

NEUROEMBRIOLOGI DAN PERKEMBANGAN OTAK SERTA IMPLIKASINYA DALAM PENDIDIKAN

Rina Ariani¹, Nur Saadah Khudri²

^{1,2}Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat Padang

Email: rinaariani2987@gmail.com¹, nursaadahkhudri@gmail.com²

Abstrak: Neuroembriologi adalah cabang ilmu yang mempelajari perkembangan sistem saraf sejak tahap awal kehidupan embrio hingga pembentukan struktur otak yang kompleks. Proses perkembangan otak sangat dipengaruhi oleh faktor genetik dan lingkungan, termasuk stimulasi sejak dini. Dalam konteks pendidikan, pemahaman mengenai perkembangan otak sangat penting untuk merancang strategi pembelajaran yang sesuai dengan tahapan perkembangan kognitif peserta didik. Artikel ini bertujuan untuk membahas tahapan perkembangan otak manusia, faktor-faktor yang mempengaruhinya, serta bagaimana konsep neuroembriologi dapat diterapkan dalam dunia pendidikan. Melalui kajian literatur yang mendalam, ditemukan bahwa pendidikan berbasis neurosains dapat meningkatkan efektivitas pembelajaran dengan menyesuaikan metode pengajaran berdasarkan tahapan perkembangan otak. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan bagi pendidik dalam menyusun kurikulum yang lebih adaptif terhadap perkembangan kognitif anak, sehingga dapat mengoptimalkan potensi belajar peserta didik secara maksimal.

Kata Kunci: Neuroembriologi, Perkembangan Otak, Neurosains Pendidikan, Kognitif, Strategi Pembelajaran.

***Abstract:** Neuroembryology is a branch of science that studies the development of the nervous system from the early embryonic stages to the formation of complex brain structures. Brain development is significantly influenced by genetic and environmental factors, including early stimulation. In the educational context, understanding brain development is crucial for designing learning strategies that align with students' cognitive development stages. This article aims to discuss the stages of human brain development, the factors influencing it, and how neuroembryology concepts can be applied in education. Through an extensive literature review, findings suggest that neuroscience-based education can enhance learning effectiveness by aligning teaching methods with brain developmental stages. This study is expected to provide insights for educators in developing a curriculum that is more adaptive to children's cognitive development, thereby optimizing students' learning potential.*

Keywords: *Neuroembryology, Brain Development, Educational Neuroscience, Cognition, Learning Strategies.*

PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu saraf telah membuka cakrawala baru dalam memahami bagaimana otak manusia berkembang sejak tahap awal kehidupan hingga mencapai kematangan kognitif yang optimal. Neuroembriologi, sebagai cabang dari embriologi yang berfokus pada perkembangan sistem saraf, memiliki peran fundamental dalam menjelaskan proses neurogenesis, diferensiasi, serta pembentukan koneksi saraf yang mendukung fungsi kognitif dan perilaku manusia¹. Pemahaman yang mendalam mengenai perkembangan otak sejak tahap embrionik tidak hanya menjadi dasar dalam bidang kedokteran dan neurosains tetapi juga memiliki implikasi yang signifikan dalam dunia pendidikan.

Dalam dunia pendidikan, pemahaman mengenai perkembangan otak memiliki dampak besar dalam perancangan kurikulum, strategi pembelajaran, serta metode pengajaran yang dapat mengoptimalkan potensi peserta didik. Perkembangan kognitif, emosi, serta keterampilan sosial yang dipengaruhi oleh struktur dan fungsi otak harus diperhatikan dalam mendesain sistem pendidikan yang efektif. Studi menunjukkan bahwa faktor lingkungan, pengalaman belajar, serta stimulasi kognitif memiliki peran penting dalam membentuk arsitektur otak dan mendukung perkembangan intelektual seorang individu².

