

PENDEKATAN NUMERIK TERHADAP DINAMIKA TRANSPOR ION Ca^{2+} DAN K^+ DALAM SISTEM SARAF AKSON BERBASIS MODEL MORRIS-LECAR DENGAN METODE ODE45

Netriani Veminsyah Ahda^{*1}, Tiara Hardyanti Utama²

^{1,2}Universitas Bengkulu
e-mail^{*1}: nvahda@unib.ac.id,

Diterima 8 Juli 2025

Disetujui 28 Agustus 2025

Dipublikasikan 31 Agustus 2025

<https://doi.org/10.33369/jkf.8.2.33-40>

ABSTRAK

Pemodelan transpor ion dalam sistem saraf sangat penting untuk memahami mekanisme potensial aksi dan dinamika membran sel. Penelitian ini menyajikan simulasi dinamika potensial membran akson berdasarkan model Morris-Lecar, yang merepresentasikan aktivitas neuron dengan memasukkan kontribusi utama dari ion K^+ (Kalium) dan Ca^{2+} (Kalsium). Simulasi dilakukan menggunakan metode numerik ODE45 pada platform Matlab. Model ini mencakup dua variabel utama: potensial membran dan variabel saluran ion (K^+ dan Ca^{2+}), yang diturunkan dari sistem persamaan diferensial. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model Morris-Lecar secara efektif merepresentasikan osilasi dan ambang eksitabilitas neuron dalam menanggapi stimulus arus. Pengaruh dominan ion Ca^{2+} terhadap proses depolarisasi serta peran ion K^+ dalam repolarisasi juga ditunjukkan secara kuantitatif. Dengan pendekatan ini, metode ODE45 terbukti stabil dan efisien dalam menangani dinamika neuron yang kompleks. Studi ini memberikan dasar yang kuat untuk analisis lebih lanjut dalam neurofisiologi komputasional dan pemodelan biologi seluler.

Kata kunci : Transpor Ion, Model Morris-Lecar, Metode ODE45.

ABSTRACT

Modeling ion transport in the nervous system is essential to understanding the mechanisms of action potentials and cell membrane dynamics. This study presents simulations of axon membrane potential dynamics based on the Morris-Lecar model, which uses K^+ (potassium) and Ca^{2+} (calcium) ions to represent neuronal activity. The simulations were performed using the ODE45 numerical method on the MATLAB platform. The model comprises two primary variables: the membrane potential and the ion channel variables (K^+ and Ca^{2+}), which are derived from a system of differential equations. The simulation results demonstrate that the Morris-Lecar model accurately represents neuronal oscillation and excitability thresholds in response to a current stimulus. The simulations also quantitatively demonstrated the dominant influence of Ca^{2+} ions on depolarization and the role of K^+ ions in repolarization. This approach proved the ODE45 method to be stable and efficient in handling complex neuronal dynamics. This study provides a solid foundation for further computational neurophysiology and cellular biology modeling analysis.

Keyword: Ion transport, Morris-Lecar model, ODE45 method.

I. PENDAHULUAN

Pemodelan transpor ion dalam sistem saraf merupakan aspek fundamental dalam memahami mekanisme potensial aksi dan dinamika membran sel (1). Proses ini melibatkan pergerakan ion-ion seperti kalium (K^+) dan kalsium (Ca^{2+}) melalui kanal ion pada membran neuron, yang berperan penting dalam pembangkitan dan propagasi sinyal listrik di sistem saraf. Pergerakan ion-ion seperti K^+ dan Ca^{2+} melalui saluran ion sangat selektif dan menciptakan perbedaan potensial listrik yang menjadi dasar terjadinya potensial aksi dan dinamika membran sel yang memungkinkan transmisi informasi antar sel saraf (2). Dinamika fluktuasi potensial membran dapat dimodelkan dengan Model Morris-Lecar. Model ini mampu mereproduksi pola spiking dan bursting yang kompleks (3).

