengalaman belajar yang sejalan dengan prinsip Brain-Based Learning sekaligus mengoptimalkan pemanfaatan media digital dalam pembelajaran (Madale et al., 2025).

Selain guru, peran peneliti pendidikan juga krusial dalam memperkuat integrasi ini. Penelitian berbasis neurosains dan teknologi pendidikan dapat menghasilkan model pembelajaran baru yang lebih inovatif, adaptif, dan efektif. Misalnya, penelitian mengenai penerapan neuroscience-based inquiry learning telah membuktikan bahwa keterpaduan antara neurosains dan pendekatan inkuiri dapat meningkatkan sikap ilmiah serta pemahaman konseptual siswa dalam pembelajaran sains (Asriyadin et al., 2021). Penelitian serupa perlu terus dikembangkan dalam bidang pendidikan matematika melalui integrasi dengan teknologi interaktif seperti GeoGebra untuk meningkatkan keterampilan berpikir kritis dan pemecahan masalah.

Integrasi neurosains dengan teknologi pendidikan juga menghadirkan tantangan etis yang perlu diantisipasi. Penggunaan data otak dan perilaku peserta didik dalam pembelajaran digital harus memperhatikan aspek privasi, keamanan data, serta potensi penyalahgunaan. Selain itu, ketergantungan berlebihan pada teknologi berisiko mengurangi peran interaksi manusiawi antara guru dan peserta didik. Oleh karena itu, diperlukan kebijakan yang jelas serta

pedoman etika yang ketat agar pemanfaatan integrasi ini tetap berada dalam koridor yang positif, bermanfaat, dan sesuai dengan tujuan pendidikan.

Secara keseluruhan, integrasi neurosains dengan teknologi pendidikan memberikan peluang besar dalam menciptakan model pembelajaran yang lebih efektif, adaptif, dan sesuai dengan kebutuhan belajar peserta didik. Dengan memanfaatkan temuan neurosains mengenai cara kerja otak serta dukungan teknologi pendidikan berbasis AI, big data, dan aplikasi interaktif, proses pembelajaran dapat ditransformasi menjadi lebih kontekstual, personal, dan bermakna. Integrasi ini sekaligus memperkuat relevansi model Brain-Based Deep Learning sebagai paradigma baru dalam pendidikan yang menghubungkan aspek biologis, psikologis, dan teknologi digital untuk membentuk generasi pembelajar yang lebih kompeten dan adaptif di era digital.

BAB 2 KERANGKA

KONSEPTUAL MODEL BRAIN-BASED DEEP LEARNING

2.1 Definisi Operasional Model Brain-Based Deep Learning

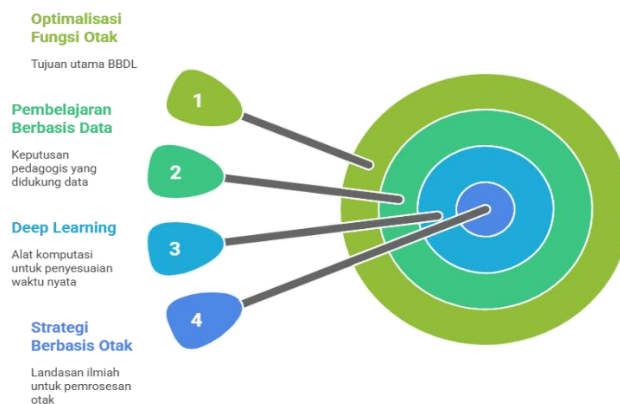
Definisi operasional dari model Brain-Based Deep Learning (BBDL) merupakan upaya konseptual untuk mengintegrasikan prinsip-prinsip neurosains dalam pembelajaran dengan kekuatan teknologi Deep Learning yang berasal dari ranah kecerdasan buatan. Secara fundamental, BBDL dapat dipahami sebagai suatu pendekatan pembelajaran yang memanfaatkan temuan ilmiah tentang cara kerja otak manusia untuk mengoptimalkan proses kognitif, sekaligus memanfaatkan algoritma Deep Learning untuk menyesuaikan pengalaman belajar berdasarkan pola data individu. Dalam definisi ini, prinsip Brain-Based Learning (BBL) yang menekankan keterhubungan emosi, motivasi, dan fungsi otak dalam pembelajaran dikombinasikan dengan analisis big data yang dilakukan oleh jaringan saraf tiruan untuk mendukung personalisasi pembelajaran (Adiansha et al., 2021; Syarifuddin et al., 2025). Oleh sebab itu, BBDL bukan hanya sebuah metode pengajaran, melainkan suatu kerangka konseptual

yang dirancang untuk menjawab kebutuhan pendidikan modern yang kompleks.

Definisi operasional BBDL juga menekankan pada karakteristik integratif antara ranah pedagogis dan teknologi. Dari sisi pedagogis, model ini mengacu pada prinsip neurosains bahwa setiap otak belajar dengan cara unik dan memerlukan stimulasi yang sesuai untuk mengoptimalkan fungsi memori, konsentrasi, dan kreativitas (Permana & Kartika, 2021). Dari sisi teknologi, Deep Learning digunakan untuk mengolah data besar yang dihasilkan selama proses belajar, seperti pola interaksi, capaian akademik, hingga preferensi belajar, guna memberikan umpan balik adaptif. Integrasi kedua dimensi tersebut menjadikan BBDL memiliki ciri utama berupa adaptabilitas tinggi, personalisasi, serta kemampuan dalam mengantisipasi kebutuhan belajar peserta didik di berbagai konteks (Ambroise et al., 2025). Dengan demikian, definisi operasional BBDL memuat aspek teoretis, praktis, dan teknologi yang saling melengkapi.

Lebih lanjut, dalam definisi operasionalnya, BBDL didefinisikan sebagai pendekatan pendidikan yang menggabungkan brain-based strategies dengan deep neural networks untuk meningkatkan efektivitas, efisiensi, dan relevansi pembelajaran. BBL menyediakan landasan ilmiah terkait bagaimana otak memproses informasi, sedangkan Deep Learning berperan sebagai alat komputasi yang mampu menyesuaikan proses belajar secara real time. Pendekatan ini

secara khusus ditujukan untuk mendukung pembelajaran yang berbasis data, di mana keputusan pedagogis tidak hanya bersifat intuitif, tetapi juga berbasis pada analisis ilmiah mengenai profil belajar peserta didik (De Vries et al., 2025). Oleh karena itu, BBDL secara operasional dapat dipahami sebagai sebuah sistem pembelajaran yang berorientasi pada optimalisasi fungsi otak dengan bantuan teknologi AI cerdas.



Gambar 10. Sistem Pembelajaran BBDL

Dalam definisi operasional ini, dimensi kognitif, afektif, dan psikomotorik dipandang sebagai satu kesatuan yang tidak terpisahkan. BBL menekankan bahwa pembelajaran efektif harus melibatkan keterpaduan aspek kognitif dan emosional, sementara Deep Learning memperkuat dimensi tersebut melalui kemampuan komputasi untuk mengidentifikasi kebutuhan afektif maupun kecenderungan perilaku belajar peserta didik. Hal ini menjadikan BBDL lebih unggul dibandingkan dengan model pembelajaran tradisional maupun

model yang hanya menekankan salah satu aspek. Penekanan pada keterpaduan dimensi ini sejalan dengan pandangan Amjad et al. (2023) yang menekankan pentingnya motivasi intrinsik dalam pembelajaran berbasis neurosains. Dengan demikian, definisi operasional BBDL mencakup pemahaman bahwa pembelajaran adalah aktivitas multidimensi yang harus dipersonalisasi sesuai kondisi unik setiap individu.

BBDL juga didefinisikan sebagai suatu model pembelajaran yang berorientasi pada keberlanjutan dan skalabilitas dalam konteks pendidikan digital. Berbeda dengan BBL yang sering kali bersifat kontekstual di ruang kelas, integrasi Deep Learning menjadikan BBDL mampu diterapkan dalam skala luas, termasuk pembelajaran daring dan hibrida. Hal ini sesuai dengan tren pendidikan global yang menekankan pentingnya pemanfaatan teknologi untuk menjawab tantangan pembelajaran di era digital (Kim et al., 2025). Dengan demikian, BBDL tidak hanya memfokuskan diri pada optimalisasi potensi otak dalam lingkup terbatas, tetapi juga merancang strategi pembelajaran yang adaptif untuk masyarakat luas dengan beragam latar belakang dan kebutuhan belajar.

Definisi operasional BBDL dapat pula dipahami sebagai suatu kerangka inovatif yang menjembatani kesenjangan antara teori neurosains, praktik pendidikan, dan kecerdasan buatan. Banyak penelitian sebelumnya hanya memanfaatkan BBL untuk mengasah keterampilan berpikir tingkat tinggi tanpa dukungan

teknologi lanjutan (Funa et al., 2024), atau sebaliknya, menerapkan Deep Learning hanya pada aspek analisis data pendidikan tanpa landasan pedagogis yang kuat (Vieira et al., 2025). BBDL menghadirkan kebaruan dengan menyatukan kedua pendekatan ini dalam satu kerangka konseptual yang utuh. Dengan demikian, definisi operasional BBDL menekankan fungsi kolaboratif antara sains otak dan teknologi AI sebagai pilar utama inovasi pendidikan.

Dalam perspektif operasional, BBDL juga didefinisikan sebagai pendekatan pembelajaran yang memanfaatkan analitik pembelajaran (learning analytics) untuk menghasilkan rekomendasi berbasis data. Rekomendasi ini dipadukan dengan strategi BBL yang berfokus pada keseimbangan fungsi otak, lingkungan belajar yang aman, serta keterlibatan emosional peserta didik (Handayani et al., 2020; Rahmawati et al., 2024). Dengan demikian, model ini dapat mendukung guru maupun fasilitator dalam mengambil keputusan instruksional yang lebih tepat, tidak hanya berdasarkan intuisi, tetapi juga melalui validasi empiris dari data yang diolah dengan Deep Learning.

Lebih dalam, definisi operasional BBDL menegaskan perannya sebagai framework yang fleksibel. Artinya, BBDL dapat diterapkan pada berbagai level pendidikan, mulai dari sekolah dasar hingga perguruan tinggi, serta dapat diadaptasi pada berbagai bidang studi, khususnya matematika dan sains. Hal ini selaras dengan pandangan Mastoni et al. (2019) yang

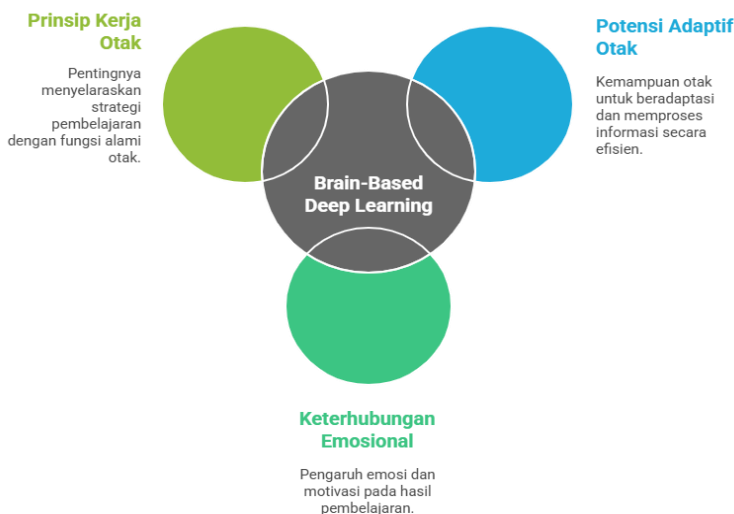
menekankan bahwa BBL mampu meningkatkan keterampilan berpikir kompleks, sehingga ketika dikombinasikan dengan teknologi Deep Learning, model ini mampu menghadirkan strategi instruksional yang kontekstual. Fleksibilitas ini menjadi salah satu ciri utama yang membedakan BBDL dari model pembelajaran berbasis teknologi lain yang cenderung kaku.

Secara keseluruhan, definisi operasional BBDL merujuk pada integrasi menyeluruh antara prinsip neurosains pendidikan dengan teknologi kecerdasan buatan berbasis Deep Learning. BBDL bukan hanya memanfaatkan kekuatan otak sebagai pusat pembelajaran, melainkan juga mengoptimalkan pemanfaatan data besar untuk menghadirkan pengalaman belajar yang adaptif, personal, dan relevan dengan tuntutan abad ke-21. Oleh sebab itu, definisi ini menegaskan bahwa BBDL adalah sebuah model inovatif yang menggabungkan keunggulan ilmiah, pedagogis, dan teknologi, sekaligus menghadirkan paradigma baru dalam mengelola pembelajaran yang berpusat pada peserta didik.

2.2 Asumsi Dasar Pengembangan Model

Asumsi dasar pengembangan model Brain-Based Deep Learning (BBDL) berakar pada pandangan bahwa proses belajar manusia tidak dapat dipisahkan dari mekanisme biologis otak yang mengatur persepsi, memori, emosi, dan kognisi. Prinsip utama yang menjadi landasan adalah bahwa otak memiliki potensi adaptif yang luar biasa dalam memproses

informasi, sehingga setiap intervensi pembelajaran harus mempertimbangkan bagaimana otak bekerja secara alami. Penelitian dalam bidang neurosains pendidikan menunjukkan bahwa keterhubungan antara faktor emosional, motivasi, dan lingkungan belajar sangat berpengaruh terhadap pencapaian akademik (Adiansha et al., 2021; Amjad et al., 2023). Dengan demikian, asumsi pertama yang mendasari BBDL adalah bahwa pembelajaran yang efektif hanya dapat terjadi jika didesain sesuai dengan prinsip kerja otak.



Gambar 11. Asumsi Dasar BBDL

Asumsi berikutnya adalah bahwa setiap individu memiliki karakteristik unik dalam hal gaya belajar, kecepatan memproses informasi, serta kemampuan dalam mengaitkan pengetahuan baru dengan pengalaman sebelumnya. Brain-Based Learning menegaskan pentingnya diferensiasi

instruksional yang mengakomodasi keunikan peserta didik (Permana & Kartika, 2021). Sementara itu, teknologi Deep Learning memberikan kapasitas untuk mengolah data besar sehingga mampu mengenali pola unik dari setiap peserta didik. Oleh karena itu, pengembangan model BBDL diasumsikan berangkat dari prinsip diferensiasi, di mana pembelajaran tidak bersifat seragam, melainkan adaptif dan responsif terhadap kebutuhan individual.

Asumsi dasar lain yang mendukung pengembangan BBDL adalah bahwa pembelajaran yang bermakna hanya dapat dicapai apabila terdapat keterhubungan antara aspek kognitif, afektif, dan psikomotorik. Neurosains menegaskan bahwa keterlibatan emosional memiliki peranan signifikan dalam memperkuat memori jangka panjang dan motivasi belajar (Rahmawati et al., 2024). Oleh sebab itu, dalam BBDL diasumsikan bahwa algoritma Deep Learning yang dirancang untuk memprediksi kebutuhan belajar tidak hanya berfokus pada hasil kognitif, tetapi juga mempertimbangkan indikator afektif seperti tingkat keterlibatan atau motivasi intrinsik. Hal ini memberikan pendekatan yang lebih holistik dalam mendefinisikan keberhasilan pembelajaran.

Asumsi berikutnya adalah bahwa teknologi dapat berperan sebagai fasilitator utama untuk menghubungkan teori neurosains dengan praktik pembelajaran. Tanpa adanya dukungan teknologi, prinsip-prinsip BBL sering kali sulit diimplementasikan secara konsisten dalam skala besar (Funa et

al., 2024). Melalui Deep Learning, berbagai data mengenai interaksi belajar dapat dianalisis secara otomatis untuk memberikan umpan balik adaptif. Oleh karena itu, asumsi mendasar dalam BBDL adalah bahwa integrasi teknologi bukan sekadar alat bantu, melainkan komponen esensial untuk memastikan penerapan prinsip neurosains dapat terwujud dalam praktik pendidikan yang lebih luas.

Asumsi lain yang penting dalam pengembangan BBDL adalah bahwa lingkungan belajar yang positif, menstimulasi, dan relevan secara kontekstual merupakan faktor penentu keberhasilan. BBL menekankan pentingnya lingkungan yang aman secara emosional dan kondusif untuk mendukung eksplorasi kognitif (Handayani et al., 2020). Ketika prinsip ini dikombinasikan dengan kemampuan Deep Learning dalam merancang pengalaman belajar personal, maka diasumsikan pembelajaran akan lebih efektif karena peserta didik merasa terhubung dengan materi dan memiliki kendali terhadap proses belajarnya. Asumsi ini memperkuat gagasan bahwa lingkungan belajar yang responsif menjadi fondasi dalam pengembangan model BBDL.

Asumsi mendasar lainnya adalah bahwa keberhasilan pembelajaran tidak hanya ditentukan oleh penguasaan pengetahuan faktual, tetapi juga oleh kemampuan berpikir tingkat tinggi seperti berpikir kritis, kreatif, dan sistematis. BBL telah terbukti mampu meningkatkan keterampilan berpikir tingkat tinggi melalui strategi yang menstimulasi otak secara

optimal (Syarifuddin et al., 2025). Dalam konteks BBDL, diasumsikan bahwa Deep Learning dapat membantu mengidentifikasi perkembangan keterampilan tersebut melalui analisis data capaian belajar. Dengan demikian, pengembangan model ini berasumsi bahwa tujuan akhir pembelajaran bukan hanya pencapaian akademik semata, tetapi juga penguatan kompetensi abad ke-21 yang relevan dengan kebutuhan global.

Asumsi selanjutnya adalah bahwa model pembelajaran harus mampu menjembatani kesenjangan antara teori dan praktik. Banyak penelitian sebelumnya menyoroti adanya kesenjangan antara pemahaman teoretis tentang cara kerja otak dengan implementasi di kelas (Dwiputra et al., 2023). BBDL diasumsikan hadir sebagai solusi untuk mengatasi kesenjangan tersebut dengan mengintegrasikan teknologi cerdas yang mampu mengaplikasikan teori neurosains dalam konteks nyata. Dengan demikian, asumsi yang dipegang adalah bahwa setiap prinsip teoretis harus dapat dikontekstualisasikan melalui pendekatan berbasis data dan teknologi agar relevan dengan kebutuhan peserta didik.

Asumsi penting lainnya adalah bahwa keberhasilan pengembangan BBDL sangat bergantung pada peran guru atau fasilitator sebagai agen utama perubahan. Meskipun teknologi dan neurosains memberikan kerangka ilmiah, namun pengambilan keputusan instruksional tetap membutuhkan kompetensi profesional guru. Oleh karena itu, diasumsikan

bahwa guru perlu dilatih untuk memahami prinsip neurosains sekaligus memanfaatkan teknologi Deep Learning dalam mendesain pembelajaran (Madale et al., 2025). Dengan demikian, asumsi yang mendasari pengembangan model ini adalah bahwa faktor manusia tetap menjadi komponen inti meskipun teknologi memegang peranan besar dalam implementasi.

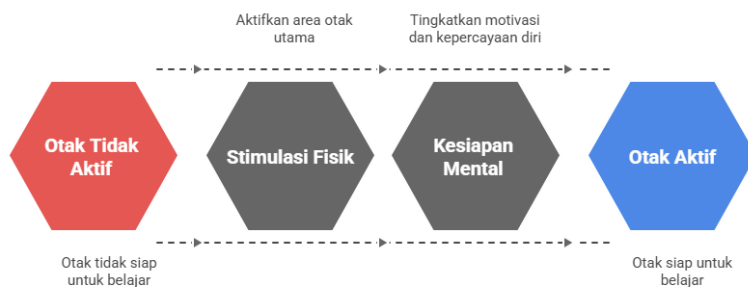
Asumsi terakhir adalah bahwa model BBDL dikembangkan untuk menjawab tuntutan pendidikan di era digital yang menekankan pentingnya fleksibilitas, adaptabilitas, dan skalabilitas. Pendidikan abad ke-21 membutuhkan model pembelajaran yang mampu menyesuaikan diri dengan perubahan cepat, baik dari sisi kebutuhan peserta didik maupun perkembangan teknologi (Kim et al., 2025). Oleh karena itu, asumsi mendasar dari BBDL adalah bahwa model ini tidak hanya berorientasi pada konteks saat ini, tetapi juga dirancang agar relevan dan berkelanjutan untuk masa depan. Dengan kata lain, BBDL diasumsikan sebagai model yang inovatif, adaptif, dan visioner dalam menghadapi dinamika pendidikan global.

2.3Komponen-Komponen Utama Model

a. Aktivasi Otak

Aktivasi otak merupakan fondasi utama dalam pengembangan model Brain-Based Deep Learning (BBDL). Prinsip ini didasarkan pada asumsi bahwa pembelajaran

yang efektif memerlukan kesiapan fisiologis dan psikologis otak sebelum menerima stimulus akademik. Proses aktivasi otak melibatkan kegiatan yang menstimulasi area prefrontal cortex, hippocampus, dan amigdala, yang berfungsi mengatur perhatian, memori, dan emosi. Penelitian dalam neurosains menunjukkan bahwa kondisi emosional positif dapat memperkuat koneksi sinaptik sehingga meningkatkan daya serap informasi (Amjad et al., 2023; Intasena et al., 2023). Dalam konteks pembelajaran, aktivasi otak dapat dilakukan melalui teknik sederhana seperti brain gym, musik edukatif, atau permainan kognitif yang mendorong keterlibatan aktif peserta didik. Dengan demikian, komponen ini berfungsi menyiapkan otak dalam keadaan optimal agar proses pembelajaran berikutnya berlangsung efektif.



Gambar 12. Aktivasi Otak Untuk Pembelajaran yang Efektif

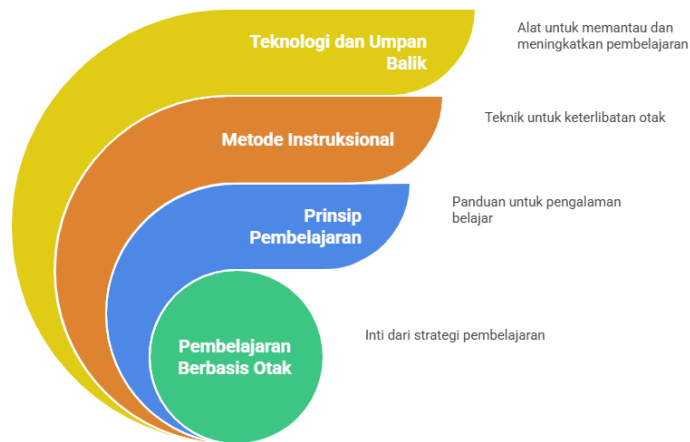
Selain stimulasi fisik, aktivasi otak juga terkait erat dengan kesiapan mental. Penelitian menunjukkan bahwa

pengaturan emosi dan motivasi intrinsik sangat memengaruhi tingkat konsentrasi dan retensi memori jangka panjang (Rahmawati et al., 2024). Oleh karena itu, strategi aktivasi otak dalam BBDL dirancang tidak hanya untuk mempersiapkan tubuh dan otak secara fisiologis, tetapi juga menciptakan rasa percaya diri, antusiasme, dan motivasi belajar yang tinggi. Aktivasi otak menjadi langkah awal yang bersifat preventif terhadap hambatan kognitif, sehingga siswa dapat memasuki proses pembelajaran dengan kesiapan penuh. Dengan demikian, komponen aktivasi otak tidak sekadar ritual pembuka, melainkan strategi sistematis yang berkontribusi terhadap efektivitas keseluruhan model.

b. Strategi Pembelajaran Berbasis Otak

Strategi pembelajaran berbasis otak dalam BBDL dirancang untuk menyelaraskan pengalaman belajar dengan cara kerja alami otak. Strategi ini mencakup penerapan prinsip kontekstualitas, multisensori, emosi positif, serta kolaborasi sosial. Menurut Caine dan Caine dalam teori Brain-Based Learning, otak belajar secara paralel dengan mengintegrasikan aspek kognitif, afektif, dan lingkungan (Nurasiah et al., 2022; Dwiputra et al., 2023). Oleh karena itu, strategi pembelajaran yang digunakan dalam BBDL melibatkan aktivitas kreatif, pemecahan masalah nyata, serta penggunaan media interaktif yang dapat menstimulasi berbagai area otak

sekaligus. Strategi ini diperkaya dengan prinsip konstruktivisme, di mana peserta didik mengkonstruksi sendiri pengetahuannya melalui pengalaman belajar aktif.



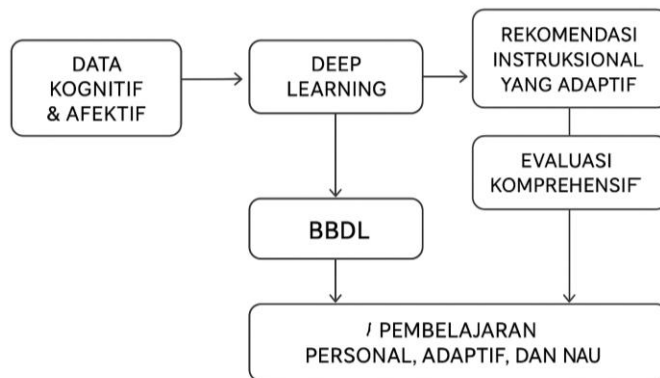
Gambar 13. Strategi Pembelajaran Berbasis Otak

Selain itu, strategi pembelajaran berbasis otak juga menekankan pentingnya scaffolding dan differentiated instruction. Penelitian menunjukkan bahwa intervensi pembelajaran yang menyesuaikan tingkat perkembangan kognitif peserta didik mampu meningkatkan keterampilan berpikir tingkat tinggi seperti analisis, evaluasi, dan kreasi (Permana & Kartika, 2021; Syarifuddin et al., 2025). Dalam model BBDL, strategi ini dipadukan dengan pemanfaatan teknologi cerdas untuk memantau capaian belajar, sehingga guru dapat memberikan umpan balik yang lebih tepat sasaran. Dengan demikian, strategi pembelajaran berbasis otak dalam BBDL bukan hanya metode

pedagogis, melainkan kerangka instruksional yang memastikan setiap peserta didik mendapatkan pengalaman belajar sesuai dengan kapasitas otaknya.

c. Integrasi Teknologi Deep Learning

Komponen terakhir dalam BBDL adalah integrasi teknologi Deep Learning yang berperan sebagai penguat dalam implementasi prinsip neurosains. Deep Learning memberikan kemampuan analisis data dalam jumlah besar sehingga memungkinkan personalisasi pembelajaran berbasis profil kognitif dan afektif peserta didik (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025). Melalui algoritma cerdas, sistem dapat mendeteksi pola belajar, kesulitan konseptual, serta tingkat keterlibatan emosional, kemudian memberikan rekomendasi instruksional yang adaptif. Dengan demikian, integrasi Deep Learning dalam BBDL berfungsi sebagai jembatan antara teori neurosains dengan praktik pendidikan berbasis data.



Gambar 14. Integrasi Teknologi Deep Learning

Lebih lanjut, integrasi ini membuka peluang bagi terciptanya lingkungan belajar yang bersifat prediktif dan adaptif. Teknologi Deep Learning dapat memproyeksikan perkembangan capaian akademik peserta didik dan mengantisipasi kesulitan yang mungkin dihadapi (Halkiopoulos et al., 2025). Dengan adanya analisis prediktif, guru dapat lebih proaktif dalam memberikan intervensi yang sesuai. Integrasi ini juga memungkinkan evaluasi yang lebih komprehensif, tidak hanya menilai aspek kognitif tetapi juga indikator afektif seperti motivasi dan keterlibatan. Oleh karena itu, dalam model BBDL, integrasi teknologi Deep Learning dipandang bukan sekadar tambahan, melainkan komponen inti yang memperkuat prinsip Brain-Based Learning sehingga mampu menghadirkan pembelajaran yang personal, adaptif, dan berkelanjutan.

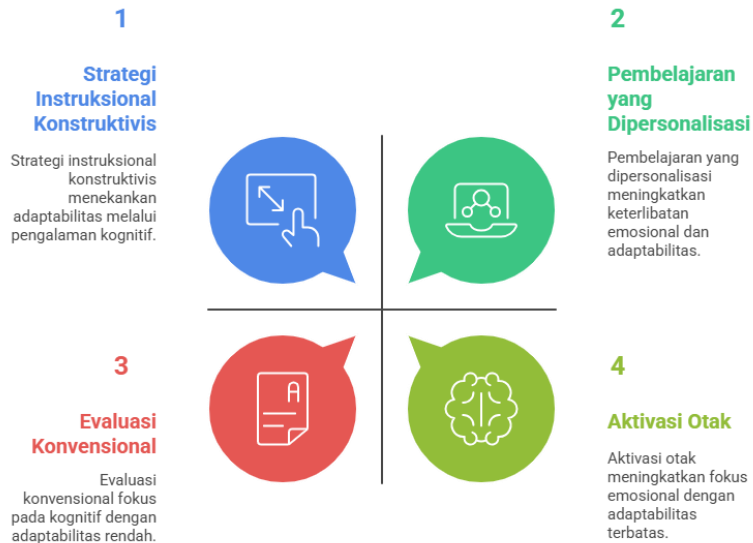
2.4 Karakteristik Model

Model Brain-Based Deep Learning (BBDL) memiliki karakteristik utama yang membedakannya dari model pembelajaran konvensional, yakni keberpihakan pada cara kerja alami otak manusia dalam memproses informasi serta integrasi teknologi kecerdasan buatan untuk mendukung personalisasi pembelajaran. Pendekatan ini menggabungkan prinsip neurosains dengan algoritma deep learning, sehingga

menghasilkan sebuah kerangka instruksional yang tidak hanya berbasis teori kognitif, tetapi juga didukung oleh analisis data besar dalam memahami perilaku belajar peserta didik. Karakteristik ini memastikan bahwa setiap peserta didik mendapatkan pengalaman belajar yang sesuai dengan profil kognitif, gaya belajar, dan kesiapan mentalnya. Dengan demikian, BBDL menjadi model yang dinamis, kontekstual, dan relevan dengan tuntutan pendidikan abad ke-21, di mana keterampilan berpikir kritis, kreativitas, dan literasi digital menjadi kebutuhan utama (Amjad et al., 2023; Ambroise et al., 2025).

Salah satu karakteristik penting BBDL adalah adanya penekanan pada aktivasi otak sebelum pembelajaran dimulai. Hal ini sesuai dengan prinsip Brain-Based Learning yang menegaskan bahwa otak memerlukan kondisi optimal secara fisiologis dan emosional agar proses belajar dapat berlangsung efektif (Rahmawati et al., 2024). Aktivasi ini dilakukan melalui stimulasi kognitif, motorik, dan emosional, seperti permainan singkat, latihan relaksasi, atau aktivitas berbasis musik yang dapat meningkatkan mood positif. Karakteristik ini membedakan BBDL dari model pembelajaran lain karena mengedepankan kesiapan otak sebagai prasyarat pembelajaran, bukan sekadar penyampaian materi. Dengan cara ini, peserta didik akan lebih fokus, termotivasi, dan memiliki keterlibatan emosional yang lebih kuat, yang pada

gilirannya akan memperkuat daya retensi memori jangka panjang.



Gambar 15. Karakteristik Model Deep Learning

Karakteristik berikutnya adalah penerapan strategi instruksional yang sejalan dengan prinsip konstruktivisme, di mana pengetahuan dibangun melalui pengalaman nyata dan interaksi sosial. BBDL menekankan pentingnya konteks dalam pembelajaran sehingga peserta didik tidak hanya menghafal konsep, melainkan juga memahami aplikasinya dalam kehidupan sehari-hari (Nurasiah et al., 2022). Dalam praktiknya, strategi pembelajaran ini mengintegrasikan tugas kolaboratif, diskusi kritis, serta eksplorasi masalah kompleks yang menuntut kreativitas dan pemecahan masalah tingkat tinggi. Dengan demikian, BBDL tidak hanya memfokuskan pada transfer

pengetahuan, tetapi juga pada pembentukan keterampilan berpikir tingkat lanjut, yang sangat relevan dengan kebutuhan era digital yang menuntut kompetensi adaptif dan inovatif.

Karakteristik lain dari model BBDL adalah sifatnya yang adaptif terhadap keragaman peserta didik. Melalui dukungan deep learning, sistem pembelajaran mampu menyesuaikan konten, metode, dan kecepatan penyampaian materi berdasarkan data profil peserta didik (Vieira et al., 2025). Hal ini memungkinkan terciptanya pembelajaran yang personal, sehingga setiap peserta didik dapat belajar sesuai dengan kapasitas kognitif dan gaya belajarnya masing-masing. Karakteristik ini sangat penting dalam mengatasi masalah kesenjangan capaian belajar, terutama dalam konteks pendidikan inklusif. Dengan kemampuan adaptif ini, BBDL menjadi lebih unggul dibandingkan model konvensional yang cenderung seragam dalam pendekatan instruksionalnya.

Keterhubungan antara aspek emosional dan kognitif juga menjadi karakteristik penting dalam BBDL. Neurosains menunjukkan bahwa emosi memiliki peran signifikan dalam menentukan keberhasilan pembelajaran karena emosi positif mampu meningkatkan aktivitas hippocampus yang berperan dalam memori jangka panjang (Amjad et al., 2023). Oleh karena itu, dalam BBDL, strategi pembelajaran dirancang untuk menciptakan suasana yang menyenangkan, aman, dan mendukung rasa percaya diri peserta didik. Hal ini dilakukan dengan memanfaatkan media interaktif, simulasi, maupun

pembelajaran berbasis permainan. Dengan mengintegrasikan aspek emosional ini, BBDL tidak hanya berorientasi pada pencapaian akademik, tetapi juga pada kesejahteraan psikologis peserta didik.

Karakteristik lain yang sangat menonjol adalah orientasi BBDL pada keterampilan abad ke-21, khususnya keterampilan berpikir kritis, kolaborasi, komunikasi, dan kreativitas. Dalam model ini, peserta didik dilatih untuk menghadapi permasalahan nyata yang kompleks dengan pendekatan berbasis proyek, diskusi interdisipliner, serta pemanfaatan teknologi digital (Funa et al., 2024). Hal ini menunjukkan bahwa BBDL tidak sekadar menyiapkan peserta didik untuk menguasai materi akademik, tetapi juga membekali mereka dengan keterampilan transformatif yang relevan dengan dunia kerja modern. Dengan demikian, BBDL memiliki karakteristik yang futuristik, menghubungkan pendidikan dengan kebutuhan global yang terus berkembang.

Penggunaan teknologi deep learning sebagai komponen utama juga menegaskan karakteristik unik BBDL. Teknologi ini memungkinkan analisis mendalam terhadap pola belajar peserta didik, mendeteksi kesulitan, serta memprediksi capaian akademik (Halkiopoulou et al., 2025). Integrasi teknologi ini menjadikan pembelajaran lebih berbasis data dan eviden, sehingga guru dapat merancang intervensi yang tepat waktu dan relevan. Hal ini membedakan BBDL dari model lain yang masih mengandalkan evaluasi konvensional yang bersifat

sumatif. Dengan pendekatan analitik berbasis deep learning, BBDL mengedepankan evaluasi formatif yang berkesinambungan dan memberikan umpan balik real-time.

BBDL juga memiliki karakteristik dalam hal fleksibilitas implementasi. Model ini dapat diterapkan dalam berbagai level pendidikan, mulai dari sekolah dasar hingga perguruan tinggi, serta dalam berbagai bidang studi, khususnya matematika, sains, dan teknologi. Fleksibilitas ini didukung oleh prinsip dasar Brain-Based Learning yang bersifat universal, serta teknologi deep learning yang dapat dikustomisasi sesuai kebutuhan kurikulum (Dwiputra et al., 2023). Dengan fleksibilitas ini, BBDL dapat diadaptasi dalam berbagai konteks, baik pembelajaran tatap muka, daring, maupun hibrida, sehingga menjadi model yang relevan dengan kondisi pendidikan masa kini yang semakin terdigitalisasi.

Terakhir, karakteristik penting dari BBDL adalah sifatnya yang inovatif dan berorientasi pada kebaruan ilmiah. Model ini hadir sebagai respon terhadap kesenjangan penelitian yang selama ini hanya menitikberatkan pada aspek kognitif tanpa memanfaatkan potensi teknologi kecerdasan buatan secara optimal (Ambroise et al., 2025). Dengan menggabungkan neurosains dan deep learning, BBDL menciptakan terobosan dalam praktik pendidikan yang berbasis data, ilmiah, dan humanis sekaligus. Karakteristik ini menegaskan bahwa BBDL bukan sekadar model pembelajaran baru, melainkan paradigma baru yang berusaha menjawab tantangan

pendidikan masa depan melalui pendekatan interdisipliner yang kokoh.

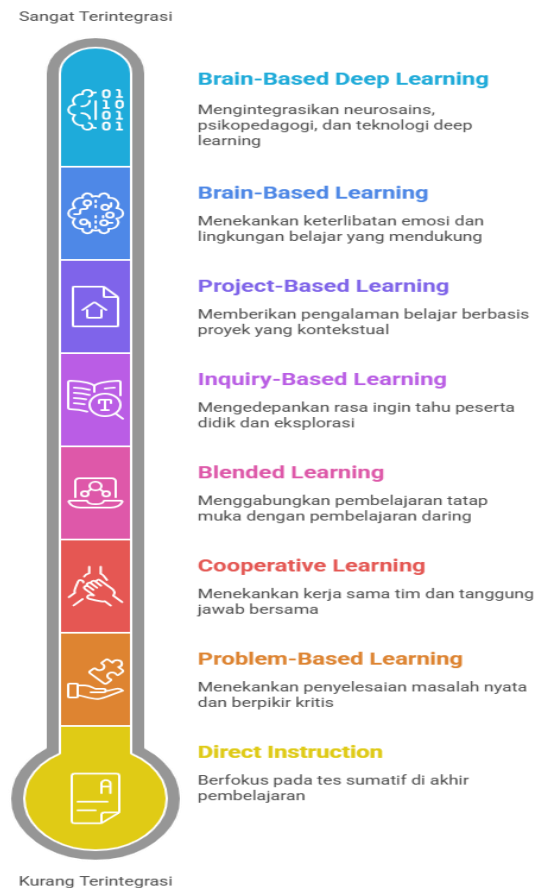
2.5 Perbandingan dengan Model Pembelajaran Lain

Model Brain-Based Deep Learning (BBDL) hadir sebagai pendekatan baru yang secara konseptual dan metodologis berbeda dengan berbagai model pembelajaran lain yang sudah berkembang sebelumnya, seperti Problem-Based Learning (PBL), Project-Based Learning (PjBL), maupun Inquiry-Based Learning. Perbedaan mendasar terletak pada titik fokus model BBDL yang menekankan integrasi neurosains dan kecerdasan buatan berbasis deep learning sebagai fondasi instruksionalnya. Sementara model-model pembelajaran lain cenderung mengutamakan strategi pedagogis berbasis konstruktivisme, BBDL menghadirkan perspektif baru dengan mengedepankan fungsi otak dalam pembelajaran, serta pemanfaatan teknologi analitik untuk personalisasi dan prediksi capaian peserta didik (Amjad et al., 2023; Ambroise et al., 2025). Dengan demikian, BBDL tidak hanya memfasilitasi pengalaman belajar kontekstual, tetapi juga memperkuat dimensi ilmiah melalui penggunaan data kognitif yang bersumber dari prinsip neurosains.

