

**ANALISIS AKTIVITAS *SPIKING* DAN PEMODELAN
JARINGAN NEURON MODEL IZHIKEVICH
DENGAN VARIASI SINAPSIS**

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan
mencapai derajat Sarjana S-1

Program Studi Fisika



Diajukan oleh:

Muhammad Faizal

20106020001

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA
**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**

UIN SUNAN KALIJAGA

YOGYAKARTA

2024

HALAMAN PENGESAHAN



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1545/Un.02/DST/PP.00.9/08/2024

Tugas Akhir dengan judul : Analisis Aktivitas Spiking dan Pemodelan Jaringan Neuron Model Izhikevich dengan Variasi Sinapsis

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : MUHAMMAD FAIZAL
Nomor Induk Mahasiswa : 20106020001
Telah diujikan pada : Rabu, 07 Agustus 2024
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Valid ID: 66c7f2d19de87

Ketua Sidang

Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D.
SIGNED



Valid ID: 66c7e940f746

Penguji I

Dr. Nita Handayani, S.Si, M.Si
SIGNED



Valid ID: 66c2e6e4b165b

Penguji II

Andi, M.Sc.
SIGNED



Valid ID: 66c80dd039141

Yogyakarta, 07 Agustus 2024
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Faizal

NIM : 20106020001

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Analisis Aktivitas *Spiking* dan Pemodelan Jaringan Neuron Model Izhikevich dengan Variasi Sinapsis” merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 29 Juli 2024

Penulis



Muhammad Faizal
NIM. 20106020001

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/R0

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan skripsi

Lamp : -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Muhammad Faizal
NIM : 20106020001
Judul Skripsi : Analisis Aktivitas *Spiking* dan Pemodelan Jaringan Neuron Model Izhikevich dengan Variasi Sinapsis

sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Fisika.

Dengan ini kami berharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 29 Juli 2024
Pembimbing

Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D.
NIP. 19830614 200901 2 009

ANALISIS AKTIVITAS SPIKING DAN PEMODELAN JARINGAN NEURON MODEL IZHKEVICH DENGAN VARIASI SINAPSIS

Muhammad Faizal

20106020001

INTISARI

Penelitian tentang analisis aktivitas *spiking* dan pemodelan jaringan neuron model Izhikevich dengan variasi sinapsis telah berhasil dibuat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis aktivitas *spiking* neuron sederhana dan kompleks model Izhikevich serta membuat model jaringan saraf dengan transmisi sinapsis sederhana dan *Short-Term Plasticity* (STP) untuk menganalisis aktivitas sinkronisasi dan dinamika potensial membran yang dihasilkan. Studi ini dilakukan menggunakan metode Euler dalam simulasi komputasi. Simulasi aktivitas *Spiking* menggunakan *Software* Matlab dan Brian2 untuk pemodelan jaringan neuron. Total neuron yang dimodelkan untuk transmisi sinapsis sederhana adalah 800 neuron, terdiri dari 650 neuron eksitatori dan 150 neuron inhibitori. Sedangkan untuk STP, terdiri dari 50 neuron dengan 40 neuron eksitatori dan 10 neuron inhibitori. Pada aktivitas *spiking* neuron Izhikevich hasil menunjukkan masing-masing pola memiliki karakteristik berbeda terkait pemulihan dan respon terhadap stimulus konstan, serta terkait pemrosesan informasi sensorik dan motorik pada kondisi fisiologis. Pada pemodelan jaringan neuron untuk transmisi sinapsis sederhana hasil menunjukkan neuron eksitatori *firing* secara tersebar sepanjang waktu, dan mendukung transmisi sinyal. Sedangkan neuron inhibitori *firing* lebih acak untuk menyeimbangkan aktivitas jaringan. Grafik potensial membran menghasilkan lonjakan potensial aksi periodik, mencerminkan keseimbangan eksitasi dan inhibisi. Pada STP hasil menunjukkan pola lonjakan antar neuron teratur dan sejajar, mengindikasikan sinkronisasi dan komunikasi terkoordinasi di antara neuron dalam jaringan. Hal ini dipengaruhi oleh probabilitas konektivitas antar neuron eksitatori dan inhibitori ($p_e = 0.8$) dan ($p_i = 0.2$) menghasilkan sinkronisasi neuron, terlihat dari garis merah dan biru yang berhimpit.

Kata Kunci: Izhikevich, *spiking* neuron, jaringan neuron, sinapsis sederhana, STP

SPIKING ACTIVITY ANALYSIS AND NEURONAL NETWORK MODELING OF THE IZHKEVICH MODEL WITH SYNAPSE VARIATION

Muhammad Faizal
20106020001

ABSTRACT

The research spiking activity analysis and neuronal network modelling of Izhikevich model with synapse variation has been successfully made. This study aims to analyse the spiking activity of simple and complex neurons of the Izhikevich model as well as create a neural network model with simple synapse transmission and Short-Term Plasticity (STP) to analyse the synchronisation activity and dynamics of the resulting membrane potential. This study was conducted using the Euler method in computational simulation. Matlab software for neuronal spiking activity simulation and Brian2 for neuronal network modelling. The total neurons modelled for simple synaptic transmission is 800 neurons, consisting of 650 excitatory neurons and 150 inhibitory neurons. As for STP, it consists of 50 neurons with 40 excitatory neurons and 10 inhibitory neurons. In the spiking activity of Izhikevich neurons, the results show that each pattern has different characteristics related to recovery and response to a constant stimulus, as well as related to the processing of sensory and motor information under physiological conditions. In neuronal network modelling for simple synaptic transmission, results show excitatory neurons firing in a dispersed manner over time, supporting signal transmission. Whereas inhibitory neurons are firing more randomly to balance network activity. The membrane potential graph produces periodic action potential spikes, reflecting the balance of excitation and inhibition. At STP the results show regular and aligned spike patterns between neurons, indicating synchronisation and coordinated communication between neurons in the network. This is influenced by the probability of connectivity between excitatory and inhibitory neurons ($p_e = 0.8$) and ($p_i = 0.2$) resulting in neuronal synchronisation, as seen by the red and blue lines that coincide. Translated with DeepL.com (free version)

