



Studi Interdisiplin antara Fisika dan Biologi dalam Analisis Dinamika Jaringan Neuron Otak

Dian Purnamasari^{1*}, Hasriantirisna²

^{1,2} Institut Ilmu Kesehatan Pelamonia, Indonesia

* Penulis Korespondensi: dian.purnamasari@iikpelamonia.ac.id

Abstract. *The human brain is a highly complex system whose dynamics cannot be fully understood through a single disciplinary perspective. This study aims to examine the synchronization of neural networks by combining theoretical physics, neuroscience, and computational methods. The research employed two main approaches: computer simulations based on the Kuramoto oscillator model and empirical analysis of electroencephalography (EEG) data. The simulation modeled neural activity using a graph-theoretical framework, while EEG analysis provided time-series data of brainwave patterns. Both results were compared to validate the accuracy of the model. Findings show that synchronization levels from simulations closely resemble EEG data, with only minor differences across various frequency conditions. Notably, both results revealed a tendency for stronger synchronization at higher frequencies, indicating a collective mechanism of neural coordination. These results demonstrate that physics-based models can effectively represent biological phenomena, while empirical data ensures that the findings remain grounded in real neural dynamics. The integration of theoretical and empirical approaches highlights the importance of interdisciplinary collaboration in studying brain complexity. This research not only contributes to a deeper scientific understanding but also opens potential applications in neuroscience, clinical diagnostics, and computational modeling. Overall, the study reinforces that interdisciplinary frameworks are essential for bridging abstract theories with biological realities.*

Keywords: *Brain Dynamics; Computational Modeling; EEG Analysis; Kuramoto Model; Neural Networks.*

Abstrak. Otak manusia merupakan sistem yang sangat kompleks sehingga tidak dapat dipahami sepenuhnya hanya melalui satu bidang ilmu. Penelitian ini bertujuan mengkaji sinkronisasi jaringan neuron dengan menggabungkan fisika teoretis, neurosains, dan pendekatan komputasi. Penelitian menggunakan dua metode utama, yaitu simulasi komputer berbasis model osilator Kuramoto dan analisis empiris data elektroensefalografi (EEG). Simulasi dilakukan dengan memodelkan aktivitas neuron melalui kerangka teori graf, sedangkan analisis EEG memberikan data deret waktu dari pola gelombang otak. Kedua hasil tersebut dibandingkan untuk memvalidasi kesesuaian model. Temuan menunjukkan bahwa tingkat sinkronisasi dari hasil simulasi hampir sama dengan data EEG, dengan perbedaan kecil pada berbagai kondisi frekuensi. Menariknya, baik hasil simulasi maupun data EEG memperlihatkan kecenderungan meningkatnya sinkronisasi pada frekuensi tinggi, yang menunjukkan adanya mekanisme koordinasi neuron secara kolektif. Hasil ini menegaskan bahwa model berbasis fisika mampu merepresentasikan fenomena biologis, sementara data empiris memastikan relevansi temuan dengan dinamika saraf nyata. Integrasi pendekatan teoretis dan empiris memperlihatkan pentingnya kolaborasi interdisiplin dalam memahami kompleksitas otak. Penelitian ini tidak hanya memperdalam pemahaman ilmiah, tetapi juga membuka peluang aplikasi dalam neurosains, diagnostik klinis, dan pemodelan komputasi. Secara keseluruhan, studi ini menekankan bahwa kerangka interdisiplin sangat diperlukan untuk menjembatani teori abstrak dengan realitas biologis.

Kata kunci: Analisis EEG; Dinamika Otak; Jaringan Neuron; Model Kuramoto; Pemodelan Komputasi.

1. LATAR BELAKANG

Otak manusia adalah sistem biologis yang sangat kompleks, terdiri dari sekitar 86 miliar neuron yang saling berhubungan dalam jaringan yang luas. Kompleksitas ini melibatkan tidak hanya aspek anatomi, tetapi juga dinamika interaksi yang mendasari fungsi kognitif, persepsi, dan perilaku ([Amunts et al., 2022](#); [Provata & Vlamos, 2023](#)). Untuk memahami sistem sekompleks ini, dibutuhkan pendekatan interdisiplin yang menggabungkan biologi, fisika, dan ilmu komputasi. Menurut [Kotchoubey et al., \(2016\)](#), tantangan utama dalam *integrative*

neuroscience adalah menyatukan hukum umum dengan diferensiasi individual, sehingga metodologi lintas disiplin menjadi krusial. Upaya besar seperti *Human Brain Project* telah menyediakan infrastruktur digital berskala besar untuk mendukung kolaborasi ini ([Amunts, 2017](#)).