Model Morris-Lecar menggunakan dua variabel utama untuk menggambarkan dinamika membran, dengan fokus pada kontribusi kanal ion K^+ (Kalium) sebagai arus hiperpolarisasi dan kanal

Ca^{2+} (Kalsium) sebagai arus depolarisasi (4)(5). Model Morris-Lecar tidak hanya memungkinkan simulasi dinamika potensial membran secara efisien, tetapi juga memberikan pemahaman yang lebih dalam mengenai peran masing-masing jenis ion dalam aktivitas neuron. Model ini telah diterapkan secara luas karena tidak hanya menyediakan kerangka numerik yang efisien untuk mensimulasikan dinamika potensial membran, tetapi juga memungkinkan analisis peran spesifik kanal ion Ca^{2+} dan K^+ dalam proses eksitasi neuron (6). Dengan memasukkan parameter fisiologis yang relevan, model Morris-Lecar dapat digunakan untuk mengeksplorasi berbagai pola aktivitas neuron, seperti spiking, bursting, dan bifurkasi, yang sangat penting dalam studi neurofisiologi dan pengembangan aplikasi neurokomputasi (7).

Penelitian terkini juga menyoroti pentingnya pendekatan komputasional dalam memodelkan transpor ion, baik secara deterministik maupun stokastik, untuk menangkap dinamika aktual di tingkat molekuler dan jaringan saraf (8). Pendekatan ini menangkap dinamika aktual transport ion dan material pada tingkat jaringan saraf, termasuk gangguan yang menyebabkan penyakit neurodegeneratif (9). Simulasi berbasis model Morris-Lecar telah digunakan secara luas untuk menganalisis pengaruh variasi parameter fisiologis terhadap kestabilan dan respons neuron terhadap rangsangan eksternal, serta untuk memahami mekanisme dasar dari berbagai fenomena neurodinamik (10). Dengan demikian, pemodelan transpor ion menggunakan model Morris-Lecar menjadi landasan penting dalam penelitian pendekatan numerik terhadap dinamika transpor Ion Ca^{2+} dan K^+ terhadap studi dinamika membran sistem saraf akson dan aktivitas neuron, serta berkontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan di bidang neurofisiologi dan biofisika sel saraf.

II. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, dinamika transpor ion Ca^{2+} dan K^+ dalam akson dianalisis menggunakan pendekatan numerik berbasis model Morris-Lecar. Model ini diformulasikan dalam bentuk sistem persamaan diferensial biasa (ODE) yang merepresentasikan perubahan potensial membran dan variabel ion Ca^{2+} dan K^+ terhadap waktu. Untuk memperoleh solusi numerik dari sistem persamaan tersebut, digunakan metode ODE45 pada perangkat lunak MATLAB. Metode ODE45 dipilih karena kemampuannya dalam menyelesaikan sistem persamaan diferensial nonlinier secara efisien dan akurat (11), sehingga sangat sesuai untuk memodelkan dinamika neuron seperti pada model Morris-Lecar.

Arus total (I) membran dalam model ini terdiri atas komponen kapasitif dan komponen ionik, yang secara matematis dirumuskan berdasarkan hukum arus Kirchhoff sebagai berikut:

$$I = C_M \frac{dV}{dt} + I_{Ca} + I_K \quad (1)$$

Dimana C_M adalah menyatakan kapasitansi membran, V adalah beda potensial, I_{Ca} merupakan arus ion Kalsium, I_K merupakan arus ion Kalium. Kedua arus ionik utama tersebut didefinisikan sebagai berikut

$$I_{Ca} = g_{Ca}(V - E_{Ca}) \quad (2)$$

$$I_K = g_K(V - E_K) \quad (3)$$

Dengan g_{Ca} dan g_K masing masing menyatakan konduktansi membrane terhadap ion Ca^{2+} dan K^+ , sedangkan E_{Ca} dan E_K merupakan potensial kesetimbangan *Nernst*. Fungsi beda potensial saat kondisi tetap bisa didefinisikan dengan $m(t)$ dan *Gating variable* $\omega(t)$. Evoluasi potensial membrane dipengaruhi oleh arus eksternal, sehingga dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$C \frac{dV}{dt} = -g_L(V - V_L) - g_{Ca}m_{\infty}(V)((V - V_{Ca}) - g_Kw(V)((V - V_K) + I \quad (4)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \lambda_{\omega}(v)(\omega_{\infty}(V) - \omega) \quad (5)$$

$$m_{\infty}(V) = 0.5 \left(1 + \tanh \left(\frac{V-V_1}{V_2} \right) \right) \quad (6)$$

$$\omega_{\infty}(V) = 0.5 \left(1 + \tanh \left(\frac{V-V_3}{V_4} \right) \right) \quad (7)$$