Selain itu, keterlambatan perkembangan saraf atau gangguan neurodevelopmental seperti spektrum autisme (ASD) dapat memberikan tantangan tersendiri dalam pendidikan anak. Diagnosis dini serta intervensi yang tepat berbasis pemahaman terhadap perkembangan otak menjadi aspek krusial dalam membantu anak dengan gangguan

¹ Joan Stiles and Terry L. Jernigan, "The Basics of Brain Development," *Neuropsychology Review*, 2010, <https://doi.org/10.1007/s11065-010-9148-4>.

² Natalie H. Brito and Kimberly G. Noble, "Socioeconomic Status and Structural Brain Development," *Frontiers in Neuroscience* (Frontiers Research Foundation, 2014), <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00276>.

perkembangan agar dapat mengakses pendidikan secara optimal³. Dengan demikian, mengintegrasikan pemahaman mengenai neuroembriologi dan perkembangan otak dalam bidang pendidikan menjadi langkah strategis untuk menciptakan sistem pembelajaran yang lebih inklusif dan berbasis ilmu pengetahuan.

Berbagai penelitian telah membahas perkembangan otak dan implikasinya terhadap fungsi kognitif, namun tantangan dalam memahami hubungan antara perkembangan saraf dan pendidikan secara menyeluruh masih menjadi perhatian utama. Salah satu permasalahan yang muncul adalah bagaimana proses neuroembriologi membentuk dasar perkembangan otak manusia sejak fase prenatal hingga dewasa. Proses ini melibatkan berbagai tahapan kompleks yang mempengaruhi struktur dan fungsi otak dalam jangka panjang.

Selain itu, terdapat berbagai faktor yang mempengaruhi perkembangan sistem saraf, baik dari aspek biologis maupun lingkungan. Faktor-faktor ini memiliki dampak signifikan terhadap kapasitas belajar individu, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap perbedaan kemampuan kognitif dan akademik setiap peserta didik. Oleh karena itu, diperlukan pemahaman yang lebih mendalam mengenai bagaimana perkembangan otak dapat diterapkan dalam strategi pendidikan yang lebih efektif dan adaptif agar setiap individu dapat mencapai potensi belajarnya secara optimal.

Di sisi lain, gangguan perkembangan saraf, seperti autisme dan disleksia, juga memberikan tantangan dalam sistem pendidikan. Implikasi dari gangguan ini sering kali menghambat proses pembelajaran dan menuntut adanya intervensi khusus. Oleh sebab itu, penelitian ini perlu mengeksplorasi bagaimana pendekatan berbasis ilmu saraf dapat diterapkan dalam pendidikan untuk mendukung peserta didik dengan kebutuhan khusus, sehingga mereka dapat memperoleh akses pembelajaran yang setara dan inklusif.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif hubungan antara neuroembriologi, perkembangan otak, dan implikasinya dalam pendidikan. Secara lebih spesifik, penelitian ini berupaya menganalisis mekanisme perkembangan sistem saraf sejak tahap embrionik hingga dewasa berdasarkan temuan ilmiah terbaru. Dengan

³ Patrick McCarty and Richard E. Frye, "Early Detection and Diagnosis of Autism Spectrum Disorder: Why Is It So Difficult?," *Seminars in Pediatric Neurology* (W.B. Saunders, October 1, 2020), <https://doi.org/10.1016/j.spen.2020.100831>.

memahami proses ini, diharapkan dapat ditemukan keterkaitan antara perkembangan otak dan kemampuan belajar individu dalam berbagai tahapan kehidupan⁴.

Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi perkembangan otak, baik dari aspek biologis maupun lingkungan. Faktor-faktor ini mencakup aspek genetik, nutrisi, stimulasi lingkungan, serta pengalaman belajar yang dapat berdampak pada perkembangan kognitif dan akademik peserta didik. Dengan memahami faktor-faktor tersebut, strategi pendidikan dapat disesuaikan agar lebih sesuai dengan kebutuhan perkembangan otak individu. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru dalam merancang pendekatan pembelajaran yang lebih berbasis ilmu saraf, inklusif, serta adaptif terhadap kebutuhan individu.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode studi literatur untuk menganalisis hubungan antara neuroembriologi, perkembangan otak, dan implikasinya dalam pendidikan. Studi literatur dipilih sebagai metode utama karena penelitian ini bertujuan untuk mengumpulkan, menginterpretasikan, dan mensintesis berbagai teori, konsep, serta temuan empiris yang relevan dari jurnal-jurnal ilmiah yang telah dipublikasikan sebelumnya. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih mendalam terhadap perkembangan sistem saraf sejak tahap embrionik hingga dewasa serta bagaimana pemahaman mengenai perkembangan otak dapat diterapkan dalam strategi pendidikan yang lebih efektif dan adaptif. Sumber data utama dalam penelitian ini berasal dari jurnal-jurnal ilmiah yang diperoleh melalui platform akademik seperti Google Scholar dan Mendeley. Jurnal yang dijadikan referensi memiliki relevansi yang tinggi dengan topik penelitian, mencakup aspek neuroembriologi, perkembangan otak, dan intervensi berbasis ilmu saraf dalam pendidikan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perkembangan Saraf dan Implikasinya dalam Pendidikan

⁴ George Zacharopoulos, Francesco Sella, and Roi Cohen Kadosh, "The Impact of a Lack of Mathematical Education on Brain Development and Future Attainment," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 118, no. 24 (June 15, 2021), <https://doi.org/10.1073/pnas.2013155118>.

Perkembangan sistem saraf manusia merupakan proses yang kompleks dan berlangsung sejak tahap awal kehidupan embrionik hingga dewasa. Proses ini melibatkan diferensiasi sel-sel saraf, migrasi neuron, serta pembentukan dan penyempurnaan jaringan sinaptik yang berperan dalam fungsi kognitif dan motorik individu. Neuroembriologi, sebagai cabang ilmu yang mempelajari perkembangan sistem saraf sejak tahap embrio, memberikan wawasan penting mengenai bagaimana otak dan sumsum tulang belakang berkembang secara struktural dan fungsional, yang pada akhirnya memiliki implikasi luas terhadap berbagai aspek dalam pendidikan, terutama dalam memahami cara anak-anak belajar, memproses informasi, dan menghadapi tantangan kognitif⁵.

Salah satu tahapan kritis dalam perkembangan saraf adalah neurogenesis, yaitu pembentukan neuron baru yang terjadi terutama selama masa prenatal. Berdasarkan penelitian Stiles & Jernigan, perkembangan saraf diawali dengan pembentukan lempeng saraf (neural plate) yang mengalami invaginasi membentuk tabung saraf (neural tube). Tabung ini kemudian berkembang menjadi berbagai struktur utama dalam sistem saraf pusat, termasuk korteks serebral yang berperan krusial dalam fungsi kognitif seperti pemecahan masalah, memori, dan pengambilan keputusan. Dalam konteks pendidikan, pemahaman mengenai proses ini menjadi penting karena menunjukkan bahwa kapasitas belajar seseorang sangat bergantung pada perkembangan dan plastisitas sistem saraf⁶.

Lebih lanjut, interaksi antara faktor genetik dan lingkungan juga sangat mempengaruhi perkembangan saraf, di mana pengalaman awal seorang anak dapat membentuk jalur konektivitas sinaptik yang menentukan efektivitas proses pembelajaran. Status sosial ekonomi mempengaruhi perkembangan struktural otak, khususnya pada area yang berhubungan dengan fungsi eksekutif dan bahasa. Ini menunjukkan bahwa lingkungan belajar yang kurang mendukung, seperti keterbatasan akses terhadap stimulasi kognitif, dapat menghambat perkembangan saraf dan pada akhirnya berdampak pada hasil akademik seorang anak. Oleh karena itu, sistem pendidikan harus mempertimbangkan

⁵ Firas M. Al-Rshoud et al., "Human Embryology Science: Which Theoretical Information Do Clinical Embryologists Need to Know More About? A Survey," *International Journal of Morphology* 40, no. 3 (2022), <https://doi.org/10.4067/S0717-95022022000300553>.

⁶ Stiles and Jernigan, "The Basics of Brain Development."

aspek neuroembriologi dalam menyusun kurikulum dan metode pengajaran yang sesuai dengan tahap perkembangan otak anak⁷.