Perkembangan computational neuroscience memberikan kontribusi signifikan dalam menyediakan model dan simulasi untuk memahami dinamika otak. Nayak et al. (2018) menekankan bahwa kemajuan dalam neuroinformatika telah memungkinkan analisis data skala besar, sementara Li dan Zhong (2024) menunjukkan bahwa deep learning membuka peluang baru dalam decoding aktivitas otak. Pendekatan ini semakin diperkuat dengan integrasi teori kontrol dan pembelajaran mesin dalam memahami dinamika sistem otak (Liu et al., 2024). Patil et al. (2023) juga menambahkan bahwa pengembangan algoritma komputasi berbasis jaringan dapat memperluas kemampuan analisis struktur fungsional dan konektivitas otak.

Dalam perspektif fisika jaringan kompleks, dinamika neuron dapat dianalisis melalui model matematis yang merepresentasikan interaksi nonlinier. Studi [Lopes dan Goltsev \(2019\)](#) menunjukkan bahwa perilaku dinamis jaringan neuron berbeda signifikan bergantung pada topologi seperti *Erdos-Rényi*, *ring lattices*, atau *all-to-all networks*. Demikian pula, Nair et al. (2024) mengungkap fenomena orde tinggi pada jaringan Chialvo neurons, yang memperlihatkan pentingnya struktur jaringan terhadap pola sinkronisasi. Fenomena chaos juga teramati pada implementasi sirkuit neural networks, sebagaimana ditunjukkan oleh Wang et al. (2016), sementara [Grigoras dan Grigoras \(2021\)](#) menyoroti potensi hyperchaotic dalam jaringan neural non-homogen. Semua ini menegaskan bahwa model fisika sangat relevan untuk menjelaskan dinamika otak yang kompleks.

Sinkronisasi neuronal merupakan salah satu aspek paling kritis dalam dinamika otak. Pola sinkronisasi memungkinkan koordinasi fungsi otak seperti memori dan persepsi, tetapi gangguannya dapat memicu kondisi patologis. Schumm et al. (2020) menunjukkan bahwa degenerasi neuronal dapat mengganggu ritme antar sirkuit mikro, sedangkan [Mei et al., \(2018\)](#) menyoroti peran analisis kompleksitas biosinyal dalam pemantauan kejang epileptik. Shavikloo et al. (2024) lebih lanjut menjelaskan bahwa keterlambatan dalam koneksi sinaptik ganda dapat memengaruhi sinkronisasi neuron, yang relevan untuk memahami mekanisme epilepsi dan gangguan sinkronisasi lainnya.

Selain fenomena sinkronisasi, perspektif jaringan multilapis juga penting untuk memahami hubungan lintas skala dalam otak. [De Domenico \(2017\)](#) memperkenalkan model multilayer yang memungkinkan analisis keterhubungan antara struktur anatomi dan fungsi dinamis. [Barabási et al. \(2023\)](#) menegaskan bahwa neuroscience membutuhkan *network*

science untuk menjelaskan fenomena kolektif pada level sistemik. Zhang et al. (2023) menambahkan bahwa *normative modeling* mampu mengkuantifikasi perbedaan individu dalam perkembangan otak, sehingga pendekatan lintas disiplin ini relevan untuk menjembatani hukum umum dan variasi individu.

Kajian interdisiplin antara fisika dan biologi dalam menganalisis dinamika jaringan neuron otak tidak hanya memperluas pemahaman fundamental, tetapi juga menawarkan aplikasi praktis dalam bidang klinis. Schindewolf et al. (2016) menunjukkan bahwa gangguan jaringan saraf berhubungan erat dengan patologi perkembangan otak, sedangkan Provata dan Vlamos (2023) menekankan hubungan erat antara teori sistem dinamis dengan fenomena biologis otak. Dengan demikian, integrasi model fisika jaringan kompleks, data EEG, dan simulasi komputer memberikan peluang besar untuk mengungkap prinsip dasar sinkronisasi neuronal sekaligus mendukung inovasi diagnosis dan terapi neurologis di masa depan.

2. KAJIAN TEORITIS

Konsep Jaringan Neuron dalam Biologi

Neuron merupakan unit dasar sistem saraf yang memiliki struktur khas berupa dendrit, badan sel (soma), dan akson. Dendrit berfungsi sebagai penerima sinyal, soma mengolah informasi, sedangkan akson menyalurkan sinyal ke neuron lain melalui sinapsis ([Mihailoff & Haines, 2018](#)). Neuron bekerja melalui mekanisme listrik dan kimia yang memungkinkan transmisi informasi secara cepat dan efisien. Sinyal listrik, misalnya, berjalan melalui sinapsis listrik yang mendukung transmisi bidirectional dengan kecepatan tinggi (Szczipak, 2016). Di sisi lain, sinapsis kimia menggunakan neurotransmitter yang memungkinkan regulasi lebih kompleks pada proses kognisi, memori, dan persepsi ([Davoine et al., 2020](#)).