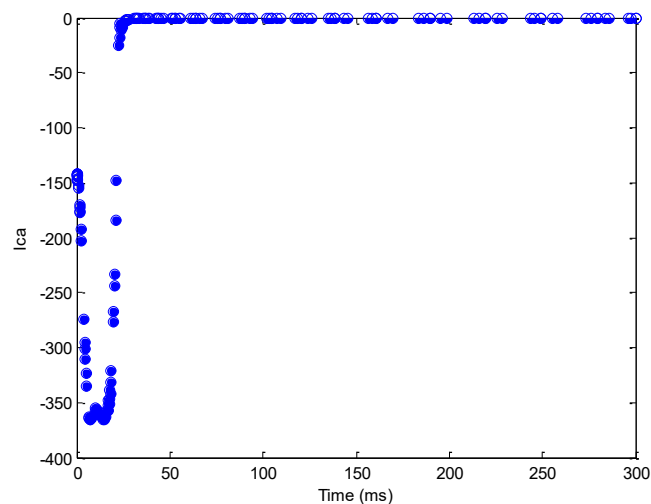
$$\lambda_{\omega}(V) = \phi \cosh \left(\frac{V-V_3}{2V_4} \right) \quad (8)$$

Kondisi ∞ adalah fungsi aktivasi keadaan yang bergantung pada tegangan. V_1, V_2, V_3, V_4 adalah parameter yang dipilih untuk mencocokkan data penjepit tegangan. Untuk keperluan simulasi numerik, model Morris–Lecar diimplementasikan dengan menggunakan seperangkat parameter standar, persamaan 1-8 dan kondisi tersebut telah banyak digunakan dalam beberapa literatur (10)(12)(13). Nilai parameter yang digunakan antara lain: konduktans membran sebesar $g_L = 2$ mS/cm² dengan potensial reversi $V_L = -60$ mV, konduktansi membran untuk ion kalsium sebesar $g_{Ca} = 4$ mS/cm² dengan potensial kesetimbangan $V_{Ca} = 120$ mV, serta konduktansi membran untuk ion kalium sebesar $g_K = 8$ mS/cm² dengan potensial kesetimbangan $V_K = -84$ mV. Kapasitansi membran total diset pada $C = 20$ μ F/cm², dan tidak terdapat arus luar yang diberikan ($I = 0$ μ A/cm²). Parameter-parameter tambahan yang digunakan dalam fungsi aktivasi antara lain $V_1 = -1.2$, $V_2 = 18$, $V_3 = 2$, dan $V_4 = 30$ mV, sedangkan faktor suhu dalam fungsi eksponensial diset sebesar $\phi = 0.04$. Waktu dalam simulasi dinyatakan dalam satuan milidetik, dan seluruh proses simulasi dilakukan selama total waktu 300 ms.

Kondisi awal dan domain waktu simulasi ditentukan secara eksplisit untuk merepresentasikan keadaan fisiologis awal neuron serta durasi dinamika yang relevan secara biologis. Proses integrasi numerik dilakukan menggunakan ODE45 guna memperoleh solusi temporal dari sistem, berupa evolusi waktu dari variabel-variabel utama model, termasuk potensial membran dan variabel kanal ion. Hasil simulasi selanjutnya dianalisis untuk mengidentifikasi karakteristik dinamik dari transpor ion intraseluler, serta sensitivitas respons sistem terhadap variasi parameter model. Pendekatan numerik ini memberikan kerangka kerja yang efektif untuk mengeksplorasi perilaku nonlinier sistem neuroelektrofisiologis yang tidak dapat diselesaikan secara analitik, serta memungkinkan evaluasi prediktif terhadap perubahan fisiologis maupun patologis pada skala seluler.