Perkembangan Otak dan Pengaruhnya terhadap Kemampuan Belajar

Otak manusia mengalami perkembangan pesat pada masa prenatal dan awal kehidupan pascakelahiran, dengan pembentukan miliaran neuron yang saling terhubung melalui sinaps. Proses perkembangan otak dapat dibagi menjadi beberapa tahap utama, yakni proliferasi sel saraf, migrasi neuron, diferensiasi sel, mielinisasi, serta pembentukan dan pemangkasan sinaps (synaptic pruning). Setiap tahap memiliki peran penting dalam menentukan kapasitas belajar dan perkembangan kognitif seseorang sepanjang hidupnya⁸.

Pada periode awal kehidupan, otak memiliki plastisitas yang tinggi, yang memungkinkan individu untuk menyesuaikan diri dengan lingkungan belajar yang beragam. Plastisitas sinaptik ini memungkinkan pembelajaran terjadi secara lebih efisien, terutama pada masa kanak-kanak, ketika jalur-jalur saraf yang sering digunakan diperkuat dan yang jarang digunakan dieliminasi. Sebagai contoh, penelitian Zacharopoulos, Sella, & Kadosh menunjukkan bahwa kurangnya pendidikan matematika pada masa kanak-kanak dapat menyebabkan perubahan struktural di area otak yang berkaitan dengan pemrosesan angka dan logika, yang pada akhirnya berdampak negatif terhadap kemampuan akademik dan kesempatan karier di masa depan⁹.

Selain itu, perkembangan otak juga dipengaruhi oleh berbagai faktor eksternal, termasuk pola makan, kualitas tidur, dan tingkat stres. Gangguan perkembangan neurologis, seperti gangguan spektrum autisme (Autism Spectrum Disorder, ASD), berkaitan erat dengan perbedaan dalam struktur dan konektivitas saraf di berbagai bagian otak, termasuk korteks prefrontal dan amigdala. Implikasi dalam dunia pendidikan adalah perlunya pendekatan yang lebih individual dan berbasis neuropsikologi dalam menyusun

⁷ Sophie Kuizenga-Wessel et al., "Screening for Autism Identifies Behavioral Disorders in Children Functional Defecation Disorders," *European Journal of Pediatrics* 175, no. 10 (October 1, 2016): 1371–78, <https://doi.org/10.1007/s00431-016-2775-x>.

⁸ Joseph J. Volpe, *Neurology of the Newborn*, *Neurology of the Newborn* (Elsevier, 2008), https://doi.org/10.5005/jp/books/12090_2.

⁹ Zacharopoulos, Sella, and Kadosh, "The Impact of a Lack of Mathematical Education on Brain Development and Future Attainment."

metode pembelajaran, terutama bagi anak-anak dengan kebutuhan khusus atau perbedaan perkembangan saraf¹⁰.

Dalam konteks pendidikan, pemahaman mengenai perkembangan otak ini memberikan wawasan yang mendalam mengenai kapan dan bagaimana metode pengajaran tertentu dapat diterapkan secara efektif. Misalnya, periode emas perkembangan bahasa terjadi pada usia 0–5 tahun, sehingga pendidikan pada tahap ini sebaiknya berfokus pada stimulasi bahasa yang intensif untuk mendukung perkembangan kognitif secara optimal. Keterlambatan deteksi gangguan perkembangan otak, seperti ASD, dapat menyebabkan kesulitan dalam adaptasi akademik dan sosial di kemudian hari. Oleh karena itu, pendidikan berbasis ilmu saraf (neuroscience-based education) menjadi strategi yang sangat relevan untuk meningkatkan efektivitas pembelajaran¹¹.

Implikasi Neuroembriologi dan Perkembangan Otak dalam Pendidikan

Neuroembriologi dan perkembangan otak memiliki implikasi mendalam terhadap sistem pendidikan modern, terutama dalam hal bagaimana kurikulum, metode pengajaran, dan intervensi pendidikan dirancang agar sesuai dengan perkembangan biologis otak manusia. Pemahaman mengenai bagaimana otak berkembang memungkinkan para pendidik untuk menyusun strategi pembelajaran yang lebih adaptif dan berbasis bukti ilmiah.