Jika dibandingkan dengan Problem-Based Learning, yang berfokus pada penyelesaian masalah nyata untuk melatih keterampilan berpikir kritis, BBDL menawarkan pendekatan yang lebih komprehensif. PBL menekankan peran guru sebagai

fasilitator dan peserta didik sebagai problem solver, namun model ini belum sepenuhnya mengakomodasi aspek fisiologis dan emosional otak dalam proses belajar (Sudarwo & Adiansha, 2022). Sebaliknya, BBDL tidak hanya menekankan keterampilan berpikir kritis melalui penyelesaian masalah, tetapi juga memperhatikan kondisi kesiapan otak, emosi positif, serta motivasi intrinsik sebagai komponen penting keberhasilan belajar. Dengan dukungan deep learning, BBDL mampu memberikan data yang lebih kaya mengenai perkembangan peserta didik, sehingga intervensi instruksional dapat dilakukan secara lebih tepat.

Project-Based Learning memiliki keunggulan dalam memberikan pengalaman belajar berbasis proyek yang kontekstual, sehingga peserta didik dapat mengembangkan keterampilan kolaborasi, komunikasi, dan kreativitas. Namun, tantangan dari PjBL adalah keterbatasan dalam mengukur efektivitas pembelajaran secara real-time dan kurangnya perhatian pada dimensi neurokognitif peserta didik (Jazuli et al., 2019). BBDL menutupi kelemahan ini dengan menghadirkan analisis berbasis deep learning yang memungkinkan guru memantau perkembangan kognitif dan emosional peserta didik secara lebih detail. Dengan demikian, BBDL tidak hanya mendorong keterampilan abad ke-21 melalui aktivitas berbasis proyek, tetapi juga memperkuatnya dengan intervensi ilmiah yang berbasis bukti neurosains.



Gambar 16. Perbandingan Model Brain-Based Deep Learning (BBDL) dengan Model Lainnya

Jika dibandingkan dengan Inquiry-Based Learning, yang mengedepankan rasa ingin tahu peserta didik sebagai motor penggerak pembelajaran, BBDL memiliki kelebihan dalam hal struktur dan ketepatan intervensi. Inquiry-Based Learning sering dianggap lebih menekankan pada proses eksplorasi dan kurang memberikan arahan yang jelas dalam hal pengelolaan beban kognitif (Asriyadin et al., 2021). Sebaliknya, BBDL

menyeimbangkan antara kebebasan eksplorasi dengan pengaturan kondisi otak agar tetap berada dalam kapasitas optimal untuk menerima dan memproses informasi. Selain itu, dengan dukungan deep learning, model ini dapat mengurangi risiko cognitive overload dengan menyesuaikan tingkat kesulitan tugas sesuai profil peserta didik, sehingga proses pembelajaran tetap menantang tetapi tidak membebani secara berlebihan.

Dari perspektif Brain-Based Learning konvensional, BBDL dapat dipandang sebagai pengembangan yang lebih maju. Brain-Based Learning tradisional telah menekankan pentingnya keterlibatan emosi, pola belajar alami otak, serta lingkungan belajar yang mendukung (Caine & Caine, 1991; Nurasiah et al., 2022). Namun, model ini masih terbatas pada aspek psikopedagogis tanpa dukungan analitik teknologi. BBDL memperluas kerangka tersebut dengan menambahkan dimensi deep learning, yang berfungsi sebagai alat diagnostik sekaligus prediktif dalam pembelajaran. Hal ini menjadikan BBDL lebih unggul dalam memberikan personalisasi pembelajaran serta mengakomodasi kebutuhan individu dengan berbasis data.

Dari segi pendekatan evaluasi, model pembelajaran tradisional seperti Direct Instruction lebih berorientasi pada tes sumatif yang dilakukan di akhir pembelajaran. Kelemahannya adalah keterlambatan dalam mendeteksi kesulitan belajar peserta didik, sehingga intervensi tidak dapat dilakukan tepat waktu (OECD, 2023). Sebaliknya, BBDL memiliki mekanisme

evaluasi formatif berkelanjutan dengan bantuan deep learning. Teknologi ini memungkinkan sistem pembelajaran menganalisis pola kesalahan, tingkat motivasi, dan perkembangan kognitif secara real-time, sehingga guru dapat melakukan penyesuaian strategi lebih awal. Perbandingan ini menunjukkan bahwa BBDL memiliki keunggulan signifikan dalam hal kecepatan, ketepatan, dan kedalaman evaluasi pembelajaran.

Jika ditinjau dari perspektif keterampilan abad ke-21, model pembelajaran kolaboratif seperti Cooperative Learning memberikan penekanan pada kerja sama tim, tanggung jawab bersama, dan interaksi sosial. Namun, dalam implementasinya sering muncul masalah ketidakmerataan kontribusi antaranggota kelompok (Slavin, 2015). BBDL menjawab tantangan ini dengan dukungan deep learning yang memungkinkan evaluasi individual meskipun tugas diselesaikan secara kelompok. Hal ini memastikan bahwa setiap peserta didik tetap terpantau perkembangannya secara personal. Dengan demikian, BBDL mampu menjaga keseimbangan antara pembelajaran kolaboratif dan penilaian individual berbasis data.

Selain itu, jika dibandingkan dengan pendekatan Blended Learning, BBDL menawarkan integrasi yang lebih kuat antara aspek digital dan neurokognitif. Blended Learning menggabungkan pembelajaran tatap muka dengan pembelajaran daring, namun sering kali terbatas pada

penyediaan akses materi dan aktivitas digital (Ode Samura & Darhim, 2023). BBDL melampaui hal tersebut dengan menggunakan deep learning untuk menganalisis interaksi digital peserta didik, sehingga bukan hanya mengukur keterlibatan, tetapi juga memahami bagaimana proses kognitif berlangsung selama pembelajaran. Hal ini menegaskan bahwa BBDL memiliki kedalaman analisis yang lebih komprehensif dibandingkan model hybrid tradisional.

Secara keseluruhan, BBDL dapat diposisikan sebagai model pembelajaran generasi baru yang melengkapi sekaligus melampaui keunggulan model-model pembelajaran terdahulu. Karakteristik integratif antara neurosains, psikopedagogi, dan teknologi deep learning menjadikannya unik sekaligus inovatif. Jika model pembelajaran lain cenderung hanya berfokus pada salah satu aspek, maka BBDL menghadirkan sintesis yang lebih menyeluruh, yaitu memperhatikan kesiapan otak, aspek emosional, strategi pedagogis, serta teknologi berbasis data. Perbandingan ini menunjukkan bahwa BBDL bukan hanya sebuah alternatif, melainkan sebuah inovasi paradigmatis yang potensial untuk merevolusi praktik pendidikan modern di berbagai jenjang dan konteks pembelajaran.

2.6 Posisi Model dalam Pendidikan Abad 21

Pendidikan abad ke-21 ditandai dengan perubahan paradigma yang sangat cepat, baik dari segi teknologi, sosial, maupun ekonomi. Peserta didik dituntut untuk memiliki

keterampilan abad ke-21 seperti berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, komunikasi, serta literasi digital. Dalam konteks ini, model Brain-Based Deep Learning (BBDL) menempati posisi strategis sebagai salah satu pendekatan yang mampu menjawab kompleksitas tantangan global. Model ini tidak hanya fokus pada transfer pengetahuan, melainkan juga mengintegrasikan pemahaman tentang cara kerja otak, prinsip neurosains, serta pemanfaatan deep learning sebagai teknologi analitik yang mendukung pembelajaran (Amjad et al., 2023; OECD, 2023). Dengan demikian, BBDL menempatkan dirinya pada posisi unik sebagai jembatan antara pendidikan tradisional dan era digital berbasis kecerdasan buatan.

Salah satu tantangan utama pendidikan abad ke-21 adalah peningkatan kesenjangan keterampilan, khususnya dalam bidang literasi numerasi, sains, dan teknologi. Hasil studi internasional seperti PISA menunjukkan bahwa capaian peserta didik masih menghadapi kesulitan dalam berpikir tingkat tinggi, pemecahan masalah, serta pemahaman konseptual yang mendalam (OECD, 2024). Model BBDL hadir untuk mengatasi hal tersebut dengan menekankan pembelajaran yang selaras dengan fungsi alami otak sekaligus memanfaatkan teknologi deep learning untuk memberikan pengalaman belajar yang adaptif. Dengan cara ini, model BBDL tidak hanya memperkuat pemahaman akademik, tetapi juga melatih peserta didik dalam keterampilan analitik, problem solving, serta kesiapan menghadapi situasi nyata di dunia kerja dan kehidupan sosial.

Dalam perspektif global, abad ke-21 ditandai oleh revolusi digital dan transformasi pendidikan berbasis teknologi. Model pembelajaran yang relevan harus mampu memadukan kompetensi digital dengan strategi pedagogis yang humanis. BBDL memenuhi tuntutan tersebut dengan mengintegrasikan teknologi kecerdasan buatan tanpa mengabaikan peran penting emosi, motivasi, dan aspek neurokognitif dalam belajar (Vieira et al., 2025). Dengan demikian, model ini menempati posisi sebagai inovasi yang tidak hanya berfokus pada keterampilan teknologi, tetapi juga pada pembentukan keseimbangan antara human-centered learning dan machine-assisted learning. Hal ini sangat penting dalam menjaga dimensi kemanusiaan dalam pendidikan abad ke-21 yang kerap terancam oleh mekanisasi digital.

Selain menyiapkan keterampilan kognitif, pendidikan abad ke-21 juga menekankan pentingnya lifelong learning atau pembelajaran sepanjang hayat. Dalam konteks ini, BBDL memiliki keunggulan karena dirancang untuk menyesuaikan kebutuhan individu, sehingga proses belajar tidak terbatas pada ruang kelas formal, melainkan dapat diperluas ke berbagai konteks belajar sepanjang kehidupan. Teknologi deep learning yang terintegrasi memungkinkan adanya learning analytics yang mendukung pengembangan personalisasi pembelajaran, sehingga peserta didik dapat mengidentifikasi kekuatan dan kelemahan mereka secara mandiri (Ambroise et al., 2025). Oleh karena itu, BBDL dapat

diposisikan sebagai model yang mendorong peserta didik untuk menjadi pembelajar otonom, adaptif, dan berkelanjutan.

Pendidikan abad ke-21 juga sangat dipengaruhi oleh pendekatan interdisipliner, di mana batas antarbidang ilmu semakin kabur. Peserta didik tidak hanya perlu memahami matematika atau sains secara terpisah, tetapi juga harus mampu menghubungkannya dengan teknologi, seni, dan aspek sosial. BBDL memberikan landasan yang tepat bagi pendidikan interdisipliner karena prinsip neurosains yang digunakannya bersifat universal, sementara teknologi deep learning memiliki kemampuan untuk mengolah data lintas disiplin (Halkiopoulos et al., 2025). Hal ini menjadikan BBDL relevan untuk diterapkan dalam berbagai bidang studi, baik dalam sains, teknologi, maupun ilmu sosial-humaniora.

Dalam konteks 21st century skills, salah satu aspek yang sangat ditekankan adalah literasi digital dan literasi data. Peserta didik perlu memiliki kemampuan untuk memahami, menginterpretasikan, serta memanfaatkan data dalam pengambilan keputusan. BBDL memberikan kontribusi nyata terhadap penguatan literasi ini dengan mengintegrasikan sistem deep learning yang dapat membantu peserta didik memahami pola-pola belajar, menganalisis hasil, serta membuat refleksi berbasis data (Za'ba et al., 2020; Fang et al., 2025). Dengan demikian, model ini menempati posisi strategis dalam membantu peserta didik menguasai keterampilan literasi

data dan digital, yang sangat penting dalam dunia kerja berbasis teknologi saat ini.

Selain aspek kognitif dan digital, pendidikan abad ke-21 juga menekankan pada penguatan karakter, seperti tanggung jawab, integritas, resiliensi, serta kemampuan beradaptasi dalam situasi yang dinamis. BBDL memberikan ruang bagi penguatan karakter tersebut karena proses pembelajaran dirancang agar melibatkan emosi positif, lingkungan belajar yang mendukung, serta strategi pembelajaran yang memperhatikan motivasi intrinsik peserta didik (Adiansha et al., 2021; Rahmawati et al., 2022). Dengan kata lain, model ini tidak hanya menekankan aspek intelektual, tetapi juga mengedepankan keseimbangan antara aspek kognitif, afektif, dan psikomotorik, sebagaimana yang diamanatkan dalam taksonomi Bloom yang telah diperbarui.

Dalam kerangka kebijakan pendidikan nasional dan internasional, model BBDL juga memiliki urgensi strategis. Di Indonesia misalnya, kurikulum merdeka belajar menekankan pada kemandirian, kreativitas, dan keterampilan bernalar kritis peserta didik. Hal ini selaras dengan karakteristik BBDL yang menekankan keterampilan berpikir tingkat tinggi dan kemandirian belajar (Dwiputra et al., 2023). Pada level global, agenda UNESCO dan OECD juga menekankan pentingnya pembelajaran berbasis kompetensi dan personalisasi. Dengan demikian, BBDL dapat dilihat sebagai model yang sejalan

dengan arah kebijakan pendidikan internasional, menjadikannya relevan dalam skala global.

Secara keseluruhan, posisi BBDL dalam pendidikan abad ke-21 dapat dipahami sebagai model pembelajaran yang bersifat integratif, inovatif, dan adaptif terhadap kebutuhan zaman. Integrasinya dengan neurosains memastikan pembelajaran sesuai dengan prinsip kerja otak, sementara pemanfaatan deep learning menghadirkan personalisasi berbasis data yang mendukung pencapaian optimal peserta didik. Lebih jauh, BBDL juga relevan dengan keterampilan abad ke-21 yang mencakup literasi digital, kolaborasi, kreativitas, serta pembelajaran sepanjang hayat. Dengan posisi yang demikian, BBDL tidak hanya menjadi salah satu alternatif model pembelajaran, tetapi juga representasi dari arah baru pendidikan di era digital yang menekankan keseimbangan antara kecerdasan manusia dan teknologi.

BAB 3 ASPEK NEUROSAINS

DALAM MODEL

PEMBELAJARAN

3.1 Dasar-Dasar Neurosains dalam Pendidikan

Neurosains juga menegaskan pentingnya keterkaitan antara emosi dan proses kognitif. Penelitian menunjukkan bahwa emosi positif dapat meningkatkan perhatian, motivasi, dan kemampuan berpikir tingkat tinggi, sementara emosi negatif justru menghambat pembelajaran. Oleh karena itu, lingkungan belajar yang sehat secara emosional menjadi prasyarat bagi optimalisasi fungsi otak dalam menerima dan mengolah informasi (Rahmawati et al., 2022). Model BBDL memanfaatkan temuan ini dengan menekankan pentingnya emotional engagement dalam pembelajaran. Melalui pendekatan berbasis otak, pendidik diarahkan untuk menciptakan suasana belajar yang kondusif, menumbuhkan rasa percaya diri peserta didik, serta memanfaatkan teknologi untuk memberikan umpan balik yang mendorong emosi positif.

Selain aspek emosi, neurosains menyoroti peran penting memori dalam proses belajar. Otak menyimpan informasi melalui interaksi kompleks antara memori jangka pendek, memori kerja, dan memori jangka panjang. Untuk memastikan

informasi bertahan lebih lama, proses belajar harus melibatkan pengulangan yang bervariasi, asosiasi makna, serta keterhubungan dengan pengalaman nyata (Cruz et al., 2022). BBDL mengintegrasikan prinsip penguatan memori ini dengan teknologi deep learning yang mampu merekam pola belajar peserta didik dan memberikan rekomendasi berbasis data untuk penguatan konsep. Dengan cara ini, pembelajaran tidak lagi bersifat seragam, melainkan disesuaikan dengan ritme dan kapasitas kognitif masing-masing individu.

Prinsip neurosains lainnya adalah peran korteks prefrontal dalam mendukung keterampilan berpikir tingkat tinggi, seperti analisis, sintesis, dan evaluasi. Bagian otak ini berkembang melalui aktivitas yang menantang, pemecahan masalah kompleks, serta interaksi kolaboratif. Pendidikan yang dirancang tanpa mempertimbangkan stimulasi korteks prefrontal cenderung hanya menghasilkan hafalan dangkal, bukan pemahaman konseptual yang mendalam (Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025). Oleh karena itu, BBDL menempatkan keterampilan berpikir kritis dan kreatif sebagai inti pembelajaran. Melalui integrasi deep learning, peserta didik dapat berlatih dalam simulasi atau skenario nyata yang mendorong keterlibatan otak pada level metakognitif.

Temuan neurosains juga menegaskan bahwa otak belajar secara kontekstual. Peserta didik lebih mudah memahami informasi yang dikaitkan dengan situasi nyata, pengalaman personal, atau aplikasi langsung. Inilah mengapa

pendekatan kontekstual menjadi sangat efektif dalam pendidikan modern. Model BBDL mengadaptasi prinsip ini dengan memanfaatkan big data dan algoritma deep learning untuk menghadirkan konten pembelajaran yang relevan dan aplikatif (Funa et al., 2024). Sebagai contoh, dalam pembelajaran matematika, peserta didik dapat diberikan masalah kontekstual yang terhubung dengan kehidupan sehari-hari, sekaligus dipandu oleh analisis teknologi untuk menemukan solusi yang lebih kreatif.

Selain faktor kognitif, neurosains menekankan pentingnya ritme biologis dalam pembelajaran. Penelitian menunjukkan bahwa kondisi otak berfluktuasi sesuai dengan siklus harian, tingkat energi, serta faktor fisiologis lainnya. Oleh karena itu, proses belajar yang memaksakan ritme seragam berpotensi menurunkan efektivitas capaian belajar. BBDL merespons hal ini dengan mengintegrasikan sistem berbasis teknologi yang memungkinkan fleksibilitas waktu dan tempat belajar, sehingga peserta didik dapat belajar sesuai dengan ritme biologis masing-masing (Intasena et al., 2023). Dengan demikian, model ini mampu mengakomodasi prinsip neurosains mengenai keterkaitan antara fisiologi dan efektivitas pembelajaran.

Penerapan neurosains dalam pendidikan juga berkaitan dengan pengembangan keterampilan sosial dan kolaboratif. Otak manusia secara alami dirancang untuk berinteraksi, sehingga pembelajaran yang bersifat kolaboratif dapat

meningkatkan aktivitas otak sosial, memperluas pemahaman, dan memperkuat regulasi emosi. BBDL menempatkan kolaborasi sebagai salah satu strategi utama dengan memanfaatkan platform digital yang mendukung interaksi virtual maupun tatap muka (Yildiz & Arpaci, 2024). Dengan cara ini, neurosains tidak hanya diterapkan pada aspek individual, tetapi juga diperluas pada aspek sosial pembelajaran, yang menjadi ciri penting pendidikan abad ke-21.

Secara keseluruhan, dasar-dasar neurosains dalam pendidikan menunjukkan bahwa proses belajar tidak dapat dilepaskan dari dinamika biologis, emosional, kognitif, dan sosial otak manusia. Model Brain-Based Deep Learning merepresentasikan integrasi temuan-temuan neurosains dengan teknologi modern, sehingga mampu menghasilkan sistem pembelajaran yang lebih adaptif, personal, dan efektif. Posisi BBDL dalam kerangka pendidikan abad ke-21 bukan hanya sebagai model alternatif, melainkan sebagai representasi nyata dari revolusi pedagogis berbasis ilmu otak dan kecerdasan buatan (Harden & Jones, 2022; Ambroise et al., 2025). Dengan demikian, dasar-dasar neurosains menjadi fondasi yang kokoh bagi pengembangan model pembelajaran inovatif yang relevan dengan kebutuhan zaman.

3.2 Mekanisme Kerja Otak dalam Belajar

Proses belajar dalam perspektif neurosains dipandang sebagai interaksi kompleks antara sistem saraf pusat, emosi,

dan lingkungan yang membentuk pengalaman baru. Otak tidak hanya berfungsi sebagai wadah informasi, melainkan sebagai organ adaptif yang mampu membentuk koneksi saraf baru melalui proses sinaptogenesis. Ketika individu menerima stimulus dari lingkungan, sistem sensorik akan mengirimkan sinyal ke korteks serebral untuk diolah, disimpan, dan dihubungkan dengan pengetahuan sebelumnya. Dalam konteks pembelajaran, mekanisme ini menunjukkan bahwa semakin banyak keterlibatan indera dalam menerima informasi, semakin kuat pula jalur saraf yang terbentuk. Hal ini mendukung peran Brain-Based Deep Learning (BBDL) yang menekankan stimulasi multisensorik dalam proses belajar untuk mempercepat pembentukan koneksi saraf dan memperkuat daya ingat (Subba et al., 2025; Mastoni et al., 2019).

Mekanisme kerja otak dalam belajar juga erat kaitannya dengan fungsi memori. Neurosains membagi memori ke dalam beberapa kategori, seperti memori jangka pendek, memori kerja, dan memori jangka panjang. Informasi yang masuk pertama kali akan diproses dalam memori jangka pendek, sebelum kemudian diseleksi untuk dipindahkan ke memori jangka panjang. Proses ini dipengaruhi oleh atensi, pengulangan, dan makna yang terkandung dalam informasi tersebut. Oleh karena itu, pembelajaran yang efektif harus mengoptimalkan pemrosesan memori dengan mengaitkan pengetahuan baru dengan pengalaman peserta didik. Model BBDL mengadopsi prinsip ini melalui desain pembelajaran

yang menghubungkan data digital dengan konteks nyata, sehingga memungkinkan penyimpanan informasi yang lebih bermakna dan tahan lama (Cruz et al., 2022; Funa et al., 2024).

Emosi memainkan peran penting dalam mekanisme kerja otak saat belajar. Penelitian neurosains menunjukkan bahwa amigdala, sebagai pusat pengendali emosi, memiliki peran langsung terhadap efektivitas memori dan konsentrasi. Emosi positif meningkatkan sekresi dopamin yang berfungsi memperkuat jalur saraf dan memperpanjang daya ingat, sedangkan emosi negatif cenderung menghambat aktivitas korteks prefrontal yang berfungsi sebagai pusat pengambilan keputusan. Oleh karena itu, pembelajaran yang memperhatikan aspek emosional terbukti lebih efektif dalam membentuk pemahaman mendalam. Model BBDL dirancang untuk menciptakan lingkungan belajar yang mendorong motivasi intrinsik, kolaborasi positif, serta pengalaman menyenangkan yang berimplikasi pada optimalisasi kinerja otak (Rahmawati et al., 2022; Amjad et al., 2023).

Mekanisme perhatian juga menjadi aspek fundamental dalam kerja otak. Perhatian memungkinkan otak untuk memilih stimulus yang relevan dari sekian banyak informasi yang diterima. Sistem retikular pada batang otak berperan dalam memfokuskan atensi sehingga otak tidak kewalahan dalam memproses data. Namun, perhatian bersifat terbatas, sehingga pendidik perlu menciptakan strategi pembelajaran yang mampu mempertahankan fokus peserta didik dalam durasi

tertentu. BBDL mengintegrasikan teknologi deep learning untuk menganalisis pola atensi peserta didik melalui data interaksi digital, sehingga dapat memberikan penyesuaian materi secara adaptif dan menjaga keterlibatan kognitif yang konsisten (Fang et al., 2025; Yildiz & Arpaci, 2024).

Selain perhatian, otak juga bekerja berdasarkan prinsip pengulangan dan penguatan. Informasi yang sering diakses akan memperkuat koneksi sinapsis, sedangkan informasi yang jarang digunakan akan mengalami peluruhan. Fenomena ini dikenal sebagai use it or lose it principle dalam neurosains. Oleh karena itu, pembelajaran yang efektif harus mengakomodasi aktivitas pengulangan bermakna agar informasi dapat dipertahankan dalam memori jangka panjang. Model BBDL mengadaptasi prinsip ini dengan memberikan materi dalam berbagai bentuk, mulai dari teks, visualisasi, hingga simulasi digital, yang memungkinkan peserta didik untuk melakukan pengulangan secara variatif tanpa menimbulkan kejenuhan (Gözüyel & Dikici, 2014; Al-Balushi & Al-Balushi, 2018).

Keterlibatan korteks prefrontal dalam mekanisme belajar menegaskan pentingnya kemampuan berpikir tingkat tinggi. Korteks prefrontal merupakan pusat eksekutif otak yang mengendalikan perencanaan, pengambilan keputusan, dan regulasi diri. Aktivitas otak pada area ini berkembang melalui tugas-tugas yang menuntut analisis, evaluasi, dan kreativitas. Pembelajaran berbasis hafalan tidak akan cukup untuk

mengoptimalkan fungsi korteks prefrontal. BBDL memfasilitasi pengembangan fungsi eksekutif ini melalui integrasi pembelajaran berbasis masalah dan simulasi digital yang menuntut peserta didik untuk mengeksplorasi solusi secara kritis dan kreatif (Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025; Harden & Jones, 2022).

Neurosains juga menegaskan adanya hubungan erat antara otak dan lingkungan belajar. Lingkungan yang kaya akan stimulus, aman, dan mendukung perkembangan sosial terbukti dapat mempercepat pembentukan koneksi sinapsis baru. Sebaliknya, lingkungan yang penuh tekanan justru dapat menghambat perkembangan kognitif. Oleh karena itu, pendidik perlu menciptakan atmosfer belajar yang kondusif dan mendukung rasa ingin tahu. BBDL memanfaatkan teknologi untuk menciptakan lingkungan belajar adaptif yang mampu menyesuaikan tingkat kesulitan, memberikan umpan balik personal, serta menciptakan ruang kolaborasi yang memperkuat interaksi sosial peserta didik (Intasena et al., 2023; Dwiputra et al., 2023).

Selain keterlibatan kognitif, mekanisme kerja otak dalam belajar juga terkait dengan ritme biologis. Siklus sirkadian dan kondisi fisiologis tubuh dapat memengaruhi tingkat energi serta kapasitas otak dalam menerima informasi. Neurosains merekomendasikan agar pembelajaran memperhatikan waktu optimal belajar untuk setiap individu. BBDL menjawab kebutuhan ini dengan memanfaatkan data interaksi digital

peserta didik untuk mengidentifikasi pola belajar yang paling efektif. Melalui pendekatan ini, pembelajaran dapat dilakukan lebih fleksibel dan personal, sejalan dengan ritme biologis otak peserta didik (Vieira et al., 2025; Ambroise et al., 2025).

Dengan memahami mekanisme kerja otak dalam belajar, dapat disimpulkan bahwa pendidikan tidak cukup hanya berfokus pada penyampaian konten, tetapi juga harus memperhatikan bagaimana otak mengolah, menyimpan, dan mereproduksi informasi. Model Brain-Based Deep Learning merepresentasikan integrasi antara prinsip neurosains dengan teknologi modern, sehingga mampu menjembatani kebutuhan kognitif, emosional, sosial, dan fisiologis peserta didik. Melalui desain yang adaptif dan personal, BBDL berpotensi menciptakan transformasi pendidikan yang lebih efektif, relevan, dan sesuai dengan tuntutan abad ke-21.

3.3 Peran Emosi, Motivasi, dan Memori dalam Pembelajaran

Emosi merupakan salah satu faktor paling dominan yang memengaruhi kualitas proses belajar. Kajian neurosains menunjukkan bahwa keterlibatan amigdala dalam memproses informasi emosional dapat memengaruhi daya ingat, atensi, dan pengambilan keputusan. Emosi positif meningkatkan sekresi neurotransmiter seperti dopamin dan serotonin yang memperkuat sinapsis, sehingga memori menjadi lebih tahan lama. Sebaliknya, emosi negatif dapat menghambat fungsi

korteks prefrontal, pusat kontrol eksekutif otak yang berperan dalam regulasi diri dan pemecahan masalah. Oleh karena itu, menciptakan suasana pembelajaran yang kondusif, penuh kehangatan, dan minim tekanan merupakan syarat mutlak agar peserta didik dapat mengoptimalkan kapasitas kognitifnya. Model Brain-Based Deep Learning (BBDL) memasukkan unsur emosional dalam desain pembelajaran melalui aktivitas kolaboratif, simulasi berbasis pengalaman, serta penggunaan teknologi interaktif yang mampu meningkatkan keterlibatan emosional peserta didik (Rahmawati et al., 2022; Amjad et al., 2023).

Motivasi, baik intrinsik maupun ekstrinsik, menjadi penggerak utama dalam proses belajar. Motivasi intrinsik muncul ketika peserta didik terdorong oleh rasa ingin tahu dan kepuasan internal, sementara motivasi ekstrinsik dipicu oleh faktor luar seperti penghargaan atau dorongan sosial. Penelitian menunjukkan bahwa motivasi intrinsik lebih berkelanjutan dan berhubungan erat dengan prestasi akademik yang tinggi. Dalam konteks neurosains, motivasi berkaitan erat dengan sistem reward otak, khususnya aktivitas dopaminergik pada nucleus accumbens. Model BBDL dirancang untuk mengintegrasikan faktor motivasional ini melalui penggunaan teknologi adaptif yang memberikan umpan balik cepat, pencapaian bertahap, serta tantangan yang disesuaikan dengan kemampuan peserta didik. Dengan demikian, motivasi tidak hanya bersifat sementara, tetapi

berkembang sebagai bagian integral dari kebiasaan belajar (Kim et al., 2025; Fang et al., 2025).

Memori merupakan fondasi dari semua aktivitas belajar. Informasi yang diperoleh melalui interaksi dengan lingkungan diproses dalam memori jangka pendek sebelum dipindahkan ke memori jangka panjang melalui mekanisme konsolidasi. Proses konsolidasi ini melibatkan aktivitas hipokampus yang berperan mengintegrasikan pengetahuan baru dengan skema kognitif yang sudah ada. Pembelajaran yang bermakna adalah pembelajaran yang mampu memperkuat proses konsolidasi ini melalui pengulangan, elaborasi, dan asosiasi kontekstual. Model BBDL menekankan pentingnya strategi yang mendukung memori jangka panjang dengan mengombinasikan pendekatan berbasis otak dan teknologi deep learning, sehingga informasi yang diperoleh tidak hanya diingat untuk jangka pendek, tetapi juga dapat diaplikasikan dalam berbagai konteks (Cruz et al., 2022; Funa et al., 2024).

Hubungan antara emosi, motivasi, dan memori bersifat interdependen. Emosi positif dapat meningkatkan motivasi intrinsik, yang pada gilirannya memperkuat memori jangka panjang. Sebaliknya, kondisi stres kronis dapat menurunkan motivasi, mengganggu konsolidasi memori, dan menurunkan kualitas belajar. Dengan memahami keterkaitan ini, pendidik dituntut untuk menciptakan pengalaman belajar yang tidak hanya berfokus pada transfer informasi, tetapi juga pada pembentukan iklim emosional dan motivasional yang sehat.

Model BBDL memanfaatkan data dari interaksi digital untuk memantau kondisi emosional dan motivasional peserta didik, sehingga memungkinkan adanya penyesuaian strategi pembelajaran yang lebih personal (Vieira et al., 2025; Ambroise et al., 2025).

Pentingnya peran emosi dalam pembelajaran semakin nyata dalam penelitian yang menekankan konsep emotional engagement. Peserta didik yang terlibat secara emosional menunjukkan tingkat partisipasi lebih tinggi, ketekunan yang lebih besar, serta peningkatan kualitas pemahaman konsep. Dalam hal ini, teknologi dapat menjadi fasilitator yang efektif. Melalui simulasi virtual, permainan edukatif, atau aplikasi berbasis kecerdasan buatan, pendidik dapat menciptakan pengalaman belajar yang menstimulasi keterlibatan emosional secara lebih mendalam. BBDL mengoptimalkan fungsi ini dengan menggabungkan elemen gamification dan pembelajaran adaptif berbasis data, sehingga keterlibatan emosional peserta didik tetap terjaga sepanjang proses belajar (Subba et al., 2025; Yildiz & Arpaci, 2024).

Motivasi dalam pembelajaran juga berkaitan dengan regulasi diri. Peserta didik yang mampu mengelola dirinya sendiri dalam proses belajar cenderung memiliki prestasi akademik yang lebih tinggi. Regulasi diri ini dipengaruhi oleh interaksi antara korteks prefrontal dan sistem limbik. Model BBDL berupaya memperkuat kemampuan regulasi diri peserta didik dengan menyediakan ruang refleksi digital, self-

assessment, serta kesempatan untuk belajar mandiri. Dengan demikian, peserta didik tidak hanya menjadi penerima informasi, tetapi juga pengelola proses belajarnya sendiri, yang pada akhirnya meningkatkan motivasi jangka panjang (Putri et al., 2025; Shimizu, 2025).

Dalam kaitannya dengan memori, penelitian menunjukkan bahwa proses belajar yang melibatkan emosi positif cenderung menghasilkan memori yang lebih tahan lama dibandingkan dengan pembelajaran netral. Hal ini karena keterlibatan emosional memperkuat sinyal neurologis yang diteruskan ke hipokampus. Selain itu, elaborasi informasi dalam konteks yang bermakna juga mempercepat integrasi ke dalam memori jangka panjang. Oleh karena itu, strategi BBDL memanfaatkan teknologi visualisasi, simulasi, dan praktik langsung untuk memastikan bahwa informasi tidak hanya diserap secara kognitif, tetapi juga dikuatkan oleh pengalaman emosional peserta didik (Nurhikmah et al., 2023; Owusu et al., 2023).

Dari perspektif neurosains, keseimbangan antara emosi, motivasi, dan memori merupakan kunci tercapainya pembelajaran yang efektif. Tanpa emosi positif, motivasi mudah menurun. Tanpa motivasi, memori tidak akan terinternalisasi secara mendalam. Tanpa memori, pembelajaran tidak akan menghasilkan perubahan perilaku yang bermakna. Oleh karena itu, model pembelajaran yang mengintegrasikan ketiga aspek ini, seperti BBDL, berpotensi lebih unggul dibandingkan model

tradisional. Dengan dukungan teknologi deep learning, integrasi ini dapat dilakukan secara sistematis dan terukur sehingga menghasilkan proses belajar yang lebih adaptif, efektif, dan sesuai kebutuhan abad ke-21 (Johar et al., 2025; Asare et al., 2025).

Secara keseluruhan, peran emosi, motivasi, dan memori dalam pembelajaran menunjukkan bahwa belajar bukan sekadar aktivitas kognitif, tetapi merupakan pengalaman holistik yang melibatkan aspek afektif dan sosial. Model BBDL hadir sebagai inovasi yang menjembatani pemahaman ilmiah mengenai fungsi otak dengan kebutuhan praktis dalam pendidikan modern. Dengan menempatkan emosi, motivasi, dan memori sebagai fondasi, BBDL tidak hanya meningkatkan capaian akademik, tetapi juga membentuk peserta didik yang tangguh, adaptif, dan siap menghadapi tantangan kompleks abad ke-21.

3.4 Plasticity Otak dan Implikasinya dalam Pembelajaran

Plasticity otak atau neuroplastisitas adalah kemampuan otak untuk beradaptasi dan mengubah struktur serta fungsinya sebagai respons terhadap pengalaman dan pembelajaran. Konsep ini menunjukkan bahwa otak bukanlah organ statis, melainkan sistem dinamis yang dapat membentuk ulang jalur sinaptik sesuai dengan kebutuhan kognitif dan emosional. Neuroplastisitas memungkinkan seseorang untuk

mengembangkan keterampilan baru, meningkatkan kapasitas berpikir, serta memulihkan fungsi yang terganggu akibat cedera neurologis. Dalam konteks pendidikan, pemahaman mengenai neuroplastisitas sangat penting karena menegaskan bahwa setiap individu memiliki potensi untuk terus berkembang melalui pengalaman belajar yang tepat. Prinsip ini menjadi landasan bagi pengembangan model Brain-Based Deep Learning (BBDL) yang menekankan pentingnya pengalaman belajar yang kaya, berulang, dan bermakna (El-Wakeel et al., 2023; Amjad et al., 2023).

Mekanisme neuroplastisitas terjadi melalui penguatan sinapsis yang dikenal sebagai long-term potentiation (LTP). LTP berperan dalam memperkuat koneksi antar-neuron setelah stimulasi yang berulang, sehingga meningkatkan efisiensi komunikasi di dalam otak. Proses ini memungkinkan terbentuknya memori jangka panjang dan keterampilan kompleks. Dalam pembelajaran, pengulangan materi yang divariasikan dengan strategi berbeda, seperti visualisasi, diskusi, dan praktik langsung, dapat memperkuat jalur sinaptik tersebut. Model BBDL memanfaatkan prinsip LTP dengan menghadirkan aktivitas pembelajaran yang melibatkan multisensori, teknologi interaktif, dan umpan balik real-time, sehingga memaksimalkan proses konsolidasi memori dan keterampilan peserta didik (Cruz et al., 2022; Funa et al., 2024).

Selain LTP, neuroplastisitas juga melibatkan mekanisme synaptic pruning, yaitu proses eliminasi jalur sinaptik yang

jarang digunakan. Proses ini membuat otak menjadi lebih efisien karena hanya mempertahankan koneksi yang relevan dengan kebutuhan belajar. Dalam konteks pendidikan, hal ini menunjukkan pentingnya pengalaman belajar yang terarah dan bermakna. Jika peserta didik terpapar pada informasi yang tidak konsisten atau kurang relevan, koneksi otak yang terbentuk dapat melemah. Model BBDL mengantisipasi hal ini dengan merancang pengalaman belajar yang konsisten, terintegrasi, serta berbasis pada tujuan pembelajaran yang jelas. Dengan demikian, peserta didik dapat mempertahankan koneksi sinaptik yang benar-benar menunjang penguasaan kompetensi abad ke-21 (Rahmawati et al., 2022; Dwiputra & Azzahra, 2024).

Implikasi neuroplastisitas dalam pembelajaran juga terlihat pada peran latihan yang berkelanjutan. Penelitian menunjukkan bahwa latihan intensif dalam jangka panjang dapat mengubah struktur otak, termasuk peningkatan volume materi abu-abu dan konektivitas antar-area otak. Misalnya, pembelajaran musik atau matematika secara mendalam terbukti dapat memperluas jalur neurologis yang berkaitan dengan keterampilan berpikir abstrak. BBDL mengadopsi prinsip ini dengan mendorong peserta didik melakukan eksplorasi dan latihan berulang melalui teknologi deep learning yang menyajikan variasi tantangan sesuai perkembangan individu. Pendekatan ini tidak hanya membangun keterampilan kognitif, tetapi juga memperkuat

kebiasaan belajar yang berorientasi pada perbaikan diri berkelanjutan (Kim et al., 2025; Asare et al., 2025).