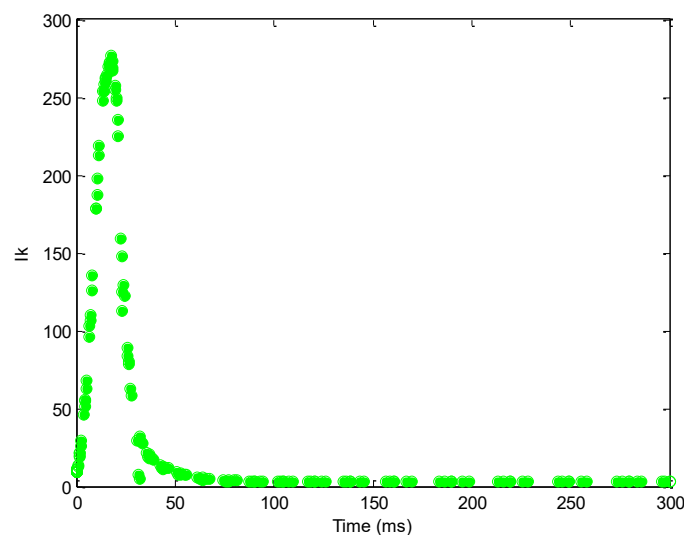
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi yang diperoleh dari kondisi awal potensial membran sebesar $V = -10$ mV menunjukkan dinamika osilasi yang konsisten dengan karakteristik eksitabilitas neuron tipe II, sebagaimana dijelaskan dalam model Morris–Lecar. Pemilihan nilai ini merepresentasikan keadaan neuron depolarisasi awal pasca fase istirahat, tepat sebelum potensi aksi mencapai puncak, sehingga memudahkan pengamatan terhadap transien awal dan pola tembakan aksi potensial. Hal ini sejalan dengan temuan (14), yang menunjukkan bahwa inisialisasi pada tegangan mendekati ambang eksitasi dapat memperjelas batas antara dinamika diam dan osilatif. Selain itu, pendekatan ini juga mempercepat konvergensi numerik pada fase awal integrasi, serta memungkinkan karakterisasi lebih rinci terhadap pengaruh parameter seperti arus eksternal dan konduktansi ionik terhadap kestabilan sistem. Dengan demikian, pemilihan $V = -10$ mV sebagai kondisi awal tidak hanya valid secara fisiologis, tetapi juga strategis dari sisi komputasional untuk mengungkap dinamika kritis dalam sistem neuron yang dimodelkan.



Gambar 1. Grafik Arus Kalsium (I_{Ca}) terhadap waktu.

Hasil simulasi terhadap dinamika arus ion dalam model Morris–Lecar menunjukkan peran distinctif dari arus kalsium I_{Ca} dan I_K selama proses eksitasi membran akson. Grafik I_{Ca} memperlihatkan lonjakan negatif yang signifikan pada awal waktu simulasi (hingga sekitar -370 pA), yang merepresentasikan masuknya ion Ca^{2+} ke dalam sel. Arus ini kemudian mengalami perubahan tajam menuju nol dalam rentang waktu 30–50 ms, menandakan inaktivasi kanal kalsium seiring meningkatnya potensial membran. Arus kalsium memiliki peran utama dalam inisiasi depolarisasi. Hal ini ditunjukkan pada gambar 1. Nilai negatif menunjukkan bahwa ion Ca^{2+} masuk ke dalam sel (arus masuk), yang mendorong kenaikan potensial membran. Penurunan cepat dari magnitudo arus menunjukkan bahwa kanal kalsium membuka dengan cepat dan kemudian menutup karena tegangan membran mencapai ambang yang menyebabkan inaktivasi saluran. Setelah 50 ms, arus I_{Ca} hampir konstan mendekati nol, menandakan stabilisasi sistem.



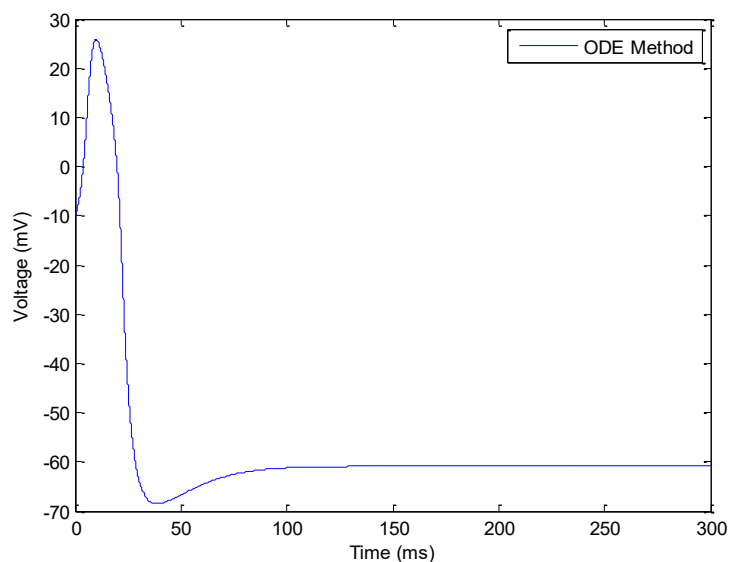
Gambar 2. Grafik Arus Kalium (I_K) terhadap waktu.