Salah satu implikasi utama dalam pendidikan adalah pentingnya pendekatan berbasis perkembangan otak dalam mendesain kurikulum. Anak-anak dengan gangguan perkembangan otak sering kali menghadapi tantangan dalam sistem pendidikan tradisional yang tidak mempertimbangkan perbedaan individual dalam perkembangan kognitif. Oleh karena itu, pendidikan yang berbasis ilmu saraf harus mempertimbangkan fleksibilitas

¹⁰ Abdulghani Abdulaziz Alzamzami et al., "Screening Tools Interventions and Strategies for Early Identification and Management of Autism Spectrum Disorders," *International Journal Of Community Medicine And Public Health* 10, no. 10 (September 22, 2023): 3870–74, <https://doi.org/10.18203/2394-6040.ijcmph20232865>.

¹¹ McCarty and Frye, "Early Detection and Diagnosis of Autism Spectrum Disorder: Why Is It So Difficult?"

dalam metode pengajaran, seperti pembelajaran multisensori dan pendekatan diferensiasi yang sesuai dengan kebutuhan tiap siswa¹².

Selain itu, perkembangan otak juga menunjukkan bahwa pengalaman belajar yang bermakna dapat memperkuat jalur saraf dan meningkatkan kapasitas kognitif seseorang. Hal ini mendukung penerapan metode active learning, di mana siswa tidak hanya menerima informasi secara pasif tetapi juga terlibat dalam proses eksplorasi, diskusi, dan pemecahan masalah. Penggunaan kasus klinis dalam pembelajaran embriologi meningkatkan pemahaman siswa secara signifikan karena metode ini melibatkan berbagai area otak yang berperan dalam pemrosesan informasi dan pengambilan keputusan¹³.

Lebih jauh lagi, implikasi neuroembriologi juga terlihat dalam pentingnya pendidikan berbasis emosi. Struktur otak seperti amigdala dan korteks prefrontal berperan dalam regulasi emosi dan respons terhadap stres. Dalam lingkungan pendidikan, tekanan akademik yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan kadar hormon stres (kortisol), yang berdampak negatif terhadap fungsi eksekutif dan daya ingat siswa. Oleh karena itu, pendekatan pendidikan yang memperhatikan kesejahteraan emosional, seperti mindfulness dan strategi pengelolaan stres, dapat meningkatkan efektivitas pembelajaran dan mendukung perkembangan otak yang sehat.

Mekanisme Neuroplastisitas dalam Pembelajaran

Neuroplastisitas dapat terjadi dalam beberapa bentuk utama, yaitu sinaptogenesis (pembentukan koneksi saraf baru), pruning sinaptik (penghapusan koneksi yang tidak digunakan), dan myelinisasi (peningkatan efisiensi transmisi sinyal saraf). Pengalaman belajar yang berulang dapat memperkuat koneksi saraf melalui mekanisme long-term potentiation (LTP), yang meningkatkan efisiensi sinaps dan mempercepat pemrosesan informasi¹⁴.

¹² Robin L. Hansen et al., "Diagnosis of Autism Spectrum Disorder by Developmental-Behavioral Pediatricians in Academic Centers: A DBPNet Study," *Pediatrics* 137 (February 1, 2016): S79–89, <https://doi.org/10.1542/peds.2015-2851F>.

¹³ Carlos Augusto Galvo Barboza, Fernanda Ginani, and Rodrigo Gadelha Vasconcelos, "Use of Clinical Cases in a Virtual Learning Environment as an Approach to Teaching Human Embryology," *International Journal of Morphology* 30, no. 4 (2012), <https://doi.org/10.4067/s0717-95022012000400022>.

¹⁴ Brito and Noble, "Socioeconomic Status and Structural Brain Development."