Neuroplastisitas juga memperlihatkan bahwa pembelajaran efektif tidak dapat dilepaskan dari konteks emosional dan sosial. Jalur sinaptik yang terbentuk lebih kuat ketika pengalaman belajar melibatkan emosi positif dan interaksi sosial yang mendukung. Dengan demikian, pembelajaran kolaboratif dan berbasis pengalaman menjadi kunci dalam membangun koneksi otak yang lebih stabil. Model BBDL menempatkan aspek ini dalam desainnya dengan menghadirkan aktivitas berbasis proyek, simulasi kolaboratif, serta integrasi kecerdasan buatan yang mampu menyesuaikan konteks pembelajaran dengan kebutuhan emosional peserta didik. Hal ini membuktikan bahwa neuroplastisitas bukan hanya fenomena biologis, tetapi juga fenomena pedagogis yang dapat dioptimalkan melalui desain instruksional (Subba et al., 2025; Yildiz & Arpacı, 2024).

Perkembangan teknologi pendidikan semakin memperkuat penerapan prinsip neuroplastisitas. Melalui teknologi seperti adaptive learning systems dan aplikasi berbasis deep learning, peserta didik dapat menerima pengalaman belajar yang dipersonalisasi. Teknologi ini mampu mengidentifikasi kesulitan belajar, menyajikan strategi yang sesuai, serta mengulang materi hingga jalur sinaptik terbentuk dengan kuat. Model BBDL mengintegrasikan teknologi ini untuk menciptakan lingkungan belajar yang responsif,

sehingga neuroplastisitas dapat bekerja secara optimal. Dengan kata lain, teknologi bukan hanya alat bantu, tetapi juga katalis yang mempercepat terbentuknya jalur neurologis baru dalam otak (Vieira et al., 2025; Ambroise et al., 2025).

Selain pada ranah kognitif, neuroplastisitas juga memiliki implikasi besar pada pembentukan karakter dan keterampilan sosial. Proses adaptasi otak memungkinkan peserta didik untuk mengembangkan keterampilan regulasi diri, empati, serta kemampuan komunikasi yang lebih baik. Dengan menekankan pembelajaran yang holistik, BBDL mengoptimalkan neuroplastisitas tidak hanya untuk pencapaian akademik, tetapi juga untuk pengembangan kompetensi sosial-emosional yang menjadi fondasi penting pendidikan abad ke-21. Hal ini sejalan dengan arah kebijakan pendidikan global yang menekankan integrasi keterampilan kognitif, afektif, dan sosial dalam kurikulum (Johar et al., 2025; Putri et al., 2025).

Penelitian terkini juga menunjukkan bahwa neuroplastisitas dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan, seperti nutrisi, aktivitas fisik, dan kualitas tidur. Faktor-faktor tersebut berperan penting dalam menjaga kesehatan otak agar tetap optimal dalam membentuk koneksi baru. Oleh karena itu, desain pembelajaran yang sejalan dengan prinsip BBDL juga harus mempertimbangkan aspek kesejahteraan peserta didik. Program pembelajaran yang memberikan ruang untuk aktivitas fisik, relaksasi, dan istirahat seimbang dapat meningkatkan kapasitas neuroplastisitas otak. Dengan demikian, integrasi

pendekatan ilmiah, teknologi, dan kesejahteraan peserta didik akan menghasilkan pembelajaran yang lebih efektif dan berkelanjutan (Nurasiah et al., 2022; Azzahra & Dwiputra, 2024).

Secara keseluruhan, neuroplastisitas memberikan pemahaman mendalam bahwa setiap peserta didik memiliki kapasitas untuk terus belajar dan berkembang sepanjang hidupnya. Model BBDL yang mengintegrasikan prinsip neuroplastisitas dengan teknologi deep learning menghadirkan peluang besar bagi dunia pendidikan untuk menciptakan pengalaman belajar yang personal, adaptif, dan bermakna. Implikasi pedagogis dari konsep ini adalah bahwa pembelajaran tidak boleh berhenti pada penyampaian materi, melainkan harus diarahkan untuk menstimulasi otak melalui pengalaman multisensori, refleksi, dan kolaborasi. Dengan pemahaman ini, pendidikan dapat berfungsi sebagai sarana pemberdayaan manusia seutuhnya, yang relevan dengan tantangan global abad ke-21.

3.5 Brain-Compatible Learning Environment

Konsep brain-compatible learning environment merujuk pada desain lingkungan pembelajaran yang sesuai dengan cara kerja otak, baik dari segi struktur maupun fungsi. Lingkungan ini mencakup aspek fisik, emosional, sosial, dan kognitif yang secara sinergis mendukung proses pembelajaran optimal. Neurosains telah menunjukkan bahwa otak belajar secara lebih efektif ketika berada dalam kondisi yang

mendukung rasa aman, motivasi intrinsik, dan keterlibatan emosional positif. Oleh karena itu, rancangan pembelajaran yang kompatibel dengan otak harus mampu menciptakan suasana kelas yang bebas dari ancaman, penuh dukungan, serta memfasilitasi interaksi kolaboratif yang bermakna (Amjad et al., 2023; El-Wakeel et al., 2023).

Lingkungan belajar yang kompatibel dengan otak menekankan pentingnya keamanan psikologis. Rasa aman memberikan kondisi optimal bagi otak untuk melakukan proses kognitif tingkat tinggi seperti berpikir kritis, analisis, dan pemecahan masalah. Sebaliknya, ketika peserta didik berada dalam situasi penuh tekanan atau kecemasan, sistem limbik cenderung mendominasi sehingga menghambat fungsi korteks prefrontal yang berperan dalam pengambilan keputusan. Oleh karena itu, model Brain-Based Deep Learning (BBDL) mengedepankan lingkungan pembelajaran yang menekankan keterbukaan, dukungan emosional, serta pendekatan yang berorientasi pada apresiasi, bukan hukuman. Lingkungan semacam ini memungkinkan peserta didik mengaktualisasikan potensi kognitifnya secara penuh (Harden & Jones, 2022; Rahmawati et al., 2022).

Selain rasa aman, aspek keterlibatan emosional juga berperan penting dalam membentuk lingkungan belajar yang kompatibel dengan otak. Penelitian menunjukkan bahwa keterlibatan emosional memperkuat pembentukan memori jangka panjang dan meningkatkan motivasi belajar. Dalam

praktiknya, hal ini dapat diwujudkan melalui aktivitas yang menggabungkan seni, musik, permainan, maupun simulasi digital yang menstimulasi rasa ingin tahu. Model BBDL mengintegrasikan hal ini dengan penggunaan teknologi deep learning yang dapat menghadirkan pengalaman interaktif dan kontekstual, sehingga mendorong keterlibatan emosional yang mendalam dalam setiap sesi pembelajaran (Subba et al., 2025; Fang et al., 2025).

Lingkungan belajar yang kompatibel dengan otak juga harus bersifat multisensori. Otak manusia belajar lebih efektif ketika informasi disampaikan melalui berbagai saluran sensorik, seperti visual, auditori, kinestetik, maupun interaktif digital. Integrasi multisensori memungkinkan terbentuknya koneksi sinaptik yang lebih kuat karena informasi diproses dari berbagai jalur. Oleh sebab itu, pembelajaran berbasis proyek dengan penggunaan media digital, aplikasi simulasi, maupun representasi grafis matematis melalui GeoGebra menjadi elemen penting dalam membangun lingkungan belajar yang sesuai dengan cara kerja otak (Nurhikmah et al., 2023; Yildiz & Arpaci, 2024).

Lingkungan belajar yang kompatibel dengan otak juga memperhatikan aspek sosial. Neurosains menunjukkan bahwa interaksi sosial memperkuat koneksi sinaptik yang berhubungan dengan empati, komunikasi, dan pemecahan masalah kolaboratif. Hal ini menegaskan bahwa pembelajaran sebaiknya tidak dilakukan secara individualistik, melainkan

melalui pendekatan kolaboratif yang memungkinkan pertukaran ide dan pengalaman. Dalam kerangka BBDL, aktivitas kelompok, diskusi berbasis masalah, serta pembelajaran berbasis proyek menjadi sarana penting untuk mengoptimalkan aspek sosial otak. Proses ini mendukung pembentukan keterampilan abad ke-21 yang menekankan kolaborasi, kreativitas, dan komunikasi efektif (Putri et al., 2025; Johar et al., 2025).

Faktor lingkungan fisik juga tidak kalah penting dalam menciptakan brain-compatible learning environment. Cahaya alami, ventilasi udara yang baik, penataan ruang kelas yang fleksibel, serta penggunaan warna yang tepat terbukti berpengaruh terhadap aktivitas otak dan tingkat konsentrasi peserta didik. Lingkungan fisik yang nyaman memberikan kontribusi pada peningkatan fungsi atensi serta regulasi emosi. BBDL menekankan pentingnya penyediaan ruang belajar yang fleksibel, memungkinkan variasi aktivitas seperti diskusi kelompok, eksplorasi digital, maupun refleksi individu, sehingga peserta didik dapat memilih pola belajar sesuai dengan kebutuhan kognitifnya (Moustaffa, 2022; Madale et al., 2025).

Lingkungan belajar yang kompatibel dengan otak juga harus mendukung fleksibilitas kognitif. Fleksibilitas ini dapat dicapai dengan menghadirkan tantangan yang bervariasi, menstimulasi pemecahan masalah kreatif, serta memberikan kesempatan bagi peserta didik untuk memilih strategi belajar.

Prinsip ini sejalan dengan temuan bahwa neuroplastisitas berkembang ketika otak menghadapi tantangan adaptif yang relevan dengan dunia nyata. Oleh karena itu, BBDL dirancang untuk memberikan pengalaman belajar yang kontekstual, berbasis masalah, serta relevan dengan kehidupan peserta didik. Hal ini menciptakan kondisi belajar yang menantang, namun tetap aman secara emosional (Chechan et al., 2025; Asare et al., 2025).

Lingkungan belajar yang sesuai dengan cara kerja otak juga menekankan pentingnya refleksi dan metakognisi. Peserta didik perlu diberi kesempatan untuk merefleksikan pengalaman belajarnya, menilai strategi yang digunakan, serta merancang langkah perbaikan untuk masa depan. Proses refleksi ini memperkuat jalur sinaptik yang berhubungan dengan kesadaran diri dan pengambilan keputusan. Dalam kerangka BBDL, refleksi dapat difasilitasi melalui penggunaan jurnal digital, diskusi reflektif, maupun evaluasi berbasis portofolio yang memungkinkan peserta didik mengintegrasikan pengalaman kognitif dan emosional secara mendalam (Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025; Subba et al., 2025).

Secara keseluruhan, brain-compatible learning environment merupakan fondasi penting dalam implementasi BBDL. Lingkungan belajar yang aman, multisensori, kolaboratif, serta mendukung fleksibilitas kognitif dan refleksi akan mempercepat proses neuroplastisitas otak. Integrasi prinsip-

prinsip tersebut dengan teknologi deep learning memungkinkan terciptanya pengalaman belajar yang personal, adaptif, dan bermakna. Dengan demikian, BBDL tidak hanya memperhatikan konten pembelajaran, tetapi juga memastikan bahwa lingkungan belajar yang tercipta benar-benar sejalan dengan cara otak belajar. Implikasi dari hal ini adalah tercapainya pendidikan yang lebih humanis, inovatif, dan relevan dengan kebutuhan abad ke-21.

3.6 Hubungan Neurosains dan Brain-Based Deep Learning

Hubungan antara neurosains dan Brain-Based Deep Learning (BBDL) terletak pada pemahaman bahwa proses belajar merupakan hasil interaksi kompleks antara fungsi kognitif, emosi, dan mekanisme biologis otak. Neurosains menyediakan landasan ilmiah mengenai bagaimana otak menerima, memproses, menyimpan, serta mengingat informasi. Pengetahuan ini kemudian dijadikan dasar bagi perumusan prinsip-prinsip pembelajaran berbasis otak yang terimplementasi dalam BBDL. Misalnya, penemuan tentang neuroplastisitas menunjukkan bahwa otak memiliki kemampuan untuk berubah dan beradaptasi melalui pengalaman belajar yang konsisten. Dengan demikian, BBDL menempatkan pengalaman belajar adaptif, multisensori, dan kontekstual sebagai inti proses pembelajaran (Al-Tarawneh et al., 2021; Yildiz & Arpaci, 2024).

Neurosains juga menjelaskan peran penting emosi dalam memengaruhi efektivitas belajar. Aktivitas amigdala dan sistem limbik terbukti memengaruhi tingkat keterlibatan, perhatian, serta pembentukan memori jangka panjang. Dalam konteks BBDL, pembelajaran dirancang agar menghadirkan pengalaman yang positif, bermakna, dan relevan dengan kehidupan peserta didik sehingga memicu keterlibatan emosional. Penelitian menunjukkan bahwa keterlibatan emosional yang kuat mempercepat pembentukan jalur sinaptik yang stabil dan meningkatkan retensi informasi (Amjad et al., 2023; Rahmawati et al., 2022). Oleh karena itu, BBDL tidak hanya berfokus pada transfer informasi, melainkan juga mengelola emosi dan motivasi belajar.

Hubungan neurosains dan BBDL juga tampak pada integrasi prinsip kerja memori dalam desain pembelajaran. Otak memiliki kapasitas terbatas dalam memproses informasi di memori kerja, namun dapat memperkuat pemahaman melalui pengulangan, asosiasi, dan pengaitan konsep dengan pengalaman nyata. BBDL merespons hal ini dengan strategi pembelajaran yang memecah informasi kompleks menjadi bagian-bagian kecil yang bermakna, menggunakan media visual, serta menyediakan kesempatan refleksi. Strategi ini memperluas kapasitas memori jangka panjang dan memungkinkan peserta didik mengembangkan keterampilan berpikir tingkat tinggi (Funa et al., 2024; Fang et al., 2025).

Lebih jauh, neurosains menekankan pentingnya stimulasi multisensori dalam memperkuat koneksi sinaptik. Otak belajar lebih efektif ketika informasi disampaikan melalui kombinasi visual, auditori, kinestetik, dan digital interaktif. Prinsip ini diterapkan dalam BBDL melalui pemanfaatan teknologi digital seperti GeoGebra, simulasi interaktif, maupun pendekatan berbasis proyek yang menuntut eksplorasi multisensori. Dengan demikian, hubungan antara neurosains dan BBDL bukan hanya teoretis, melainkan juga praktis dalam perancangan aktivitas pembelajaran yang sesuai dengan cara kerja otak (Nurhikmah et al., 2023; Gurmu et al., 2024).

Neurosains juga memberikan pemahaman tentang pentingnya feedback atau umpan balik bagi perkembangan kognitif. Mekanisme dopamin di otak berfungsi menguatkan pengalaman belajar yang disertai dengan umpan balik positif. BBDL mengintegrasikan konsep ini dengan menghadirkan pembelajaran yang berbasis refleksi, asesmen formatif, dan penggunaan teknologi deep learning untuk mempersonalisasi umpan balik. Hal ini memungkinkan peserta didik mengenali kekuatan dan kelemahannya, sehingga dapat memperbaiki strategi belajar secara berkelanjutan. Dengan demikian, hubungan neurosains dan BBDL mempertegas bahwa umpan balik bukan sekadar evaluasi, melainkan bagian penting dari proses neurokognitif pembelajaran (Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025; Vieira et al., 2025).

Selain itu, penelitian neurosains menunjukkan bahwa otak belajar lebih optimal ketika menghadapi tantangan yang adaptif. Tantangan tersebut harus cukup kompleks untuk merangsang pemikiran kritis, namun tetap berada dalam jangkauan kemampuan peserta didik. BBDL mengadopsi prinsip ini dengan menghadirkan tugas berbasis masalah, proyek kolaboratif, serta simulasi digital yang dirancang untuk menyeimbangkan tantangan dan dukungan. Proses ini selaras dengan teori zone of proximal development yang menekankan pentingnya keseimbangan antara tantangan dan bimbingan dalam pembelajaran (Subba et al., 2025; Chechan et al., 2025).

Integrasi teknologi deep learning dalam BBDL juga memiliki basis neurosains. Teknologi ini berfungsi meniru cara kerja otak dalam mengenali pola, memproses informasi kompleks, dan membuat prediksi. Dalam pendidikan, deep learning dapat digunakan untuk mempersonalisasi pembelajaran berdasarkan data perilaku belajar peserta didik, sehingga menciptakan pengalaman yang adaptif dan sesuai dengan kebutuhan kognitif masing-masing individu. Dengan demikian, hubungan neurosains dan BBDL tidak hanya sebatas pada aspek biologis otak, tetapi juga pada penerapan algoritma kecerdasan buatan yang meniru mekanisme otak manusia (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Lebih lanjut, neurosains menekankan pentingnya keterhubungan antara otak, tubuh, dan lingkungan dalam pembelajaran. Hal ini selaras dengan prinsip BBDL yang

menekankan bahwa pembelajaran harus kontekstual, relevan, dan terkait langsung dengan pengalaman hidup peserta didik. Lingkungan belajar yang kompatibel dengan otak menciptakan keterlibatan holistik, di mana aspek kognitif, emosional, sosial, dan fisik saling berinteraksi. Hubungan ini menegaskan bahwa BBDL merupakan model pembelajaran yang menyatukan dimensi neurosains dengan pedagogi modern untuk menghasilkan pengalaman belajar yang lebih utuh (Harden & Jones, 2022; Madale et al., 2025).

Secara keseluruhan, hubungan neurosains dan BBDL memperlihatkan bahwa model ini bukan sekadar pendekatan pedagogis, melainkan hasil integrasi antara temuan ilmiah tentang otak dengan strategi pendidikan yang inovatif. BBDL menjadikan otak sebagai acuan utama dalam merancang pembelajaran, mulai dari pengaturan lingkungan, strategi penyampaian materi, hingga integrasi teknologi deep learning. Implikasi dari hubungan ini adalah terciptanya model pembelajaran yang lebih relevan dengan kebutuhan abad ke-21, yang tidak hanya mengembangkan aspek kognitif, tetapi juga emosional, sosial, dan digital peserta didik. Dengan demikian, neurosains memberikan legitimasi ilmiah sekaligus arah praktis bagi pengembangan BBDL sebagai model pembelajaran masa depan.

BAB 4 ASPEK TEKNOLOGI DEEP LEARNING DALAM PENDIDIKAN

4.1 Definisi dan Konsep Dasar Deep Learning

Deep learning merupakan salah satu cabang dari kecerdasan buatan yang berfokus pada pengolahan data menggunakan arsitektur jaringan saraf tiruan berlapis untuk meniru cara kerja otak manusia dalam mengenali pola, mengklasifikasikan informasi, dan mengambil keputusan. Konsep dasar ini terinspirasi dari mekanisme biologis otak, khususnya dalam pembentukan koneksi sinaptik yang kompleks serta kemampuan adaptif sistem saraf dalam merespons pengalaman baru. Dalam konteks pendidikan, deep learning tidak hanya dipahami sebagai sekadar teknologi komputasi, melainkan sebagai paradigma yang memungkinkan pembelajaran lebih personal, adaptif, dan berbasis data. Melalui pemanfaatan algoritma yang mampu mengidentifikasi kebutuhan belajar peserta didik, teknologi ini membuka peluang besar untuk meningkatkan efektivitas proses pendidikan (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Definisi mendalam tentang deep learning menekankan pada kemampuan sistem untuk melakukan feature learning, yaitu proses mengekstraksi representasi penting dari data mentah tanpa intervensi manusia secara langsung. Keunggulan

ini menjadikan deep learning mampu memproses berbagai bentuk data seperti teks, gambar, suara, hingga data perilaku peserta didik. Dalam ranah pendidikan, kemampuan ini bermanfaat dalam menganalisis proses pembelajaran, mendeteksi kesulitan belajar, serta merancang strategi pembelajaran yang sesuai dengan kebutuhan individu. Dengan demikian, deep learning tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu teknis, tetapi juga sebagai mitra pedagogis yang memperluas cakrawala pembelajaran modern (Halkiopoulou et al., 2025; Ambroise et al., 2025).

Konsep dasar deep learning berakar pada struktur jaringan saraf tiruan yang terdiri atas lapisan input, lapisan tersembunyi, dan lapisan output. Setiap lapisan tersembunyi bertugas melakukan transformasi non-linear terhadap data, sehingga menghasilkan representasi yang semakin abstrak pada tiap tahap pemrosesan. Proses ini sejalan dengan cara otak manusia dalam memproses informasi dari sensoris hingga membentuk pemahaman konseptual. Dalam pendidikan, representasi ini dapat digunakan untuk memahami pola belajar, mengevaluasi capaian akademik, hingga memprediksi kecenderungan keberhasilan peserta didik. Oleh karena itu, deep learning memiliki relevansi yang kuat sebagai model komputasi yang mendukung pendekatan Brain-Based Deep Learning (De Vries et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Pengembangan deep learning sebagai teknologi pendidikan juga didorong oleh peningkatan kapasitas

komputasi dan ketersediaan data dalam jumlah besar. Dengan adanya big data pendidikan yang berasal dari learning management systems, aplikasi pembelajaran digital, maupun asesmen daring, algoritma deep learning dapat digunakan untuk menemukan pola yang tidak terlihat secara langsung oleh guru. Hal ini menciptakan peluang bagi penerapan pembelajaran berbasis bukti (evidence-based learning), di mana keputusan pedagogis tidak lagi bergantung pada intuisi semata, tetapi pada analisis data yang objektif. Dengan demikian, konsep deep learning tidak hanya bersifat teoritis, melainkan aplikatif dalam mendukung transformasi digital pendidikan (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Deep learning juga didefinisikan melalui fungsinya dalam mendukung pembelajaran adaptif. Sistem adaptif berbasis deep learning dapat menyesuaikan tingkat kesulitan materi, memberikan rekomendasi pembelajaran personal, serta mengidentifikasi gaya belajar peserta didik. Adaptivitas ini merupakan salah satu prinsip penting dalam pendidikan abad ke-21, yang menuntut fleksibilitas dan personalisasi pembelajaran. Dengan memanfaatkan algoritma deep learning, model pembelajaran dapat lebih inklusif karena memperhatikan perbedaan kemampuan, latar belakang, serta kecepatan belajar setiap individu (Kim et al., 2025; Yildiz & Arpaci, 2024).

Selain sebagai instrumen analisis, deep learning juga berfungsi sebagai sarana interaktif dalam pendidikan. Contoh

nyata adalah pengembangan chatbot cerdas, sistem rekomendasi pembelajaran, maupun aplikasi berbasis pengenalan suara dan gambar yang digunakan dalam pembelajaran matematika dan sains. Integrasi ini memberikan pengalaman belajar yang lebih menarik dan kontekstual, sekaligus melatih peserta didik dalam keterampilan digital. Dengan demikian, deep learning bukan sekadar teknologi pendukung, tetapi menjadi medium baru yang menjembatani interaksi antara peserta didik dengan konten pembelajaran (Fang et al., 2025; Chechan et al., 2025).

Konsep dasar deep learning dalam pendidikan juga erat kaitannya dengan predictive analytics. Teknologi ini mampu mengidentifikasi potensi kegagalan belajar sejak dini, menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi motivasi, serta memprediksi capaian akademik. Informasi ini sangat penting bagi guru dan pengambil kebijakan untuk merancang intervensi yang tepat waktu dan efektif. Hal ini selaras dengan paradigma Brain-Based Deep Learning yang menekankan pentingnya pemantauan proses belajar secara berkelanjutan dan berbasis data ilmiah (Vieira et al., 2025; Halkiopoulou et al., 2025).

Lebih lanjut, definisi dan konsep dasar deep learning dalam pendidikan tidak dapat dilepaskan dari prinsip etika. Penggunaan data peserta didik menuntut adanya perlindungan privasi, transparansi algoritma, serta keadilan dalam rekomendasi pembelajaran. Hal ini penting untuk memastikan

bahwa teknologi ini benar-benar meningkatkan kualitas pendidikan tanpa menimbulkan bias maupun ketidaksetaraan. Oleh karena itu, deep learning dalam pendidikan harus dirancang sebagai teknologi yang humanistik, berorientasi pada peserta didik, dan sesuai dengan nilai-nilai pendidikan universal (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Secara keseluruhan, definisi dan konsep dasar deep learning menunjukkan bahwa teknologi ini merupakan kombinasi dari prinsip neurosains, komputasi, dan pedagogi. Dengan kemampuannya dalam meniru cara kerja otak, mengolah data dalam skala besar, serta menghadirkan pembelajaran adaptif, deep learning berpotensi merevolusi sistem pendidikan modern. Penerapan konsep ini selaras dengan pendekatan Brain-Based Deep Learning yang menekankan keterhubungan antara proses biologis otak, strategi pedagogis, dan teknologi digital. Dengan demikian, integrasi deep learning dalam pendidikan tidak hanya menjadi inovasi teknologis, tetapi juga sebuah langkah strategis dalam menciptakan pembelajaran yang lebih cerdas, inklusif, dan berorientasi pada masa depan.

4.2 Algoritma dan Arsitektur Deep Learning

a. Neural Network

Neural network merupakan fondasi utama dari arsitektur deep learning yang meniru cara kerja jaringan saraf biologis manusia dalam memproses informasi.

Jaringan ini terdiri atas tiga komponen utama, yaitu lapisan input, lapisan tersembunyi (hidden layers), dan lapisan output. Setiap neuron dalam lapisan memiliki bobot yang dapat disesuaikan untuk menentukan seberapa besar pengaruh suatu informasi dalam proses pengambilan keputusan. Melalui proses propagasi maju (forward propagation) dan pembaruan bobot dengan algoritma backpropagation, neural network mampu belajar dari data dengan mengurangi kesalahan prediksi secara bertahap. Dalam pendidikan, arsitektur ini digunakan untuk berbagai keperluan, seperti analisis pola belajar, klasifikasi gaya belajar, hingga prediksi performa akademik peserta didik. Misalnya, neural network dapat menganalisis respons siswa terhadap soal matematika untuk mengidentifikasi tingkat pemahaman konsep tertentu, sekaligus memberikan rekomendasi materi tambahan yang sesuai. Kemampuan adaptif ini menjadikan neural network sebagai instrumen penting dalam pendekatan Brain-Based Deep Learning yang menghubungkan aspek biologis otak dengan teknologi digital. Keunggulan utama neural network adalah fleksibilitasnya dalam menangani berbagai jenis data, mulai dari teks, suara, gambar, hingga data perilaku belajar, sehingga dapat digunakan secara luas dalam mendukung transformasi pendidikan digital yang adaptif dan personal (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

b. Convolutional Neural Network (CNN)

Convolutional Neural Network (CNN) merupakan salah satu arsitektur neural network yang dirancang khusus untuk memproses data spasial, terutama gambar. CNN bekerja dengan menggunakan lapisan konvolusi yang berfungsi mengekstraksi fitur penting dari data input melalui filter atau kernel, serta lapisan pooling yang bertugas mereduksi dimensi data tanpa kehilangan informasi signifikan. Arsitektur ini sangat relevan dalam konteks pendidikan berbasis teknologi, khususnya dalam pengembangan aplikasi pembelajaran visual seperti pengenalan tulisan tangan, analisis ekspresi wajah untuk mendeteksi emosi, serta pengolahan citra dalam pembelajaran sains dan matematika. CNN juga dapat digunakan untuk mengembangkan sistem penilaian otomatis berbasis citra, misalnya dalam mengevaluasi jawaban berbentuk grafik atau gambar geometri. Dengan demikian, CNN tidak hanya memperluas pemanfaatan deep learning dalam pendidikan, tetapi juga memungkinkan integrasi pendekatan neurosains dengan teknologi digital, karena pengolahan visual merupakan salah satu fungsi utama otak manusia. Selain itu, CNN dapat digunakan dalam riset pendidikan untuk menganalisis keterlibatan emosional peserta didik melalui ekspresi wajah yang terekam kamera, sehingga guru dapat memperoleh informasi real-time mengenai

motivasi belajar. Potensi besar CNN dalam pendidikan menunjukkan bahwa arsitektur ini selaras dengan kebutuhan pembelajaran abad ke-21 yang menekankan personalisasi, adaptivitas, serta integrasi teknologi mutakhir dalam proses belajar mengajar (De Vries et al., 2025; Halkiopoulous et al., 2025).

c. Recurrent Neural Network (RNN)

Recurrent Neural Network (RNN) merupakan arsitektur neural network yang dirancang untuk menangani data berurutan (sequential data), seperti teks, suara, maupun aktivitas waktu nyata. Keunggulan utama RNN adalah adanya mekanisme memori internal yang memungkinkan model ini mengingat informasi dari input sebelumnya untuk memengaruhi output pada langkah berikutnya. Hal ini membuat RNN sangat cocok digunakan dalam pendidikan, misalnya untuk memodelkan pola interaksi peserta didik dalam learning management system, menganalisis proses berpikir saat menyelesaikan soal, atau mengembangkan aplikasi pembelajaran berbasis bahasa alami. RNN juga digunakan dalam pengembangan chatbot cerdas yang mampu berinteraksi secara kontekstual dengan peserta didik, memberikan penjelasan konsep, hingga membantu latihan soal. Dengan kemampuan mengolah data berurutan, RNN dapat mendukung penelitian dalam bidang neurosains pendidikan karena memungkinkan

analisis terhadap dinamika proses kognitif peserta didik dari waktu ke waktu. Selain itu, varian RNN seperti Long Short-Term Memory (LSTM) dan Gated Recurrent Unit (GRU) semakin meningkatkan kapasitas model untuk mengingat informasi jangka panjang, yang sangat relevan dalam pembelajaran berbasis kurikulum yang berlangsung berjenjang. Integrasi RNN dalam pendidikan menunjukkan potensi luar biasa dalam mendukung pembelajaran adaptif, analisis pola kognitif, serta pengembangan lingkungan belajar cerdas yang sesuai dengan prinsip Brain-Based Deep Learning, di mana memori dan keterhubungan pengalaman belajar menjadi aspek fundamental.

4.3 Potensi Deep Learning dalam Pendidikan

Perkembangan teknologi kecerdasan buatan, khususnya deep learning, telah membuka cakrawala baru dalam dunia pendidikan yang sebelumnya sulit dicapai dengan metode konvensional. Deep learning memungkinkan analisis data dalam jumlah besar dan kompleks, yang mencakup perilaku belajar siswa, pola interaksi, hingga capaian akademik yang dapat dipetakan dengan akurasi tinggi. Dalam konteks pendidikan berbasis otak, kemampuan deep learning untuk mendeteksi pola tersembunyi pada data memberikan peluang besar dalam memahami proses belajar yang selaras dengan mekanisme kerja otak. Misalnya, sistem berbasis deep learning

dapat memprediksi tingkat pemahaman siswa terhadap konsep matematika tertentu melalui analisis jawaban dan waktu pengerjaan soal, sehingga guru dapat memberikan intervensi yang lebih tepat sasaran. Potensi ini mengarah pada terciptanya ekosistem pembelajaran yang bersifat adaptif, personal, dan lebih relevan dengan kebutuhan peserta didik di era digital (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Salah satu potensi utama deep learning dalam pendidikan adalah kemampuannya mendukung pembelajaran yang dipersonalisasi. Dengan algoritma yang mampu memproses data perilaku siswa, deep learning dapat mengidentifikasi kecepatan belajar, gaya kognitif, hingga preferensi pembelajaran setiap individu. Hal ini memungkinkan sistem pembelajaran digital untuk menyesuaikan materi, tingkat kesulitan, serta jenis media pembelajaran yang paling sesuai. Dengan demikian, pendekatan one-size-fits-all yang selama ini menjadi kelemahan pendidikan tradisional dapat digantikan oleh model pembelajaran yang lebih manusiawi dan efektif. Personalisasi ini juga sejalan dengan prinsip Brain-Based Learning, yang menekankan bahwa setiap otak unik dan membutuhkan stimulus berbeda agar proses belajar berlangsung optimal (Yildiz & Arpaci, 2024; Fang et al., 2025).

Deep learning juga memiliki potensi besar dalam mendukung asesmen formatif dan sumatif yang lebih objektif dan komprehensif. Dengan memanfaatkan algoritma pengenalan pola, sistem dapat menilai hasil belajar siswa tidak

hanya dari jawaban akhir, tetapi juga dari proses berpikir yang dilalui. Sebagai contoh, dalam pembelajaran matematika, deep learning dapat menilai langkah-langkah pengerjaan soal siswa dan mendeteksi kesalahan konseptual sejak awal. Hal ini sangat penting karena penilaian tidak hanya berhenti pada benar atau salah, tetapi juga pada bagaimana siswa mencapai jawabannya. Dengan demikian, asesmen berbasis deep learning memberikan gambaran yang lebih utuh tentang kemampuan kognitif, keterampilan berpikir kritis, dan kreativitas peserta didik (Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025; Subba et al., 2025).

Selain mendukung personalisasi dan asesmen, deep learning juga dapat digunakan dalam pengembangan konten pembelajaran adaptif. Sistem berbasis deep learning mampu merekomendasikan materi pembelajaran tambahan sesuai dengan kelemahan individu siswa, sekaligus mengatur alur penyajian konten agar sesuai dengan tingkat perkembangan kognitifnya. Dalam pembelajaran berbasis matematika, misalnya, aplikasi deep learning dapat memanfaatkan GeoGebra untuk mengadaptasi soal dan visualisasi sesuai kemampuan siswa. Hal ini menunjukkan bagaimana integrasi teknologi dengan neurosains dapat mewujudkan pembelajaran berbasis otak yang lebih efektif, di mana stimulus yang diberikan sesuai dengan kapasitas memori, perhatian, dan motivasi siswa (Nurhikmah et al., 2023; Owusu et al., 2023).

Di samping itu, deep learning berpotensi besar dalam bidang analitik pendidikan (learning analytics) yang dapat

digunakan untuk pengambilan keputusan strategis. Data hasil belajar siswa, kehadiran, partisipasi, hingga keterlibatan emosional dapat dianalisis secara komprehensif untuk memberikan rekomendasi kebijakan pendidikan. Dengan demikian, pengambil keputusan dapat merancang intervensi yang lebih efektif dalam meningkatkan kualitas pembelajaran. Analisis berbasis deep learning juga dapat mendukung lembaga pendidikan dalam merancang kurikulum yang adaptif terhadap kebutuhan siswa, sekaligus selaras dengan tuntutan abad ke-21 yang menekankan kreativitas, pemecahan masalah, serta keterampilan berpikir tingkat tinggi (OECD, 2023; Johar et al., 2025).

Dalam ranah pembelajaran berbasis emosi dan motivasi, deep learning dapat berfungsi sebagai alat deteksi yang sensitif. Melalui analisis ekspresi wajah, intonasi suara, atau pola interaksi digital, sistem dapat mengenali tingkat motivasi dan keterlibatan siswa. Informasi ini sangat penting dalam pendidikan berbasis otak karena emosi berperan besar dalam memengaruhi daya ingat dan konsentrasi siswa. Dengan teknologi ini, guru dapat segera mengetahui jika motivasi siswa menurun dan memberikan stimulus tambahan untuk meningkatkan semangat belajar. Potensi ini memperlihatkan bagaimana deep learning tidak hanya mendukung aspek kognitif, tetapi juga afektif dalam pendidikan, sehingga menciptakan pendekatan pembelajaran yang holistik (Halkiopoulous et al., 2025; Kim et al., 2025).

Potensi lainnya adalah pemanfaatan deep learning dalam pembelajaran berbasis bahasa alami. Sistem seperti chatbot dan asisten digital pendidikan dapat memanfaatkan algoritma RNN atau LSTM untuk berinteraksi dengan siswa secara kontekstual, memberikan jawaban, hingga membantu latihan soal. Teknologi ini sangat relevan dalam mendukung pembelajaran mandiri, terutama dalam era digital di mana akses terhadap guru secara langsung sering kali terbatas. Dengan kemampuan ini, siswa dapat memperoleh pengalaman belajar yang lebih fleksibel, adaptif, sekaligus tetap sesuai dengan prinsip Brain-Based Learning yang menekankan pentingnya interaksi dan stimulus kognitif yang berkelanjutan (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Selain pada tingkat individu, deep learning juga memiliki potensi untuk meningkatkan efektivitas manajemen pendidikan secara makro. Analisis data besar dari berbagai sekolah dapat digunakan untuk mengidentifikasi kesenjangan kualitas pendidikan, faktor-faktor penyebab rendahnya capaian belajar, hingga efektivitas kebijakan pendidikan tertentu. Dengan demikian, teknologi ini berkontribusi pada terciptanya sistem pendidikan yang lebih inklusif dan berkeadilan, di mana intervensi dapat diarahkan pada kelompok siswa yang paling membutuhkan dukungan. Hal ini selaras dengan tujuan pendidikan global yang diusung melalui program-program seperti PISA, yang menekankan pentingnya pemerataan

kualitas pendidikan untuk menghadapi tantangan global (OECD, 2024; Ulya et al., 2024).

Akhirnya, potensi deep learning dalam pendidikan tidak dapat dipisahkan dari integrasinya dengan neurosains dan prinsip Brain-Based Learning. Dengan memanfaatkan pemahaman tentang bagaimana otak memproses informasi, menyimpan memori, dan merespons stimulus, deep learning dapat dikembangkan sebagai alat yang benar-benar mendukung perkembangan kognitif dan emosional siswa. Inovasi ini menunjukkan adanya kebaruan dalam pendekatan pendidikan abad ke-21, di mana teknologi bukan hanya sekadar alat bantu, tetapi menjadi bagian integral dari proses pembelajaran. Dengan demikian, potensi deep learning dalam pendidikan bukan hanya untuk meningkatkan efisiensi pembelajaran, tetapi juga untuk menciptakan ekosistem belajar yang selaras dengan cara kerja otak manusia dan kebutuhan generasi masa depan.

4.4 Integrasi Deep Learning dengan Media Pembelajaran

Integrasi deep learning dengan media pembelajaran merupakan salah satu inovasi strategis dalam mewujudkan transformasi pendidikan digital yang selaras dengan prinsip Brain-Based Deep Learning (BBDL). Media pembelajaran pada dasarnya berfungsi sebagai perantara antara materi ajar dan peserta didik, sehingga ketika dipadukan dengan teknologi

deep learning, media tersebut dapat menghadirkan pengalaman belajar yang lebih adaptif, personal, dan interaktif. Misalnya, aplikasi berbasis deep learning dapat menganalisis respons peserta didik terhadap soal interaktif, kemudian secara otomatis menyesuaikan tingkat kesulitan materi sesuai dengan kemampuan kognitif yang ditunjukkan. Dengan demikian, media pembelajaran tidak lagi bersifat statis, melainkan dinamis dan mampu memberikan pengalaman belajar yang sejalan dengan cara kerja otak. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi deep learning dapat memperkuat fungsi media sebagai fasilitator pembelajaran, sekaligus mendorong terciptanya lingkungan belajar yang lebih responsif terhadap kebutuhan individu (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Dalam konteks pendidikan matematika, integrasi deep learning dengan media seperti GeoGebra memberikan peluang besar untuk menghadirkan visualisasi konsep yang lebih konkret dan interaktif. Dengan dukungan algoritma deep learning, sistem dapat mengamati pola kesalahan siswa ketika menggunakan GeoGebra, kemudian memberikan rekomendasi visualisasi tambahan atau langkah-langkah perbaikan yang relevan. Hal ini tidak hanya membantu mempercepat proses pemahaman konsep, tetapi juga mendorong penguatan koneksi sinaptik sesuai prinsip neurosains. Integrasi ini memungkinkan pembelajaran yang lebih otentik, karena siswa memperoleh umpan balik real-time yang sesuai dengan perkembangan kognitifnya. Oleh sebab itu, deep learning

bukan sekadar menambahkan kecanggihan teknologi, tetapi benar-benar merevolusi cara media pembelajaran digunakan dalam pendidikan (Nurhikmah et al., 2023; Rahmawati et al., 2022).