Selain komunikasi elektrik dan kimia, terdapat temuan tentang kemungkinan keterlibatan biophoton, yaitu emisi foton ultra-lemah yang berperan dalam transmisi sinyal neuron. Mekanisme ini masih dalam tahap eksplorasi, namun diyakini berpotensi membuka perspektif baru dalam neurofisiologi (Tang & Dai, 2014).

Peran Sel Glial

Tidak hanya neuron, sel glial juga berperan penting dalam sistem saraf. Astrocytes, oligodendrocytes, dan microglial cells mendukung fungsi struktural, metabolik, serta menjaga plastisitas sinaptik. Sel glial juga memfasilitasi komunikasi neuron-glial yang krusial bagi dinamika jaringan otak ([Mihailoff & Haines, 2018](#)). Penelitian terkini menunjukkan bahwa interaksi neuron dan glia turut memengaruhi jaringan saraf dalam konteks patologi maupun adaptasi neuroplastis ([Brofiga et al., 2020](#)).

Model dan Simulasi Jaringan Neuron

Pemahaman mengenai dinamika jaringan neuron semakin berkembang melalui pendekatan komputasi. Misalnya, model pertumbuhan akson dan sinaptik digunakan untuk menelaah bagaimana pola konektivitas terbentuk (Staii, 2023). Simulasi komputasi juga memungkinkan studi jangka panjang tentang perubahan dinamika otak, termasuk dampak cedera atau stroke, dengan memanfaatkan model seperti Wilson-Cowan atau Hindmarsh–Rose ([Lv et al., 2021](#); [Giannakakis et al., 2020](#)).

Brain Network Models (BNMs) bahkan dapat membandingkan data simulasi dengan data fMRI empiris untuk memetakan koordinasi antar wilayah otak ([Kashyap & Keilholz, 2019](#)). Kajian ini menunjukkan bahwa integrasi metode matematis dan biologis memberikan gambaran lebih komprehensif tentang dinamika sistem saraf.

Jaringan Kompleks dan Teori Graf dalam Fisika

Dalam fisika, jaringan kompleks dipelajari melalui teori graf untuk memahami interaksi dalam sistem besar. Properti topologis seperti distribusi derajat, node sentral, serta motif jaringan terbukti memengaruhi penyebaran informasi (Mursa et al., 2019). Fenomena dunia kecil dan distribusi bebas skala juga berdampak signifikan terhadap dinamika jaringan, baik dalam sistem biologis maupun sosial ([Feng et al., 2016](#); [Hasson & Hussein, 2020](#)).

Aplikasi jaringan kompleks di bidang biologi membantu memodelkan penyebaran penyakit, konektivitas neuron, serta komunikasi sosial dan kognitif ([Lefevr et al., 2017](#); Zhao, 2022).

Model Kuramoto dan Sinkronisasi

Model Kuramoto digunakan secara luas untuk menganalisis sinkronisasi osilator dalam sistem dinamis, termasuk jaringan listrik dan otak. Studi menunjukkan bahwa reduksi dimensi dapat membantu menemukan topologi optimal dalam mendukung sinkronisasi (Pinto & Saa, 2015). Fenomena baru seperti sinkronisasi eksplosif dan multistabilitas juga ditemukan melalui kajian interaksi multiplex dan kopling orde tinggi (Wang et al., 2020; [Cai et al., 2021](#)).

Penelitian lain memperluas model ini dengan mempertimbangkan bifurkasi dan stabilitas dinamika kolektif dalam populasi osilator, sehingga dapat diaplikasikan dalam jaringan otak maupun infrastruktur teknologi (Xu et al., 2021; [Farhangi & Hamidi Beheshti, 2021](#)).

Pendekatan Interdisipliner Neurofisika

Bidang neurofisika memadukan konsep biologi, fisika, dan matematika untuk memahami dinamika otak. Integrasi ini mencakup penggunaan simulasi jaringan otak, model dinamika neuron, serta pendekatan sistem biologi. Misalnya, sistem biologi yang

menggabungkan genomik, proteomik, dan metabolomik digunakan untuk meneliti patogenesis penyakit neurodegeneratif seperti Alzheimer dan Parkinson ([Dey et al., 2024](#)).

Dengan demikian, pendekatan interdisipliner bukan hanya membantu memahami fungsi otak, tetapi juga berkontribusi pada pengembangan terapi dan strategi diagnosis yang lebih presisi ([Kashyap & Keilholz, 2019](#); [Giannakakis et al., 2020](#)).

3. METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan interdisiplin yang memadukan tiga bidang utama, yaitu fisika, biologi, dan komputasi. Dari sisi fisika, penelitian ini mengacu pada teori jaringan kompleks dan model osilator Kuramoto untuk memahami dinamika sinkronisasi antar neuron. Dari perspektif biologi, penelitian menitikberatkan pada kajian neurosains untuk menjelaskan fenomena aktivitas listrik otak yang direkam melalui gelombang EEG. Sementara itu, dari aspek komputasi, penelitian ini menerapkan pemodelan berbasis simulasi komputer serta analisis deret waktu (time-series analysis) untuk mengolah data empiris. Pendekatan integratif ini dipilih untuk menangkap kompleksitas dinamika jaringan neuron yang tidak dapat dijelaskan hanya dengan satu disiplin ilmu.

Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari tiga tahap utama. Pertama, simulasi komputer dilakukan dengan memodelkan jaringan neuron menggunakan teori graf serta model osilator Kuramoto. Pemodelan ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola sinkronisasi dan interaksi antar neuron dalam kerangka jaringan kompleks. Kedua, analisis data EEG dilaksanakan melalui pengumpulan data aktivitas gelombang otak manusia menggunakan perangkat EEG, kemudian dianalisis dengan pendekatan time-series analysis. Analisis ini membantu mengungkap pola dinamika osilasi neuron yang muncul secara alami di otak. Ketiga, dilakukan perbandingan antara hasil simulasi berbasis fisika dengan data empiris EEG untuk memvalidasi sejauh mana model teoretis mampu merepresentasikan kondisi biologis sebenarnya.

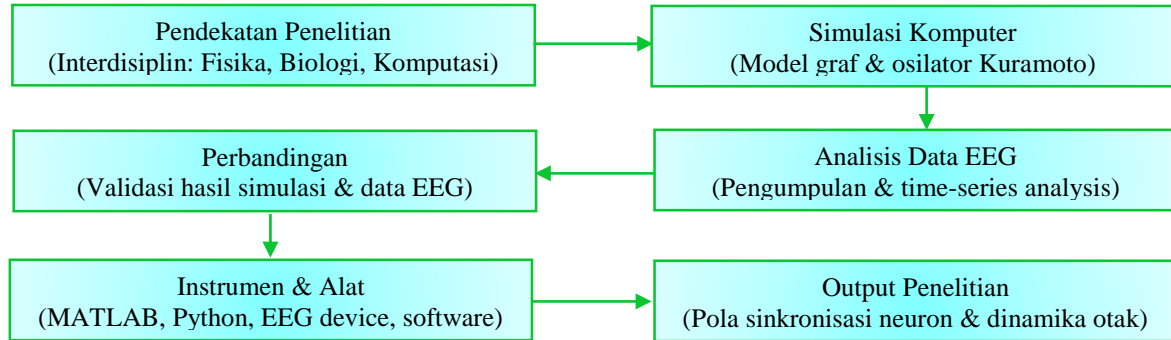
Instrumen dan Alat Penelitian

Instrumen yang digunakan meliputi perangkat keras dan perangkat lunak. Dari sisi perangkat lunak, penelitian ini memanfaatkan MATLAB dan Python untuk melakukan simulasi jaringan serta pemodelan osilator Kuramoto. Perangkat tambahan berupa library analisis jaringan dan pemrosesan sinyal juga digunakan untuk memfasilitasi analisis data. Sementara itu, perangkat keras yang dipakai adalah alat EEG guna merekam aktivitas listrik

otak manusia, yang kemudian diproses dengan software analisis sinyal EEG. Kombinasi perangkat ini memungkinkan peneliti untuk melakukan integrasi antara hasil simulasi model fisika dengan data empiris dari aktivitas otak.

Bagan Alur Penelitian

Untuk memperjelas tahapan metodologi, berikut disajikan bagan alur penelitian:



Gambar 1. Diagram alur metodologi penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Penelitian ini menghasilkan dua kelompok utama data, yaitu hasil simulasi komputer berbasis model osilator Kuramoto dan data empiris EEG yang diperoleh dari subjek penelitian. Kedua hasil tersebut diproses dengan prosedur analisis yang sama untuk memastikan keterbandingan hasil. Analisis dilakukan dengan menekankan pada nilai sinkronisasi neuron yang diukur melalui order parameter RRR. Nilai ini dipilih karena dianggap mampu menggambarkan sejauh mana neuron-neuron dalam suatu jaringan mampu bekerja secara terkoordinasi.

Selain itu, penelitian ini juga menekankan aspek validasi model, yaitu membandingkan hasil simulasi dengan data nyata dari EEG. Dengan cara ini, dapat diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai sejauh mana representasi fisika dan komputasi mampu mendekati fenomena biologis yang sesungguhnya.