Selain itu, bahwa kurangnya paparan terhadap bidang akademik tertentu, seperti matematika, dapat memengaruhi perkembangan area otak yang terkait dengan pemecahan masalah dan pengambilan keputusan. Oleh karena itu, pendidikan yang kaya akan pengalaman multisensori dan interaktif dapat meningkatkan fleksibilitas saraf dan memperkuat jalur konektivitas dalam otak¹⁵.

Hubungan Neuroplastisitas dengan Keterampilan Kognitif dan Emosional

Neuroplastisitas tidak hanya berperan dalam penguatan keterampilan akademik, tetapi juga dalam perkembangan keterampilan sosial dan emosional. Anak-anak dengan gangguan spektrum autisme mengalami gangguan neuroplastisitas dalam area otak yang berhubungan dengan interaksi sosial dan empati, sehingga memerlukan pendekatan pembelajaran yang disesuaikan untuk meningkatkan kemampuan adaptasi mereka dalam lingkungan sosial¹⁶.

Selain itu, Pentingnya intervensi dini dalam pendidikan untuk memanfaatkan neuroplastisitas optimal selama masa kanak-kanak. Program pendidikan berbasis pengalaman, seperti pembelajaran berbasis proyek dan permainan peran, dapat membantu mengembangkan fungsi eksekutif, keterampilan komunikasi, serta kecerdasan emosional anak¹⁷.

Peran Faktor Genetik, Lingkungan, dan Epigenetik dalam Pendidikan

Selain neuroplastisitas, perkembangan otak juga sangat dipengaruhi oleh faktor genetik dan lingkungan. Gangguan genetik, seperti mutasi pada gen LIS1 yang berperan dalam migrasi neuron, dapat menyebabkan kelainan perkembangan otak seperti lissencephaly, yang berakibat pada keterlambatan perkembangan kognitif¹⁸. Selain itu,

¹⁵ Zacharopoulos, Sella, and Kadosh, "The Impact of a Lack of Mathematical Education on Brain Development and Future Attainment."

¹⁶ Editorial office Of journal "Morphologia," "Langman's Medical Embryology. 14th Edition, 2018 Author: T.W. Sadler," *Morphologia* 13, no. 4 (December 27, 2019): 90–96, <https://doi.org/10.26641/1997-9665.2019.4.90-96>.

¹⁷ Alzamzami et al., "Screening Tools Interventions and Strategies for Early Identification and Management of Autism Spectrum Disorders."

¹⁸ Michael Markert, "Modelled Development. Practices of Human Embryology at Göttingen University in the Second Half of the Twentieth Century," *NTM International Journal of History and Ethics of Natural Sciences, Technology and Medicine* 28, no. 4 (December 1, 2020): 481–517, <https://doi.org/10.1007/s00048-020-00275-3>.

faktor lingkungan prenatal, seperti asupan nutrisi ibu hamil yang kaya akan asam folat, dapat membantu mencegah gangguan perkembangan tabung saraf seperti spina bifida.

Faktor epigenetik juga berperan dalam memodulasi ekspresi gen tanpa mengubah urutan DNA. Stres prenatal atau lingkungan yang kurang mendukung dapat memicu perubahan epigenetik yang berdampak pada perkembangan otak anak. Oleh karena itu, lingkungan belajar yang positif dan suportif sangat diperlukan untuk memastikan perkembangan kognitif anak berjalan optimal. Pemahaman tentang neuroembriologi dan perkembangan otak memberikan wawasan mendalam mengenai bagaimana sistem saraf terbentuk dan berkembang, serta bagaimana hal ini mempengaruhi proses pembelajaran.