Gambar 2 menunjukkan peningkatan arus I_K yang cepat hingga puncak sekitar 270 pA, diikuti oleh penurunan eksponensial dan stabilisasi menuju nol setelah waktu 100 ms. Fenomena ini menggambarkan mekanisme repolarisasi yang dikendalikan oleh efluks ion K^+ setelah fase depolarisasi awal. Kondisi ini menggambarkan ion K^+ keluar dari sel, menghasilkan arus positif (keluar) untuk merepolarisasi atau menstabilkan kembali membran. Penurunan arus menunjukkan

bahwa kanal K^{+} mulai menutup seiring berjalannya waktu ketika sistem mendekati keadaan istirahat atau steady state.

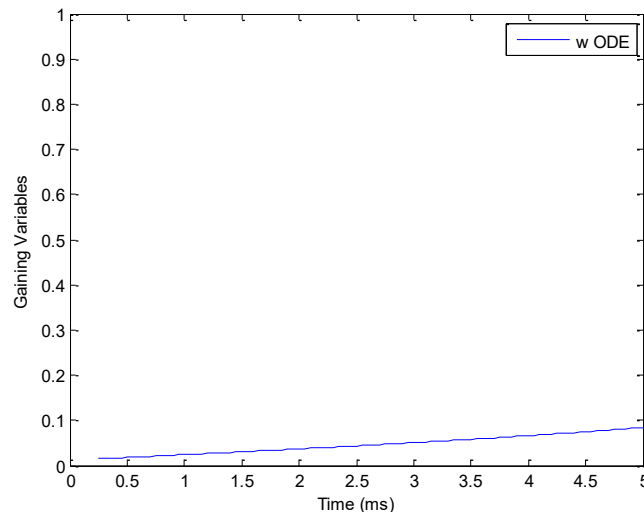
Pola temporal yang saling melengkapi antara I_{Ca} dan I_{K} ini mencerminkan dinamika khas neuron tipe II, dengan respons osilatif sesaat dan stabilisasi menuju keadaan diam. Penelitian (15) menekankan bahwa osilasi subthreshold pada neuron muncul dari keseimbangan arus masuk (I_{NaP} , I_{h} , atau sejenis Ca^{2+}) dan arus keluar K^{+} . Pada penelitian ini menyoroti interaksi depolarisasi–repolarisasi, namun lebih berfokus pada mekanisme potensial aksi tunggal (arus ion K^{+} dan Ca^{2+}). Simulasi menunjukkan bahwa arus Ca^{2+} memicu depolarisasi awal, sementara arus K^{+} bertanggung jawab pada repolarisasi dan stabilisasi. Melalui model Morris–Lecar, kontribusi kuantitatif kanal ion dapat dijelaskan lebih mendalam untuk memahami eksitabilitas neuron. Melalui model biofisika sederhana, menunjukkan bahwa keterlambatan aktivasi dan deaktivasi arus masuk dan keluar memunculkan pola osilatif sesaat yang mengarah pada stabilisasi potensial membran

Fenomena ini khas pada neuron tipe II, yang menampilkan respons osilatif singkat sebelum mencapai keadaan stabil. Secara keseluruhan, hasil ini memperkuat pemahaman bahwa transpor ion yang dikendalikan oleh tegangan merupakan komponen kunci dalam regulasi eksitabilitas neuron dan pembentukan potensial aksi awal dalam sistem saraf.



Gambar 3. Potensial Membran terhadap waktu.