Media pembelajaran berbasis simulasi juga dapat ditingkatkan efektivitasnya melalui integrasi deep learning. Misalnya, dalam pembelajaran sains, simulasi laboratorium virtual yang dilengkapi algoritma deep learning dapat menyesuaikan skenario eksperimen berdasarkan interaksi peserta didik. Sistem ini mampu mengenali kesalahan langkah eksperimen dan memberikan panduan korektif secara langsung. Pendekatan ini mendukung terciptanya pengalaman belajar yang imersif, aman, dan bebas risiko, sekaligus menguatkan prinsip Brain-Based Learning yang menekankan pada keterlibatan multisensori dan pengalaman nyata. Dengan cara ini, media simulasi bukan hanya sarana visualisasi, melainkan wahana pembelajaran berbasis otak yang menumbuhkan keterampilan berpikir kritis dan pemecahan masalah (Funa et al., 2024; Fang et al., 2025).

Selain simulasi, media berbasis bahasa alami seperti chatbot pendidikan juga semakin relevan dengan adanya integrasi deep learning. Chatbot berbasis RNN atau LSTM dapat berfungsi sebagai tutor virtual yang mampu memberikan jawaban kontekstual, menjelaskan konsep, serta menawarkan latihan sesuai tingkat kemampuan peserta didik. Chatbot ini juga dapat mendeteksi kebingungan atau kesulitan belajar

melalui analisis pola interaksi, kemudian menyajikan solusi yang sesuai. Dengan demikian, media berbasis bahasa alami menjadi perpanjangan tangan guru dalam menyediakan pembelajaran personal dan berbasis kebutuhan. Integrasi ini sejalan dengan prinsip BBDL yang menekankan pentingnya interaksi, motivasi, dan keterlibatan emosional dalam pembelajaran (Kim et al., 2025; Ambroise et al., 2025).

Penggunaan media pembelajaran berbasis video interaktif juga dapat ditingkatkan efektivitasnya melalui integrasi deep learning. Algoritma dapat digunakan untuk menganalisis respons peserta didik terhadap video, seperti bagian mana yang sering diulang, dihentikan, atau dilewati. Data ini memberikan wawasan berharga untuk menyesuaikan konten video secara adaptif sesuai kebutuhan kognitif peserta didik. Lebih jauh, sistem dapat merekomendasikan materi tambahan atau mengajukan pertanyaan reflektif guna memperkuat pemahaman. Pendekatan ini mendukung pembelajaran yang lebih efektif karena memanfaatkan keterlibatan visual dan auditori yang telah terbukti memperkuat pembentukan memori jangka panjang dalam otak (Yildiz & Arpaci, 2024; Chechan et al., 2025).

Integrasi deep learning dengan media berbasis gamifikasi juga membuka peluang besar dalam meningkatkan motivasi belajar. Media gamifikasi yang dilengkapi dengan algoritma cerdas dapat menyesuaikan tingkat tantangan permainan sesuai dengan kemampuan siswa, sehingga tetap

berada dalam zona perkembangan proksimalnya. Hal ini mendukung prinsip neurosains yang menekankan pentingnya keseimbangan antara tantangan dan rasa aman dalam pembelajaran. Dengan demikian, gamifikasi berbasis deep learning tidak hanya meningkatkan keterlibatan emosional, tetapi juga memfasilitasi perkembangan kognitif yang lebih adaptif. Media ini menjadi sarana yang efektif dalam menumbuhkan ketekunan, kreativitas, serta keterampilan pemecahan masalah (Subba et al., 2025; Johar et al., 2025).

Media pembelajaran berbasis asesmen digital juga dapat dioptimalkan melalui integrasi deep learning. Sistem berbasis algoritma dapat menilai hasil kerja siswa secara lebih komprehensif, tidak hanya berdasarkan jawaban akhir, tetapi juga proses penyelesaian. Sebagai contoh, dalam pembelajaran matematika, sistem dapat mendeteksi kesalahan konseptual yang dilakukan siswa dalam langkah pengerjaan soal, kemudian memberikan umpan balik korektif yang sesuai. Hal ini mendukung asesmen formatif yang berfokus pada proses, selaras dengan prinsip Brain-Based Learning yang menekankan pentingnya pemantauan berkelanjutan terhadap perkembangan kognitif. Integrasi ini membuat media asesmen digital menjadi lebih bermakna karena memberikan gambaran holistik tentang perkembangan siswa (Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025; Vieira et al., 2025).

Lebih lanjut, integrasi deep learning dengan media pembelajaran juga memiliki implikasi penting dalam

mendukung inklusivitas. Media berbasis teknologi cerdas dapat dirancang untuk membantu peserta didik berkebutuhan khusus, misalnya dengan pengenalan suara untuk siswa tunanetra atau pengenalan teks otomatis untuk siswa tunarungu. Sistem deep learning dapat mempersonalisasi materi agar sesuai dengan kebutuhan individu, sehingga setiap peserta didik memperoleh kesempatan belajar yang adil. Pendekatan ini selaras dengan tujuan pendidikan universal yang menekankan akses dan kesetaraan, sekaligus memperkuat fungsi neurosains dalam memahami keberagaman otak manusia (Asare et al., 2025; Madale et al., 2025).

Secara keseluruhan, integrasi deep learning dengan media pembelajaran menunjukkan potensi transformatif dalam pendidikan modern. Media tidak lagi sekadar alat bantu statis, tetapi menjadi entitas cerdas yang mampu menyesuaikan, menganalisis, dan merespons kebutuhan belajar peserta didik secara real time. Integrasi ini selaras dengan prinsip BB DL yang menggabungkan pemahaman neurosains tentang otak dengan teknologi digital mutakhir. Dengan demikian, media pembelajaran berbasis deep learning tidak hanya meningkatkan efektivitas kognitif, tetapi juga memperkuat motivasi, emosi, dan keterlibatan siswa dalam proses belajar. Implikasi dari hal ini adalah terciptanya sistem pembelajaran yang lebih personal, inklusif, dan berorientasi pada kebutuhan abad ke-21.

4.5 Peran GeoGebra, AI Tools, dan Simulasi Visual

GeoGebra sebagai salah satu perangkat lunak pendidikan berbasis matematika telah menjadi media penting dalam mendukung pembelajaran interaktif. Dengan integrasi deep learning, peran GeoGebra tidak lagi terbatas pada penyajian grafik atau visualisasi konsep matematis, melainkan dapat berfungsi sebagai sistem cerdas yang mampu menyesuaikan materi sesuai dengan kebutuhan kognitif siswa. Algoritma deep learning dapat menganalisis interaksi siswa ketika menggunakan GeoGebra, misalnya dalam memanipulasi grafik atau menyelesaikan persamaan, lalu memberikan rekomendasi visualisasi tambahan. Integrasi ini mendukung prinsip Brain-Based Deep Learning (BBDL), di mana pembelajaran harus adaptif, kontekstual, serta menstimulasi otak melalui pengalaman multisensori. Dengan demikian, GeoGebra tidak hanya menjadi alat bantu visual, tetapi juga medium pembelajaran cerdas yang meningkatkan pemahaman konseptual siswa (Nurhikmah et al., 2023; Fang et al., 2025).

Peran AI tools dalam pendidikan semakin krusial seiring berkembangnya teknologi deep learning. AI tools, seperti chatbot, sistem rekomendasi pembelajaran, hingga platform analitik, berfungsi sebagai fasilitator digital yang dapat memberikan umpan balik personal. Dengan dukungan deep learning, AI tools mampu mengenali pola belajar, mendeteksi kesulitan, serta memberikan intervensi adaptif sesuai

kebutuhan. Hal ini mendukung pendekatan BBDL yang menekankan pentingnya keterhubungan antara otak, emosi, dan teknologi. Misalnya, chatbot berbasis AI dapat membantu siswa dalam memecahkan soal matematika dengan memberikan penjelasan langkah demi langkah sesuai tingkat pemahaman. AI tools juga memungkinkan guru memperoleh informasi real-time mengenai perkembangan kognitif siswa, sehingga dapat merancang strategi pembelajaran yang lebih efektif (Kim et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Simulasi visual merupakan bentuk media pembelajaran yang menghadirkan pengalaman belajar mendekati kenyataan. Dengan integrasi deep learning, simulasi visual dapat menyesuaikan skenario pembelajaran berdasarkan interaksi siswa, sehingga menciptakan pengalaman belajar yang lebih personal dan relevan. Misalnya, dalam pembelajaran sains, simulasi laboratorium virtual yang dilengkapi algoritma deep learning dapat memberikan percobaan yang disesuaikan dengan tingkat keterampilan siswa. Hal ini memungkinkan siswa belajar melalui pengalaman eksploratif tanpa risiko, sekaligus memperkuat keterlibatan emosional dan kognitif. Integrasi ini sejalan dengan prinsip BBDL yang menekankan pentingnya pembelajaran berbasis pengalaman multisensori dan kontekstual (Funa et al., 2024; Chechan et al., 2025).

GeoGebra, AI tools, dan simulasi visual memiliki peran penting dalam memfasilitasi pembelajaran matematika yang lebih bermakna. GeoGebra berperan dalam menghadirkan

visualisasi konsep abstrak, AI tools mendukung pemahaman melalui personalisasi dan umpan balik adaptif, sedangkan simulasi visual menciptakan pengalaman belajar berbasis realitas virtual. Ketiganya, ketika dipadukan dengan deep learning, mampu menghadirkan ekosistem pembelajaran yang selaras dengan cara kerja otak. Penggunaan kombinasi ini memungkinkan siswa membangun koneksi konseptual yang lebih kuat, memperkuat memori jangka panjang, serta mengembangkan keterampilan berpikir kritis yang relevan dengan kebutuhan abad ke-21 (Rahmawati et al., 2022; Ambroise et al., 2025).

Peran penting lainnya dari integrasi ini adalah dalam meningkatkan motivasi dan keterlibatan siswa. GeoGebra yang dikombinasikan dengan AI tools dapat memberikan pengalaman belajar yang lebih interaktif, sementara simulasi visual menghadirkan tantangan adaptif yang membuat siswa merasa lebih tertantang namun tetap berada dalam zona perkembangan proksimalnya. Hal ini selaras dengan prinsip neurosains yang menekankan pentingnya keseimbangan antara tantangan dan rasa aman dalam pembelajaran. Dengan demikian, integrasi ketiga elemen ini berfungsi sebagai strategi untuk meningkatkan engagement dan motivasi intrinsik siswa, yang sangat penting bagi keberhasilan pembelajaran jangka panjang (Subba et al., 2025; Johar et al., 2025).

Selain mendukung aspek kognitif dan afektif, integrasi GeoGebra, AI tools, dan simulasi visual juga berperan dalam

mengembangkan keterampilan kolaboratif. Misalnya, simulasi berbasis virtual reality yang dilengkapi fitur AI memungkinkan siswa bekerja dalam kelompok untuk menyelesaikan proyek atau eksperimen digital. Sementara itu, GeoGebra dapat digunakan sebagai platform kolaboratif dalam pemecahan masalah matematis yang kompleks. Kolaborasi ini diperkuat dengan analitik berbasis deep learning yang dapat mengevaluasi kontribusi individu sekaligus kelompok, sehingga menciptakan proses belajar yang lebih adil dan transparan. Dengan demikian, integrasi ini bukan hanya mendukung pembelajaran individu, tetapi juga membangun kompetensi sosial yang penting dalam pendidikan abad ke-21 (Madale et al., 2025; Yildiz & Arpaci, 2024).

AI tools yang dipadukan dengan GeoGebra dan simulasi visual juga dapat dimanfaatkan untuk asesmen berbasis proses. Sistem berbasis deep learning dapat menganalisis bagaimana siswa menyelesaikan soal, langkah-langkah yang diambil, serta kesalahan konseptual yang muncul. Asesmen ini memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang perkembangan kognitif siswa, sehingga guru dapat merancang intervensi yang lebih tepat sasaran. Integrasi ini selaras dengan prinsip BBDL yang menekankan pentingnya pemantauan berkelanjutan terhadap perkembangan otak dalam proses belajar. Dengan kata lain, GeoGebra, AI tools, dan simulasi visual tidak hanya menjadi sarana pembelajaran, tetapi juga media asesmen

adaptif berbasis otak (Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025; Vieira et al., 2025).

Lebih jauh lagi, integrasi teknologi ini juga mendukung inklusivitas dalam pendidikan. GeoGebra dapat diadaptasi untuk siswa dengan kebutuhan khusus, misalnya menyediakan visualisasi yang lebih sederhana untuk siswa dengan keterbatasan kognitif. AI tools dapat membantu dengan fitur pengenalan suara atau teks otomatis, sedangkan simulasi visual dapat menghadirkan pengalaman belajar yang sesuai dengan gaya kognitif individu. Pendekatan ini memperkuat peran teknologi dalam menciptakan lingkungan belajar yang inklusif dan adil, di mana setiap siswa memiliki kesempatan yang sama untuk berkembang. Dengan demikian, integrasi ini tidak hanya meningkatkan kualitas pembelajaran, tetapi juga memperkuat nilai-nilai humanistik dalam pendidikan (Asare et al., 2025; Harden & Jones, 2022).

Secara keseluruhan, peran GeoGebra, AI tools, dan simulasi visual dalam konteks deep learning dan BBDL menunjukkan adanya sinergi yang kuat antara teknologi, neurosains, dan pedagogi. Ketiganya bukan hanya media pembelajaran, tetapi juga instrumen strategis untuk menciptakan pengalaman belajar yang lebih adaptif, kontekstual, dan inklusif. Integrasi ini menjawab tantangan pendidikan abad ke-21 dengan menghadirkan pembelajaran yang tidak hanya menekankan aspek kognitif, tetapi juga emosional, sosial, dan digital. Dengan demikian, GeoGebra, AI

tools, dan simulasi visual memiliki peran transformatif dalam memperkuat implementasi Brain-Based Deep Learning, serta mewujudkan pendidikan yang lebih inovatif dan berorientasi pada masa depan.

4.6 Tantangan dan Peluang Deep Learning di Bidang Pendidikan

Implementasi deep learning dalam pendidikan menghadirkan tantangan dan peluang yang saling beriringan. Dari sisi tantangan, salah satu isu utama adalah kebutuhan akan data dalam jumlah besar untuk melatih model deep learning. Data pendidikan sering kali tersebar di berbagai platform dengan format berbeda, sehingga sulit dikompilasi secara sistematis. Selain itu, data siswa juga sangat sensitif dan harus dijaga kerahasiaannya, sehingga penggunaan deep learning menuntut regulasi ketat terkait perlindungan privasi. Namun, di sisi lain, peluang besar muncul karena data pendidikan semakin melimpah melalui sistem manajemen pembelajaran daring, aplikasi digital, serta ujian berbasis komputer. Jika dikelola dengan tepat, data tersebut dapat diubah menjadi sumber wawasan berharga untuk meningkatkan kualitas pembelajaran (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Tantangan lain adalah keterbatasan sumber daya teknologi dan infrastruktur. Deep learning membutuhkan perangkat keras dengan kemampuan komputasi tinggi, seperti GPU dan server khusus, yang tidak selalu tersedia di semua

lembaga pendidikan, terutama di daerah dengan akses terbatas. Hal ini menimbulkan kesenjangan digital antara sekolah yang memiliki sumber daya cukup dengan yang tidak. Meskipun demikian, peluang dapat tercipta melalui pemanfaatan layanan cloud computing yang menyediakan akses teknologi canggih tanpa memerlukan investasi besar. Dengan model berbasis cloud, sekolah dapat memanfaatkan kecanggihan deep learning secara lebih merata, sehingga memperluas pemerataan akses pendidikan digital (Fang et al., 2025; Halkiopoulou et al., 2025).

Kendala berikutnya terletak pada kesiapan sumber daya manusia. Guru dan tenaga pendidik sering kali belum memiliki pengetahuan dan keterampilan yang memadai untuk mengoperasikan atau memanfaatkan deep learning secara optimal dalam pembelajaran. Hal ini dapat menghambat implementasi teknologi yang seharusnya memberikan manfaat besar. Namun, tantangan ini sekaligus membuka peluang untuk pengembangan program pelatihan dan peningkatan kapasitas guru. Dengan pelatihan yang tepat, guru tidak hanya menjadi pengguna pasif, tetapi juga aktor utama dalam merancang strategi pembelajaran berbasis deep learning yang selaras dengan prinsip Brain-Based Learning (Johar et al., 2025; Kim et al., 2025).

Aspek etika juga menjadi tantangan signifikan. Algoritma deep learning berpotensi menghasilkan bias apabila data pelatihan yang digunakan tidak representatif. Misalnya, jika

data hanya berasal dari kelompok tertentu, sistem dapat memberikan rekomendasi yang tidak adil bagi kelompok lain. Risiko ini menimbulkan dilema etis dalam penerapan teknologi pendidikan. Namun demikian, peluang muncul melalui penelitian lebih lanjut dalam pengembangan algoritma yang transparan dan adil, serta desain sistem yang memperhatikan keberagaman siswa. Dengan demikian, deep learning dapat dikembangkan sebagai teknologi yang inklusif dan humanistik, selaras dengan nilai-nilai pendidikan universal (Asare et al., 2025; Madale et al., 2025).

Dari sisi pedagogis, tantangan lain adalah potensi ketergantungan yang berlebihan pada teknologi. Jika tidak diimbangi dengan interaksi manusiawi, pembelajaran berbasis deep learning berisiko mengurangi aspek emosional dan sosial dalam pendidikan. Namun, peluang tetap terbuka apabila teknologi ini diposisikan sebagai alat bantu yang memperkuat peran guru, bukan menggantikannya. Dengan dukungan deep learning, guru dapat lebih fokus pada pengembangan aspek afektif dan keterampilan sosial siswa, sementara analisis kognitif dibantu oleh teknologi. Hal ini mendukung terciptanya ekosistem pendidikan yang lebih seimbang dan berpusat pada manusia (Halkiopoulos et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Tantangan lainnya adalah keterbatasan integrasi antara deep learning dengan kurikulum yang ada. Banyak kurikulum masih bersifat tradisional dan belum sepenuhnya menekankan pemanfaatan teknologi cerdas dalam pembelajaran. Kondisi ini

menimbulkan kesenjangan antara inovasi teknologi dan praktik pendidikan di lapangan. Namun, peluang besar dapat muncul dengan adanya reformasi kurikulum yang memasukkan aspek teknologi, neurosains, dan keterampilan abad ke-21. Dengan demikian, integrasi deep learning dapat menjadi motor penggerak transformasi pendidikan yang lebih relevan dengan kebutuhan zaman (OECD, 2023; Ulya et al., 2024).

Keterbatasan literasi digital siswa juga menjadi tantangan nyata. Tidak semua siswa memiliki keterampilan dasar yang cukup untuk memanfaatkan sistem berbasis deep learning. Hal ini dapat memperdalam kesenjangan antara siswa yang melek teknologi dengan yang tidak. Namun, peluang muncul dengan mengintegrasikan literasi digital dalam pembelajaran sejak dini. Dengan pembiasaan yang tepat, siswa dapat lebih siap menghadapi tantangan digital, sekaligus memanfaatkan teknologi deep learning untuk meningkatkan keterampilan kognitif, kreatif, dan problem solving mereka (Rahmawati et al., 2022; Subba et al., 2025).

Selain itu, tantangan yang sering muncul adalah tingginya biaya pengembangan sistem berbasis deep learning. Pembuatan aplikasi cerdas, pemeliharaan infrastruktur, serta pembaruan algoritma memerlukan biaya besar yang tidak semua institusi mampu menanggung. Namun, peluang dapat muncul melalui kolaborasi antara pemerintah, lembaga pendidikan, dan sektor swasta. Dukungan pendanaan dan kemitraan strategis dapat mempercepat adopsi teknologi ini

dalam pendidikan. Bahkan, dengan model kolaborasi ini, deep learning dapat dimanfaatkan tidak hanya di sekolah elit, tetapi juga di daerah dengan keterbatasan sumber daya (Amjad et al., 2023; OECD, 2024).

Secara keseluruhan, tantangan dan peluang deep learning dalam pendidikan menunjukkan bahwa teknologi ini bukanlah solusi instan, melainkan instrumen strategis yang membutuhkan kesiapan ekosistem pendidikan secara menyeluruh. Tantangan berupa infrastruktur, etika, kurikulum, dan literasi digital memang signifikan, tetapi peluang yang ditawarkan jauh lebih besar jika dikelola dengan baik. Dengan integrasi yang selaras dengan prinsip Brain-Based Deep Learning, deep learning dapat memperkuat efektivitas, inklusivitas, dan relevansi pendidikan abad ke-21. Oleh karena itu, keberhasilan penerapan deep learning tidak hanya bergantung pada teknologi itu sendiri, tetapi juga pada sinergi antara guru, siswa, kebijakan, dan lingkungan pendidikan yang mendukung.

BAB 5 MODEL BRAIN-BASED DEEP LEARNING

5.1 Struktur Model Pembelajaran

Struktur Model Brain-Based Deep Learning (BBDL) dirancang dengan mengintegrasikan prinsip neurosains, strategi pembelajaran berbasis otak, serta teknologi kecerdasan buatan yang dikembangkan melalui pendekatan deep learning. Struktur ini pada dasarnya berfungsi sebagai kerangka konseptual sekaligus operasional yang menjadi pedoman bagi guru dalam merancang pengalaman belajar yang selaras dengan mekanisme kerja otak. Dalam konteks ini, BBDL tidak hanya menyajikan urutan kegiatan belajar mengajar, tetapi juga memuat prinsip-prinsip ilmiah mengenai bagaimana otak memproses informasi, menyimpan memori, dan merespons stimulus pembelajaran. Struktur tersebut menekankan pada personalisasi, interaktivitas, dan adaptivitas, yang memungkinkan setiap peserta didik mendapatkan pengalaman belajar sesuai dengan karakteristik kognitif dan emosionalnya (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Struktur BBDL umumnya dibagi ke dalam tiga komponen utama, yaitu input, proses, dan output. Bagian input mencakup pengondisian lingkungan belajar yang kompatibel dengan cara kerja otak, termasuk penciptaan suasana emosional yang

positif, pengaturan lingkungan fisik, serta pemanfaatan teknologi interaktif seperti GeoGebra. Bagian proses mencakup tahap aktivasi otak melalui strategi pembelajaran yang berpusat pada siswa, di mana deep learning berperan untuk menganalisis perilaku belajar dan memberikan umpan balik adaptif. Bagian output mencerminkan hasil belajar yang tidak hanya berupa penguasaan kognitif, tetapi juga keterampilan berpikir kritis, pemecahan masalah, serta kemampuan kolaboratif yang relevan dengan kebutuhan abad ke-21 (Fang et al., 2025; Johar et al., 2025).

Secara lebih rinci, struktur BBDL mencakup tahap orientasi, eksplorasi, elaborasi, refleksi, dan evaluasi. Pada tahap orientasi, guru menciptakan kondisi awal yang menumbuhkan motivasi, rasa ingin tahu, serta keterlibatan emosional siswa. Deep learning dapat digunakan untuk mengenali tingkat motivasi siswa melalui analisis data interaksi, sehingga guru dapat memberikan stimulus awal yang lebih sesuai. Tahap eksplorasi melibatkan keterlibatan aktif siswa dalam mengamati, memanipulasi, dan menganalisis informasi melalui media interaktif. Pada tahap ini, GeoGebra atau simulasi visual digunakan untuk memperkuat pemahaman konseptual. Tahap elaborasi kemudian menekankan integrasi pengetahuan baru dengan pengetahuan sebelumnya, di mana algoritma deep learning memberikan rekomendasi materi tambahan sesuai kebutuhan individu (Nurhikmah et al., 2023; Chechan et al., 2025).

Tahap refleksi dalam struktur BBDL sangat penting karena pada tahap ini siswa diajak untuk mengevaluasi pemahaman dan pengalaman belajar yang telah dilalui. Refleksi dilakukan baik secara individual maupun kelompok, dengan dukungan AI tools yang menyediakan umpan balik berbasis analitik. Proses ini membantu siswa menyadari kekuatan dan kelemahan dalam proses belajar, sekaligus menumbuhkan metakognisi yang sangat penting dalam pembelajaran berbasis otak. Sementara itu, tahap evaluasi tidak hanya mengukur capaian akademik, tetapi juga melibatkan penilaian proses berpikir, keterampilan sosial, serta aspek emosional. Evaluasi berbasis deep learning memungkinkan analisis lebih komprehensif terhadap proses belajar siswa, sehingga hasil evaluasi lebih otentik dan sesuai dengan karakteristik individu (Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025; Vieira et al., 2025).

Struktur BBDL juga memperhatikan pentingnya pengelolaan lingkungan belajar yang kompatibel dengan kerja otak. Hal ini mencakup pengaturan pencahayaan, warna, suara, serta dinamika kelas yang mendukung fokus dan kenyamanan emosional siswa. Teknologi interaktif yang dipadukan dengan prinsip neurosains dapat menciptakan lingkungan yang meminimalkan stres dan meningkatkan keterlibatan kognitif. Misalnya, simulasi visual yang dikembangkan melalui deep learning dapat menghadirkan skenario belajar yang adaptif terhadap kondisi emosional siswa, sehingga menciptakan

pengalaman belajar yang lebih alami. Lingkungan belajar yang brain-compatible ini menjadi pondasi penting dari struktur model BBDL (Yildiz & Arpaci, 2024; Funa et al., 2024).

Struktur BBDL juga mengintegrasikan peran guru dan siswa secara seimbang. Guru berfungsi sebagai fasilitator, pengelola lingkungan, sekaligus pengguna teknologi analitik yang didukung oleh deep learning. Siswa berperan aktif sebagai subjek pembelajaran yang mengeksplorasi, menganalisis, serta merefleksikan pengalaman belajar. Interaksi antara guru, siswa, dan teknologi dalam struktur ini menciptakan sinergi yang memperkuat efektivitas pembelajaran. Dengan demikian, struktur BBDL tidak hanya berfokus pada penguasaan konten, tetapi juga membentuk pola pikir fleksibel, adaptif, dan kolaboratif sesuai dengan tuntutan abad ke-21 (Rahmawati et al., 2022; Subba et al., 2025).

Selain itu, struktur BBDL menekankan integrasi antara aspek kognitif, afektif, dan psikomotorik. Pembelajaran tidak hanya berorientasi pada penguasaan konsep abstrak, tetapi juga melibatkan pengalaman emosional yang menyenangkan dan aktivitas motorik yang mendukung. Misalnya, dalam pembelajaran matematika berbasis GeoGebra, siswa tidak hanya memahami konsep aljabar atau geometri, tetapi juga mengalami rasa ingin tahu, kepuasan intelektual, serta penguatan keterampilan berpikir kritis. Integrasi ketiga aspek ini sejalan dengan prinsip neurosains yang menyatakan bahwa

belajar adalah aktivitas yang melibatkan seluruh fungsi otak, bukan sekadar bagian tertentu saja (Halkiopoulous et al., 2025; Kim et al., 2025).

Struktur BBDL juga memperhatikan kesinambungan antara pembelajaran formal dan nonformal. Melalui pemanfaatan AI tools dan aplikasi berbasis deep learning, siswa dapat melanjutkan proses belajar di luar kelas dengan akses yang lebih fleksibel. Sistem pembelajaran berbasis teknologi ini memungkinkan siswa memperoleh materi tambahan, latihan soal adaptif, serta umpan balik real-time meskipun berada di luar ruang kelas. Hal ini mendukung prinsip pembelajaran sepanjang hayat (lifelong learning), di mana pengalaman belajar tidak berhenti pada batas ruang dan waktu tertentu, tetapi berlangsung secara terus-menerus sesuai dengan kebutuhan perkembangan otak (OECD, 2023; Ulya et al., 2024).

Dengan demikian, struktur model Brain-Based Deep Learning merupakan kerangka inovatif yang menghubungkan prinsip neurosains dengan kecanggihan teknologi deep learning dalam praktik pendidikan. Struktur ini bukan hanya menyajikan tahapan pembelajaran yang sistematis, tetapi juga menghadirkan pengalaman belajar yang lebih manusiawi, adaptif, dan inklusif. Dengan mengintegrasikan aspek kognitif, afektif, sosial, dan teknologi, BBDL menawarkan pendekatan komprehensif yang relevan dengan kebutuhan abad ke-21. Oleh karena itu, struktur BBDL dapat dipandang sebagai model

yang mampu menjembatani kesenjangan antara teori neurosains, inovasi teknologi, dan praktik pedagogi modern.

5.2 Sintaks (Tahapan) Model

a. Tahap Persiapan Otak (Preparation Stage)

Tahap persiapan otak merupakan langkah awal dalam model Brain-Based Deep Learning (BBDL) yang bertujuan menciptakan kondisi optimal bagi otak untuk menerima stimulus pembelajaran. Pada tahap ini, guru berperan penting dalam mengondisikan lingkungan belajar agar sesuai dengan prinsip neurosains, misalnya melalui pengaturan suasana kelas, pemberian motivasi, dan penggunaan strategi brain-compatible learning environment. Aktivitas seperti pemanasan kognitif, permainan sederhana, atau pemicu rasa ingin tahu digunakan untuk mengaktifkan area otak yang berhubungan dengan motivasi dan perhatian. Prinsip neurosains menegaskan bahwa otak lebih mudah menerima informasi ketika berada pada kondisi emosional yang positif dan aman. Deep learning berperan dengan menganalisis data awal siswa, seperti riwayat belajar dan preferensi kognitif, untuk kemudian memberikan rekomendasi aktivitas persiapan yang sesuai. Dengan demikian, tahap ini tidak hanya menciptakan kesiapan mental, tetapi juga menyesuaikan kondisi awal

pembelajaran dengan karakteristik unik setiap individu (Ambroise et al., 2025; Fang et al., 2025).

b. Tahap Aktivasi (Activation Stage)

Tahap aktivasi bertujuan menstimulasi otak siswa agar aktif dalam memproses informasi melalui pengalaman belajar multisensori. Pada tahap ini, guru menghadirkan materi pembelajaran menggunakan media interaktif seperti GeoGebra, simulasi visual, atau AI tools, yang semuanya dapat diperkaya dengan algoritma deep learning. Aktivitas dirancang untuk melibatkan sistem limbik yang berperan dalam emosi dan motivasi, sekaligus korteks prefrontal yang berhubungan dengan pemecahan masalah dan pengambilan keputusan. Proses aktivasi memungkinkan terbentuknya koneksi sinaptik yang kuat melalui pengulangan bermakna, eksplorasi, dan manipulasi konsep. Deep learning menganalisis interaksi siswa, misalnya dalam memanipulasi grafik atau menyelesaikan soal, untuk kemudian memberikan umpan balik adaptif secara real-time. Dengan cara ini, tahap aktivasi memastikan bahwa siswa tidak hanya menerima informasi secara pasif, tetapi benar-benar menginternalisasi konsep melalui keterlibatan kognitif, emosional, dan sosial (Nurhikmah et al., 2023; Johar et al., 2025).

c. Tahap Elaborasi (Elaboration Stage)

Tahap elaborasi merupakan inti dari proses pembelajaran dalam model BBDL, di mana siswa didorong

untuk menghubungkan informasi baru dengan pengetahuan sebelumnya. Pada tahap ini, pembelajaran diarahkan untuk memperdalam pemahaman konseptual, mengembangkan keterampilan berpikir kritis, serta memperkuat keterampilan pemecahan masalah. Aktivitas yang dilakukan dapat berupa diskusi kelompok, proyek berbasis masalah, atau eksperimen digital melalui simulasi visual. Teknologi deep learning berperan dengan memberikan rekomendasi materi tambahan yang sesuai dengan kebutuhan siswa, berdasarkan analisis data interaksi sebelumnya. Proses elaborasi ini mendukung teori konstruktivisme, yang menyatakan bahwa belajar merupakan proses aktif membangun makna melalui pengalaman. Selain itu, tahap ini sesuai dengan prinsip neurosains yang menekankan pentingnya integrasi berbagai area otak dalam memperkuat memori jangka panjang. Dengan demikian, elaborasi dalam BBDL tidak hanya memperluas wawasan, tetapi juga memperkuat keterampilan kognitif yang esensial bagi pendidikan abad ke-21 (Chechan et al., 2025; Kim et al., 2025).

d. Tahap Refleksi dan Evaluasi (Reflection & Evaluation Stage)

Tahap refleksi dan evaluasi menjadi penutup dari sintaks model BBDL, di mana siswa diajak untuk meninjau kembali pengalaman belajar yang telah dilalui, sekaligus mengevaluasi capaian yang diperoleh. Refleksi dilakukan

melalui kegiatan diskusi, penulisan jurnal belajar, atau presentasi hasil pembelajaran, yang semuanya didukung oleh AI tools untuk memberikan umpan balik berbasis analitik. Evaluasi dalam BBDL tidak terbatas pada penguasaan pengetahuan kognitif, tetapi juga mencakup keterampilan berpikir kritis, kolaboratif, serta aspek emosional. Teknologi deep learning memungkinkan evaluasi formatif yang lebih komprehensif dengan menganalisis proses berpikir siswa, bukan hanya hasil akhir. Refleksi membantu siswa mengembangkan kesadaran metakognitif, yaitu kemampuan untuk memahami proses berpikirnya sendiri, sedangkan evaluasi memberikan informasi berharga bagi guru untuk merancang strategi pembelajaran berikutnya. Dengan demikian, tahap refleksi dan evaluasi dalam BBDL tidak hanya berfungsi sebagai penutup, tetapi juga sebagai jembatan untuk pembelajaran berkelanjutan dan adaptif.

5.3 Peran Guru dan Peserta Didik

Dalam model Brain-Based Deep Learning (BBDL), peran guru tidak lagi sekadar sebagai penyampai informasi, melainkan sebagai fasilitator, desainer pembelajaran, sekaligus pengelola lingkungan belajar yang kompatibel dengan prinsip neurosains. Guru perlu memahami bagaimana otak bekerja ketika menerima, memproses, dan menyimpan informasi sehingga strategi pembelajaran yang digunakan dapat

menstimulasi aktivitas kognitif secara optimal. Konsep ini sejalan dengan pandangan bahwa pembelajaran efektif lahir dari lingkungan yang selaras dengan prinsip kerja otak, termasuk keterlibatan emosi, motivasi, dan memori. Guru dituntut untuk merancang aktivitas yang mampu membangun keterhubungan bermakna antara pengetahuan baru dan pengalaman siswa, sekaligus memanfaatkan teknologi deep learning untuk mendukung personalisasi pembelajaran (Sudarwo & Adiansha, 2022; Ambroise et al., 2025).

Guru dalam konteks BBDL juga berperan sebagai mediator yang membantu siswa menghubungkan konsep abstrak dengan pengalaman nyata melalui strategi berbasis masalah, eksplorasi, dan simulasi visual. Teknologi seperti GeoGebra, alat kecerdasan buatan (AI tools), serta algoritma deep learning memungkinkan guru mengembangkan aktivitas pembelajaran yang adaptif terhadap kebutuhan siswa. Guru dapat menggunakan analisis data untuk memahami pola belajar, mendeteksi kesulitan kognitif, serta memberikan intervensi tepat waktu. Dengan demikian, guru bukan sekadar instruktur, melainkan seorang arsitek pembelajaran yang mengintegrasikan prinsip neurosains dengan kecanggihan teknologi untuk menciptakan pengalaman belajar yang menyeluruh dan mendalam (Nurhikmah et al., 2023; Yildiz & Arpaci, 2024).

Selain sebagai fasilitator, guru juga berfungsi sebagai motivator yang membangkitkan semangat belajar siswa. Dalam

BBDL, motivasi merupakan faktor kunci karena aktivitas otak sangat dipengaruhi oleh kondisi emosional. Guru harus mampu menciptakan suasana yang positif, aman, dan kondusif agar sistem limbik siswa mendukung aktivitas kognitif yang lebih tinggi. Misalnya, guru dapat memulai pembelajaran dengan pertanyaan pemicu yang relevan atau menghadirkan konteks kehidupan nyata yang dekat dengan siswa. Melalui cara ini, guru membangun jembatan antara aspek emosional dengan aktivitas berpikir kritis yang menjadi tujuan utama pembelajaran (Kim et al., 2025; Halmatuzzuhrotulaini & Adiansha, 2024).

Sementara itu, peserta didik dalam model BBDL memegang peran sentral sebagai subjek aktif dalam proses pembelajaran. Peserta didik tidak hanya berfungsi sebagai penerima informasi, melainkan juga penjelajah pengetahuan yang membangun pemahaman melalui pengalaman, kolaborasi, dan refleksi. Prinsip konstruktivisme menekankan bahwa pengetahuan harus dikonstruksi secara aktif, sehingga peserta didik didorong untuk menghubungkan informasi baru dengan struktur kognitif yang sudah ada. Teknologi deep learning mendukung proses ini dengan menyediakan materi adaptif, simulasi interaktif, serta umpan balik personal. Peran aktif peserta didik ini memastikan terjadinya pembelajaran bermakna yang lebih tahan lama dalam memori jangka panjang (Asare et al., 2025; Chechan et al., 2025).

Peserta didik juga berperan sebagai pengembang keterampilan berpikir tingkat tinggi, termasuk berpikir kritis,

kreatif, dan sistematis. Model BBDL menekankan pentingnya aktivitas yang mendorong eksplorasi, pengujian hipotesis, dan pemecahan masalah kompleks. Dalam konteks ini, peserta didik dihadapkan pada tantangan intelektual yang dirancang untuk menstimulasi prefrontal cortex, area otak yang terkait dengan pengambilan keputusan dan pengendalian diri. Melalui integrasi deep learning, siswa dapat mengeksplorasi berbagai skenario pembelajaran, mendapatkan prediksi hasil, serta mengakses solusi alternatif. Hal ini memberikan kesempatan luas bagi peserta didik untuk mengembangkan kecakapan yang relevan dengan tantangan abad ke-21 (Putri et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Selain itu, peserta didik memiliki tanggung jawab untuk mengelola emosi, motivasi, dan strategi belajar secara mandiri. Dalam model BBDL, refleksi metakognitif menjadi bagian penting dari pembelajaran karena membantu siswa menyadari proses berpikirnya sendiri. Peserta didik diharapkan mampu mengidentifikasi strategi belajar yang efektif, mengevaluasi kesalahan, serta menyesuaikan pendekatan pembelajaran. Dukungan teknologi deep learning memungkinkan siswa mendapatkan umpan balik personal yang memperkuat keterampilan metakognitif ini. Dengan demikian, siswa tidak hanya belajar tentang materi akademik, tetapi juga belajar bagaimana cara belajar, yang merupakan esensi dari pendidikan sepanjang hayat (Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025; Subba et al., 2025).