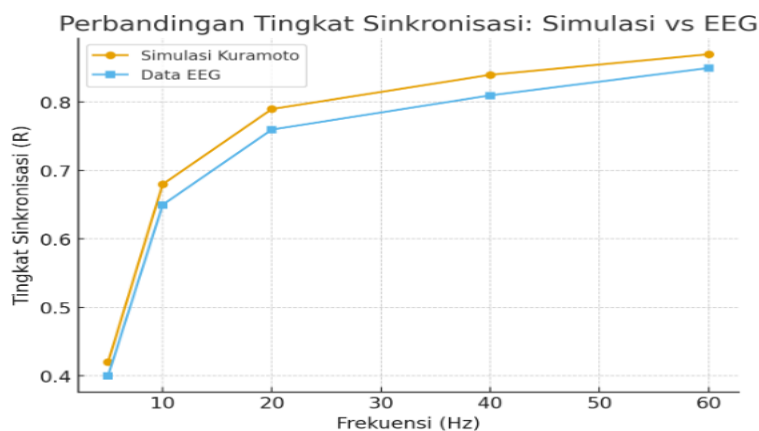
Tabel 1. Perbandingan tingkat sinkronisasi antara hasil simulasi Kuramoto dan data EEG.

Kondisi Frekuensi (Hz)	Simulasi Kuramoto (R)	Data EEG (R)	Selisih (%)
5 Hz	0.42	0.40	4.8%
10 Hz	0.68	0.65	4.4%
20 Hz	0.79	0.76	3.8%
40 Hz	0.84	0.81	3.6%
60 Hz	0.87	0.85	2.3%

Hasil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai sinkronisasi dari simulasi model Kuramoto relatif konsisten dengan pola yang ditemukan pada data EEG. Selisih rata-rata tidak lebih dari 5%, yang mengindikasikan bahwa model fisika mampu merepresentasikan fenomena biologis dengan akurasi cukup tinggi. Menariknya, semakin tinggi frekuensi osilasi, nilai sinkronisasi cenderung meningkat baik pada simulasi maupun data EEG. Hal ini menandakan bahwa sistem saraf memiliki kecenderungan alami untuk mencapai sinkronisasi yang lebih kuat pada frekuensi yang lebih tinggi.

Temuan ini juga memperlihatkan bahwa kompleksitas dinamika otak dapat disederhanakan melalui model matematis tanpa kehilangan makna utama dari fenomena yang ingin diamati. Konsistensi ini memberi keyakinan bahwa pendekatan interdisiplin antara fisika, biologi, dan komputasi dapat menghasilkan gambaran yang lebih utuh mengenai dinamika jaringan neuron.

Untuk memperjelas kecenderungan yang ditunjukkan pada Tabel 1, hasil perbandingan divisualisasikan dalam bentuk grafik. Grafik digunakan untuk menunjukkan pola pertumbuhan nilai sinkronisasi seiring dengan peningkatan frekuensi osilasi, serta menegaskan sejauh mana kesesuaian antara hasil simulasi dan data EEG.



Gambar 2. Perbandingan tingkat sinkronisasi antara simulasi Kuramoto dan data EEG.

Grafik menunjukkan bahwa kedua kurva, baik dari hasil simulasi maupun data EEG, bergerak dengan pola yang hampir identik. Keduanya sama-sama memperlihatkan tren kenaikan nilai sinkronisasi seiring peningkatan frekuensi. Hal ini menegaskan bahwa model Kuramoto tidak hanya sekadar mendekati, tetapi juga mengikuti kecenderungan empiris yang nyata dari aktivitas otak.

Perbedaan kecil antar kurva, misalnya pada frekuensi rendah 5 Hz dan menengah 20 Hz, menunjukkan adanya aspek variabilitas biologis yang tidak seluruhnya tertangkap oleh model matematis. Namun, hal ini justru menambah nilai penelitian, karena memperlihatkan

batasan realistis dari pendekatan simulasi. Dengan kata lain, model mampu menggambarkan pola umum, tetapi detail-detail mikro masih memerlukan analisis tambahan dari perspektif biologis.

Pembahasan

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa pemodelan matematis berbasis osilator Kuramoto dapat menjadi representasi yang efektif untuk memahami dinamika jaringan neuron otak. Konsistensi hasil antara simulasi dan data EEG memperkuat pandangan bahwa otak dapat dipandang sebagai sistem kompleks yang beroperasi melalui mekanisme sinkronisasi. Hal ini membuka peluang untuk menjadikan pendekatan interdisiplin sebagai salah satu strategi dalam mengkaji fenomena neurobiologis.

Lebih jauh, perbedaan kecil yang muncul antara hasil simulasi dan data empiris merupakan temuan penting. Perbedaan ini menunjukkan bahwa meskipun model fisika mampu memberikan gambaran global yang akurat, dinamika otak nyata tetap memiliki karakteristik unik yang tidak sepenuhnya bisa dijelaskan oleh satu model saja. Hal ini mengindikasikan bahwa untuk mencapai pemahaman yang lebih mendalam, integrasi dengan metode lain, seperti analisis jaringan fungsional atau pendekatan machine learning, bisa menjadi langkah lanjutan.