Gambar 3 menunjukkan evolusi potensial membran $V(t)$ terhadap waktu dalam satuan milidetik. Tegangan awal meningkat tajam hingga mencapai puncak sekitar 28 mV dalam waktu singkat (sekitar 10–20 ms), kemudian mengalami penurunan cepat dan berosilasi sebelum kembali ke kondisi istirahat. Pola ini merupakan representasi dari potensial aksi tunggal (single spike) khas neuron tipe II, di mana stimulus awal menghasilkan respons osilatif yang cepat namun tidak berkelanjutan. Pada neuron tipe II, arus I_{Ca} berperan dalam memicu depolarisasi dan osilasi sesaat, sedangkan I_{K} berperan dalam repolarisasi dan stabilisasi membran sebagaimana ditunjukkan pada penelitian (16). Lonjakan cepat menuju nilai positif menunjukkan terjadinya depolarisasi akibat aktivasi kanal Ca^{2+} . Setelah mencapai puncak, terjadi repolarisasi yang cepat dan diikuti oleh redaman osilasi karena aktivasi kanal K^{+} , hingga sistem mencapai keadaan diam kembali. Hal ini menunjukkan bahwa model berada pada regime eksitabilitas, bukan pada osilasi berkelanjutan, yang konsisten dengan parameter Morris–Lecar dalam domain bistabil atau *near-threshold*.



Gambar 4. Gating variable $w(t)$ terhadap waktu.

Gambar 4 memperlihatkan perubahan nilai $w(t)$, yang merepresentasikan aktivasi kanal kalium, dalam rentang waktu 0–5 ms. Nilai awal sangat rendah (sekitar 0.01), dan meningkat secara bertahap hingga mendekati 0,1. Variabel gating $w(t)$, yang mewakili buka-tutupnya kanal ion, naik secara pelan karena pada tegangan awal (yang belum tinggi), kanal belum diberi cukup stimulus untuk membuka secara cepat. Selain itu, model Morris–Lecar memang mendefinisikan bahwa kecepatan aktivasi gating bergantung pada tegangan: semakin rendah tegangannya, semakin lambat respon kanalnya, karena konstanta waktunya lebih besar. Progresi memperlihatkan bahwa sistem sedang menuju aktivasi kanal ion secara bertahap, yang memperkuat kontrol terhadap kestabilan membran pasca depolarisasi (17). Beberapa penelitian menyatakan bahwa Model Morris-Lecar dapat menegaskan dinamika gating kanal kalium mengikuti fungsi waktu yang bergantung tegangan, yang memengaruhi pola osilasi dan respons neuron secara keseluruhan (18) (13).

IV. SIMPULAN DAN SARAN

4.1 Simpulan

Model Morris–Lecar memberikan pendekatan numerik yang efektif dalam mempelajari dinamika transpor ion Ca^{2+} dan K^+ pada membrane sistem saraf akson. Pemodelan menggunakan sistem persamaan diferensial yang diselesaikan secara numerik dengan metode ODE45 mampu menggambarkan perubahan potensial membran dan aktivasi kanal ion secara akurat. Pemilihan kondisi awal $V = -10$ mV terbukti tepat secara fisiologis dan strategis secara komputasional untuk memunculkan dinamika osilatif awal neuron tipe II. Hasil simulasi menunjukkan bahwa arus Ca^{2+} memicu depolarisasi awal, sementara arus K^+ berperan dalam repolarisasi dan stabilisasi membran. Pola temporal keduanya mencerminkan mekanisme potensial aksi tunggal dengan karakteristik khas neuron eksitabel. Perubahan bertahap variabel gating kanal K^+ menegaskan peran konstanta waktu besar pada tegangan rendah. Secara keseluruhan, simulasi ini menegaskan relevansi model Morris–Lecar dalam memahami mekanisme eksitabilitas neuron dan memberikan dasar kuat bagi kajian biofisika sel saraf secara kuantitatif.

4.2 Saran

Penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan mengeksplorasi metode numerik alternatif lainnya. Selain itu, model Morris-Lecar dapat dibandingkan atau dikombinasikan dengan model biofisika lain seperti Hodgkin-Huxley atau FitzHugh-Nagumo untuk mendapatkan gambaran yang lebih komprehensif tentang dinamika transpor ion. Validasi model numerik dengan data eksperimen, seperti hasil rekaman patch-clamp atau data konsentrasi ion in-vitro, juga penting untuk meningkatkan keakuratan hasil simulasi. Perluasan pada model spasial dan analisis kestabilan sistem