Kolaborasi antara guru dan peserta didik juga menjadi elemen penting dalam BBDL. Guru berperan sebagai fasilitator yang membimbing, sementara peserta didik aktif mengeksplorasi, berdiskusi, dan memecahkan masalah. Interaksi ini membentuk ekosistem pembelajaran yang dinamis, di mana teknologi berfungsi sebagai penghubung antara keduanya. Misalnya, platform berbasis deep learning dapat menyediakan data perkembangan siswa yang membantu guru memberikan arahan lebih tepat, sementara siswa memperoleh pengalaman belajar yang lebih personal dan sesuai dengan kebutuhan mereka. Hubungan sinergis ini menciptakan pembelajaran yang bersifat dua arah, partisipatif, dan berbasis pada pemahaman bersama (Fang et al., 2025; Johar et al., 2025).

Dalam praktiknya, peran guru dan peserta didik dalam BBDL dapat dianalogikan sebagai mitra belajar yang saling melengkapi. Guru memberikan kerangka, strategi, dan lingkungan belajar, sedangkan siswa mengisi kerangka tersebut dengan pengalaman, refleksi, dan eksplorasi mandiri. Teknologi deep learning memperkuat hubungan ini dengan menyediakan jembatan digital yang memungkinkan terjadinya pertukaran informasi secara cepat, akurat, dan adaptif. Hal ini menegaskan bahwa pembelajaran yang efektif di abad ke-21 memerlukan kolaborasi erat antara guru, siswa, dan teknologi, dengan otak sebagai pusat utama proses belajar (Yildiz & Arpaci, 2024; Kim et al., 2025).

Secara keseluruhan, peran guru dan peserta didik dalam model BBDL menegaskan paradigma baru pendidikan yang bersifat kolaboratif, personal, dan berbasis neurosains. Guru tidak hanya menjadi pemberi informasi, melainkan fasilitator, motivator, dan desainer pembelajaran yang mengintegrasikan teknologi mutakhir. Peserta didik bertindak sebagai aktor utama yang aktif membangun pengetahuan, mengembangkan keterampilan berpikir kritis, serta mengelola strategi belajar secara mandiri. Sinergi antara keduanya, yang diperkuat oleh algoritma deep learning dan prinsip brain-based learning, menjadikan pembelajaran lebih relevan, bermakna, dan berorientasi pada pengembangan kompetensi abad ke-21.

5.4 Perangkat Pendukung Pembelajaran

Perangkat pendukung pembelajaran dalam model Brain-Based Deep Learning (BBDL) merupakan komponen esensial yang memastikan efektivitas penerapan konsep neurosains dan teknologi deep learning di dalam kelas. Perangkat ini tidak hanya mencakup sarana fisik seperti komputer, proyektor, atau perangkat jaringan, tetapi juga melibatkan aplikasi, perangkat lunak, serta strategi instruksional yang mendukung proses pembelajaran. Prinsip utama BBDL menekankan bahwa pembelajaran yang optimal harus selaras dengan cara kerja otak dalam memproses informasi. Oleh karena itu, perangkat pendukung perlu dirancang agar dapat menstimulasi keterlibatan multisensori, memperkuat atensi, dan memfasilitasi

refleksi kognitif siswa. Dengan memanfaatkan perangkat yang sesuai, guru dapat menciptakan lingkungan belajar yang adaptif, inovatif, dan selaras dengan kebutuhan abad ke-21 (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Salah satu perangkat utama dalam BBDL adalah teknologi berbasis kecerdasan buatan, khususnya algoritma deep learning yang dapat digunakan untuk menganalisis pola belajar siswa. Melalui sistem analitik ini, guru dapat memetakan kebutuhan belajar setiap individu, memprediksi potensi kesulitan, serta merancang intervensi yang tepat waktu. Sebagai contoh, learning analytics yang berbasis deep learning mampu memberikan umpan balik adaptif sesuai dengan tingkat pemahaman siswa. Dengan demikian, perangkat ini bukan hanya membantu guru dalam mengelola pembelajaran, tetapi juga memberdayakan siswa untuk lebih aktif dalam mengontrol proses belajar mereka sendiri. Kehadiran perangkat berbasis AI ini memperkuat peran personalisasi dalam pembelajaran yang merupakan karakteristik utama dari BBDL (Fang et al., 2025; Halkiopoulous et al., 2025).

Selain perangkat berbasis AI, media pembelajaran interaktif seperti GeoGebra memiliki peranan penting dalam mendukung model BBDL. GeoGebra memungkinkan siswa mengeksplorasi konsep matematika secara visual, interaktif, dan dinamis, sehingga memperkuat keterlibatan kognitif sekaligus emosional. Penggunaan perangkat ini sejalan dengan prinsip neurosains yang menyatakan bahwa otak lebih mudah

memahami informasi jika disajikan dalam bentuk visual dan kontekstual. Lebih jauh, integrasi GeoGebra dengan sistem deep learning dapat memperkaya pengalaman belajar, karena aplikasi ini mampu memberikan simulasi yang lebih adaptif sesuai dengan tingkat pemahaman siswa. Hal ini menjadikan GeoGebra tidak hanya sebagai alat bantu, tetapi sebagai perangkat kunci dalam penerapan BBDL (Nurhikmah et al., 2023; Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025).

Perangkat pendukung lain yang sangat relevan adalah sistem manajemen pembelajaran (Learning Management System/LMS) berbasis deep learning. LMS ini berfungsi sebagai wadah untuk mengelola materi, memfasilitasi interaksi, serta memantau perkembangan siswa secara sistematis. Dengan adanya integrasi algoritma cerdas, LMS dapat menyesuaikan jalur pembelajaran sesuai dengan kebutuhan individu, sekaligus menyediakan laporan analitik bagi guru untuk mengambil keputusan instruksional. Hal ini mendukung prinsip brain-based learning yang menekankan pentingnya keterhubungan antara pengalaman belajar dengan kebutuhan personal siswa. Oleh karena itu, LMS berbasis AI dapat menjadi jantung ekosistem digital dalam BBDL (Johar et al., 2025; Subba et al., 2025).

Lingkungan belajar yang sesuai dengan prinsip neurosains juga memerlukan perangkat pendukung berupa desain ruang kelas yang brain-compatible. Pencahayaan, tata warna, sirkulasi udara, serta pengaturan tempat duduk

berperan besar dalam memengaruhi konsentrasi dan motivasi siswa. Penelitian neurosains menunjukkan bahwa lingkungan fisik yang nyaman dapat menurunkan stres, meningkatkan atensi, serta memperkuat keterlibatan emosional dalam pembelajaran. Dengan demikian, perangkat pendukung tidak hanya berupa teknologi digital, tetapi juga mencakup sarana fisik yang dirancang untuk mendukung kerja otak secara optimal. Integrasi antara teknologi digital dan lingkungan fisik yang ramah otak merupakan ciri khas dari perangkat pendukung BBDL (Yildiz & Arpaci, 2024; Funa et al., 2024).

Selain aspek fisik dan digital, perangkat instruksional seperti modul pembelajaran adaptif juga sangat penting. Modul ini dirancang dengan memperhatikan prinsip brain-based learning, di mana informasi disajikan secara bertahap, bermakna, dan terhubung dengan pengalaman nyata. Modul berbasis AI dapat diperkaya dengan algoritma deep learning yang memungkinkan penyajian konten adaptif sesuai dengan profil belajar siswa. Misalnya, siswa yang kesulitan memahami konsep aljabar dapat diberikan latihan tambahan yang disesuaikan dengan pola kesalahan yang terdeteksi. Modul adaptif ini memastikan bahwa setiap siswa mendapatkan dukungan sesuai dengan kapasitas kognitifnya, sehingga pengalaman belajar menjadi lebih efektif dan personal (Chechan et al., 2025; Kim et al., 2025).

Perangkat pendukung dalam BBDL juga mencakup sistem evaluasi berbasis deep learning. Evaluasi tradisional

yang hanya berfokus pada hasil akhir sering kali tidak mampu menangkap dinamika proses belajar siswa. Dengan perangkat berbasis AI, evaluasi dapat dilakukan secara formatif, berkelanjutan, dan komprehensif. Sistem ini mampu menganalisis interaksi siswa, mengidentifikasi kesulitan konseptual, serta memberikan umpan balik otomatis. Evaluasi berbasis deep learning juga mendukung penilaian autentik, di mana keterampilan berpikir kritis, kolaborasi, dan kreativitas dapat diukur secara lebih akurat. Perangkat ini memperkuat aspek refleksi dalam model BBDL, sehingga hasil evaluasi tidak hanya bersifat sumatif, tetapi juga instruktif bagi pengembangan strategi pembelajaran (Asare et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Kehadiran perangkat pendukung pembelajaran berbasis deep learning juga membuka peluang integrasi dengan teknologi lain, seperti realitas virtual (Virtual Reality/VR) dan realitas tertambah (Augmented Reality/AR). Perangkat ini memungkinkan siswa terlibat dalam simulasi pengalaman nyata yang sulit diwujudkan di kelas konvensional, misalnya eksperimen ilmiah berisiko tinggi atau visualisasi konsep abstrak dalam matematika. Penggunaan VR dan AR sejalan dengan prinsip brain-based learning karena melibatkan sistem multisensori yang memperkuat keterhubungan antara informasi baru dengan pengalaman konkret. Integrasi VR/AR dengan algoritma deep learning dapat meningkatkan kualitas pengalaman belajar yang lebih imersif, adaptif, dan relevan

dengan kebutuhan zaman (Halkiopoulos et al., 2025; Amjad et al., 2023).

Secara keseluruhan, perangkat pendukung pembelajaran dalam model Brain-Based Deep Learning mencakup kombinasi antara teknologi digital, desain lingkungan fisik, modul adaptif, serta sistem evaluasi yang cerdas. Kehadiran perangkat ini memperkuat integrasi antara prinsip neurosains dan kecanggihan deep learning, sehingga pembelajaran menjadi lebih personal, interaktif, dan komprehensif. Dengan memanfaatkan perangkat pendukung yang tepat, guru dapat menciptakan ekosistem belajar yang selaras dengan cara kerja otak, sementara siswa memperoleh pengalaman belajar yang bermakna, menyenangkan, dan berkelanjutan. Oleh karena itu, perangkat pendukung bukan hanya elemen tambahan, melainkan fondasi penting bagi keberhasilan implementasi model BBDL dalam pendidikan modern.

5.5 Skenario Implementasi di Kelas

Skenario implementasi model Brain-Based Deep Learning (BBDL) di kelas dirancang untuk memastikan keterpaduan antara prinsip neurosains, teknologi deep learning, serta pendekatan pedagogis yang humanis. Implementasi ini dimulai dengan menciptakan lingkungan belajar yang ramah otak (brain-compatible environment), yang melibatkan pengaturan ruang kelas, pencahayaan, serta

penggunaan media digital interaktif. Guru memastikan bahwa suasana emosional siswa berada dalam kondisi positif, karena aspek emosi sangat berperan dalam mengaktifkan sistem limbik yang mendukung aktivitas kognitif. Pada tahap awal, guru dapat menggunakan permainan ringan, pemicu diskusi, atau pertanyaan kontekstual sebagai strategi membuka jalur perhatian siswa. Strategi ini bertujuan untuk mengondisikan otak agar siap menerima informasi baru secara optimal (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Setelah kondisi awal tercipta, skenario implementasi masuk pada tahap aktivasi otak, di mana guru menggunakan media interaktif seperti GeoGebra untuk memperkenalkan konsep matematika secara visual dan dinamis. Misalnya, pada pembelajaran geometri, siswa diajak memanipulasi bentuk-bentuk bangun ruang sehingga mereka dapat memahami sifat-sifat geometris melalui eksplorasi langsung. Teknologi deep learning berperan dengan menganalisis interaksi siswa selama eksplorasi tersebut, sehingga sistem dapat memberikan rekomendasi materi tambahan bagi siswa yang mengalami kesulitan. Proses ini memastikan bahwa pembelajaran berlangsung adaptif, personal, dan sesuai dengan karakteristik kognitif masing-masing individu (Nurhikmah et al., 2023; Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025).

Tahap berikutnya adalah elaborasi, yang dalam skenario kelas diwujudkan melalui aktivitas kolaboratif seperti diskusi kelompok, proyek berbasis masalah, atau eksperimen digital.

Misalnya, siswa diminta menganalisis data hasil simulasi menggunakan algoritma deep learning untuk menemukan pola tertentu dalam konteks matematika atau sains. Proses ini memperkuat keterampilan berpikir kritis dan analitis siswa, karena mereka harus menghubungkan informasi baru dengan pengetahuan yang telah dimiliki. Guru berperan sebagai fasilitator yang memandu arah diskusi, sementara teknologi menyediakan dukungan berupa visualisasi data yang lebih jelas. Integrasi antara interaksi sosial, aktivitas kognitif, dan dukungan teknologi ini membuat tahap elaborasi lebih bermakna (Chechan et al., 2025; Kim et al., 2025).

Dalam skenario implementasi kelas berbasis BBDL, refleksi menjadi tahap penting yang tidak boleh diabaikan. Guru dapat meminta siswa menuliskan jurnal pembelajaran, melakukan presentasi kelompok, atau mengisi kuesioner digital mengenai pengalaman belajar yang telah dilalui. Teknologi deep learning mendukung proses refleksi dengan menyediakan analisis berbasis data mengenai capaian siswa, misalnya tingkat partisipasi, respons terhadap pertanyaan, serta perkembangan pemahaman konsep. Informasi ini membantu siswa menyadari kekuatan dan kelemahan dalam proses belajar mereka, sekaligus memberikan wawasan bagi guru untuk merancang strategi pembelajaran selanjutnya. Dengan demikian, refleksi bukan hanya sarana evaluasi, melainkan juga media pengembangan kesadaran metakognitif (Johar et al., 2025; Subba et al., 2025).

Evaluasi dalam skenario BBDL tidak terbatas pada ujian tertulis, tetapi mencakup penilaian autentik yang melibatkan aspek kognitif, afektif, dan psikomotorik. Guru dapat memanfaatkan sistem evaluasi berbasis AI yang menganalisis pola penyelesaian soal, partisipasi diskusi, hingga kreativitas siswa dalam menyusun solusi. Evaluasi ini dilakukan secara formatif dan berkelanjutan sehingga guru mendapatkan gambaran menyeluruh tentang perkembangan siswa. Selain itu, sistem deep learning memungkinkan analisis prediktif untuk mengidentifikasi potensi kesulitan di masa depan. Hal ini membuat evaluasi menjadi lebih komprehensif, berorientasi pada proses, dan sesuai dengan prinsip neurosains yang menekankan pentingnya keterlibatan menyeluruh dalam belajar (Asare et al., 2025; Fang et al., 2025).

Skenario implementasi BBDL juga menekankan pentingnya integrasi antara pembelajaran formal di kelas dengan pengalaman belajar nonformal di luar kelas. Guru dapat memanfaatkan Learning Management System (LMS) berbasis deep learning untuk memberikan akses materi tambahan, latihan adaptif, dan forum diskusi daring. Dengan demikian, siswa dapat melanjutkan proses belajar secara mandiri dan berkesinambungan. Teknologi ini juga memudahkan guru dalam memantau perkembangan siswa secara real-time, sehingga intervensi dapat diberikan lebih cepat dan tepat. Integrasi ini mendukung prinsip lifelong learning yang sejalan dengan tuntutan abad ke-21, di mana

belajar tidak berhenti di kelas, melainkan berlangsung sepanjang hayat (Yildiz & Arpaci, 2024; Amjad et al., 2023).

Dalam implementasi di kelas, guru juga harus memperhatikan aspek lingkungan fisik yang ramah otak. Misalnya, pengaturan pencahayaan, warna, dan tata ruang dapat disesuaikan untuk mendukung konsentrasi serta mengurangi distraksi. Penelitian neurosains menunjukkan bahwa lingkungan fisik yang nyaman memengaruhi aktivitas otak dalam menyerap informasi. Dengan demikian, skenario implementasi BBDL tidak hanya berfokus pada teknologi dan strategi instruksional, tetapi juga pada desain ruang belajar yang mendukung kesehatan mental dan emosional siswa. Hal ini menjadikan pembelajaran lebih menyeluruh karena mencakup aspek biologis, psikologis, dan pedagogis (Funa et al., 2024; Vieira et al., 2025).

Kolaborasi guru dan siswa juga menjadi ciri khas dalam skenario implementasi BBDL. Guru merancang kerangka pembelajaran yang sistematis, sementara siswa aktif mengeksplorasi pengetahuan melalui aktivitas berbasis proyek atau problem solving. Teknologi deep learning bertindak sebagai mediator yang menghubungkan keduanya dengan menyediakan data analitik dan rekomendasi adaptif. Dengan skenario seperti ini, proses pembelajaran tidak lagi bersifat satu arah, melainkan dialogis, partisipatif, dan berorientasi pada penciptaan makna bersama. Kolaborasi ini memperkuat aspek sosial dalam pembelajaran yang juga diakui neurosains sebagai

salah satu faktor penting dalam mengoptimalkan fungsi otak (Halkiopoulos et al., 2025; Kim et al., 2025).

Secara keseluruhan, skenario implementasi BBDL di kelas menampilkan pendekatan holistik yang menggabungkan prinsip neurosains, strategi instruksional berbasis otak, serta dukungan teknologi deep learning. Skenario ini dimulai dari persiapan otak, aktivasi, elaborasi, refleksi, hingga evaluasi yang semuanya dirancang untuk membangun pengalaman belajar yang mendalam dan berkesinambungan. Dengan adanya integrasi perangkat digital, lingkungan fisik yang ramah otak, serta kolaborasi antara guru dan siswa, BBDL menawarkan model pembelajaran yang relevan dengan tuntutan pendidikan modern. Oleh karena itu, implementasi BBDL dapat dipandang sebagai inovasi pedagogis yang menjembatani kesenjangan antara teori neurosains dan praktik pembelajaran abad ke-21.

5.6 Keunggulan dan Keterbatasan Model

Model Brain-Based Deep Learning (BBDL) memiliki keunggulan utama pada kemampuannya mengintegrasikan prinsip neurosains dengan teknologi kecerdasan buatan untuk menciptakan pembelajaran yang lebih personal, adaptif, dan relevan dengan kebutuhan abad ke-21. Dengan memahami cara otak memproses informasi, guru dapat merancang pengalaman belajar yang sesuai dengan kondisi biologis peserta didik, sementara teknologi deep learning menyediakan dukungan analitik untuk menyesuaikan strategi pembelajaran.

Keunggulan ini menjadikan BBDL sebagai model yang tidak hanya menekankan aspek kognitif, tetapi juga memperhatikan dimensi emosional, motivasional, dan sosial yang berpengaruh besar terhadap keberhasilan belajar (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Keunggulan lain dari model ini adalah fleksibilitasnya dalam mengakomodasi berbagai gaya belajar. Neurosains menegaskan bahwa setiap otak memiliki keunikan dalam menyerap dan mengolah informasi. Dengan bantuan algoritma deep learning, BBDL mampu menyesuaikan materi, metode, dan media pembelajaran sesuai dengan profil belajar individu. Hal ini membuat siswa dengan gaya belajar visual, auditori, maupun kinestetik tetap dapat memperoleh pengalaman belajar yang optimal. Personalisasi semacam ini sulit dicapai dalam model pembelajaran tradisional, sehingga BBDL memberikan solusi inovatif dalam meningkatkan kualitas pendidikan (Nurhikmah et al., 2023; Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025).

Selain fleksibilitas, keunggulan lain BBDL adalah kemampuannya meningkatkan motivasi dan keterlibatan siswa. Penggunaan media interaktif seperti GeoGebra, simulasi visual, atau platform berbasis AI menjadikan pembelajaran lebih menarik, dinamis, dan relevan dengan dunia digital yang akrab bagi siswa. Ketika motivasi meningkat, otak lebih mudah memproses informasi dan menyimpannya dalam memori jangka panjang. Dengan demikian, integrasi teknologi dalam

BBDL bukan hanya alat bantu, melainkan strategi kognitif yang memperkuat daya serap dan retensi informasi (Kim et al., 2025; Yildiz & Arpaci, 2024).

Keunggulan berikutnya adalah kemampuan BBDL dalam mendorong pengembangan keterampilan abad ke-21, seperti berpikir kritis, pemecahan masalah, kreativitas, dan kolaborasi. Melalui pendekatan berbasis masalah dan aktivitas eksploratif, siswa dilatih untuk menghubungkan teori dengan praktik serta mengembangkan kemampuan analitis. Teknologi deep learning memperkuat aspek ini dengan menyediakan data real-time mengenai progres siswa, yang dapat digunakan guru untuk memberikan tantangan yang lebih relevan. Hal ini menjadikan BBDL sebagai model yang tidak hanya berorientasi pada transfer pengetahuan, tetapi juga pada pengembangan kompetensi (Chechan et al., 2025; Asare et al., 2025).

Namun, meskipun memiliki banyak keunggulan, BBDL juga menghadapi sejumlah keterbatasan yang perlu diperhatikan. Salah satu keterbatasan utama adalah tingginya kebutuhan infrastruktur teknologi, seperti perangkat keras, jaringan internet, serta aplikasi berbasis AI yang memadai. Tanpa dukungan sarana dan prasarana yang memadai, penerapan BBDL akan sulit dilakukan secara optimal. Kesenjangan digital antara sekolah dengan fasilitas lengkap dan sekolah dengan fasilitas terbatas dapat menimbulkan ketidakmerataan akses terhadap model ini (Funa et al., 2024; Amjad et al., 2023).

Selain kendala infrastruktur, keterbatasan lain terdapat pada kesiapan guru dalam mengimplementasikan BBDL. Model ini menuntut pemahaman yang mendalam mengenai prinsip neurosains sekaligus kemampuan teknis dalam mengoperasikan perangkat digital dan algoritma deep learning. Tidak semua guru memiliki latar belakang atau pelatihan yang memadai untuk memenuhi tuntutan tersebut. Oleh karena itu, diperlukan program pelatihan dan pendampingan yang berkelanjutan agar guru mampu mengintegrasikan BBDL ke dalam praktik pembelajaran dengan baik (Johar et al., 2025; Fang et al., 2025).

Keterbatasan lain muncul dari aspek etika dan privasi data. Penggunaan deep learning dalam pendidikan sering kali melibatkan pengumpulan, analisis, dan penyimpanan data siswa dalam jumlah besar. Hal ini menimbulkan kekhawatiran mengenai perlindungan data pribadi dan potensi penyalahgunaan informasi. Oleh karena itu, penerapan BBDL harus disertai dengan kebijakan yang jelas mengenai etika penggunaan data serta langkah-langkah keamanan yang memadai. Tanpa pengaturan yang tepat, risiko terhadap kerahasiaan data dapat menjadi hambatan serius bagi penerapan model ini (Halkiopoulous et al., 2025; Subba et al., 2025).

Selain aspek teknis dan etika, keterbatasan juga terlihat pada faktor psikologis dan adaptasi siswa. Tidak semua siswa mampu dengan cepat beradaptasi dengan pembelajaran

berbasis teknologi yang intensif. Beberapa siswa mungkin mengalami kesulitan dalam menggunakan aplikasi digital, sementara siswa lain bisa merasa terbebani dengan evaluasi berbasis data yang terus menerus. Hal ini menuntut guru untuk merancang strategi transisi yang halus serta memberikan dukungan emosional agar siswa tetap merasa nyaman dan termotivasi dalam mengikuti pembelajaran berbasis BBDL (Kim et al., 2025; Ambroise et al., 2025).

Secara keseluruhan, keunggulan dan keterbatasan model BBDL mencerminkan realitas bahwa setiap inovasi pendidikan selalu memiliki potensi sekaligus tantangan. Keunggulannya terletak pada integrasi neurosains dan deep learning yang memungkinkan personalisasi, peningkatan motivasi, serta pengembangan keterampilan abad ke-21. Sementara itu, keterbatasannya mencakup infrastruktur, kesiapan guru, isu etika, serta adaptasi siswa. Untuk mengoptimalkan penerapan BBDL, diperlukan strategi yang holistik, termasuk investasi teknologi, pelatihan guru, kebijakan etis yang kuat, serta dukungan psikologis bagi siswa. Dengan cara ini, BBDL dapat menjadi model pembelajaran yang tidak hanya inovatif, tetapi juga berkelanjutan dalam konteks pendidikan modern.

BAB 6 IMPLEMENTASI MODEL DALAM PEMBELAJARAN MATEMATIKA

6.1 Relevansi Brain-Based Deep Learning dalam Matematika

Pembelajaran matematika merupakan salah satu bidang yang memiliki tantangan besar dalam dunia pendidikan karena bersifat abstrak, simbolik, dan membutuhkan kemampuan berpikir tingkat tinggi. Model Brain-Based Deep Learning (BBDL) hadir sebagai pendekatan yang relevan dalam menjembatani kesenjangan antara teori dan praktik pembelajaran matematika. Dengan memanfaatkan prinsip neurosains, model ini memungkinkan siswa untuk belajar matematika sesuai dengan cara kerja otak, yang menekankan keterhubungan, visualisasi, dan stimulasi multisensori. Penerapan deep learning melalui media digital juga membantu mempermudah proses representasi konsep yang kompleks menjadi lebih mudah dipahami. Relevansi ini menunjukkan bahwa BBDL dapat menjadi solusi untuk meningkatkan kualitas pembelajaran matematika di era digital (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Matematika menuntut keterampilan pemecahan masalah, penalaran logis, dan kemampuan analitis yang tinggi. Prinsip BBDL yang mengaitkan aktivitas otak dengan penggunaan teknologi deep learning memberikan peluang untuk memperkuat keterampilan tersebut. Melalui pemanfaatan media interaktif seperti GeoGebra, siswa dapat memvisualisasikan fungsi, grafik, dan bangun geometri dengan lebih jelas. Aktivitas ini melibatkan berbagai area otak, termasuk korteks visual dan prefrontal, yang berperan penting dalam pengolahan informasi abstrak. Dengan demikian, BBDL berfungsi sebagai jembatan yang memperkaya pengalaman belajar matematika melalui keterlibatan kognitif, emosional, dan sosial secara seimbang (Nurhikmah et al., 2023; Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025).

Relevansi BBDL dalam matematika juga tampak pada kemampuannya mendukung personalisasi pembelajaran. Setiap siswa memiliki gaya belajar dan tingkat pemahaman yang berbeda. Dengan bantuan algoritma deep learning, guru dapat menganalisis pola belajar siswa secara lebih akurat, kemudian menyesuaikan materi, latihan, dan strategi pengajaran sesuai dengan kebutuhan individu. Misalnya, siswa yang kesulitan memahami konsep integral dapat diberikan visualisasi tambahan atau latihan bertahap yang sesuai dengan tingkat penguasaan. Pendekatan ini menegaskan bahwa BBDL bukan hanya model pembelajaran yang bersifat umum,

melainkan adaptif terhadap kebutuhan kognitif setiap siswa (Asare et al., 2025; Chechan et al., 2025).

Selain aspek personalisasi, BBDL relevan dalam pengembangan keterampilan berpikir kritis dan kreatif dalam matematika. Aktivitas berbasis otak seperti eksplorasi, diskusi kelompok, serta simulasi digital mendorong siswa untuk menemukan pola, membuat generalisasi, dan menguji hipotesis. Deep learning mendukung proses ini dengan menyediakan data dan prediksi yang dapat diuji kebenarannya. Dalam konteks ini, matematika tidak lagi dipandang hanya sebagai kumpulan rumus, melainkan sebagai sarana untuk mengasah kemampuan intelektual dan pemecahan masalah kompleks. Hal ini sesuai dengan tuntutan pendidikan abad ke-21 yang menekankan pentingnya literasi numerasi sebagai dasar pengambilan keputusan (Kim et al., 2025; Fang et al., 2025).

Relevansi lain dari BBDL adalah kemampuannya mengintegrasikan pembelajaran matematika dengan pengalaman dunia nyata. Melalui pendekatan berbasis masalah, siswa diajak menghubungkan konsep matematika dengan fenomena sehari-hari, seperti analisis data ekonomi, simulasi fisika, atau pemodelan biologis. Integrasi ini membuat matematika menjadi lebih kontekstual, bermakna, dan mudah dipahami. Teknologi deep learning memperkuat pendekatan ini dengan menyediakan analisis data berskala besar yang dapat digunakan sebagai bahan eksplorasi dalam kelas.

Dengan demikian, matematika tidak lagi bersifat abstrak, melainkan relevan dengan kehidupan nyata (Johar et al., 2025; Subba et al., 2025).

Aspek motivasi juga menjadi faktor penting yang memperkuat relevansi BBDL dalam pembelajaran matematika. Salah satu kesulitan terbesar dalam mengajarkan matematika adalah rendahnya minat siswa. Dengan menggunakan pendekatan BBDL, guru dapat merancang pengalaman belajar yang lebih menarik, interaktif, dan sesuai dengan minat siswa. Misalnya, permainan berbasis matematika digital atau simulasi visual dapat membangkitkan antusiasme siswa. Neurosains menjelaskan bahwa ketika emosi positif terlibat, otak lebih mudah menyerap dan mengingat informasi. Hal ini menunjukkan bahwa BBDL berperan penting dalam meningkatkan motivasi belajar matematika (Yildiz & Arpaci, 2024; Funa et al., 2024).

Penerapan BBDL dalam pembelajaran matematika juga memperkuat keterampilan kolaborasi. Melalui aktivitas kelompok yang didukung teknologi, siswa dapat bekerja sama dalam menyelesaikan masalah kompleks. Proses kolaborasi ini sejalan dengan prinsip neurosains yang menekankan pentingnya interaksi sosial dalam pembelajaran. Teknologi deep learning berfungsi sebagai pendukung yang membantu menganalisis kontribusi individu dalam kelompok, sehingga guru dapat menilai tidak hanya hasil, tetapi juga proses kolaborasi. Dengan demikian, matematika menjadi sarana

untuk mengembangkan keterampilan sosial sekaligus akademik (Ambroise et al., 2025; Halkiopoulous et al., 2025).

Relevansi BBDL juga tampak dalam penguatan memori jangka panjang dalam pembelajaran matematika. Melalui pengulangan bermakna, visualisasi, dan aktivitas multisensori, konsep-konsep matematika dapat lebih mudah diinternalisasi dalam memori otak. Teknologi deep learning mendukung proses ini dengan menyediakan latihan adaptif yang disesuaikan dengan tingkat penguasaan siswa. Dengan pendekatan ini, pembelajaran matematika tidak hanya bersifat temporer untuk ujian, tetapi juga berkontribusi pada pembentukan kompetensi jangka panjang. Hal ini sangat penting karena keterampilan matematika merupakan fondasi bagi berbagai disiplin ilmu lain (Chechan et al., 2025; Kim et al., 2025).

Secara keseluruhan, relevansi BBDL dalam pembelajaran matematika terletak pada kemampuannya menyelaraskan prinsip neurosains dengan teknologi pembelajaran modern. Model ini memungkinkan pembelajaran yang lebih personal, kontekstual, interaktif, dan berorientasi pada pengembangan keterampilan abad ke-21. BBDL menjadikan matematika bukan hanya sebagai materi akademik, tetapi juga sebagai wahana untuk melatih kemampuan berpikir kritis, kolaboratif, kreatif, dan reflektif. Oleh karena itu, penerapan model ini dapat dipandang sebagai langkah strategis untuk meningkatkan

kualitas pembelajaran matematika di era digital yang penuh tantangan.

6.2 Pemanfaatan GeoGebra dalam Visualisasi Konsep Matematis

GeoGebra merupakan salah satu perangkat lunak matematika dinamis yang sangat relevan dalam mendukung implementasi Brain-Based Deep Learning (BBDL) karena mengintegrasikan visualisasi, interaktivitas, dan eksplorasi konsep secara menyeluruh. Dalam pembelajaran matematika, banyak konsep yang bersifat abstrak sehingga sulit dipahami jika hanya disampaikan secara verbal atau melalui simbol. Dengan GeoGebra, konsep-konsep tersebut dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik, animasi, maupun simulasi, sehingga memudahkan otak dalam menghubungkan representasi abstrak dengan pengalaman konkret. Visualisasi semacam ini selaras dengan prinsip neurosains yang menegaskan pentingnya keterlibatan multisensori dalam memfasilitasi proses belajar. Oleh karena itu, pemanfaatan GeoGebra bukan hanya sekadar media bantu, tetapi menjadi bagian integral dari model BBDL (Nurhikmah et al., 2023; Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025).

Dalam konteks geometri, GeoGebra memiliki peran yang sangat signifikan karena mampu mengubah bangun datar maupun bangun ruang menjadi representasi dinamis yang dapat dimanipulasi langsung oleh siswa. Misalnya, konsep

tentang transformasi geometri seperti translasi, rotasi, refleksi, atau dilatasi dapat divisualisasikan secara interaktif, sehingga siswa tidak hanya menghafal rumus, tetapi memahami makna dari setiap transformasi tersebut. Pengalaman belajar semacam ini memungkinkan siswa mengaktifkan korteks visual sekaligus memperkuat memori prosedural, sesuai dengan prinsip *brain-based learning*. Dengan demikian, GeoGebra mendukung penciptaan pengalaman belajar yang lebih bermakna dan mendalam (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Dalam pembelajaran aljabar, GeoGebra dapat digunakan untuk memvisualisasikan persamaan dan fungsi matematika dalam bentuk grafik yang interaktif. Siswa dapat mengubah nilai variabel secara langsung dan melihat bagaimana perubahan tersebut memengaruhi grafik. Proses eksplorasi ini membantu siswa memahami keterkaitan antara simbol aljabar dan representasi grafis, yang selama ini menjadi kesulitan utama dalam pembelajaran matematika. Dengan kata lain, GeoGebra memungkinkan siswa untuk menemukan hubungan matematis melalui pengalaman belajar berbasis penemuan, yang selaras dengan prinsip konstruktivisme dalam BBDL (Chechan et al., 2025; Kim et al., 2025).

Selain itu, pemanfaatan GeoGebra juga efektif dalam mendukung pembelajaran kalkulus. Konsep-konsep seperti limit, turunan, dan integral yang sering dianggap abstrak dapat divisualisasikan secara interaktif melalui grafik dan animasi. Misalnya, konsep turunan dapat divisualisasikan dengan

menampilkan garis singgung pada kurva yang bergerak seiring dengan perubahan titik. Dengan demikian, siswa dapat memahami makna geometris dari turunan tanpa hanya berfokus pada manipulasi simbolik. Pendekatan ini membantu memperkuat pemahaman konseptual, sekaligus memfasilitasi transfer pengetahuan ke dalam pemecahan masalah nyata (Fang et al., 2025; Johar et al., 2025).

GeoGebra juga memiliki keunggulan dalam mendukung pembelajaran berbasis masalah (problem-based learning). Guru dapat merancang aktivitas yang menantang siswa untuk memecahkan permasalahan nyata dengan bantuan GeoGebra. Misalnya, perhitungan luas daerah tertentu dapat dikaitkan dengan aplikasi integral dalam konteks pembangunan infrastruktur. Siswa dapat mengeksplorasi data, membuat model matematis, dan memverifikasi hasilnya secara visual. Dengan demikian, GeoGebra berperan sebagai media yang menghubungkan matematika dengan kehidupan sehari-hari, yang sejalan dengan semangat pendidikan abad ke-21 (Subba et al., 2025; Yildiz & Arpacı, 2024).

Integrasi GeoGebra dengan prinsip deep learning juga memperkuat fungsinya dalam pembelajaran matematika. Dengan memanfaatkan analitik berbasis AI, aktivitas siswa dalam menggunakan GeoGebra dapat direkam dan dianalisis untuk memetakan pola kesalahan maupun strategi pemecahan masalah. Guru kemudian dapat memberikan intervensi yang lebih spesifik berdasarkan hasil analisis tersebut. Pendekatan ini

mempertegas keunggulan BBDL dalam menyediakan pembelajaran yang adaptif, personal, dan berbasis data. GeoGebra tidak lagi hanya sekadar alat eksplorasi, melainkan bagian dari ekosistem cerdas yang memperkuat efektivitas instruksional (Halkiopoulos et al., 2025; Asare et al., 2025).

Penggunaan GeoGebra dalam pembelajaran juga selaras dengan aspek motivasional yang penting dalam BBDL. Ketika siswa terlibat langsung dengan visualisasi dinamis, rasa ingin tahu mereka meningkat, sehingga mendorong keterlibatan emosional dan kognitif secara simultan. Neurosains menegaskan bahwa motivasi positif berhubungan erat dengan peningkatan aktivitas neurotransmitter yang memperkuat memori jangka panjang. Dengan kata lain, pengalaman interaktif melalui GeoGebra bukan hanya meningkatkan pemahaman konseptual, tetapi juga memperkuat retensi pembelajaran dalam jangka waktu yang lebih lama (Funa et al., 2024; Ambroise et al., 2025).

Selain mendukung siswa, GeoGebra juga memberikan manfaat besar bagi guru. Dengan bantuan perangkat ini, guru dapat mendesain pembelajaran yang lebih kreatif, efisien, dan berpusat pada siswa. Misalnya, guru dapat membuat simulasi interaktif yang langsung dapat digunakan di kelas atau dibagikan melalui platform digital. Hal ini mengurangi ketergantungan pada metode tradisional yang cenderung bersifat satu arah. Sebaliknya, pembelajaran menjadi lebih partisipatif, di mana siswa berperan aktif dalam membangun

pengetahuan. Dengan demikian, GeoGebra juga berkontribusi dalam meningkatkan kualitas pedagogi guru sesuai dengan prinsip BBDL (Kim et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Secara keseluruhan, pemanfaatan GeoGebra dalam visualisasi konsep matematis memiliki relevansi yang sangat kuat dengan implementasi BBDL. Aplikasi ini mendukung visualisasi abstraksi, memperkuat keterampilan berpikir kritis, meningkatkan motivasi, serta memungkinkan personalisasi pembelajaran. Integrasinya dengan deep learning semakin memperluas potensi GeoGebra sebagai media pembelajaran yang cerdas dan adaptif. Dengan demikian, pemanfaatan GeoGebra bukan hanya sebagai alat bantu tambahan, tetapi sebagai perangkat inti dalam transformasi pembelajaran matematika yang lebih inovatif, efektif, dan sesuai dengan tuntutan abad ke-21.

6.3 Strategi Pengembangan Keterampilan Berpikir Kritis dan Kreatif

Keterampilan berpikir kritis dan kreatif merupakan kompetensi inti abad ke-21 yang harus dikembangkan melalui pembelajaran matematika. Model Brain-Based Deep Learning (BBDL) menawarkan strategi yang relevan untuk mengasah kedua keterampilan ini melalui integrasi neurosains dan teknologi pembelajaran adaptif. Berpikir kritis ditandai dengan kemampuan menganalisis, mengevaluasi, dan mengambil keputusan berbasis logika, sedangkan berpikir kreatif ditandai

dengan kemampuan menghasilkan ide-ide baru yang orisinal dan bermanfaat. Dalam konteks BBDL, strategi pengembangan kedua keterampilan tersebut dirancang berdasarkan cara kerja otak dalam memproses informasi, memperhatikan faktor emosi, memori, dan stimulasi multisensori (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Strategi pertama yang ditawarkan BBDL adalah menciptakan pembelajaran berbasis masalah nyata. Dengan menghadapkan siswa pada situasi yang kompleks, guru dapat mendorong siswa untuk menganalisis permasalahan, mengevaluasi alternatif solusi, dan membuat keputusan yang tepat. GeoGebra dan teknologi berbasis deep learning dapat digunakan untuk memvisualisasikan masalah serta menganalisis data secara dinamis. Melalui pengalaman ini, siswa terlatih untuk berpikir kritis dalam memproses informasi, sekaligus kreatif dalam menghasilkan berbagai alternatif solusi. Proses ini sejalan dengan prinsip konstruktivisme yang menekankan pentingnya keterlibatan aktif dalam membangun pengetahuan (Nurhikmah et al., 2023; Chechan et al., 2025).