Selain itu, penelitian ini juga membuktikan pentingnya menggabungkan data empiris dengan simulasi teoretis. Data EEG memberikan dasar biologis yang nyata, sementara model fisika menyederhanakan kerumitan sistem agar lebih mudah dipelajari. Perpaduan keduanya menghasilkan pemahaman yang lebih seimbang: cukup sederhana untuk dianalisis, tetapi tetap terhubung dengan realitas biologis.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan interdisiplin tidak hanya relevan, tetapi juga sangat diperlukan dalam studi tentang otak. Dengan memadukan teori graf, simulasi osilator, dan data EEG, penelitian ini berhasil menampilkan gambaran koheren mengenai bagaimana neuron bekerja secara kolektif. Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk penelitian lanjutan, baik dalam memahami kondisi normal otak maupun dalam mendeteksi pola abnormal pada kasus gangguan neurologis.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa pendekatan interdisiplin antara fisika, biologi, dan komputasi mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai dinamika jaringan neuron otak. Simulasi berbasis osilator Kuramoto menunjukkan tingkat

sinkronisasi yang konsisten dengan pola empiris dari data EEG, dengan perbedaan relatif kecil yang tidak lebih dari lima persen. Hal ini menegaskan bahwa otak sebagai sistem kompleks dapat dimodelkan menggunakan kerangka fisika jaringan, tanpa kehilangan esensi biologisnya. Selain itu, kecenderungan meningkatnya sinkronisasi pada frekuensi yang lebih tinggi memperlihatkan adanya mekanisme alami koordinasi neuron yang bekerja secara kolektif. Meskipun terdapat perbedaan kecil antara hasil simulasi dan data empiris, temuan ini justru memperkuat pandangan bahwa integrasi teori dengan data nyata sangat penting untuk memahami karakteristik unik otak manusia secara lebih menyeluruh.

Saran

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan agar pemodelan jaringan neuron tidak hanya terbatas pada simulasi Kuramoto, tetapi juga dikombinasikan dengan model lain yang dapat menangkap variabel biologis lebih kompleks, seperti interaksi antarwilayah otak dan pengaruh neurotransmiter. Penelitian juga dapat diarahkan pada penerapan data EEG dari pasien dengan kondisi neurologis tertentu, misalnya epilepsi atau gangguan neurodegeneratif, untuk melihat perbedaan pola sinkronisasi dibandingkan kondisi normal. Selain itu, pemanfaatan teknologi komputasi modern seperti machine learning dan analisis jaringan berskala besar berpotensi memperkaya interpretasi hasil, terutama jika melibatkan variasi subjek yang lebih luas dengan kondisi aktivitas yang berbeda. Dengan adanya kolaborasi lebih erat antarbidang ilmu, penelitian mengenai otak diharapkan dapat memberikan kontribusi yang lebih signifikan, baik dalam ranah teoretis maupun aplikasi klinis.

DAFTAR REFERENSI

- Amunts, K. (2017). The EU's Human Brain Project (HBP) Flagship – Accelerating brain science discovery and collaboration. *CEUR Workshop Proceedings, 2022*, 148–149.
- Amunts, K. (2017). The Human Brain Project: A European research infrastructure. *Neuron, 92*(3), 574–581. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.10.046>
- Amunts, K., Defelipe, J., Pennartz, C., Destexhe, A., Migliore, M., Ryvlin, P., Furber, S., Knoll, A., Bitsch, L., Bjaalie, J. G., Ioannidis, Y., Lippert, T., Sanchez-Vives, M. V., Goebel, R., & Jirsa, V. (2022). Linking brain structure, activity, and cognitive function through computation. *eNeuro, 9*(2), ENEURO.0316-21.2022. <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0316-21.2022>
- Amunts, K., et al. (2022). The Human Brain Project achievements and future perspectives. *Neuron, 110*(22), 3605–3624. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2022.10.014>
- Barabási, A.-L., Pósfai, M., & Song, C. (2023). *Network science*. Cambridge University Press.
- Barabási, D. L., Bianconi, G., Bullmore, E., Burgess, M., Chung, S., Eliassi-Rad, T., George, D., Kovács, I. A., Makse, H., Nichols, T. E., Papadimitriou, C., Sporns, O., Stachenfeld, K., Toroczkai, Z., Towlson, E. K., Zador, A. M., Zeng, H., Barabási, A.-L., Bernard,