dapat memberikan wawasan tambahan mengenai propagasi potensial aksi dan kondisi patologis sistem saraf.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak institusi yang telah menyediakan fasilitas, dukungan dan referensi ilmiah untuk mendukung penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada rekan sejawat dan kerja atas masukan konstruktif selama proses penyusunan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Xiang ZX, Liu GZ, Tang CX, Yan LX. A model of ion transport processes along and across the neuronal membrane. *J Integr Neurosci*. 2017;16(1):33–55.
2. Setiawan H, Firmansyah A, Purwati AE. Buku Ajar Ilmu Biomedik Dasar untuk Mahasiswa Keperawatan. Ciamis: CV. EUREKA MEDIA AKSARA; 2025.
3. Bao H, Yu X, Xu Q, Wu H, Bao B. Three-dimensional memristive Morris–Lecar model with magnetic induction effects and its FPGA implementation. *Cogn Neurodyn* [Internet]. 2023;17(4):1079–92. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11571-022-09871-6>
4. Anderson DF, Ermentrout B, Thomas PJ. Stochastic representations of ion channel kinetics and exact stochastic simulation of neuronal dynamics. *J Comput Neurosci*. 2015;38(1):67–82.
5. Azizi T, Mugabi R. The Phenomenon of Neural Bursting and Spiking in Neurons: Morris-Lecar Model. *Appl Math*. 2020;11(03):203–26.
6. Dmitrichev AS, Kasatkin D V., Klinshov V V., Kirillov SY, Maslennikov O V., Shchapin DS, et al. Nonlinear dynamical models of neurons: Review. *Izv Vyss Uchebnykh Zaved Prikl Nelineynaya Din*. 2018;26(4):5–58.
7. Almatroud OA, Pham VT, Rajagopal K. A Rectified Linear Unit-Based Memristor-Enhanced Morris–Lecar Neuron Model. *Mathematics*. 2024;12(19):1–10.
8. Fisco-Compte P, Aquilué-Llorens D, Roqueiro N, Fossas E, Guillamon A. Empirical modeling and prediction of neuronal dynamics. *Biol Cybern* [Internet]. 2024;118(1–2):83–110. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00422-024-00986-z>
9. Li A, Zhang YJ. Modeling intracellular transport and traffic jam in 3D neurons using PDE-constrained optimization. *J Mech*. 2021;38:44–59.
10. Sharma SK, Mondal A, Kaslik E, Hens C, Antonopoulos CG. Diverse electrical responses in a network of fractional-order conductance-based excitable Morris-Lecar systems. *Sci Rep* [Internet]. 2023;13(1):1–15. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34807-3>
11. Kusumastuti N, Kiftiah M. Pemodelan Aliran Listrik pada Sel Saraf Manusia. *Bul Ilm Mat Stat dan Ter*. 2015;4(2):95–100.
12. Ditlevsen S, Greenwood P. The Morris-Lecar neuron model embeds a leaky integrate-and-fire model. *J Math Biol*. 2013;67(2):239–59.
13. Ermentrout B, Terman D. *Foundations of Mathematical Neuroscience*. New York: Springer US; 2015. 440 p.
14. Li C, Liao X, Zhang R. A global exponential robust stability criterion for interval delayed neural networks with variable delays. *Neurocomputing*. 2006;69(7-9 SPEC. ISS.):803–9.
15. Dickson CT, Magistretti J, Shalinsky MH, Fransén E, Hasselmo ME, Alonso A. Properties

- and role of $I(h)$ in the pacing of subthreshold oscillations in entorhinal cortex layer II neurons. *J Neurophysiol.* 2000;83(5):2562–79.
16. Diantoro T, Alif Fiolana F, Arie Widhining K. D. Klasifikasi Sinyal Delta, Theta, Alpha, Beta, Gamma Pada Electroencephalography (EEG). *ALINIER J Artif Intell Appl.* 2023;4(2):91–104.
 17. Robert Cronin, Nicholas Dias, Yung Peng RK, Daniel Harris, BA, Lynn McNicoll, MD, Gary Epstein-Lubow, MD, and Kali S. Thomas P. Computational Neuroscience: Mathematical and Statistical Perspectives. *Annu Rev Stat Appl.* 2019;176(3):139–48.
 18. Meier SR, Lancaster JL, Starobin JM. Bursting regimes in a reaction-diffusion system with action potential-dependent equilibrium. *PLoS One.* 2015;10(3):1–25.