Selain berbasis masalah, strategi lain adalah penerapan eksplorasi visual interaktif. GeoGebra memungkinkan siswa memanipulasi objek matematika secara langsung, misalnya dalam memahami sifat fungsi atau bangun geometri. Aktivitas manipulasi ini memicu rasa ingin tahu, meningkatkan motivasi, dan menstimulasi otak untuk membuat koneksi baru. Proses ini mendukung pengembangan kreativitas karena siswa diberi

kebebasan untuk mengeksplorasi berbagai kemungkinan representasi matematis. Sementara itu, keterampilan berpikir kritis dikembangkan melalui analisis hubungan antarvariabel yang divisualisasikan secara grafis (Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025; Kim et al., 2025).

Strategi berikutnya adalah integrasi kolaborasi dalam kegiatan pembelajaran. Neurosains menekankan bahwa interaksi sosial merupakan salah satu faktor penting dalam membangun pemahaman yang mendalam. Dalam kegiatan kelompok, siswa dapat berdiskusi, menyampaikan argumen, serta mengevaluasi gagasan dari teman sejawat. Proses kolaborasi ini tidak hanya mengembangkan keterampilan berpikir kritis melalui evaluasi argumen, tetapi juga keterampilan berpikir kreatif melalui pertukaran ide. Deep learning dapat mendukung strategi ini dengan menganalisis kontribusi individu dalam kelompok dan memberikan umpan balik berbasis data untuk meningkatkan efektivitas kolaborasi (Johar et al., 2025; Halkiopoulos et al., 2025).

BBDL juga menekankan pentingnya refleksi sebagai strategi pengembangan berpikir kritis dan kreatif. Setelah menyelesaikan aktivitas pembelajaran, siswa diajak untuk merefleksikan proses yang telah mereka lalui, termasuk strategi apa yang berhasil, kendala apa yang muncul, dan bagaimana cara memperbaikinya. Refleksi ini menstimulasi aktivitas metakognitif yang melibatkan prefrontal cortex, sehingga memperkuat kemampuan analitis. Selain itu, refleksi juga

membuka peluang bagi siswa untuk menemukan ide-ide baru atau pendekatan alternatif yang lebih efektif, sehingga kreativitas dapat berkembang secara optimal (Funa et al., 2024; Ambroise et al., 2025).

Strategi lain yang relevan adalah penggunaan simulasi berbasis teknologi. Dalam pembelajaran matematika, simulasi memungkinkan siswa mengeksplorasi fenomena yang kompleks dengan cara yang lebih sederhana. Misalnya, simulasi pertumbuhan populasi dengan fungsi eksponensial atau simulasi perhitungan integral untuk menghitung luas daerah tertentu. Aktivitas ini melatih keterampilan berpikir kritis karena siswa harus mengevaluasi hasil simulasi, sekaligus mengembangkan kreativitas karena mereka dapat memodifikasi variabel untuk melihat berbagai kemungkinan hasil. Deep learning memperkuat strategi ini dengan memberikan umpan balik berbasis pola interaksi siswa (Asare et al., 2025; Subba et al., 2025).

Selain itu, BBDL mengedepankan pendekatan berbasis proyek (project-based learning) untuk mengembangkan keterampilan berpikir kritis dan kreatif. Dalam proyek ini, siswa diminta merancang solusi matematis untuk permasalahan nyata yang membutuhkan analisis mendalam dan kreativitas tinggi. Misalnya, proyek desain bangunan dengan mempertimbangkan prinsip geometri atau analisis data ekonomi menggunakan konsep aljabar. Proyek semacam ini memfasilitasi integrasi antara teori dan praktik, sekaligus

melatih kemampuan siswa dalam merancang solusi yang inovatif. Dengan dukungan teknologi deep learning, guru dapat memantau perkembangan proyek secara individual dan kolektif (Chechan et al., 2025; Kim et al., 2025).

Aspek motivasi dan emosi juga memiliki peran penting dalam strategi pengembangan keterampilan berpikir kritis dan kreatif. Neurosains menegaskan bahwa emosi positif dapat meningkatkan aktivitas otak dalam memproses informasi. Oleh karena itu, guru perlu menciptakan suasana belajar yang kondusif, menyenangkan, dan bebas tekanan. Penggunaan GeoGebra dengan animasi menarik atau permainan edukatif berbasis matematika dapat menjadi sarana untuk membangkitkan minat belajar. Ketika motivasi meningkat, siswa lebih berani mengeksplorasi ide-ide baru sekaligus lebih teliti dalam menganalisis informasi (Yildiz & Arpaci, 2024; Ambroise et al., 2025).

Secara keseluruhan, strategi pengembangan keterampilan berpikir kritis dan kreatif melalui BBDL dalam pembelajaran matematika mencakup pembelajaran berbasis masalah, eksplorasi visual, kolaborasi, refleksi, simulasi, proyek, serta motivasi emosional. Strategi-strategi ini tidak hanya memperkuat dimensi kognitif, tetapi juga dimensi afektif dan sosial siswa, sehingga menghasilkan pembelajaran yang lebih holistik. Integrasi neurosains dengan teknologi deep learning menjadikan strategi tersebut lebih adaptif dan berbasis data, sehingga mampu menjawab kebutuhan individual siswa

sekaligus tuntutan pendidikan abad ke-21. Dengan demikian, BBDL menjadi model yang relevan untuk mencetak generasi yang kritis, kreatif, dan inovatif dalam menghadapi tantangan global.

6.4 Pembelajaran Kolaboratif dengan Model Brain-Based Deep Learning

Pembelajaran kolaboratif merupakan salah satu pendekatan penting dalam pendidikan abad ke-21 yang menekankan kerja sama, komunikasi, dan interaksi sosial dalam mencapai tujuan pembelajaran. Dalam konteks Model Brain-Based Deep Learning (BBDL), kolaborasi tidak hanya dipandang sebagai strategi pedagogis, tetapi juga sebagai mekanisme alami otak dalam memproses informasi. Neurosains menegaskan bahwa aktivitas sosial merangsang pelepasan neurotransmitter yang memperkuat keterhubungan antar neuron, sehingga mempercepat pemahaman dan memperkuat memori jangka panjang. Dengan demikian, integrasi BBDL dengan pembelajaran kolaboratif menjadi strategi yang saling melengkapi untuk meningkatkan kualitas pembelajaran matematika (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Dalam praktiknya, pembelajaran kolaboratif dengan BBDL memfasilitasi siswa untuk bekerja dalam kelompok kecil, mendiskusikan konsep, serta menyelesaikan masalah secara bersama-sama. Melalui diskusi, siswa saling menukar ide, mengajukan argumen, dan melakukan evaluasi kritis terhadap

pemikiran rekan sejawat. Proses ini mengaktifkan fungsi eksekutif otak yang terkait dengan pengambilan keputusan dan regulasi kognitif. Dengan dukungan teknologi seperti GeoGebra, siswa dapat bersama-sama memanipulasi representasi matematis secara visual, sehingga memperkuat keterlibatan kognitif maupun sosial. Aktivitas semacam ini menjadikan pembelajaran lebih hidup, kontekstual, dan bermakna (Nurhikmah et al., 2023; Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025).

BBDL juga memberikan landasan kuat untuk menciptakan kolaborasi berbasis data melalui integrasi deep learning. Algoritma deep learning dapat merekam pola interaksi siswa dalam kelompok, mengidentifikasi siapa yang berperan aktif, serta mendeteksi potensi kesulitan individu. Informasi ini memungkinkan guru untuk memberikan intervensi yang tepat sasaran, baik untuk meningkatkan keterlibatan siswa pasif maupun memperdalam pemahaman siswa yang sudah aktif. Dengan demikian, pembelajaran kolaboratif tidak hanya berfokus pada produk akhir diskusi, tetapi juga pada proses dinamis yang berlangsung dalam kelompok (Chechan et al., 2025; Asare et al., 2025).

Salah satu keunggulan kolaborasi dalam BBDL adalah kemampuannya membangun keterampilan sosial-emosional yang sangat penting dalam pendidikan. Melalui kolaborasi, siswa belajar mengelola emosi, menghargai pendapat orang lain, serta mengembangkan empati. Neurosains menunjukkan

bahwa interaksi sosial yang positif dapat meningkatkan aktivitas sistem limbik, yang berperan dalam regulasi emosi. Dengan suasana emosional yang sehat, proses pembelajaran matematika menjadi lebih menyenangkan dan bermakna. Oleh karena itu, pembelajaran kolaboratif dalam kerangka BBDL tidak hanya membentuk keterampilan akademik, tetapi juga karakter siswa (Funa et al., 2024; Ambroise et al., 2025).

Strategi kolaboratif dengan BBDL dapat diterapkan pada berbagai topik matematika, mulai dari aljabar hingga kalkulus. Misalnya, dalam topik sistem persamaan linear, siswa dapat bekerja dalam kelompok untuk memecahkan masalah kontekstual menggunakan GeoGebra. Setiap anggota kelompok memiliki peran spesifik, seperti merancang model, memvisualisasikan grafik, dan memverifikasi solusi. Proses pembagian peran ini menstimulasi kerja otak dalam mengorganisasi informasi dan meningkatkan akuntabilitas individu dalam kolaborasi. Hasilnya, siswa tidak hanya belajar matematika, tetapi juga belajar manajemen tugas dan tanggung jawab (Johar et al., 2025; Subba et al., 2025).

Kolaborasi juga dapat memperkuat keterampilan berpikir kritis dan kreatif. Saat siswa berkolaborasi, mereka berhadapan dengan berbagai perspektif yang berbeda. Proses menanggapi argumen dan mengusulkan ide baru mengaktifkan area prefrontal cortex, yang berperan dalam berpikir tingkat tinggi. Dengan demikian, pembelajaran kolaboratif dalam kerangka BBDL mendorong siswa untuk

mengevaluasi gagasan dengan kritis sekaligus menciptakan solusi inovatif. Teknologi deep learning memperkuat proses ini dengan menyediakan analisis otomatis terkait kualitas argumen atau kreativitas dalam penyelesaian masalah (Kim et al., 2025; Fang et al., 2025).

Aspek lain yang perlu digarisbawahi adalah motivasi. Bekerja secara kolaboratif dalam suasana yang positif meningkatkan motivasi intrinsik siswa karena mereka merasa didukung secara sosial. Dalam BBDL, motivasi berperan penting dalam memperkuat proses pembelajaran karena emosi positif mempercepat konsolidasi memori. GeoGebra, ketika digunakan secara kolaboratif, juga dapat membangkitkan semangat belajar karena siswa merasa terlibat dalam aktivitas yang interaktif dan menyenangkan. Hal ini memperlihatkan bahwa kolaborasi dalam BBDL tidak hanya meningkatkan pemahaman, tetapi juga motivasi belajar (Yildiz & Arpaci, 2024; Halkiopoulou et al., 2025).

Pembelajaran kolaboratif berbasis BBDL juga memberikan peluang untuk menumbuhkan keterampilan metakognitif. Dalam diskusi kelompok, siswa sering kali diminta menjelaskan strategi yang digunakan, mengkritisi pendekatan teman, atau mengevaluasi hasil yang diperoleh. Proses refleksi kolektif ini membantu siswa mengenali kekuatan dan kelemahan dalam pemikiran mereka. Dengan dukungan analisis berbasis AI, guru dapat memberikan umpan balik yang lebih spesifik terhadap keterampilan metakognitif yang muncul

selama kolaborasi. Hal ini menegaskan bahwa kolaborasi tidak hanya meningkatkan pengetahuan, tetapi juga keterampilan belajar sepanjang hayat (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Secara keseluruhan, pembelajaran kolaboratif dengan model Brain-Based Deep Learning merupakan strategi yang sangat relevan untuk meningkatkan kualitas pembelajaran matematika. Melalui integrasi neurosains, teknologi deep learning, dan media interaktif seperti GeoGebra, kolaborasi tidak hanya menjadi sarana untuk menyelesaikan masalah, tetapi juga untuk membangun keterampilan sosial, emosional, kognitif, dan metakognitif. Dengan demikian, pembelajaran kolaboratif dalam kerangka BBDL dapat dipandang sebagai inovasi yang mampu menjawab tantangan pendidikan abad ke-21 dan menyiapkan generasi yang kritis, kreatif, serta siap menghadapi kompleksitas dunia nyata.

BAB 7 EVALUASI DAN PENILAIAN MODEL PEMBELAJARAN

7.1 Konsep Dasar Evaluasi dalam Pembelajaran

Evaluasi dalam pembelajaran merupakan komponen esensial yang berfungsi untuk menilai sejauh mana tujuan pembelajaran telah tercapai, serta sebagai sarana refleksi untuk meningkatkan kualitas proses pendidikan. Dalam perspektif Model Brain-Based Deep Learning (BBDL), evaluasi tidak hanya diarahkan pada hasil akhir, tetapi juga pada proses belajar yang dialami siswa. Hal ini selaras dengan pendekatan neurosains yang menekankan bahwa pembelajaran merupakan suatu proses kompleks yang melibatkan interaksi antara kognisi, emosi, dan pengalaman multisensori. Oleh karena itu, evaluasi dalam kerangka BBDL perlu dirancang secara menyeluruh, melibatkan aspek kognitif, afektif, dan psikomotor. Evaluasi yang komprehensif ini mendukung tercapainya hasil belajar yang lebih bermakna serta memastikan model pembelajaran berfungsi optimal (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Konsep dasar evaluasi menekankan bahwa kegiatan ini bukan sekadar mengukur hasil belajar, tetapi juga memberikan umpan balik yang bermanfaat bagi siswa dan guru. Evaluasi

yang efektif dalam kerangka BBDL bersifat formatif, sumatif, dan diagnostik. Evaluasi formatif dilakukan selama proses pembelajaran untuk memberikan umpan balik yang segera, sedangkan evaluasi sumatif dilakukan pada akhir pembelajaran untuk menilai pencapaian tujuan secara keseluruhan. Sementara itu, evaluasi diagnostik digunakan untuk mengidentifikasi kekuatan dan kelemahan siswa sebelum proses pembelajaran berlangsung. Ketiga jenis evaluasi ini berperan penting dalam memandu guru mengambil keputusan instruksional yang lebih tepat (Chechan et al., 2025; Nurhikmah et al., 2023).

Dalam pendekatan tradisional, evaluasi sering berfokus pada tes tertulis yang mengukur pengetahuan kognitif. Namun, BBDL menekankan bahwa evaluasi perlu melampaui sekadar penguasaan fakta. Evaluasi harus mencakup pemahaman konseptual, kemampuan pemecahan masalah, kreativitas, keterampilan kolaboratif, serta aspek afektif seperti motivasi dan sikap terhadap pembelajaran. Dengan kata lain, evaluasi dalam BBDL bersifat holistik dan kontekstual. Hal ini sejalan dengan paradigma pembelajaran abad ke-21 yang menuntut siswa memiliki keterampilan berpikir kritis, kreatif, komunikatif, dan kolaboratif, sehingga evaluasi harus dirancang untuk mengukur keterampilan tersebut secara komprehensif (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Konsep evaluasi dalam BBDL juga menekankan pentingnya proses asesmen autentik. Asesmen autentik adalah

penilaian yang didasarkan pada tugas-tugas nyata yang relevan dengan kehidupan sehari-hari siswa. Misalnya, dalam pembelajaran matematika, evaluasi dapat dilakukan melalui proyek berbasis masalah kontekstual, penggunaan GeoGebra untuk memodelkan konsep matematis, atau penyelesaian tugas kolaboratif yang memerlukan pemikiran kritis. Asesmen autentik mendorong keterlibatan aktif siswa, meningkatkan motivasi, serta memberikan gambaran lebih akurat tentang kemampuan mereka dalam mengaplikasikan pengetahuan. Dengan demikian, asesmen ini mendukung prinsip neurosains bahwa pembelajaran akan lebih bermakna jika terkait langsung dengan pengalaman nyata (Johar et al., 2025; Funa et al., 2024).

Selain asesmen autentik, evaluasi dalam kerangka BBDL juga dapat memanfaatkan teknologi berbasis kecerdasan buatan dan deep learning. Teknologi ini memungkinkan analisis data pembelajaran yang lebih mendalam, seperti pola interaksi siswa dengan media, kesalahan umum dalam menyelesaikan soal, serta tingkat keterlibatan dalam aktivitas kolaboratif. Dengan adanya teknologi, evaluasi menjadi lebih personal karena dapat disesuaikan dengan kebutuhan masing-masing siswa. Hasil analisis berbasis data ini memberikan guru informasi yang lebih detail untuk merancang strategi pembelajaran berikutnya, sekaligus mendukung pembelajaran adaptif yang berpusat pada siswa (Kim et al., 2025; Fang et al., 2025).

Evaluasi juga memiliki dimensi motivasional yang signifikan. Dalam kerangka BBDL, evaluasi dirancang tidak hanya untuk menilai, tetapi juga untuk memotivasi siswa. Evaluasi yang konstruktif, dengan umpan balik yang positif dan membangun, dapat meningkatkan rasa percaya diri siswa dan mendorong mereka untuk terus belajar. Neurosains menunjukkan bahwa umpan balik positif dapat merangsang pelepasan dopamin, yang berperan dalam memperkuat motivasi dan mempercepat pembentukan memori jangka panjang. Oleh karena itu, evaluasi harus dilihat sebagai sarana untuk memberdayakan siswa, bukan sekadar menilai kelemahan (Ambroise et al., 2025; Yildiz & Arpaci, 2024).

Dalam praktiknya, evaluasi berbasis BBDL menekankan keterpaduan antara asesmen formatif, sumatif, diagnostik, dan autentik. Guru perlu merancang instrumen penilaian yang bervariasi, seperti tes berbasis proyek, portofolio digital, refleksi tertulis, maupun observasi kinerja. Dengan instrumen yang bervariasi, evaluasi dapat memberikan gambaran menyeluruh tentang perkembangan siswa. Variasi ini juga mendukung keberagaman gaya belajar, sehingga setiap siswa memiliki kesempatan untuk menunjukkan kemampuannya melalui cara yang paling sesuai. Dengan demikian, evaluasi bukan lagi aktivitas statis, melainkan proses dinamis yang berlangsung sepanjang pembelajaran (Subba et al., 2025; Halkiopoulos et al., 2025).

Konsep dasar evaluasi dalam BBDL juga menggarisbawahi pentingnya keterlibatan siswa dalam proses evaluasi. Siswa didorong untuk melakukan evaluasi diri (self-assessment) maupun evaluasi sejawat (peer assessment). Proses ini menstimulasi keterampilan metakognitif, karena siswa belajar merefleksikan kekuatan dan kelemahan mereka sendiri, serta memberikan umpan balik yang konstruktif kepada teman. Keterlibatan ini meningkatkan rasa tanggung jawab terhadap proses belajar, sekaligus memperkuat kesadaran diri sebagai pembelajar sepanjang hayat. Dengan demikian, evaluasi tidak hanya menjadi tugas guru, tetapi juga bagian dari aktivitas belajar itu sendiri (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Secara keseluruhan, konsep dasar evaluasi dalam pembelajaran dengan pendekatan Brain-Based Deep Learning adalah evaluasi yang bersifat menyeluruh, autentik, berbasis data, dan memotivasi. Evaluasi tidak hanya menilai apa yang telah dicapai siswa, tetapi juga bagaimana mereka belajar, berkolaborasi, berefleksi, dan berkembang secara emosional maupun kognitif. Dengan pendekatan ini, evaluasi menjadi bagian integral dari proses pembelajaran, sekaligus sebagai instrumen untuk mengembangkan potensi siswa secara holistik. Model evaluasi seperti ini dipandang lebih relevan dalam menjawab tantangan pendidikan abad ke-21 yang menuntut integrasi keterampilan kognitif, afektif, dan teknologi.

7.2 Indikator Keberhasilan Model

Indikator keberhasilan Model Brain-Based Deep Learning (BBDL) merupakan ukuran penting untuk menilai efektivitas implementasi model dalam konteks pendidikan, khususnya pada pembelajaran matematika. Keberhasilan model ini tidak hanya diukur melalui pencapaian hasil belajar kognitif, tetapi juga pada aspek afektif, sosial, dan keterampilan berpikir tingkat tinggi. Dengan pendekatan neurosains, keberhasilan BBDL ditentukan oleh sejauh mana proses pembelajaran mampu menstimulasi otak secara optimal, membangun motivasi intrinsik, serta meningkatkan daya ingat dan transfer pengetahuan. Hal ini menegaskan bahwa keberhasilan model harus dilihat secara menyeluruh, mencakup dimensi pengetahuan, sikap, keterampilan, serta kesiapan menghadapi tantangan abad ke-21 (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Salah satu indikator keberhasilan yang utama adalah peningkatan pemahaman konseptual siswa. Dalam pembelajaran matematika, pemahaman konseptual mencakup kemampuan untuk menghubungkan simbol, prosedur, dan representasi visual dengan makna yang mendalam. BBDL memfasilitasi hal ini melalui penggunaan media interaktif seperti GeoGebra, serta integrasi teknologi deep learning yang memberikan umpan balik adaptif. Jika siswa mampu menjelaskan konsep dengan jelas, menerapkan dalam konteks baru, serta menunjukkan fleksibilitas dalam pemecahan

masalah, maka hal tersebut menjadi tanda keberhasilan implementasi model (Nurhikmah et al., 2023; Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025).

Indikator lain yang menonjol adalah berkembangnya keterampilan berpikir kritis dan kreatif. Keberhasilan BBDL dapat dilihat dari sejauh mana siswa mampu menganalisis informasi, mengevaluasi argumen, dan menghasilkan solusi inovatif. Proses kolaboratif, refleksi, dan eksplorasi visual yang terdapat dalam model ini dirancang untuk menstimulasi prefrontal cortex, bagian otak yang berperan dalam berpikir tingkat tinggi. Jika siswa dapat menghasilkan ide-ide baru dalam menyelesaikan permasalahan matematis dan sekaligus menguji keefektifan solusi tersebut, maka indikator keberhasilan ini terpenuhi (Kim et al., 2025; Fang et al., 2025).

Motivasi belajar juga menjadi indikator keberhasilan yang sangat penting. Neurosains menegaskan bahwa emosi positif berhubungan erat dengan peningkatan motivasi dan pembentukan memori jangka panjang. Dalam BBDL, keberhasilan model dapat dilihat dari meningkatnya partisipasi aktif siswa, antusiasme dalam mengikuti kegiatan, serta keberanian mengambil risiko intelektual dalam pembelajaran. Jika siswa menunjukkan ketekunan dalam menyelesaikan tugas, keterlibatan penuh dalam diskusi, dan kepuasan terhadap proses belajar, maka dapat disimpulkan bahwa motivasi belajar telah berkembang melalui implementasi model (Funa et al., 2024; Ambroise et al., 2025).

Selain itu, indikator keberhasilan juga mencakup peningkatan kemampuan kolaborasi. Pembelajaran berbasis otak dan deep learning menekankan pentingnya interaksi sosial sebagai sarana pembentukan pemahaman. Keberhasilan model dapat diamati dari kemampuan siswa bekerja sama, menghargai pendapat orang lain, serta menyelesaikan tugas kelompok secara efektif. Jika kolaborasi menghasilkan keluaran yang berkualitas, memperlihatkan integrasi ide, dan meningkatkan keterampilan komunikasi matematis, maka hal ini menjadi bukti keberhasilan model dalam ranah sosial-emosional (Johar et al., 2025; Halkiopoulos et al., 2025).

Indikator lain yang relevan adalah retensi pengetahuan dan kemampuan transfer. Keberhasilan BBDL dapat diukur melalui kemampuan siswa dalam mengingat kembali konsep setelah jangka waktu tertentu serta menerapkan konsep tersebut pada situasi baru yang berbeda dengan latihan sebelumnya. Misalnya, siswa tidak hanya mampu menyelesaikan soal rutin tentang turunan, tetapi juga dapat menggunakannya dalam menganalisis fenomena pertumbuhan populasi. Retensi dan transfer ini menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis otak benar-benar membentuk pemahaman yang mendalam dan tahan lama (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Keterampilan metakognitif juga menjadi indikator penting. Siswa yang berhasil dalam pembelajaran BBDL ditandai dengan kemampuan untuk merefleksikan strategi

belajar mereka sendiri, menyadari kelemahan, serta mampu merencanakan perbaikan. Jika siswa mampu menjelaskan alasan di balik langkah-langkah yang mereka ambil, mengevaluasi hasil, dan memperbaiki kesalahan secara mandiri, maka hal tersebut merupakan bukti bahwa model ini berhasil menumbuhkan kesadaran belajar sepanjang hayat. Indikator ini penting karena metakognisi berhubungan langsung dengan kemampuan adaptasi dalam menghadapi tantangan baru (Subba et al., 2025; Chechan et al., 2025).

Penguasaan teknologi juga menjadi bagian dari indikator keberhasilan BBDL. Dengan integrasi GeoGebra, AI tools, dan simulasi berbasis deep learning, keberhasilan model terlihat dari sejauh mana siswa dapat mengoperasikan teknologi tersebut untuk mendukung pembelajaran. Jika siswa mampu memanfaatkan teknologi untuk memvisualisasikan konsep, melakukan eksplorasi, serta menyelesaikan masalah matematis yang kompleks, maka ini menunjukkan keberhasilan model dalam mempersiapkan siswa menghadapi era digital. Hal ini penting karena literasi teknologi merupakan salah satu kompetensi utama abad ke-21 (Yildiz & Arpaci, 2024; Asare et al., 2025).

Secara keseluruhan, indikator keberhasilan Model Brain-Based Deep Learning mencakup peningkatan pemahaman konseptual, keterampilan berpikir kritis dan kreatif, motivasi, kolaborasi, retensi dan transfer pengetahuan, keterampilan metakognitif, serta literasi teknologi. Indikator-indikator ini

menegaskan bahwa keberhasilan model tidak hanya diukur dari capaian kognitif semata, tetapi juga mencakup aspek afektif, sosial, dan teknologi yang relevan dengan tuntutan pendidikan abad ke-21. Dengan indikator yang komprehensif, evaluasi keberhasilan model dapat memberikan gambaran yang akurat tentang efektivitas implementasi serta arah pengembangan lebih lanjut.

7.3 Instrumen Penilaian: Tes, Observasi, dan Rubrik

Instrumen penilaian merupakan komponen utama dalam evaluasi pembelajaran karena berfungsi sebagai alat untuk mengukur ketercapaian tujuan belajar serta menilai efektivitas model yang digunakan. Dalam konteks Brain-Based Deep Learning (BBDL), instrumen penilaian harus dirancang untuk menangkap dimensi kognitif, afektif, dan psikomotor secara menyeluruh. Tiga instrumen utama yang relevan untuk digunakan adalah tes, observasi, dan rubrik. Ketiganya saling melengkapi dan memberikan gambaran yang komprehensif mengenai hasil belajar siswa. Tes digunakan untuk mengukur kemampuan kognitif, observasi digunakan untuk memantau perilaku belajar, sedangkan rubrik berfungsi menilai kualitas performa dan produk siswa berdasarkan kriteria yang jelas. Dengan kombinasi ini, penilaian dalam BBDL dapat bersifat adil, transparan, dan menyeluruh (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Tes sebagai instrumen penilaian berperan penting dalam mengukur pemahaman konseptual, keterampilan prosedural, serta kemampuan pemecahan masalah. Dalam BBDL, tes tidak hanya berbentuk soal pilihan ganda atau esai konvensional, tetapi juga dapat berupa soal berbasis proyek, studi kasus, atau aplikasi teknologi seperti GeoGebra. Dengan demikian, tes dirancang agar tidak hanya menilai hafalan, melainkan juga mendorong siswa untuk berpikir kritis, kreatif, dan reflektif. Keunggulan penggunaan tes dalam kerangka ini adalah kemampuannya mengukur aspek kognitif secara objektif, meskipun tantangan yang muncul adalah memastikan bahwa tes benar-benar kontekstual dan sesuai dengan prinsip pembelajaran berbasis otak (Nurhikmah et al., 2023; Johar et al., 2025).

Observasi merupakan instrumen penilaian yang memungkinkan guru menilai perilaku, sikap, keterampilan sosial, dan proses belajar siswa secara langsung. Dalam pembelajaran kolaboratif yang menjadi bagian integral dari BBDL, observasi sangat penting untuk memantau partisipasi, komunikasi, serta keterlibatan siswa dalam diskusi kelompok. Observasi juga memberikan informasi mengenai bagaimana siswa mengelola emosi, menunjukkan motivasi, dan berinteraksi dengan teknologi pembelajaran. Dengan mencatat pola-pola tersebut, guru dapat memperoleh gambaran yang lebih lengkap tentang perkembangan siswa yang tidak selalu dapat ditangkap melalui tes tertulis. Observasi ini juga

mendukung prinsip neurosains bahwa interaksi sosial dan pengalaman nyata memiliki peran signifikan dalam memperkuat memori jangka panjang (Funa et al., 2024; Ambroise et al., 2025).

Rubrik digunakan untuk menilai hasil kerja atau performa siswa berdasarkan kriteria yang telah ditentukan secara jelas. Dalam BBDL, rubrik sangat berguna untuk mengevaluasi keterampilan berpikir kritis, kreativitas, dan kemampuan kolaborasi. Rubrik memberikan deskripsi terperinci mengenai tingkat pencapaian dari suatu tugas, sehingga siswa memahami standar yang diharapkan sekaligus dapat melakukan refleksi diri. Misalnya, rubrik dapat digunakan untuk menilai kualitas presentasi kelompok, penggunaan GeoGebra dalam memvisualisasikan konsep, atau hasil laporan proyek berbasis masalah. Dengan adanya rubrik, penilaian menjadi lebih objektif dan konsisten, serta mendorong siswa untuk meningkatkan kualitas kinerja mereka (Subba et al., 2025; Halkiopoulous et al., 2025).

Ketiga instrumen ini memiliki keunggulan masing-masing, namun efektivitasnya akan optimal jika digunakan secara terpadu. Tes memberikan data kuantitatif yang terukur, observasi menghasilkan data kualitatif yang kontekstual, sedangkan rubrik menyediakan evaluasi berbasis kriteria yang transparan. Dengan mengombinasikan ketiganya, guru dapat memperoleh gambaran komprehensif mengenai kemampuan siswa. Hal ini selaras dengan prinsip BBDL yang menekankan

evaluasi holistik terhadap perkembangan kognitif, afektif, dan psikomotor, bukan sekadar pencapaian akademik tradisional (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Selain memberikan manfaat bagi guru, instrumen penilaian ini juga berperan dalam meningkatkan kesadaran metakognitif siswa. Misalnya, melalui rubrik, siswa dapat memahami aspek mana dari pekerjaannya yang sudah baik dan aspek mana yang perlu diperbaiki. Observasi juga dapat digunakan sebagai dasar untuk memberikan umpan balik personal yang membangun, sedangkan tes dapat dijadikan refleksi terhadap tingkat pemahaman yang dicapai. Dengan cara ini, penilaian bukan hanya menjadi alat ukur, tetapi juga sarana belajar yang membantu siswa berkembang secara berkelanjutan (Chechan et al., 2025; Fang et al., 2025).

Instrumen penilaian dalam BBDL juga perlu dirancang untuk mengintegrasikan teknologi. Misalnya, tes berbasis komputer dapat memanfaatkan kecerdasan buatan untuk menganalisis respons siswa dan memberikan umpan balik instan. Observasi dapat didukung dengan aplikasi digital yang merekam keterlibatan siswa dalam aktivitas kolaboratif, sedangkan rubrik dapat diimplementasikan dalam platform daring yang memungkinkan penilaian lebih efisien dan transparan. Integrasi teknologi ini sejalan dengan tuntutan pendidikan modern yang menekankan literasi digital sebagai bagian dari kompetensi utama siswa (Yildiz & Arpaci, 2024; Asare et al., 2025).

Meskipun ketiga instrumen ini sangat bermanfaat, tantangan tetap ada dalam penerapannya. Tes sering kali terbatas dalam mengukur keterampilan berpikir tingkat tinggi jika tidak dirancang dengan baik, observasi dapat bersifat subjektif jika tidak menggunakan pedoman yang jelas, dan rubrik membutuhkan waktu untuk dikembangkan serta diaplikasikan secara konsisten. Oleh karena itu, guru perlu memiliki kompetensi dalam merancang, mengombinasikan, serta mengadaptasi instrumen sesuai dengan konteks kelas. Pelatihan berkelanjutan bagi guru juga sangat diperlukan agar instrumen penilaian dalam kerangka BBDL benar-benar efektif (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Secara keseluruhan, tes, observasi, dan rubrik merupakan instrumen penilaian yang saling melengkapi dalam mengevaluasi keberhasilan implementasi Brain-Based Deep Learning. Ketiganya mampu menangkap dimensi kognitif, afektif, psikomotor, serta keterampilan abad ke-21 yang dibutuhkan siswa. Dengan desain yang tepat, instrumen ini tidak hanya berfungsi sebagai alat evaluasi, tetapi juga sebagai sarana pembelajaran yang memperkuat keterampilan berpikir kritis, kolaborasi, kreativitas, dan literasi teknologi. Oleh karena itu, pemanfaatan instrumen ini menjadi langkah strategis dalam memastikan BBDL benar-benar memberikan dampak signifikan terhadap kualitas pendidikan.

7.4 Penilaian Berbasis Kinerja (Performance Assessment)

Penilaian berbasis kinerja (performance assessment) merupakan pendekatan evaluasi yang menilai kemampuan siswa melalui tugas nyata yang mencerminkan keterampilan dan kompetensi yang relevan dengan konteks kehidupan sehari-hari. Dalam kerangka Brain-Based Deep Learning (BBDL), penilaian berbasis kinerja dianggap penting karena mampu menangkap dimensi kognitif, afektif, dan psikomotor secara komprehensif. Berbeda dengan tes konvensional yang sering terbatas pada pengukuran hafalan, penilaian ini menekankan pada penerapan konsep, proses berpikir kritis, kreativitas, serta keterampilan kolaboratif. Dengan demikian, performance assessment tidak hanya mengukur hasil belajar, tetapi juga bagaimana siswa memproses informasi, bekerja sama, dan menciptakan produk yang bermakna (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Dalam pembelajaran matematika berbasis BBDL, penilaian berbasis kinerja dapat berupa tugas pemecahan masalah kontekstual, proyek berbasis teknologi, presentasi, maupun penggunaan perangkat lunak seperti GeoGebra. Misalnya, siswa dapat diminta untuk membuat model grafik fungsi yang kompleks dengan GeoGebra, lalu menjelaskan implikasi matematisnya dalam situasi nyata. Kegiatan ini tidak hanya menilai penguasaan konsep, tetapi juga keterampilan komunikasi, penggunaan teknologi, serta refleksi kritis. Dengan

demikian, performance assessment mendorong siswa untuk menunjukkan pemahaman mendalam sekaligus menumbuhkan keterampilan praktis yang relevan dengan kebutuhan abad ke-21 (Kadan-Tabaja & Yerushalmy, 2025; Johar et al., 2025).

Penilaian berbasis kinerja juga sesuai dengan prinsip neurosains, yang menegaskan bahwa pembelajaran lebih bermakna jika dikaitkan dengan pengalaman nyata. Ketika siswa terlibat dalam tugas kinerja yang menantang, otak mengalami aktivasi lebih luas, termasuk pada area yang berhubungan dengan pemecahan masalah, kreativitas, dan regulasi emosi. Hal ini memperkuat jalur sinaptik yang mendukung retensi pengetahuan jangka panjang. Dengan demikian, performance assessment tidak hanya menilai apa yang dipelajari siswa, tetapi juga berkontribusi pada pembentukan struktur kognitif yang lebih kokoh (Funa et al., 2024; Ambroise et al., 2025).

Salah satu keunggulan performance assessment adalah kemampuannya menilai keterampilan berpikir tingkat tinggi. Dalam konteks BBDL, penilaian ini digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana siswa dapat menganalisis informasi, mengevaluasi strategi, dan menciptakan solusi inovatif. Sebagai contoh, pada topik kalkulus, siswa dapat diberikan tugas untuk memodelkan laju pertumbuhan populasi menggunakan turunan, kemudian membandingkan hasil analisis matematis dengan data empiris. Tugas ini menuntut pemahaman konseptual, keterampilan analisis, serta kemampuan integrasi

data, yang kesemuanya tidak dapat diukur secara memadai melalui tes konvensional (Kim et al., 2025; Fang et al., 2025).

Dalam praktiknya, performance assessment memerlukan instrumen penilaian yang jelas dan transparan. Rubrik merupakan alat penting untuk menilai kinerja siswa berdasarkan kriteria tertentu, seperti ketepatan konsep, kreativitas, kejelasan presentasi, serta keterampilan kolaborasi. Rubrik ini membantu guru memberikan penilaian yang objektif, sekaligus memberi siswa pemahaman tentang standar yang harus dicapai. Dengan menggunakan rubrik, siswa dapat melakukan refleksi diri, sehingga penilaian tidak hanya bersifat sumatif, tetapi juga formatif dan mendukung perkembangan berkelanjutan (Subba et al., 2025; Halkiopoulos et al., 2025).

Selain aspek akademik, penilaian berbasis kinerja juga berperan dalam menilai keterampilan sosial dan emosional. Dalam pembelajaran kolaboratif yang menjadi inti dari BBDL, performance assessment dapat mencakup pengamatan terhadap kerja sama tim, kepemimpinan, kemampuan komunikasi, serta pengelolaan emosi dalam kelompok. Hal ini penting karena keberhasilan belajar tidak hanya ditentukan oleh kecerdasan kognitif, tetapi juga oleh kecerdasan emosional dan sosial. Oleh karena itu, performance assessment memperkuat fungsi evaluasi sebagai sarana untuk mengembangkan siswa secara holistik (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Teknologi juga dapat dimanfaatkan dalam performance assessment. Misalnya, penggunaan platform digital untuk mengumpulkan tugas proyek, perekaman video presentasi siswa, atau simulasi berbasis AI untuk mengukur keterampilan problem solving. Dengan integrasi teknologi, penilaian dapat dilakukan lebih efisien, transparan, dan akurat. Selain itu, teknologi memungkinkan evaluasi yang lebih personal karena dapat menganalisis pola kinerja siswa secara mendetail, sehingga guru dapat memberikan umpan balik yang sesuai dengan kebutuhan individu (Yildiz & Arpaci, 2024; Asare et al., 2025).