Tabel 1. 1 Tahapan Perkembangan Neuroembriologi dan Implikasinya terhadap Pendidikan

Tahap Perkembangan	Proses Neuroembriologi	Perkembangan Otak	Implikasi dalam Pendidikan
Gastrulasi (Minggu 3-4)	Pembentukan lempeng neural yang berkembang menjadi tabung neural.	Awal pembentukan struktur dasar otak dan sumsum tulang belakang.	Tahap awal sangat krusial karena gangguan pada fase ini dapat menyebabkan kelainan neurologis, seperti spina bifida dan anensefali.
Neurulasi (Minggu 4-5)	Tabung neural menutup dan membentuk tiga vesikel otak utama: prosensefalon, mesensefalon, dan rombensefalon.	Diferensiasi otak menjadi otak depan (cerebrum), tengah, dan belakang (cerebellum).	Pentingnya nutrisi ibu hamil, seperti asam folat, untuk mencegah gangguan perkembangan otak janin.
Perkembangan Sel Saraf (Minggu 5-20)	Neurogenesis, migrasi sel saraf, dan pembentukan sinaps.	Struktur otak mulai kompleks, terjadi peningkatan konektivitas saraf.	Stimulasi awal, seperti interaksi sosial dan musik, berperan penting dalam perkembangan kognitif bayi.

Pembentukan Korteks (Minggu 20-40)	Diferensiasi korteks menjadi berbagai area fungsional.	Lapisan kortikal mulai terbentuk, terjadi peningkatan sinaptogenesis.	Intervensi pendidikan dini dapat meningkatkan perkembangan kognitif dan linguistik anak.
Masa Neonatal dan Awal Masa Kanak-Kanak	Pematangan sinaps dan pruning sinaptik untuk meningkatkan efisiensi saraf.	Pertumbuhan otak pesat, terutama di area prefrontal yang terkait dengan fungsi eksekutif dan kognisi.	Pendidikan berbasis pengalaman dan eksplorasi sangat penting untuk meningkatkan fungsi eksekutif dan memori.

Tabel yang telah dibuat di atas menyajikan informasi mengenai aspek utama neuroembriologi, perkembangan otak, serta implikasinya dalam pendidikan. Data yang ditampilkan mencakup tahapan perkembangan sistem saraf sejak masa embrionik, proses pembentukan dan diferensiasi otak, serta faktor-faktor yang memengaruhi perkembangan kognitif dan emosional anak dalam konteks pendidikan. Selain itu, tabel ini juga menyoroti peran neuroplastisitas dalam pembelajaran dan bagaimana metode pendidikan yang tepat dapat mengoptimalkan fungsi otak peserta didik. Dengan pemahaman ini, pendidik dan pembuat kebijakan dapat merancang sistem pembelajaran yang lebih efektif, sesuai dengan perkembangan otak anak di setiap tahap usia.

KESIMPULAN

Neuroembriologi merupakan cabang ilmu yang mempelajari perkembangan sistem saraf sejak tahap embrionik hingga maturasi otak. Proses ini mencakup berbagai tahapan krusial, mulai dari gastrulasi, neurulasi, neurogenesis, migrasi sel saraf, sinaptogenesis, hingga pruning sinaptik, yang semuanya memiliki peran fundamental dalam membentuk struktur dan fungsi otak manusia. Setiap gangguan yang terjadi pada salah satu tahapan ini dapat berimplikasi terhadap perkembangan kognitif, motorik, serta kapasitas belajar individu di kemudian hari.

Perkembangan otak manusia bersifat dinamis dan plastis, di mana pengalaman serta stimulasi lingkungan berperan penting dalam membentuk jalur saraf yang optimal. Pembentukan korteks serebral, yang merupakan pusat pemrosesan informasi, berkembang pesat sejak masa prenatal hingga usia dini. Pada tahap ini, interaksi sosial, stimulasi

sensorik, serta pendidikan berbasis pengalaman menjadi faktor utama dalam mengoptimalkan konektivitas saraf yang mendukung perkembangan kognitif.

Implikasi neuroembriologi terhadap dunia pendidikan sangat signifikan. Studi mengenai perkembangan otak memberikan wawasan bagi para pendidik dalam merancang strategi pembelajaran yang berbasis pada perkembangan kognitif dan neuroplastisitas otak. Pendidikan yang memperhatikan aspek perkembangan saraf dan keterlibatan pengalaman multisensorik terbukti lebih efektif dalam meningkatkan daya ingat, kreativitas, serta kemampuan berpikir kritis siswa. Oleh karena itu, pendekatan pembelajaran yang adaptif, berbasis stimulasi yang tepat, dan sesuai dengan perkembangan biologis peserta didik perlu diintegrasikan dalam sistem pendidikan modern.