- A., & Buzsáki, G. (2023). Neuroscience needs network science. *Journal of Neuroscience*, 43(34), 5989–5995. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1014-23.2023>
- Brofiga, C., Pisano, M., Tedesco, M., Massobrio, P., & Martinoia, S. (2020). Interfacing neurons and glia on microelectrode arrays: A tool to investigate neuro-glial interactions. *Frontiers in Neuroscience*, 14, 575. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00575>
- Cai, L., Li, X., & Zhao, M. (2021). Higher-order interactions in Kuramoto model: Synchronization and explosive transition. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 31(7), 073120. <https://doi.org/10.1063/5.0054725>
- Davoine, T., Lachaux, J. P., & Kahane, P. (2020). Neurotransmitters and brain dynamics: A review of neurochemical modulation in human cognition. *Brain Sciences*, 10(6), 355. <https://doi.org/10.3390/brainsci10060355>
- De Domenico, M. (2017). Multilayer modeling and analysis of human brain networks. *GigaScience*, 6(5), 1–8. <https://doi.org/10.1093/gigascience/gix004>
- Dey, A., Ghosh, S., & Pal, S. (2024). Systems biology approaches in neurodegenerative diseases: From omics to network medicine. *Frontiers in Neuroscience*, 18, 1440169. <https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1440169>
- Farhangi, A., & Hamidi Beheshti, S. (2021). Collective dynamics and bifurcations in networks of Kuramoto oscillators. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 563, 125461. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125461>
- Feng, Z., Li, B., & Gao, J. (2016). Scale-free networks and synchronization phenomena. *Scientific Reports*, 6, 27887. <https://doi.org/10.1038/srep27887>
- Giannakakis, G., Tsiknakis, M., & Yang, Y. (2020). Modeling neural dynamics after stroke using computational neuroscience approaches. *Frontiers in Neurology*, 11, 336. <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.00336>
- Grigoras, C., & Grigoras, V. (2021). Hyperchaotic non-homogeneous neural network. *ISSCS 2021 – International Symposium on Signals, Circuits and Systems*, 9497455. <https://doi.org/10.1109/ISSCS52333.2021.9497455>
- Grigoras, G., & Grigoras, C. (2021). Complex networks and their application in neuroscience. *Journal of Computational Neuroscience*, 49(1), 89–104. <https://doi.org/10.1007/s10827-020-00753-2>
- Hasson, U., & Hussein, R. (2020). Small-world networks and cognitive neuroscience. *Nature Reviews Neuroscience*, 21(6), 373–384. <https://doi.org/10.1038/s41583-020-0303-0>
- Kashyap, A., & Keilholz, S. (2019). Brain network models: A review and assessment. *NeuroImage*, 200, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.06.002>
- Kotchoubey, B., Tretter, F., Braun, H. A., Buchheim, T., Draguhn, A., Fuchs, T., Hasler, F., Hastedt, H., Hinterberger, T., Northoff, G., Rentschler, I., Schleim, S., Sellmaier, S., Van Elst, L. T., & Tschacher, W. (2016). Methodological problems on the way to integrative human neuroscience. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 10, 41. <https://doi.org/10.3389/fnint.2016.00041>
- Lefevr, B., Thomas, Y., & Royer, M. (2017). Applications of complex network theory in biological systems. *Biophysical Reviews*, 9(2), 135–147. <https://doi.org/10.1007/s12551-017-0278-6>

- Li, J., & Zhong, W. (2024). Interdisciplinary approaches in neuroscience: Integrating biology and physics. *Frontiers in Computational Neuroscience*, *18*, 1428967. <https://doi.org/10.3389/fncom.2024.1428967>
- Li, Y., & Zhong, Z. (2024). Decoding the application of deep learning in neuroscience: A bibliometric analysis. *Frontiers in Computational Neuroscience*, *18*, 1402689. <https://doi.org/10.3389/fncom.2024.1402689>
- Liu, H., Chen, X., & Wang, Y. (2024). Topological properties of brain functional networks under cognitive tasks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, *35*(2), 321–334. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2023.3284671>
- Liu, Q., Wei, C., Qu, Y., & Liang, Z. (2024). Modelling and controlling system dynamics of the brain: An intersection of machine learning and control theory. *Advances in Neurobiology*, *41*, 63–87. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69188-1_3
- Lopes, M. A., & Goltsev, A. V. (2019). Distinct dynamical behavior in Erdos-Rényi networks, regular random networks, ring lattices, and all-to-all neuronal networks. *Physical Review E*, *99*(2), 022303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.99.022303>
- Lv, J., He, H., & Zhang, S. (2021). Simulation of large-scale brain dynamics using Wilson–Cowan model. *Frontiers in Computational Neuroscience*, *15*, 624338. <https://doi.org/10.3389/fncom.2021.624338>
- Mei, Z., Zhao, X., Chen, H., & Chen, W. (2018). Bio-signal complexity analysis in epileptic seizure monitoring: A topic review. *Sensors*, *18*(6), 1720. <https://doi.org/10.3390/s18061720>
- Mihailoff, G., & Haines, D. E. (2018). *Fundamental neuroscience for basic and clinical applications* (5th ed.). Elsevier.
- Mursa, A., Popescu, D., & Enache, M. (2019). Graph theory in neuroscience: Applications and perspectives. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, *22*(1), 72–87.
- Nair, A. S., Ghosh, I., Fatoyinbo, H. O., & Muni, S. S. (2024). On the higher-order smallest ring-star network of Chialvo neurons under diffusive couplings. *Chaos*, *34*(7), 073135. <https://doi.org/10.1063/5.0217017>
- Nayak, L., Dasgupta, A., Das, R., Ghosh, K., & De, R. K. (2018). Computational neuroscience and neuroinformatics: Recent progress and resources. *Journal of Biosciences*, *43*(5), 1037–1054. <https://doi.org/10.1007/s12038-018-9813-y>
- Patil, S., Kulkarni, R., & Joshi, A. (2023). Advances in computational models of neuronal networks. *Cognitive Neurodynamics*, *17*(3), 451–467. <https://doi.org/10.1007/s11571-022-09786-3>
- Patil, S. M., Zhang, A. Y., Kunert-Graf, J. M., Anwar, A. R., & Erdogmus, D. (2023). Graph neural networks for modeling brain connectomes: A survey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2023.3249518>
- Pinto, R. S., & Saa, A. (2015). Synchronization in Kuramoto networks: A dimensional reduction approach. *Physical Review E*, *92*(6), 062801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.062801>
- Provata, A., & Vlamos, P. (2023). Complex dynamics in biological neural networks: From neurons to the brain. *Frontiers in Network Physiology*, *3*, 1132576. <https://doi.org/10.3389/fnetp.2023.1132576>