Namun, pelaksanaan performance assessment juga menghadapi tantangan. Proses ini membutuhkan waktu yang lebih lama, persiapan instrumen yang matang, serta kemampuan guru dalam mengelola penilaian secara adil dan konsisten. Selain itu, evaluasi berbasis kinerja cenderung lebih kompleks karena harus mempertimbangkan berbagai dimensi kemampuan siswa. Untuk mengatasi hal ini, guru perlu dilatih dalam merancang tugas kinerja yang sesuai dengan tujuan pembelajaran, serta menyusun rubrik yang komprehensif. Dengan dukungan pelatihan dan teknologi, tantangan ini dapat diatasi sehingga performance assessment benar-benar memberikan nilai tambah dalam evaluasi pembelajaran (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Secara keseluruhan, penilaian berbasis kinerja merupakan pendekatan evaluasi yang sangat relevan dalam

kerangka Brain-Based Deep Learning. Penilaian ini tidak hanya menilai pencapaian akademik, tetapi juga mengukur keterampilan berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, komunikasi, serta literasi teknologi. Dengan instrumen yang tepat seperti rubrik dan dukungan teknologi, performance assessment menjadi sarana untuk menilai hasil belajar secara komprehensif sekaligus memotivasi siswa untuk berkembang lebih jauh. Dengan demikian, penerapan performance assessment dapat dipandang sebagai salah satu indikator utama keberhasilan implementasi BBDL dalam pendidikan abad ke-21.

7.5 Evaluasi Efektivitas Model Brain-Based Deep Learning

Evaluasi efektivitas model Brain-Based Deep Learning (BBDL) merupakan langkah strategis untuk menilai sejauh mana model ini mampu mencapai tujuan pembelajaran secara optimal. Efektivitas model tidak hanya dilihat dari aspek kognitif, tetapi juga mencakup dimensi afektif, sosial, dan teknologi yang terintegrasi dalam proses belajar. Evaluasi efektivitas diperlukan agar implementasi BBDL tidak sekadar menjadi inovasi konseptual, tetapi benar-benar memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan kualitas pendidikan. Hal ini penting karena pendidikan abad ke-21 menuntut adanya model pembelajaran yang adaptif, relevan dengan neurosains, serta mampu mengembangkan keterampilan berpikir tingkat tinggi siswa (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Efektivitas model dapat diukur melalui pencapaian hasil belajar siswa. Dalam kerangka BBDL, hasil belajar bukan hanya berupa nilai akademik, tetapi juga mencakup pemahaman konseptual, keterampilan pemecahan masalah, serta kemampuan transfer pengetahuan. Jika siswa mampu menghubungkan konsep matematika dengan fenomena nyata, menerapkan strategi berpikir kritis, serta menunjukkan kreativitas dalam menyelesaikan masalah, maka model dapat dianggap efektif. Evaluasi efektivitas ini sejalan dengan prinsip neurosains yang menekankan pentingnya keterhubungan antara pengalaman belajar dengan konteks kehidupan nyata (Nurhikmah et al., 2023; Johar et al., 2025).

Aspek motivasi belajar juga menjadi indikator penting dalam mengevaluasi efektivitas BBDL. Neurosains menunjukkan bahwa emosi positif dan motivasi intrinsik memperkuat memori jangka panjang serta meningkatkan keterlibatan siswa dalam pembelajaran. Efektivitas model dapat dilihat dari peningkatan antusiasme siswa dalam mengikuti kegiatan belajar, ketekunan dalam menyelesaikan tugas, serta keberanian mengambil risiko intelektual. Jika indikator motivasi ini terpenuhi, maka model terbukti berhasil menciptakan suasana belajar yang menyenangkan sekaligus produktif (Funa et al., 2024; Ambroise et al., 2025).

Kolaborasi juga menjadi dimensi penting dalam evaluasi efektivitas BBDL. Keberhasilan model dapat dilihat dari sejauh mana siswa mampu bekerja sama dalam kelompok,

menghargai pendapat orang lain, serta menghasilkan karya kolaboratif yang bermakna. Evaluasi efektivitas dalam aspek ini dapat dilakukan melalui observasi interaksi siswa, penilaian kerja kelompok, maupun refleksi diri. Jika kolaborasi menghasilkan peningkatan keterampilan komunikasi, kepemimpinan, dan empati, maka model terbukti efektif dalam membangun kompetensi sosial yang relevan dengan kebutuhan abad ke-21 (Halkiopoulos et al., 2025; Subba et al., 2025).

Efektivitas BBDL juga diukur melalui retensi dan transfer pengetahuan. Jika siswa mampu mengingat kembali konsep matematika setelah jangka waktu tertentu serta menggunakannya dalam konteks baru, maka model ini dapat dikatakan berhasil. Misalnya, siswa yang mempelajari turunan dalam kalkulus tidak hanya mampu menyelesaikan soal rutin, tetapi juga mampu menggunakannya untuk menganalisis fenomena fisik seperti kecepatan atau pertumbuhan populasi. Retensi dan transfer pengetahuan ini menunjukkan bahwa pembelajaran benar-benar bermakna, sesuai dengan prinsip neurosains tentang penguatan jalur sinaptik (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Selain aspek siswa, efektivitas model juga harus dilihat dari perspektif guru. Guru yang menerapkan BBDL diharapkan lebih mampu merancang pembelajaran inovatif, memanfaatkan teknologi, serta memberikan umpan balik yang konstruktif. Evaluasi efektivitas dapat dilakukan dengan menilai

kemampuan guru dalam mengintegrasikan prinsip neurosains, memfasilitasi interaksi kolaboratif, dan mengelola kelas berbasis teknologi. Jika guru menunjukkan peningkatan kompetensi profesional, maka implementasi model dapat dikatakan efektif tidak hanya bagi siswa, tetapi juga bagi pengembangan kapasitas pendidik (Kim et al., 2025; Fang et al., 2025).

Efektivitas model BBDL juga harus dilihat dari keberlanjutan penerapannya. Model dapat dianggap efektif apabila dapat diadaptasi dalam berbagai konteks pembelajaran, baik di sekolah dengan fasilitas teknologi memadai maupun di lingkungan dengan keterbatasan sumber daya. Fleksibilitas ini mencerminkan bahwa model tidak hanya relevan secara teoretis, tetapi juga aplikatif dalam praktik. Evaluasi keberlanjutan ini menjadi penting untuk memastikan bahwa model BBDL dapat memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan mutu pendidikan di berbagai tingkatan (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Untuk mengevaluasi efektivitas secara komprehensif, diperlukan penggunaan instrumen penilaian yang bervariasi, seperti tes, observasi, portofolio, dan rubrik berbasis kinerja. Instrumen ini memungkinkan guru mendapatkan gambaran menyeluruh tentang perkembangan siswa. Evaluasi juga dapat didukung oleh analisis berbasis data menggunakan teknologi deep learning, yang mampu mengidentifikasi pola pembelajaran siswa dan memberikan umpan balik adaptif.

Dengan pendekatan multi-instrumen ini, evaluasi efektivitas model dapat dilakukan secara lebih akurat, obyektif, dan relevan dengan kebutuhan pembelajaran modern (Yildiz & Arpaci, 2024; Asare et al., 2025).

Secara keseluruhan, evaluasi efektivitas Brain-Based Deep Learning tidak hanya menilai pencapaian akademik, tetapi juga keterampilan berpikir kritis, kreativitas, motivasi, kolaborasi, retensi pengetahuan, serta kompetensi guru. Efektivitas model juga dilihat dari kemampuannya untuk beradaptasi dengan berbagai konteks pendidikan dan memberikan dampak jangka panjang. Dengan indikator yang komprehensif serta instrumen evaluasi yang tepat, BBDL dapat dipastikan sebagai model pembelajaran yang efektif dalam menjawab tantangan pendidikan abad ke-21. Evaluasi ini tidak hanya mengukur keberhasilan implementasi, tetapi juga menjadi dasar untuk pengembangan model lebih lanjut.

BAB 8 TANTANGAN DAN PROSPEK PENGEMBANGAN MODEL

8.1 Hambatan dalam Implementasi di Kelas

Implementasi model Brain-Based Deep Learning (BBDL) di kelas sering kali menghadapi berbagai hambatan yang kompleks dan multidimensional. Salah satu hambatan utama adalah keterbatasan pemahaman guru terhadap prinsip neurosains dan teknologi deep learning. Sebagian besar guru masih berorientasi pada metode pembelajaran tradisional yang berfokus pada penyampaian informasi satu arah. Hal ini menyebabkan mereka kesulitan mengintegrasikan strategi pembelajaran berbasis otak dengan pendekatan teknologi modern. Padahal, keberhasilan penerapan BBDL sangat bergantung pada kemampuan guru memahami proses kerja otak, mengelola emosi siswa, serta mengoptimalkan pemanfaatan teknologi. Kesenjangan pengetahuan ini menjadi hambatan signifikan yang perlu diatasi melalui pelatihan berkelanjutan dan dukungan profesional (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Hambatan lain yang muncul adalah keterbatasan sarana dan prasarana, terutama di sekolah dengan sumber daya

terbatas. Implementasi BBDL membutuhkan perangkat teknologi yang memadai seperti komputer, perangkat lunak GeoGebra, serta akses internet yang stabil. Tanpa dukungan infrastruktur yang memadai, penerapan strategi berbasis deep learning menjadi tidak optimal. Misalnya, penggunaan simulasi visual dan aplikasi berbasis kecerdasan buatan yang seharusnya membantu pemahaman siswa, tidak dapat dijalankan dengan baik jika fasilitas teknologi tidak tersedia. Kondisi ini menunjukkan bahwa kesenjangan infrastruktur masih menjadi tantangan besar bagi sekolah, terutama di daerah terpencil (Johar et al., 2025; Nurhikmah et al., 2023).

Selain keterbatasan infrastruktur, hambatan lain terletak pada kesiapan siswa. Tidak semua siswa terbiasa dengan pendekatan pembelajaran yang menuntut keterlibatan aktif, kolaborasi, dan pemecahan masalah berbasis proyek. Sebagian siswa cenderung lebih nyaman dengan metode konvensional yang berfokus pada hafalan. Perubahan paradigma menuju pembelajaran berbasis otak yang menekankan keterampilan berpikir kritis, kreativitas, dan refleksi diri dapat menimbulkan resistensi awal. Hambatan ini muncul karena perbedaan gaya belajar, perbedaan latar belakang akademik, maupun keterbatasan literasi teknologi siswa. Oleh karena itu, implementasi BBDL memerlukan strategi adaptasi yang dapat menjembatani perbedaan tersebut (Funa et al., 2024; Ambroise et al., 2025).

Keterbatasan waktu dalam pembelajaran juga menjadi hambatan nyata. Model BBDL membutuhkan tahapan yang sistematis mulai dari persiapan, aktivasi, elaborasi, hingga refleksi. Setiap tahapan memerlukan waktu yang cukup agar siswa benar-benar dapat terlibat secara aktif dan mendalam. Namun, kurikulum yang padat sering kali membuat guru kesulitan mengalokasikan waktu secara optimal. Akibatnya, pembelajaran cenderung dilakukan secara terburu-buru, sehingga tujuan pembelajaran berbasis otak tidak tercapai sepenuhnya. Hal ini menunjukkan bahwa hambatan waktu harus dikelola dengan baik agar penerapan model dapat berjalan efektif (Subba et al., 2025; Halkiopoulou et al., 2025).

Hambatan juga muncul pada aspek evaluasi pembelajaran. Evaluasi konvensional yang berfokus pada tes tertulis belum sepenuhnya sesuai dengan tujuan BBDL yang menekankan keterampilan berpikir tingkat tinggi. Guru sering kali mengalami kesulitan dalam merancang instrumen penilaian autentik, seperti performance assessment, rubrik kolaborasi, atau observasi berbasis kriteria. Selain itu, penggunaan teknologi dalam evaluasi juga membutuhkan kompetensi tambahan yang tidak semua guru kuasai. Akibatnya, evaluasi yang dilakukan sering kali tidak mampu menggambarkan pencapaian siswa secara menyeluruh (Adiansha et al., 2021; Ambroise et al., 2025).

Resistensi terhadap perubahan juga menjadi hambatan dalam implementasi model ini. Beberapa guru dan pihak

sekolah cenderung mempertahankan metode tradisional karena dianggap lebih praktis dan sesuai dengan kebiasaan lama. Sikap resistif ini dapat menghambat adopsi inovasi pembelajaran, meskipun secara teoretis model BBDL memiliki keunggulan. Hambatan ini tidak hanya terjadi di tingkat guru, tetapi juga pada level kebijakan sekolah yang belum sepenuhnya mendukung integrasi teknologi dan pendekatan berbasis otak. Tanpa adanya dukungan institusional, implementasi model ini sulit berkembang secara optimal (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Hambatan selanjutnya terkait dengan kompleksitas penerapan teknologi deep learning dalam pembelajaran. Meskipun teknologi ini memiliki potensi besar, tidak semua guru memiliki kompetensi dalam mengoperasikan dan mengintegrasikannya dengan materi ajar. Penggunaan aplikasi seperti GeoGebra relatif lebih mudah, namun integrasi dengan algoritma deep learning atau simulasi berbasis kecerdasan buatan membutuhkan pemahaman yang lebih mendalam. Tanpa pendampingan yang memadai, guru dapat mengalami kesulitan teknis yang pada akhirnya menghambat efektivitas pembelajaran (Yildiz & Arpaci, 2024; Asare et al., 2025).

Hambatan lain yang tidak kalah penting adalah faktor budaya belajar. Dalam beberapa konteks, budaya belajar yang masih menekankan pada pencapaian nilai ujian dapat menjadi penghalang bagi implementasi BBDL yang lebih menekankan proses, kolaborasi, dan kreativitas. Orientasi pada hasil semata

membuat siswa kurang menghargai proses pembelajaran yang mendalam. Hal ini bertentangan dengan prinsip neurosains yang menekankan pentingnya pengalaman belajar bermakna untuk memperkuat retensi jangka panjang. Oleh karena itu, diperlukan perubahan paradigma budaya belajar agar BBDL dapat diterima secara lebih luas (Funa et al., 2024; Ambroise et al., 2025).

Secara keseluruhan, hambatan dalam implementasi BBDL di kelas mencakup keterbatasan pemahaman guru, infrastruktur, kesiapan siswa, waktu, evaluasi, resistensi terhadap perubahan, kompleksitas teknologi, serta budaya belajar. Hambatan-hambatan ini menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi BBDL membutuhkan pendekatan sistemik yang mencakup peningkatan kompetensi guru, penyediaan infrastruktur, penguatan budaya belajar, serta dukungan kebijakan. Dengan mengatasi hambatan-hambatan ini, model BBDL dapat diimplementasikan secara lebih efektif dan memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan mutu pendidikan abad ke-21.

8.2 Tantangan Integrasi Neurosains dan Teknologi

Integrasi neurosains dan teknologi dalam pendidikan, khususnya melalui model Brain-Based Deep Learning (BBDL), menghadapi sejumlah tantangan yang kompleks. Salah satu tantangan utama adalah kesenjangan pemahaman antara konsep neurosains yang bersifat biologis dengan teknologi

pendidikan yang berbasis algoritmik. Neurosains berfokus pada pemahaman mekanisme otak, emosi, memori, dan plastisitas neural, sedangkan teknologi, khususnya deep learning, menekankan pada representasi data dan komputasi. Menyatukan dua bidang yang berbeda ini membutuhkan kerangka konseptual yang kuat serta pemahaman interdisipliner yang mendalam. Tanpa jembatan konseptual yang kokoh, integrasi ini berisiko hanya bersifat simbolik tanpa menghasilkan dampak signifikan bagi praktik pembelajaran (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Tantangan lain terletak pada keterbatasan kapasitas guru dalam memahami baik prinsip neurosains maupun teknologi. Banyak guru memiliki keterbatasan dalam literasi digital maupun pengetahuan mengenai proses kerja otak. Hal ini menyebabkan kesulitan dalam mengimplementasikan pembelajaran yang sesuai dengan prinsip BBDL. Misalnya, penggunaan aplikasi GeoGebra atau simulasi berbasis AI memerlukan kemampuan teknis tertentu, sedangkan pengintegrasian aspek emosional dan motivasional dalam pembelajaran membutuhkan pemahaman neurosains yang mendalam. Keterbatasan kompetensi ganda ini menjadi hambatan nyata yang menghalangi keberhasilan integrasi (Johar et al., 2025; Nurhikmah et al., 2023).

Selain kompetensi guru, tantangan lain adalah keterbatasan infrastruktur. Integrasi teknologi deep learning dengan neurosains memerlukan perangkat keras dan

perangkat lunak yang canggih, termasuk komputer dengan kapasitas tinggi, jaringan internet stabil, serta aplikasi edukasi berbasis AI. Sekolah dengan sumber daya terbatas sering kali tidak mampu menyediakan fasilitas tersebut. Akibatnya, integrasi teknologi hanya dapat dijalankan secara parsial, sehingga manfaat optimal dari penerapan BBDL tidak sepenuhnya tercapai. Masalah ini mencerminkan adanya kesenjangan digital yang perlu segera diatasi agar inovasi pendidikan dapat berlangsung secara merata (Yildiz & Arpaci, 2024; Asare et al., 2025).

Tantangan integrasi juga muncul dari aspek metodologis. Neurosains sering kali menghasilkan temuan berdasarkan eksperimen laboratorium dengan kondisi yang terkontrol, sedangkan pembelajaran di kelas berlangsung dalam situasi yang dinamis dan penuh variabel. Menerjemahkan temuan neurosains ke dalam praktik pembelajaran yang realistis membutuhkan penyesuaian metodologis yang tidak sederhana. Demikian pula, penerapan teknologi deep learning dalam pendidikan harus disesuaikan dengan kebutuhan kurikulum, tingkat perkembangan siswa, serta budaya belajar. Kesenjangan metodologis ini sering kali menjadi hambatan dalam menciptakan integrasi yang aplikatif (Funa et al., 2024; Ambroise et al., 2025).

Isu etika juga menjadi tantangan serius dalam integrasi neurosains dan teknologi. Penggunaan teknologi berbasis deep learning dalam pendidikan berpotensi menimbulkan

permasalahan terkait privasi data, pengawasan berlebihan, serta potensi bias algoritmik. Sementara itu, penerapan temuan neurosains yang terlalu teknis dapat mengabaikan aspek kemanusiaan dalam pendidikan. Oleh karena itu, integrasi keduanya harus memperhatikan prinsip etika yang menjamin perlindungan hak siswa, keadilan, serta penggunaan teknologi untuk tujuan positif. Tanpa kesadaran etika yang kuat, integrasi ini dapat menimbulkan dampak negatif yang tidak diinginkan (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Tantangan lain adalah keterbatasan penelitian interdisipliner. Sebagian besar penelitian di bidang neurosains dan teknologi pendidikan masih berjalan secara terpisah. Kajian yang menggabungkan keduanya dalam konteks pembelajaran masih relatif terbatas. Kondisi ini membuat integrasi neurosains dan teknologi sering kali hanya bersifat konseptual tanpa dukungan empiris yang memadai. Oleh karena itu, diperlukan lebih banyak penelitian kolaboratif yang menghubungkan neurosains, kecerdasan buatan, dan pendidikan, sehingga menghasilkan model integratif yang valid dan dapat diterapkan di lapangan (Kim et al., 2025; Fang et al., 2025).

Selain itu, tantangan muncul dari budaya belajar yang masih berorientasi pada hasil akhir. Integrasi neurosains menekankan pentingnya proses belajar yang bermakna, sedangkan teknologi sering digunakan untuk mempercepat capaian akademik. Perbedaan orientasi ini menimbulkan

ketidaksesuaian dalam praktik implementasi. Jika orientasi pembelajaran hanya berfokus pada nilai ujian, maka manfaat neurosains dan teknologi dalam mendukung pembelajaran mendalam tidak dapat tercapai. Oleh karena itu, diperlukan perubahan paradigma agar integrasi benar-benar mendukung tujuan pendidikan holistik (Funa et al., 2024; Ambroise et al., 2025).

Hambatan juga muncul dari keterbatasan waktu dan kurikulum. Model BBDL yang mengintegrasikan neurosains dan teknologi membutuhkan tahapan pembelajaran yang lebih panjang dan mendalam. Namun, kurikulum yang padat sering kali membatasi fleksibilitas guru dalam menerapkan pendekatan ini. Guru dituntut menyelesaikan target kurikulum sehingga sulit meluangkan waktu untuk menerapkan pembelajaran berbasis otak dengan dukungan teknologi secara optimal. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi neurosains dan teknologi membutuhkan kebijakan kurikulum yang lebih adaptif (Subba et al., 2025; Halkiopoulou et al., 2025).

Secara keseluruhan, tantangan integrasi neurosains dan teknologi dalam pembelajaran mencakup kesenjangan konseptual, keterbatasan kompetensi guru, infrastruktur, metodologi, isu etika, keterbatasan penelitian, orientasi budaya belajar, serta kendala kurikulum. Tantangan-tantangan ini menegaskan bahwa integrasi BBDL memerlukan dukungan sistemik dari berbagai pihak, mulai dari pendidik, peneliti,

hingga pembuat kebijakan. Dengan mengatasi hambatan-hambatan tersebut, integrasi neurosains dan teknologi dapat memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan mutu pembelajaran dan membekali siswa dengan keterampilan yang relevan untuk menghadapi tantangan abad ke-21.

8.3 Faktor Guru, Siswa, dan Lingkungan Belajar

Faktor guru, siswa, dan lingkungan belajar merupakan elemen fundamental yang sangat menentukan keberhasilan implementasi model Brain-Based Deep Learning (BBDL) dalam pendidikan. Guru memiliki peran sentral sebagai fasilitator, inovator, sekaligus pengelola proses belajar yang kompleks. Siswa berperan aktif sebagai subjek yang terlibat langsung dalam aktivitas kognitif, emosional, dan sosial. Lingkungan belajar, baik fisik maupun non-fisik, menjadi wadah yang memengaruhi kualitas interaksi dan pengalaman belajar. Ketiga faktor ini saling berhubungan erat, sehingga ketidakseimbangan pada salah satunya dapat menghambat efektivitas penerapan model BBDL (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Guru merupakan kunci keberhasilan dalam mengimplementasikan model berbasis otak. Kompetensi guru dalam memahami prinsip neurosains, strategi pembelajaran aktif, serta pemanfaatan teknologi sangat menentukan efektivitas pembelajaran. Guru yang mampu mengelola tahap persiapan, aktivasi, elaborasi, hingga refleksi secara tepat akan

menciptakan pengalaman belajar yang bermakna bagi siswa. Namun, keterbatasan pemahaman tentang neurosains dan literasi digital masih menjadi kendala di banyak sekolah. Oleh karena itu, pengembangan kapasitas guru melalui pelatihan dan pendampingan berkelanjutan menjadi faktor penting yang harus diperhatikan (Nurhikmah et al., 2023; Johar et al., 2025).

Selain kompetensi, sikap dan motivasi guru juga memengaruhi penerapan BBDL. Guru yang memiliki motivasi intrinsik tinggi cenderung lebih inovatif dalam menggunakan strategi pembelajaran baru. Sebaliknya, resistensi terhadap perubahan dapat menghambat adopsi model ini. Lingkungan sekolah yang mendukung, misalnya dengan memberikan penghargaan atas inovasi guru atau menyediakan komunitas belajar profesional, dapat meningkatkan motivasi guru untuk terus mengembangkan praktik berbasis neurosains dan teknologi (Kim et al., 2025; Fang et al., 2025).

Dari sisi siswa, keberhasilan implementasi BBDL sangat bergantung pada kesiapan mereka dalam beradaptasi dengan pendekatan baru. Siswa dituntut untuk aktif, berpikir kritis, kreatif, serta mampu bekerja sama dengan teman sebaya. Namun, tidak semua siswa terbiasa dengan pola belajar seperti ini. Sebagian masih lebih nyaman dengan metode tradisional yang berorientasi pada hafalan. Tantangan ini menuntut adanya strategi bertahap dalam memperkenalkan BBDL agar siswa dapat menyesuaikan diri tanpa mengalami tekanan yang berlebihan (Funa et al., 2024; Ambroise et al., 2025).

Aspek motivasi dan emosi siswa juga menjadi faktor penting dalam keberhasilan model ini. Neurosains menunjukkan bahwa emosi positif dan motivasi intrinsik memperkuat pembentukan memori jangka panjang serta meningkatkan keterlibatan siswa dalam proses belajar. Oleh karena itu, guru harus mampu menciptakan iklim kelas yang aman, nyaman, dan mendukung agar siswa termotivasi untuk terlibat aktif. Misalnya, pemberian tantangan yang sesuai dengan tingkat kemampuan siswa dapat meningkatkan motivasi tanpa menimbulkan kecemasan berlebihan (Subba et al., 2025; Chechan et al., 2025).

Lingkungan belajar juga memainkan peran yang signifikan dalam penerapan BBDL. Lingkungan fisik, seperti ruang kelas yang fleksibel, pencahayaan, dan tata letak meja, dapat memengaruhi kenyamanan dan konsentrasi siswa. Lingkungan non-fisik, seperti budaya sekolah yang kolaboratif dan dukungan dari pihak manajemen, juga berperan penting. Lingkungan belajar yang mendukung interaksi, kreativitas, serta penggunaan teknologi akan memperkuat efektivitas model ini. Sebaliknya, lingkungan yang kaku dan kurang fleksibel dapat menghambat kreativitas siswa (Halkiopoulou et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Selain faktor internal sekolah, dukungan eksternal seperti peran orang tua dan kebijakan pendidikan juga tidak bisa diabaikan. Orang tua yang memahami pentingnya pembelajaran berbasis neurosains dapat memberikan

dukungan emosional dan motivasional di rumah. Kebijakan pendidikan yang adaptif, seperti penyediaan fasilitas teknologi atau pelatihan guru, turut memperkuat penerapan model ini. Dengan demikian, keberhasilan BBDL memerlukan sinergi antara faktor internal sekolah dan faktor eksternal di luar sekolah (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Interaksi antara guru, siswa, dan lingkungan belajar menciptakan ekosistem pendidikan yang dinamis. Jika guru mampu memfasilitasi pembelajaran yang sesuai dengan prinsip neurosains, siswa termotivasi untuk belajar aktif, dan lingkungan mendukung proses ini, maka implementasi BBDL dapat berlangsung optimal. Namun, jika salah satu faktor melemah, efektivitas model dapat menurun. Oleh karena itu, pendekatan sistemik yang melibatkan semua faktor harus diutamakan agar model ini benar-benar memberikan dampak signifikan terhadap hasil belajar siswa (Adiansha et al., 2021; Ambroise et al., 2025).

Secara keseluruhan, faktor guru, siswa, dan lingkungan belajar merupakan tiga pilar utama dalam implementasi BBDL. Guru menjadi fasilitator utama, siswa sebagai subjek aktif, dan lingkungan sebagai wadah yang mendukung proses pembelajaran. Ketiganya saling terkait dan harus dipandang secara holistik. Dengan memperhatikan keseimbangan antara ketiga faktor ini, tantangan dalam implementasi dapat diminimalisasi, dan prospek pengembangan BBDL dapat

diwujudkan secara lebih efektif untuk mendukung pendidikan abad ke-21.

8.4 Prospek Pengembangan Model di Era Kecerdasan Buatan

Perkembangan pesat kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) membuka peluang besar bagi pengembangan model Brain-Based Deep Learning (BBDL) dalam pendidikan. AI menyediakan berbagai instrumen yang dapat memperkuat prinsip neurosains dalam pembelajaran, seperti sistem pembelajaran adaptif, analisis pola belajar siswa, serta pemberian umpan balik secara real-time. Dalam konteks ini, BBDL memiliki prospek yang signifikan karena integrasi antara mekanisme kerja otak dengan algoritma AI dapat menciptakan pembelajaran yang lebih personal, kontekstual, dan responsif terhadap kebutuhan individu. Dengan demikian, era kecerdasan buatan menjadi momentum penting untuk mengoptimalkan implementasi BBDL di berbagai jenjang pendidikan (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Salah satu prospek pengembangan model BBDL di era AI adalah munculnya pembelajaran adaptif yang mampu menyesuaikan materi, metode, dan evaluasi dengan profil kognitif setiap siswa. Algoritma deep learning dapat memproses data hasil belajar siswa untuk mengidentifikasi kelemahan, kekuatan, serta gaya belajar yang dominan. Integrasi ini sejalan dengan prinsip neurosains yang

menekankan pada keunikan otak setiap individu. Dengan demikian, prospek BBDL di era AI adalah menciptakan pengalaman belajar yang lebih personal dan sesuai dengan kebutuhan spesifik siswa (Yildiz & Arpaci, 2024; Asare et al., 2025).

Penggunaan AI juga berpotensi memperluas dimensi visualisasi dalam pembelajaran matematika melalui integrasi dengan aplikasi seperti GeoGebra. Teknologi berbasis simulasi visual memungkinkan konsep abstrak dapat divisualisasikan dengan lebih interaktif dan realistis. Dalam konteks BBDL, visualisasi ini memperkuat proses aktivasi otak dan membangun koneksi neural yang lebih kuat. AI dapat meningkatkan kemampuan GeoGebra dengan menyediakan simulasi yang lebih kompleks, otomatisasi analisis, serta rekomendasi berbasis data. Prospek ini membuka jalan bagi pembelajaran matematika yang lebih bermakna dan mendalam (Johar et al., 2025; Nurhikmah et al., 2023).

Prospek lain yang menjanjikan adalah pemanfaatan AI dalam evaluasi pembelajaran. Model BBDL yang menekankan keterampilan berpikir tingkat tinggi, kreativitas, dan kolaborasi membutuhkan instrumen evaluasi yang autentik. AI dapat mendukung hal ini dengan menghadirkan rubrik otomatis, analisis teks, serta evaluasi berbasis performa yang akurat. Selain itu, AI dapat memberikan umpan balik formatif yang cepat dan personal, sehingga siswa dapat segera mengetahui area yang perlu diperbaiki. Dengan demikian, integrasi AI

memperkuat proses evaluasi dalam kerangka BBDL (Adiansha et al., 2021; Ambroise et al., 2025).

Era AI juga menawarkan prospek dalam pengembangan pembelajaran kolaboratif. Platform berbasis AI mampu memfasilitasi interaksi antar siswa melalui diskusi virtual, simulasi kolaboratif, hingga proyek berbasis tim yang bersifat lintas batas geografis. Hal ini sesuai dengan prinsip BBDL yang menekankan pentingnya interaksi sosial dan emosi dalam proses pembelajaran. Dengan bantuan AI, kolaborasi dapat lebih mudah difasilitasi, dipantau, serta dianalisis untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang dinamika kelompok (Funa et al., 2024; Ambroise et al., 2025).

Meskipun demikian, prospek pengembangan BBDL di era AI juga harus mempertimbangkan tantangan etis. AI yang digunakan untuk mendukung pembelajaran harus bebas dari bias algoritmik, menghormati privasi data, serta tidak mengurangi peran manusia dalam pendidikan. BBDL harus tetap menempatkan guru sebagai fasilitator utama, sementara AI berfungsi sebagai pendukung yang memperkaya pengalaman belajar. Dengan pendekatan ini, prospek pengembangan BBDL di era AI tidak hanya menghasilkan pembelajaran yang efektif, tetapi juga etis dan berorientasi pada kemanusiaan (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Prospek BBDL juga mencakup pengembangan penelitian interdisipliner yang menghubungkan neurosains, pendidikan, dan kecerdasan buatan. Penelitian semacam ini

berpotensi menghasilkan model pembelajaran baru yang lebih valid, aplikatif, dan adaptif terhadap perubahan zaman. Misalnya, penggabungan data hasil neuroimaging dengan analisis AI dapat memberikan wawasan mendalam mengenai bagaimana otak belajar dalam konteks digital. Hasil penelitian ini akan menjadi landasan penting bagi penyempurnaan model BBDL di masa depan (Kim et al., 2025; Fang et al., 2025).

Selain di level kelas, prospek pengembangan BBDL di era AI juga meluas ke tingkat kebijakan pendidikan. Integrasi neurosains dan AI dapat digunakan oleh pengambil kebijakan untuk merancang kurikulum adaptif, program pelatihan guru, serta strategi pengembangan literasi digital siswa. Dengan memanfaatkan big data dan algoritma AI, kebijakan pendidikan dapat lebih berbasis bukti dan responsif terhadap kebutuhan nyata di lapangan. Prospek ini menunjukkan bahwa BBDL tidak hanya relevan di level mikro kelas, tetapi juga pada level makro kebijakan pendidikan nasional (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Secara keseluruhan, prospek pengembangan model BBDL di era kecerdasan buatan sangatlah menjanjikan. Integrasi AI memungkinkan personalisasi belajar, memperkuat visualisasi konsep, meningkatkan evaluasi autentik, serta mendukung pembelajaran kolaboratif. Namun, prospek ini juga menuntut perhatian serius terhadap aspek etika, kesiapan guru, dan dukungan kebijakan. Dengan pendekatan yang komprehensif, BBDL di era AI dapat menjadi salah satu inovasi

paling signifikan dalam pendidikan abad ke-21, membawa transformasi nyata terhadap cara siswa belajar dan guru mengajar.

8.5 Implikasi bagi Penelitian dan Praktik Pendidikan

Implikasi model Brain-Based Deep Learning (BBDL) bagi penelitian dan praktik pendidikan sangat luas karena model ini menggabungkan dua ranah besar: neurosains dan kecerdasan buatan. Dari sisi penelitian, BBDL membuka peluang untuk memperluas kajian interdisipliner yang melibatkan psikologi kognitif, teknologi pendidikan, serta pedagogi. Para peneliti dapat menguji efektivitas model ini melalui eksperimen di kelas, studi longitudinal, atau penelitian berbasis data besar (big data). Integrasi ini memungkinkan peneliti memahami bagaimana otak memproses informasi dalam konteks pembelajaran digital, serta bagaimana algoritma deep learning dapat memperkuat proses tersebut (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Dalam praktik pendidikan, implikasi BBDL terletak pada pergeseran paradigma mengajar dan belajar. Guru tidak lagi berperan sebagai satu-satunya sumber pengetahuan, tetapi menjadi fasilitator yang merancang pengalaman belajar sesuai prinsip otak. Sementara itu, teknologi AI berfungsi sebagai mitra untuk mendukung personalisasi pembelajaran. Implikasi ini mendorong terciptanya pembelajaran yang lebih adaptif, responsif, dan sesuai dengan kebutuhan individual siswa.

Dengan demikian, BBDL berpotensi mengurangi homogenitas pembelajaran yang selama ini menjadi kelemahan model tradisional (Johar et al., 2025; Nurhikmah et al., 2023).

Implikasi penting lain bagi penelitian adalah kebutuhan untuk mengembangkan instrumen evaluasi baru yang sesuai dengan karakteristik BBDL. Evaluasi tradisional berbasis tes tertulis tidak lagi cukup untuk mengukur keterampilan berpikir kritis, kreativitas, dan kolaborasi yang menjadi inti model ini. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut perlu mengembangkan instrumen berbasis performa, rubrik observasi, serta asesmen digital yang dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai capaian siswa. Hal ini akan memperkaya literatur evaluasi pendidikan berbasis neurosains dan teknologi (Adiansha et al., 2021; Ambroise et al., 2025).

Dari perspektif praktik, guru memerlukan pelatihan intensif agar mampu mengintegrasikan prinsip neurosains dan teknologi deep learning secara harmonis. Implikasi ini menuntut lembaga pendidikan untuk menyediakan program pengembangan profesional yang berkelanjutan. Program tersebut dapat mencakup workshop penggunaan aplikasi GeoGebra, pelatihan literasi digital, serta penguatan pemahaman tentang mekanisme kerja otak. Dengan cara ini, praktik pembelajaran di kelas dapat lebih selaras dengan prinsip BBDL, sehingga pengalaman belajar siswa menjadi lebih bermakna (Kim et al., 2025; Fang et al., 2025).

Bagi penelitian, BBDL juga membuka peluang untuk mengeksplorasi hubungan antara data neurokognitif dengan performa akademik siswa. Misalnya, penelitian dapat memanfaatkan data dari neuroimaging untuk melihat bagaimana aktivitas otak siswa berubah ketika menggunakan teknologi pembelajaran berbasis AI. Integrasi data ini akan memberikan wawasan mendalam tentang efektivitas BBDL serta memperkuat validitas teoretis model. Implikasi ini menegaskan pentingnya kolaborasi antara peneliti di bidang neurosains, teknologi, dan pendidikan (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Implikasi lainnya adalah perlunya perubahan desain kurikulum agar lebih mendukung penerapan BBDL. Kurikulum tradisional yang padat materi perlu disesuaikan dengan pendekatan berbasis otak yang menekankan kualitas pemahaman, bukan kuantitas hafalan. Penelitian dapat berperan dalam memberikan rekomendasi kurikulum yang lebih adaptif terhadap prinsip neurosains dan perkembangan teknologi. Sementara itu, praktik pendidikan di sekolah harus diarahkan untuk menciptakan ruang yang lebih fleksibel bagi implementasi model ini (Subba et al., 2025; Halkiopoulou et al., 2025).

Bagi guru dan praktisi pendidikan, implikasi model ini adalah munculnya kebutuhan untuk membangun budaya belajar yang lebih kolaboratif dan reflektif. Siswa harus dilatih untuk terbiasa mengeksplorasi, berdiskusi, dan mengelaborasi

pengetahuan. Penelitian lebih lanjut dapat menilai sejauh mana penerapan BBDL meningkatkan keterampilan abad ke-21 seperti critical thinking, creativity, collaboration, dan communication (4C). Dengan demikian, model ini tidak hanya berdampak pada kognisi, tetapi juga pada pembentukan karakter siswa yang adaptif terhadap tuntutan global (Funa et al., 2024; Chechan et al., 2025).

Implikasi penting lain adalah kebutuhan untuk mengembangkan ekosistem pendidikan yang lebih ramah teknologi. Sekolah perlu menyiapkan infrastruktur digital yang mendukung integrasi neurosains dengan AI. Penelitian dapat berkontribusi dengan merancang model ekosistem digital sekolah yang ideal, sementara praktik pendidikan dapat menguji implementasinya dalam berbagai konteks. Dengan demikian, BBDL dapat diterapkan tidak hanya di sekolah unggulan, tetapi juga di sekolah dengan sumber daya terbatas melalui strategi adaptif (Yildiz & Arpaci, 2024; Asare et al., 2025).

Secara keseluruhan, implikasi BBDL bagi penelitian dan praktik pendidikan mencakup transformasi dalam desain kurikulum, evaluasi, pelatihan guru, infrastruktur teknologi, hingga pengembangan budaya belajar. Model ini memberikan landasan kuat untuk penelitian interdisipliner dan menawarkan pendekatan baru dalam praktik pembelajaran. Dengan dukungan penelitian yang berkelanjutan dan implementasi yang konsisten, BBDL dapat menjadi salah satu inovasi paling

berpengaruh dalam meningkatkan kualitas pendidikan di era kecerdasan buatan.