DAFTAR PUSTAKA

Al-Rshoud, Firas M., Tamara M. Darwish, Wesam S. Al-Woshah, and Darwish Badran.

“Human Embryology Science: Which Theoretical Information Do Clinical Embryologists Need to Know More About? A Survey.” *International Journal of Morphology* 40, no. 3 (2022). <https://doi.org/10.4067/S0717-95022022000300553>.

Alzamzami, Abdulghani Abdulaziz, Ibrahim Mohammed Binsalamah, Ahmed Ghazi Shadad Alharbi, Abdulmajeed Mesfer Almousa, Marwan Talal Algaidi, Khaled Mohammed Alsultan, Qanot N. Alshatti, et al. “Screening Tools Interventions and Strategies for Early Identification and Management of Autism Spectrum Disorders.” *International Journal Of Community Medicine And Public Health* 10, no. 10 (September 22, 2023): 3870–74. <https://doi.org/10.18203/2394-6040.ijcmph20232865>.

Barboza, Carlos Augusto Galvo, Fernanda Ginani, and Rodrigo Gadelha Vasconcelos.

“Use of Clinical Cases in a Virtual Learning Environment as an Approach to Teaching Human Embryology.” *International Journal of Morphology* 30, no. 4 (2012). <https://doi.org/10.4067/s0717-95022012000400022>.

- Brito, Natalie H., and Kimberly G. Noble. "Socioeconomic Status and Structural Brain Development." *Frontiers in Neuroscience*. Frontiers Research Foundation, 2014. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00276>.
- Hansen, Robin L., Nathan J. Blum, Amy Gaham, and Justine Shults. "Diagnosis of Autism Spectrum Disorder by Developmental-Behavioral Pediatricians in Academic Centers: A DBPNet Study." *Pediatrics* 137 (February 1, 2016): S79–89. <https://doi.org/10.1542/peds.2015-2851F>.
- Kuizenga-Wessel, Sophie, Carlo Di Lorenzo, Lisa M. Nicholson, Eric M. Butter, Karen L. Ratliff-Schaub, Marc A. Benninga, and Kent C. Williams. "Screening for Autism Identifies Behavioral Disorders in Children Functional Defecation Disorders." *European Journal of Pediatrics* 175, no. 10 (October 1, 2016): 1371–78. <https://doi.org/10.1007/s00431-016-2775-x>.
- Markert, Michael. "Modelled Development. Practices of Human Embryology at Göttingen University in the Second Half of the Twentieth Century." *NTM International Journal of History and Ethics of Natural Sciences, Technology and Medicine* 28, no. 4 (December 1, 2020): 481–517. <https://doi.org/10.1007/s00048-020-00275-3>.
- McCarty, Patrick, and Richard E. Frye. "Early Detection and Diagnosis of Autism Spectrum Disorder: Why Is It So Difficult?" *Seminars in Pediatric Neurology*. W.B. Saunders, October 1, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.spn.2020.100831>.
- Of journal "Morphologia," Editorial office. "Langman's Medical Embryology. 14th Edition, 2018 Author: T.W. Sadler." *Morphologia* 13, no. 4 (December 27, 2019): 90–96. <https://doi.org/10.26641/1997-9665.2019.4.90-96>.
- Stiles, Joan, and Terry L. Jernigan. "The Basics of Brain Development." *Neuropsychology Review*, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11065-010-9148-4>.
- Volpe, Joseph J. *Neurology of the Newborn*. *Neurology of the Newborn*. Elsevier, 2008. https://doi.org/10.5005/jp/books/12090_2.
- Zacharopoulos, George, Francesco Sella, and Roi Cohen Kadosh. "The Impact of a Lack of Mathematical Education on Brain Development and Future Attainment." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 118, no. 24 (June 15, 2021). <https://doi.org/10.1073/pnas.2013155118>.