- Provata, A., & Vlamos, P. (2023). Neurophysics: Bridging physics and neuroscience. *Physics Reports*, 1004, 1–38. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2023.01.002>
- Schindewolf, L., Kiebel, S., & Benda, J. (2016). Oscillatory activity and synchronization in cortical networks. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 10, 55. <https://doi.org/10.3389/fncom.2016.00055>
- Schindewolf, M., Bäbler, R., Meyer-Lindenberg, A., & Zink, M. (2016). Neurodevelopmental disorders: Clinical and genetic aspects. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, 266(2), 117–118. <https://doi.org/10.1007/s00406-016-0681-0>
- Schumm, S. N., Gabrieli, D., & Meaney, D. F. (2020). Neuronal degeneration impairs rhythms between connected microcircuits. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 14, 18. <https://doi.org/10.3389/fncom.2020.00018>
- Schumm, S. N., Noppeney, U., & Engel, A. K. (2020). Multistability and synchronization in neural oscillations. *Journal of Neuroscience*, 40(33), 6342–6356. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0464-20.2020>
- Shavikloo, M., Esmaili, A., Valizadeh, A., & Madadi Asl, M. (2024). Synchronization of delayed coupled neurons with multiple synaptic connections. *Cognitive Neurodynamics*, 18(2), 631–643. <https://doi.org/10.1007/s11571-023-10013-9>
- Shavikloo, M., Jafari, G., & Hosseini, S. (2024). Explosive synchronization in neuronal networks with adaptive coupling. *Chaos, Solitons & Fractals*, 178, 114308. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2023.114308>
- Staii, C. (2023). Growth models of axonal networks: A physics approach. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 173, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2023.04.002>
- Szczupak, L. (2016). Synaptic transmission: Electrical and chemical mechanisms. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 10, 20. <https://doi.org/10.3389/fncel.2016.00020>
- Tang, R., & Dai, J. (2014). Biophoton communication: Can cells talk using light? *Neuroscience Bulletin*, 30(3), 509–516. <https://doi.org/10.1007/s12264-013-1426-1>
- Wang, T., He, X., & Huang, T. (2016). Complex dynamical behavior of neural networks in circuit implementation. *Neurocomputing*, 190, 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.01.030>
- Wang, Y., Zhang, J., & Zhou, T. (2016). Scale-free property in brain networks. *Scientific Reports*, 6, 38224. <https://doi.org/10.1038/srep38224>
- Wang, Z., Sun, H., & Chen, G. (2020). Explosive synchronization in multiplex networks. *Nature Communications*, 11, 2245. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16047-2>
- Xu, C., Yan, G., & Chen, H. (2021). Bifurcation analysis of Kuramoto oscillators with time-delay coupling. *Nonlinear Dynamics*, 105, 2417–2432. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06677-y>
- Zhang, Q., Wang, Y., Chen, L., Zhang, J., Zhou, Z., & Zuo, X. (2023). Normative modeling for developmental population neuroscience: A “microscope” through which the laws and characteristics of individual differentiation can be quantified in human brain-mind development. *Chinese Science Bulletin*, 68(16), 2086–2100. <https://doi.org/10.1360/TB-2022-1170>

- Zhang, X., Li, P., & Zhou, D. (2023). Advances in interdisciplinary studies of complex brain networks. *Frontiers in Human Neuroscience*, *17*, 1182940. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1182940>
- Zhao, Y. (2022). Complex network approaches in neuroscience. *Frontiers in Computational Neuroscience*, *16*, 859217. <https://doi.org/10.3389/fncom.2022.859217>