8.6Arah Baru Brain-Based Deep Learning di Masa Depan

Arah baru pengembangan Brain-Based Deep Learning (BBDL) di masa depan menekankan pada integrasi yang semakin erat antara neurosains, teknologi kecerdasan buatan (AI), serta praktik pedagogi yang humanistik. Kombinasi ini diharapkan mampu menciptakan model pembelajaran yang tidak hanya efektif secara kognitif, tetapi juga mendukung perkembangan emosional dan sosial siswa. Seiring dengan kemajuan riset di bidang neurosains, pemahaman tentang bagaimana otak memproses informasi, membangun memori, dan merespons stimulus eksternal akan semakin detail. Pengetahuan ini dapat menjadi fondasi untuk merancang pembelajaran yang lebih personal, dinamis, dan sesuai dengan kebutuhan individu (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Masa depan BBDL akan diarahkan pada pengembangan sistem pembelajaran adaptif yang mampu menyesuaikan secara otomatis dengan kondisi kognitif dan emosional siswa. Teknologi AI dapat digunakan untuk memantau pola belajar, tingkat motivasi, serta kondisi emosional siswa melalui data interaksi digital. Hasil analisis tersebut kemudian dapat digunakan untuk memberikan rekomendasi strategi belajar yang lebih efektif dan sesuai. Pendekatan ini tidak hanya

memperkuat prinsip neurosains tentang keunikan otak manusia, tetapi juga mendukung terciptanya pembelajaran yang lebih inklusif (Yildiz & Arpaci, 2024; Asare et al., 2025).

Arah baru juga mencakup eksplorasi penggunaan teknologi realitas virtual (VR) dan augmented reality (AR) dalam implementasi BBDL. Teknologi ini dapat memberikan pengalaman belajar yang imersif, di mana siswa dapat berinteraksi dengan representasi visual dari konsep abstrak. Dalam konteks matematika, misalnya, VR dapat digunakan untuk mengeksplorasi ruang tiga dimensi, sedangkan AR dapat membantu siswa memahami konsep aljabar melalui simulasi visual. Dengan demikian, masa depan BBDL akan semakin erat kaitannya dengan pengembangan media interaktif yang memaksimalkan kapasitas otak dalam memahami informasi kompleks (Johar et al., 2025; Nurhikmah et al., 2023).

Selain itu, arah baru BBDL juga menekankan pentingnya penelitian longitudinal untuk mengukur dampak jangka panjang dari penerapannya. Selama ini, sebagian besar penelitian lebih fokus pada hasil jangka pendek, seperti peningkatan motivasi atau hasil ujian. Namun, penelitian masa depan perlu melihat bagaimana penerapan BBDL memengaruhi keterampilan berpikir kritis, kreativitas, dan kolaborasi dalam jangka panjang. Penelitian longitudinal semacam ini akan memperkuat landasan teoretis dan memberikan bukti empiris yang lebih komprehensif (Kim et al., 2025; Fang et al., 2025).

Dalam ranah kebijakan pendidikan, arah baru BBDL akan berfokus pada penerapan skala luas melalui kurikulum yang fleksibel. Pemerintah dan lembaga pendidikan di masa depan diharapkan dapat mengintegrasikan prinsip-prinsip BBDL dalam kebijakan nasional, termasuk dalam perencanaan kurikulum, pelatihan guru, dan penyediaan infrastruktur teknologi. Kebijakan yang mendukung akan menjadi pendorong utama dalam memperluas implementasi BBDL sehingga tidak hanya terbatas pada sekolah unggulan, tetapi juga dapat diterapkan di berbagai konteks pendidikan dengan beragam kondisi (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Arah baru BBDL juga menekankan pada kolaborasi lintas disiplin. Integrasi neurosains, teknologi, pendidikan, serta psikologi perkembangan membutuhkan kerja sama yang intensif antarpeneliti dari berbagai bidang. Kolaborasi ini diharapkan dapat menghasilkan inovasi baru, seperti pengembangan algoritma AI yang lebih humanistik atau media pembelajaran berbasis neurosains yang lebih aplikatif. Dengan demikian, arah masa depan BBDL akan semakin memperkuat karakter interdisipliner yang menjadi ciri khasnya (Funa et al., 2024; Chechan et al., 2025).

Dalam praktik pendidikan, arah baru BBDL akan lebih menekankan pada pembentukan keterampilan abad ke-21. Keterampilan seperti critical thinking, creativity, collaboration, dan communication (4C) akan menjadi fokus utama. BBDL dapat mendukung hal ini dengan memfasilitasi pembelajaran

berbasis proyek, diskusi kolaboratif, dan pemecahan masalah kontekstual. Dengan mengintegrasikan neurosains dan teknologi, siswa diharapkan mampu mengembangkan keterampilan yang relevan untuk menghadapi tantangan global, sekaligus memiliki daya adaptasi tinggi terhadap perubahan zaman (Subba et al., 2025; Halkiopoulos et al., 2025).

Arah baru juga akan menekankan pada inklusivitas dalam pendidikan. BBDL di masa depan harus mampu merangkul semua jenis siswa, termasuk mereka yang memiliki kebutuhan khusus. Teknologi AI dan perangkat berbasis neurosains dapat dimanfaatkan untuk menciptakan pembelajaran yang lebih ramah bagi siswa dengan hambatan belajar. Dengan demikian, BBDL dapat berperan dalam menciptakan sistem pendidikan yang lebih adil dan merata, sesuai dengan prinsip pendidikan inklusif (Ambroise et al., 2025; Vieira et al., 2025).

Secara keseluruhan, arah baru BBDL di masa depan mencakup pengembangan sistem pembelajaran adaptif berbasis AI, pemanfaatan VR/AR, penelitian longitudinal, kebijakan pendidikan fleksibel, kolaborasi lintas disiplin, serta penekanan pada keterampilan abad ke-21 dan inklusivitas. Semua arah tersebut menunjukkan bahwa BBDL bukan hanya sekadar model pembelajaran, melainkan sebuah paradigma baru yang mampu mengubah wajah pendidikan. Jika arah ini dapat diimplementasikan secara konsisten, maka BBDL

berpotensi menjadi salah satu inovasi paling berpengaruh dalam membentuk generasi masa depan yang cerdas, kreatif, dan berdaya saing.

BAB 10 PENUTUP

9.1 Kesimpulan Umum

Secara keseluruhan, buku ini menegaskan bahwa Model Brain-Based Deep Learning (BBDL) merupakan pendekatan inovatif yang mengintegrasikan prinsip neurosains, teknologi kecerdasan buatan, serta praktik pedagogi modern dalam rangka meningkatkan kualitas pendidikan, khususnya pada bidang matematika. BBDL didesain berdasarkan pemahaman mendalam mengenai mekanisme kerja otak dalam menerima, mengolah, menyimpan, dan mereproduksi informasi, sehingga proses pembelajaran menjadi lebih selaras dengan potensi alami peserta didik. Model ini menekankan pentingnya tahap persiapan, aktivasi, elaborasi, hingga refleksi dalam menciptakan pengalaman belajar yang utuh dan bermakna. Integrasi dengan teknologi deep learning, media interaktif seperti GeoGebra, serta pemanfaatan alat berbasis AI menambah dimensi baru dalam pembelajaran yang adaptif, personal, dan kontekstual. Buku ini juga menguraikan bagaimana model BBDL mampu menjawab tuntutan pendidikan abad ke-21 dengan menekankan pengembangan keterampilan berpikir kritis, kreatif, kolaboratif, serta komunikasi. Selain itu, buku ini membahas tantangan, keunggulan, keterbatasan, serta prospek BBDL di masa depan, termasuk implikasi bagi penelitian dan praktik pendidikan.

Dengan demikian, BBDL dapat dipandang sebagai paradigma baru yang mampu merevolusi proses pembelajaran menuju arah yang lebih efektif, humanistik, dan berbasis sains.

Berdasarkan kajian yang telah dipaparkan pada setiap bab, dapat disimpulkan bahwa penerapan Brain-Based Deep Learning tidak hanya memberikan dampak positif terhadap hasil belajar kognitif, tetapi juga memperkuat aspek afektif dan psikomotor peserta didik. Lingkungan belajar yang kompatibel dengan cara kerja otak, dipadukan dengan dukungan teknologi berbasis AI, mampu menciptakan pembelajaran yang menyenangkan, menantang, dan bermakna. Guru berperan sebagai fasilitator yang menghubungkan antara prinsip neurosains dengan praktik pembelajaran, sementara siswa ditempatkan sebagai subjek aktif yang berinteraksi dengan berbagai stimulus kognitif, emosional, dan sosial. Evaluasi yang dilakukan secara otentik melalui tes, observasi, rubrik, hingga penilaian berbasis kinerja memastikan ketercapaian tujuan pembelajaran secara komprehensif. Lebih jauh, buku ini juga menyoroti urgensi penelitian lanjutan, baik dari sisi desain model, instrumen evaluasi, maupun kebijakan pendidikan yang mendukung. Prospek pengembangan BBDL di masa depan sangat erat dengan perkembangan kecerdasan buatan, big data, serta teknologi realitas virtual dan augmented reality, yang diprediksi mampu memperkuat implementasi model ini di berbagai konteks pendidikan. Dengan demikian, dapat ditegaskan bahwa BBDL memiliki kontribusi strategis dalam

menciptakan sistem pendidikan yang lebih adaptif, inovatif, dan relevan dengan tantangan global, sekaligus membuka jalan bagi pembentukan generasi yang cerdas, kreatif, dan berdaya saing tinggi.

9.2 Keterbatasan Model dan Buku

Meskipun Model Brain-Based Deep Learning (BBDL) dikembangkan berdasarkan integrasi antara neurosains, teknologi kecerdasan buatan, dan prinsip pedagogis, namun model ini masih memiliki keterbatasan konseptual yang perlu diperhatikan. Pertama, validitas teoretis dari model ini masih membutuhkan penguatan melalui kajian empiris yang lebih mendalam, khususnya dalam menguji hubungan langsung antara mekanisme kerja otak dan penerapan algoritma deep learning dalam proses pembelajaran. Kedua, BBDL hingga saat ini cenderung banyak diaplikasikan pada konteks pembelajaran matematika, sehingga penerapan pada mata pelajaran lain masih memerlukan adaptasi yang lebih spesifik. Selain itu, keterbatasan konseptual juga terletak pada generalisasi model, di mana belum ada bukti yang cukup mengenai efektivitas BBDL pada berbagai jenjang pendidikan dengan karakteristik siswa yang beragam. Model ini juga belum sepenuhnya mampu menjawab isu kompleksitas pendidikan di era digital, misalnya bagaimana menghadapi distraksi kognitif akibat penggunaan teknologi berlebihan atau bagaimana menyeimbangkan aspek emosional dan sosial dalam

pembelajaran daring. Oleh karena itu, keterbatasan konseptual ini perlu dipandang sebagai ruang terbuka untuk pengembangan teori lebih lanjut yang mampu memperkuat posisi BBDL sebagai model pembelajaran yang valid dan komprehensif.

Dari sisi implementasi, BBDL masih menghadapi tantangan besar, terutama terkait kesiapan sumber daya manusia dan infrastruktur pendidikan. Guru sebagai aktor utama sering kali belum mendapatkan pelatihan yang memadai untuk memahami prinsip neurosains maupun keterampilan teknis dalam memanfaatkan kecerdasan buatan dan aplikasi berbasis deep learning. Kondisi ini menyebabkan kesenjangan antara desain model dengan praktik di lapangan. Selain itu, keterbatasan sarana dan prasarana, seperti akses perangkat komputer, jaringan internet yang stabil, serta perangkat lunak yang sesuai, menjadi hambatan utama di sekolah dengan fasilitas terbatas. Di samping itu, implementasi BBDL juga membutuhkan waktu pembelajaran yang lebih fleksibel untuk menjalankan sintaks pembelajaran yang meliputi tahap persiapan, aktivasi, elaborasi, refleksi, dan evaluasi. Dalam praktiknya, keterbatasan alokasi waktu di kelas sering kali membuat penerapan model tidak berjalan optimal. Faktor lingkungan belajar yang belum mendukung, termasuk resistensi terhadap perubahan dan keterbatasan dukungan kebijakan, turut menjadi kendala signifikan. Dengan demikian, keterbatasan implementasi praktis ini menunjukkan bahwa

meskipun BBDL potensial, pelaksanaannya tetap menuntut kesiapan sistemik dan dukungan penuh dari seluruh ekosistem pendidikan.

Selain keterbatasan model, buku ini sebagai sebuah karya akademik juga memiliki batasan tertentu. Walaupun telah berusaha menyajikan uraian komprehensif melalui kajian teoretis, landasan neurosains, integrasi teknologi, hingga skenario implementasi di kelas, buku ini masih terbatas dalam aspek pembuktian empiris. Sebagian besar pembahasan masih didominasi oleh kajian literatur dan analisis konseptual, sementara penelitian berbasis data lapangan secara langsung masih sangat diperlukan untuk memperkuat keabsahan isi. Selain itu, meskipun sumber literatur yang digunakan berasal dari referensi mutakhir, cakupan penelitian yang dianalisis masih dapat diperluas, terutama dari konteks global dengan latar belakang sosial, budaya, dan ekonomi yang berbeda. Buku ini juga belum secara mendalam membahas isu etika dan teknis dalam penggunaan teknologi berbasis AI, seperti privasi data, keamanan digital, serta dampak psikososial penggunaan teknologi intensif bagi siswa. Dengan menyadari keterbatasan-keterbatasan tersebut, buku ini diharapkan menjadi pijakan awal yang membuka ruang diskusi, pengembangan teori, serta penelitian lanjutan untuk menyempurnakan konsep dan praktik BBDL.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiansha, A. A. (2019). *Pengaruh Brain Based Learning dan Problem Based Learning terhadap Kemampuan Komunikasi Matematis dari Perspektif Kreativitas Siswa*. Seminar Nasional Taman Siswa Bima.
- Adiansha, A. A., Khatimah, H., & Asriyadin. (2020). *Pengembangan Kreativitas dalam Pembelajaran Matematika melalui Model Brain Based Learning Siswa Sekolah Dasar*. Jurnal Pendidikan MIPA.
- Adiansha, A. A., Sani, K. (2021). *Pengaruh Model Brain Based Learning dan Problem Based Learning terhadap Keterampilan Berpikir Kompleks Matematis ditinjau dari Kreativitas Siswa Sekolah Dasar di Kabupaten Bima*. Jurnal Pendidikan MIPA, 11(1), 36-44. <https://ejournal.tsb.ac.id/index.php/jpm/article/view/454>
- Adiansha, A. A., Sani, K., Sudarwo, R., Nasution, N., & Mulyadi, M. (2021). *Brain-based learning: How does mathematics creativity develop in elementary school students?* *Premiere Educandum: Jurnal Pendidikan Dasar dan Pembelajaran*, 11(2), 191. <https://doi.org/10.25273/pe.v11i2.8950>
- Adiansha, A. A., Sumantri, M. S., & Makmuri, M. (2018). *Pengaruh model brain based learning terhadap kemampuan komunikasi matematis siswa ditinjau dari*

keaktivitas. Premiere Educandum: Jurnal Pendidikan Dasar dan Pembelajaran.

Aiwan, A., Kustati, M., & Sepriyanti, N. (2023). *Teori-teori belajar bermunculan Teori Belajar Muncul Bersamaan Dengan Teori Belajar Kognitif.* Jurnal Ilmiah Kanderang Tingang. <https://doi.org/10.37304/jikt.v14i2.238>

Al-Balushi, K. A., & Al-Balushi, S. M. (2018). *Effectiveness of Brain-Based Learning for Grade Eight Students' Direct and Postponed Retention in Science.* International Journal of Instruction, 11(3), 525-538. <https://doi.org/10.12973/iji.2018.11336a>

Al-Tarawneh, A., Altarawneh, A. F., & Al-Aziz Karaki, W. K. A. (2021). *Effect of Brain-based Learning in Developing Spatial Ability of Ninth Grade Students with Low Achievement in Mathematics.* Journal of Educational and Social Research, 11(5), 141. <https://doi.org/10.36941/jesr-2021-0112>

Ambarwati, D., & Kurniasih, M. D. (2021). *Pengaruh Problem Based Learning Berbantuan Media Youtube terhadap Kemampuan Literasi Numerasi Siswa.* Jurnal Cendekia: Jurnal Pendidikan Matematika, 5(3). <https://doi.org/10.31004/cendekia.v5i3.829>

Ambroise, C., Grigis, A., Houenou, J., & Frouin, V. (2025). *Interpretable and integrative deep learning for discovering brain-behaviour associations.* Scientific

Reports, 15(1), 2312.

<https://www.nature.com/articles/s41598-024-85032-5>

Amjad, A. I., Habib, M., Tabassum, U., Alvi, G. F., Taseer, N. A., & Noreen, I. (2023). *The impact of Brain-Based Learning on students' intrinsic motivation to learn and perform in mathematics: A neuroscientific study in school psychology*. International Electronic Journal of Elementary Education, 16(1), 111-122. <https://doi.org/10.26822/iejee.2023.318>

Asare, B., Arthur, Y. D., & Obeng, B. A. (2025). Mathematics self-belief and mathematical creativity of university students: The role of problem-solving skills. Cogent Education, 12(1). <https://doi.org/10.1080/2331186X.2025.2456438>

Asriyadin, Yulianci, S., Kaniawati, I., & Liliawati, W. (2021). *The formation of students' scientific attitudes through the neuroscience-based inquiry model in physics learning*. In AIP Conference Proceedings (Vol. 838038, p. 050028). <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/838038>

Asriyadin, Yulianci, S., Adiansha, A. A., Kaniawati, I., Liliawati, W., & Muliana. (2021). *The development of character and scientific knowledge of students through inquiry-based learning neuroscience approach*. Journal of Physics: Conference Series, 1806(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1806/1/012019>

Azzahra, W., & Dwiputra, D. F. K. (2023). *A Systematic Literature Review on Enhancing the Success of Independent*

Curriculum through Brain-Based Learning Innovation Implementation. Indonesian Journal of Learning and Advanced Education.

<https://doi.org/10.23917/ijolae.v5i3.22318>

Azzahra, W., & Dwiputra, D. F. K. (2024). *Unraveling the evolution of brain-based learning in Indonesia: An in-depth exploration through systematic literature review.* International Journal of Educational Reform, 33(4), 483-502. <https://doi.org/10.1177/10567879241258134>

Bada, A. A., & Jita, L. C. (2022). *Integrating Brain-based Learning in the Science Classroom: A Systematic Review.* International Journal of Pedagogy and Teacher Education. <https://doi.org/10.20961/ijpte.v6i1.57377>

Chechan, B., Ampadu, E., & Pears, A. (2025). *Student strategies for digital tool use in mathematical problem solving.* International Journal of Mathematical Education in Science and Technology, 1-20. <https://doi.org/10.1080/0020739X.2025.2457361>

Creswell, J. W. (2020). *Penelitian kualitatif & desain riset: Memilih di antara lima pendekatan.*

Cruz, M. P. M. da, Silva, E. N., Holanda Filho, I. de O., & Bastos, L. M. G. (2022). *GeoGebra.* Revista do Instituto GeoGebra Internacional de São Paulo, 11(1), 022-036. <https://doi.org/10.23925/2237-9657.2022.v11i1p022-036>

- De Vries, M., Dent, L. G., Curry, N., Rowe-Brown, L., Bousgouni, V., Fourkioti, O., et al. (2025). *Geometric deep learning and multiple-instance learning for 3D cell-shape profiling*. *Cell Systems*, 16(3), 101229. <https://doi.org/10.1016/j.cels.2025.101229>
- Dwiputra, D. F. K., Azzahra, W., & Heryanto, F. N. (2023). *A systematic literature review on enhancing the success of independent curriculum through Brain-Based Learning innovation implementation*. *Indonesian Journal of Learning and Advanced Education*.
- El-Wakeel, H. A., Abdellatif, R., Eldardiry, D. H., Al-Saleh, D. F., Shukri, M. I., & Ansari, K. M. N. (2023). *Brain-based learning in design and visual arts education: A bibliometric assessment of Scopus indexed literature*. *F1000Research*, 11, 1-28. <https://doi.org/10.12688/f1000research.110294.3>
- Fang, X., Ng, D. T. K., & Yuen, M. (2025). *Effects of GeoGebra-enhanced Scratch computational thinking instruction on fifth-grade students' motivation, anxiety, and cognitive load*. *Education and Information Technologies*, 30(1), 377-402. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-13052-9>
- Funa, A. A., Ricafort, J. D., & Jetomo, F. G. J. (2024). *Effectiveness of Brain-Based Learning toward improving students' conceptual understanding: A meta-analysis*. *International Journal of Instruction*, 17(1), 361-380. http://www.e-iji.net/dosyalar/iji_2024_1_19.pdf

- Gastón, J. P., Guffey-McCorrison, S. K., & Rand, A. D. (2023). *Using video and written reflection to assess second-grade students' design thinking and conceptual understanding in an engineering and design challenge*. International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology, 11(4), 820-843.
- Gözüyeşil, E., & Dikici, A. (2014). *The effect of Brain Based Learning on academic achievement: A meta-analytical study*. Educational Sciences: Theory and Practice. <https://doi.org/10.12738/estp.2014.2.2103>
- Halmatuzzuhrotulaini, B., & Adiansha, A. A. (2024). *Penerapan model Brain Based Learning untuk meningkatkan literasi data pada siswa sekolah dasar*. BADA'A Jurnal Ilmiah Pendidikan Dasar, 6(2), 418-432. <https://doi.org/10.37216/badaa.v6i2.1505>
- Halkiopoulou, C., Gkintoni, E., Aroutzidis, A., & Antonopoulou, H. (2025). *Advances in neuroimaging and deep learning for emotion detection: A systematic review of cognitive neuroscience and algorithmic innovations*. Diagnostics, 15(4), 456. <https://www.mdpi.com/2075-4418/15/4/456>
- Handayani, B. S., Corebima, A. D., Susilo, H., & Mahanal, S. (2020). *Developing brain based learning (BBL) model integrated with whole brain teaching (WBT) model on science learning in junior high school in Malang*. Universal Journal of Educational Research, 8(1), 1809. <https://doi.org/10.13189/ujer.2020.081809>

- Harden, V., & Jones, V. N. (2022). *Applying the principles of Brain-Based Learning in social work education*. *Advances in Social Work*, 22(1), 145-162.
<https://doi.org/10.18060/25142>
- Herianto, H., & Lestari, D. P. (2021). *Implementasi teori konstruktivisme dalam pembelajaran IPA melalui pemanfaatan bahan ajar elektronik*. *Jurnal Pembangunan Pendidikan: Fondasi dan Aplikasi*, 9(1).
<https://doi.org/10.21831/jppfa.v9i1.38024>
- Ilham, M., Syarifuddin, & Silviana, D. (2021). *Proses pemecahan masalah matematika siswa SMP dalam menyelesaikan masalah operasi aljabar*. *Jurnal Pendidikan MIPA*, 11(2), 12-22.
<https://ejournal.tsb.ac.id/index.php/jpm/article/view/457>
- Intasena, A., Nuangchalerm, P., & Srimunta, T. (2023). *Brain-based learning management in primary students: Language literacy studies*. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 10(6), 107-112.
<https://doi.org/10.21833/ijaas.2023.06.013>
- Jazuli, L. O. A., Solihatin, E., & Syahrial, Z. (2019). *The effect of Brain Based Learning strategies and Project Based Learning on mathematics learning outcomes in students of the kinesthetic learning style group*. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8(6s3), 373-377.
<https://doi.org/10.35940/ijeat.F1064.0986S319>

- Johar, R., Harnita, F., Sasaki, D., & Oktari, R. S. (2025). *Incorporating disaster context into mathematical problem-solving abilities: The role of cognitive and affective needs*. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 116, 105083. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.105083>
- Kadan-Tabaja, A., & Yerushalmy, M. (2025). *Designing automated assessment activity that stimulates metacognitive actions: A case study on fractions*. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 1-31. <https://doi.org/10.1080/0020739X.2025.2454601>
- Kim, Y. R., Park, M. S., & Joung, E. (2025). *Exploring the integration of artificial intelligence in math education: Preservice teachers' experiences and reflections on problem-posing activities with ChatGPT*. *School Science and Mathematics*. <https://doi.org/10.1111/ssm.18336>
- Krisdianti, K., Syarifuddin, S., & Andang, A. (2023). *Analisis kemampuan pemecahan masalah matematika berbentuk soal cerita berdasarkan teori Polya siswa SMA Muhammadiyah Kota Bima*. *JagoMIPA Jurnal Pendidikan Matematika dan IPA*, 3(2), 114-132. <https://jurnal.bimaberilmu.com/index.php/jagomipa/article/view/360>
- Listiani, W., & Rachmawati, R. (2022). *Transformasi taksonomi Bloom dalam evaluasi pembelajaran berbasis HOTS*.

Jendela Pendidikan, 2(3).
<https://doi.org/10.57008/jjp.v2i03.266>

Madale, V. A., Casidar, J. A., Barquilla, M. B., Salic-Hairulla, M. A., Adil, J. Jr. G., & Alcopra, A. R. (2025). *Designing and implementing teachers' professional development program on crafting brain-based lessons*. International Journal of Evaluation and Research in Education, 14(4), 2790. <https://doi.org/10.11591/ijere.v14i4.32642>

Mastoni, E., Sumantri, M. S., & Ibrahim, N. (2019). *A preliminary study of Brain-Based Learning (BBL) and intrapersonal intelligence in junior high school mathematics learning*. Universal Journal of Educational Research, 7(9A), 147-154. <https://doi.org/10.13189/ujer.2019.071617>

Moustaffa, N. (2022). *Accelerated learning and exploring the future of professional development*. Journal of Educational and Social Research, 12(6), 260. <https://doi.org/10.36941/jesr-2022-0161>

Nafiati, D. A. (2021). Revisi taksonomi Bloom: Kognitif, afektif, dan psikomotorik. Humanika, 21(2). <https://doi.org/10.21831/hum.v21i2.29252>

Narbuko, C., & Achmadi, A. (2021). *Metodologi penelitian*. Bumi Aksara.

Nasrullah, A., Mubarika, M. P., & Umalihayati. (2023). *Distance learning: GeoGebra-learning videos to improving mathematical communication ability*. International

- Journal of Emerging Technology in Learning, 18(16), 115-129. <https://doi.org/10.3991/ijet.v18i16.42173>
- Nurchahyandi, Z. R., & Purwaningrum, J. P. (2022). *Penerapan teori belajar David Kolb dalam pembelajaran matematika materi koordinat Kartesius*. SIGMA Jurnal Pendidikan Matematika, 14(1). <https://doi.org/10.26618/sigma.v14i1.6888>
- Nurhikmah, N., Adiansha, A. A., Mariamah, M., & Syarifuddin, S. (2023). *Pengaruh media pembelajaran menggunakan aplikasi GeoGebra pada materi bangun ruang terhadap motivasi dan hasil belajar peserta didik*. JagoMIPA Jurnal Pendidikan Matematika dan IPA, 3(2), 99-106. <https://doi.org/10.53299/jagomipa.v3i2.302>
- Nurasiah, I., Rachmawati, N., Supena, A., & Yufiarti, Y. (2022). *Literatur review: Model pembelajaran Brain Based Learning di sekolah dasar*. Jurnal Basicedu, 6(3), 3991-4003. <https://doi.org/10.31004/basicedu.v6i3.2768>
- OECD. (2023). PISA 2022. Münster: Waxmann Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31244/9783830998488>
- OECD. (2024). PISA 2022. Perfiles Educativos, 183. <https://doi.org/10.22201/iisue.24486167e.2024.183.61714>
- Owusu, R., Bonyah, E., & Arthur, Y. D. (2023). *The effect of GeoGebra on university students' understanding of polar coordinates*. Cogent Education, 10(1). <https://doi.org/10.1080/2331186X.2023.2177050>

- Permana, A. A., & Kartika, I. (2021). *Brain-Based Learning: The impact on students' higher order thinking skills and motivation*. Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni, 10(1), 47.
<https://doi.org/10.24042/jipfalbiruni.v10i1.6908>
- Pravitasari, N. (2020). *Pengaruh partisipasi aktif orangtua dan penguasaan konsep kognitif matematika terhadap kemampuan berpikir kreatif siswa*. Jurnal Studi Guru dan Pembelajaran, 3(2).
<https://doi.org/10.30605/jsqp.3.2.2020.308>
- Putri, A., Nusantara, T., Purwanto, P., & As'ari, A. R. (2025). *The contribution of critical thinking skills in rich mathematical problem completion: Insights from pre-service mathematics teachers*. Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education, 21(2), em2581.
<https://doi.org/10.29333/ejmste/15931>
- Rahmawati, Y., Madlazim, M., & Sudibyo, E. (2024). *The role of Brain-Based Learning in training students' critical thinking skills*. International Journal of Recent Educational Research, 5(2). <https://doi.org/10.46245/ijorer.v5i2.578>
- Ratnasari, G., & Sutirna, S. (2023). *Analisis beban kognitif dalam kemampuan pemahaman konsep matematis siswa*. Didactic Mathematics, 5(2).
<https://doi.org/10.31949/dm.v5i2.5334>
- Sari, R. A., Adisel, A., & Citra, D. E. (2023). *Implementasi teori belajar konstruktivisme dalam pembelajaran IPS terpadu*.

Jurnal Teknologi Pendidikan, 8(1).
<https://doi.org/10.33394/jtp.v8i1.6291>

- Shimizu, Y. (2025). *Learning engagement as moderator between self-efficacy, math anxiety, use of diagrams, and complex plane problem-solving*. Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education, 21(2), em2586. <https://doi.org/10.29333/ejmste/15956>
- Subba, B. H., Chanunan, S., & Poonpaiboonpipat, W. (2025). *A proposed constructivism-based instructional model to enhance metacognition and mathematical problem-solving skills in Bhutanese grade nine students*. Journal of Mathematics Education, 16(1), 51-72. <https://doi.org/10.22342/jme.v16i1.pp51-72>
- Sugrah, N. U. (2020). *Implementasi teori belajar konstruktivisme dalam pembelajaran sains*. Humanika, 19(2). <https://doi.org/10.21831/hum.v19i2.29274>
- Sudarwo, R., & Adiansha, A. A. (2022). *Brain-Based Learning vs Problem Based Learning: Mathematical complex thinking skills in terms of student creativity?* International Journal of Social Science Research and Review, 5(4), 77-86. <https://doi.org/10.47814/ijssrr.v5i4.231>
- Sukrah, N., & Achmadi, A. (2021). *Metodologi Penelitian*. Bumi Aksara.
- Tan, R. M., Yangco, R. T., & Que, E. N. (2020). *Students' conceptual understanding and science process skills in an inquiry-based flipped classroom environment*.

- Malaysian Journal of Learning and Instruction, 17(1).
<https://doi.org/10.32890/mjli2020.17.1.7>
- Tsurayya, A., & Ningrum, N. K. (2021). *Analisis kemampuan pemahaman konsep mahasiswa dalam menyelesaikan soal persamaan diferensial ditinjau dari gaya kognitif*. Jurnal Cendekia: Jurnal Pendidikan Matematika, 5(3), 2385-2397. <https://doi.org/10.31004/cendekia.v5i3.866>
- Utami, F., Adiansha, A. A., & Yusuf, M. (2023). *Analisis kemampuan pemecahan masalah matematika melalui pemanfaatan aplikasi GeoGebra di SMPN 1 Monta*. DIKSI: Jurnal Kajian Pendidikan dan Sosial, 4(2), 58-63. <https://bimaberilmu.com/jurnal/index.php/diksi/article/view/314>
- Vieira, S., Baecker, L., Pinaya, W. H. L., Garcia-Dias, R., Scarpazza, C., Calhoun, V., et al. (2025). *Neurofind: Using deep learning to make individualised inferences in brain-based disorders*. Translational Psychiatry, 15(1), 69. <https://doi.org/10.1038/s41398-025-03290-x>
- Yildiz, E., & Arpacı, I. (2024). *Understanding pre-service mathematics teachers' intentions to use GeoGebra: The role of technological pedagogical content knowledge*. Education and Information Technologies, 29(14), 18817-18838. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-12614-1>
- Yuwana, S., & Indarti, T. (2023). *Metode penelitian dan pengembangan (Research & Development) dalam*

pendidikan dan pembelajaran. UMM Press.

<https://books.google.co.id/books?id=ZY3kEAAAQBAJ>

Za'ba, N., Ismail, Z., & Abdullah, A. H. (2020). *Preparing student teachers to teach mathematics with GeoGebra.* Universal Journal of Educational Research, 8(5A), 29-33.
<https://doi.org/10.13189/ujer.2020.081904>

Zakiah, L., Kusmawati, A. P., Yufiarti, Y., & Supena, A. (2022). *Brain Based Learning in civics learning to grow the responsible attitude of elementary school students.* Jurnal Ilmiah Sekolah Dasar, 6(3).
<https://doi.org/10.23887/jisd.v6i3.46126>

GLOSARIUM

Istilah	Definisi
Aktivasi Otak	Proses stimulasi area otak melalui kegiatan belajar yang dirancang untuk meningkatkan perhatian, kesiapan mental, dan kapasitas kognitif peserta didik.
Aljabar	Cabang matematika yang mempelajari simbol, persamaan, serta hubungan antar variabel, dan menjadi dasar dalam pemodelan matematis.
Artificial Intelligence (AI)	Ilmu komputer yang mengembangkan sistem cerdas yang mampu melakukan tugas seperti belajar, bernalar, memecahkan masalah, dan membuat keputusan.
Asumsi Dasar Model	Prinsip atau landasan konseptual yang dijadikan titik tolak dalam mengembangkan suatu model pembelajaran.
Brain-Based Deep Learning (BBDL)	Model pembelajaran yang mengintegrasikan prinsip neurosains tentang cara kerja otak dengan algoritma deep learning serta media teknologi pendidikan untuk meningkatkan efektivitas belajar.
Brain-Compatible Learning Environment	Lingkungan belajar yang dirancang agar sesuai dengan mekanisme otak, melibatkan aspek fisik, emosional, sosial, dan kognitif peserta didik.

Cognitive Load (Beban Kognitif)	Jumlah informasi yang harus diproses oleh memori kerja dalam suatu waktu tertentu, yang berpengaruh terhadap efektivitas belajar.
Convolutional Neural Network (CNN)	Jenis jaringan saraf tiruan yang efektif dalam analisis data visual, digunakan untuk pengenalan gambar, pola, atau citra.
Deep Learning	Metode pembelajaran mesin berbasis jaringan saraf tiruan berlapis yang dapat mengekstraksi representasi data kompleks secara bertahap.
Elaborasi	Tahap pembelajaran di mana peserta didik memperluas pemahaman konsep melalui penghubungan ide, penerapan, dan refleksi kritis.
Evaluasi Efektivitas	Proses pengukuran keberhasilan model atau metode pembelajaran dalam mencapai tujuan yang ditetapkan.
Faktor Lingkungan Belajar	Kondisi eksternal yang memengaruhi pembelajaran, termasuk sarana, prasarana, suasana kelas, serta interaksi sosial.
GeoGebra	Perangkat lunak matematika dinamis yang digunakan untuk visualisasi konsep aljabar, geometri, kalkulus, dan statistik secara interaktif.
Instrumen Penilaian	Alat yang digunakan untuk mengukur capaian pembelajaran peserta didik, seperti tes, lembar observasi, kuesioner, dan rubrik penilaian.
Karakteristik	Ciri-ciri khas yang membedakan suatu

Model	model pembelajaran dengan model lain, baik dari segi sintaks, peran guru, maupun peran peserta didik.
Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence)	Kemampuan sistem komputer untuk meniru fungsi otak manusia, termasuk pengenalan pola, prediksi, dan pemecahan masalah.
Kognitif	Aspek berpikir manusia yang mencakup persepsi, ingatan, penalaran, pemecahan masalah, dan pengambilan keputusan.
Kolaboratif	Pendekatan pembelajaran yang melibatkan kerja sama antar peserta didik untuk mencapai tujuan pembelajaran secara bersama-sama.
Pembelajaran Kolaboratif	Strategi pembelajaran yang menekankan keterlibatan aktif peserta didik dalam kelompok untuk memecahkan masalah atau menyelesaikan tugas.
Performance Assessment (Penilaian Berbasis Kinerja)	Teknik evaluasi yang mengukur keterampilan peserta didik melalui tugas nyata, proyek, atau simulasi.
Plasticity Otak	Kemampuan otak untuk beradaptasi dengan pengalaman baru, membentuk jalur saraf baru, serta memperkuat atau melemahkan koneksi sinaptik.
Recurrent Neural Network (RNN)	Jaringan saraf tiruan yang dirancang untuk memproses data berurutan seperti teks, suara, atau sinyal waktu.
Refleksi	Tahap pembelajaran di mana peserta didik menganalisis pengalaman belajar,

	mengevaluasi pemahaman, dan merancang perbaikan.
Rumusan Masalah	Pertanyaan penelitian atau fokus utama yang dirumuskan untuk mengarahkan tujuan penulisan atau penelitian.
Sintaks Model	Langkah-langkah sistematis dalam implementasi suatu model pembelajaran, mulai dari persiapan, pelaksanaan, hingga evaluasi.
Strategi Pembelajaran Berbasis Otak	Metode instruksional yang menyesuaikan dengan mekanisme otak dalam menerima, memproses, dan menyimpan informasi.
Taksonomi Bloom	Kerangka klasifikasi tujuan belajar ke dalam tiga domain utama: kognitif, afektif, dan psikomotorik.
Tes	Instrumen penilaian berupa soal atau tugas yang digunakan untuk mengukur pemahaman peserta didik terhadap suatu materi.
Urgensi Model	Alasan penting atau kebutuhan mendasar yang melatarbelakangi pengembangan suatu model pembelajaran.
Visualisasi Matematis	Representasi konsep matematika dalam bentuk grafik, diagram, atau simulasi untuk meningkatkan pemahaman peserta didik.

Model Brain-Based Deep Learning:

Teori dan Aplikasi dalam Pendidikan

Judul Model Brain-Based Deep Learning: Teori dan Aplikasi dalam Pendidikan merepresentasikan pendekatan inovatif yang memadukan prinsip neurosains dengan teknologi pembelajaran untuk meningkatkan kualitas pendidikan. Model ini bertumpu pada pemahaman tentang bagaimana otak bekerja dalam proses belajar, sehingga strategi, metode, dan media yang digunakan selaras dengan cara alami otak memproses informasi. Integrasi neurosains membantu guru merancang pembelajaran yang lebih efektif dengan mempertimbangkan aspek kognitif, emosional, dan fisiologis peserta didik. Sementara itu, pemanfaatan teknologi memperkuat implementasi model ini melalui penyediaan pengalaman belajar yang interaktif, adaptif, dan berbasis data. Dengan demikian, model ini tidak hanya mendorong peningkatan pemahaman konseptual dan keterampilan berpikir mendalam, tetapi juga menyiapkan peserta didik menghadapi tantangan era digital dengan mengoptimalkan potensi otak secara holistik.

ISBN:

978-634-04-6970-7



Penerbit

Yayasan Pendidikan Bima Berilmu

Redaksi

Jalan Lintas Sumbawa Bima, desa Leu, RT. 009, RW. 004,
kecamatan Bolo, kabupaten Bima, Nusa Tenggara Barat,
Kode post. 84161
Email: bimaberilmu@gmail.com