Keywords: Izhikevich, spiking neurons, neuron networks, simple synapses, STP

MOTTO

“Muda hanya sekali dan miskin itu menyakitkan”

~

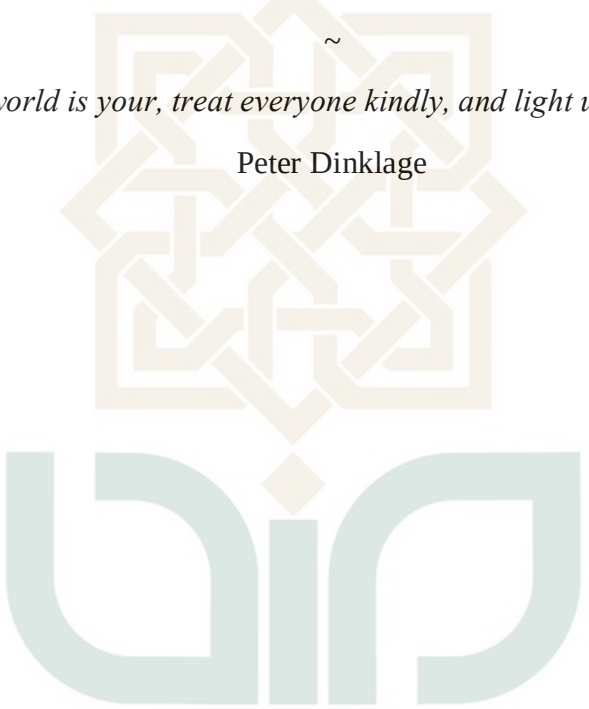
*“Ever tried, ever failed, no matter
Try again, fail again, fail better.”*

Samuel Beckett

~

“The world is your, treat everyone kindly, and light up the night”

Peter Dinklage



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

PERSEMBAHAN

Untaian kata dalam kalimat dipersembahkan untuk:

~

Yang terhormat Guru sekaligus Ibu, Ibu Anis Yuniati

Rasa syukur kepada Allah SWT yang telah menjadikan Ibu sebagai pengajar, pembimbing, dan suri tauladan yang baik.

Terima kasih yang tulus penulis haturkan kepada Ibu yang telah dengan penuh dedikasi dan kesabaran dalam membimbing. Terima kasih telah menyalakan api pengetahuan dan memberikan inspirasi dalam setiap langkah perjalanan yang dilalui.

Terima kasih telah mengajarkan makna kasih yang tulus, sabar yang tak bertepi, kekuatan yang tak tergoyahkan, dan harapan yang selalu ada dalam mengarungi manis pahitnya kehidupan.

Pengajaran dan bimbingan yang diberikan, tidak akan bisa penulis balas dengan segala sesuatu yang berbentuk materialis. Penulis hanya senantiasa berdo'a agar Ibu dan keluarga selalu dalam keberkahan, kesehatan dan lindungan Allah SWT.

~

Yang tersayang Mamah, Bapak, dan Adek

Terima kasih yang tak terhingga kepada Mamah dan Bapak yang telah menjadi pilar kekuatan dalam hidup. Terima kasih atas cinta tanpa syarat yang selalu diberikan, terima kasih atas dukungan yang tak pernah pudar, terima kasih atas do'a yang tak henti senantiasa dilambungkan, dan atas pengorbanan yang dilakukan.

Terima kasih telah membimbingku dengan penuh kasih dalam setiap lika-liku kehidupan, menjadikanku pribadi yang lebih kuat.

~

Yang manis Afif Nazila

Terima kasih telah menjadi penyemangat dan menjadi pendengar atas keluh kesah pada hari yang tidak mudah selama pengerjaan Tugas Akhir.

Terima kasih atas dukungan yang diberikan selama perjalanan dalam 4 tahun terakhir. Terima kasih telah bertahan sejauh ini menjadi rumah kedua dan menjadi bagian dalam perjalanan penyusunan Tugas Akhir hingga selesai.

Terima kasih telah memahami ku, percaya pada diriku, mimpi-mimpiku, harapanku

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

السلام عليكم ورحمة الله وبركاته

Syukur yang tak terhingga penulis panjatkan kepada Sang Maha Luhur dan selawat serta salam terlimpah kepada Baginda Rasulullah SAW. Berkat anugerah Allah SWT yang melimpah, terwujudlah tulisan ini dalam bentuk karya berjudul “Analisis Aktivitas *Spiking* dan Pemodelan Jaringan Neuron Izhikevich dengan Variasi Sinapsis” Penelitian ini adalah sebuah upaya untuk merenungkan ayat-ayat-Nya yang tersurat dan tersirat di alam semesta sebagai bentuk syukur atas karunia-Nya. Memikirkan tanda-tanda kebesaran-Nya adalah salah satu cara untuk menyelami kedalaman kalam-Nya. Mempelajari otak merupakan usaha untuk menjelajahi cakrawala ilmu-Nya yang tak terbatas. Mengeksplorasi neurosains juga menjadi sarana untuk memaksimalkan potensi akal dan mengoptimalkan kemampuan berpikir yang diberkahi-Nya, harapan besar penulis pada penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi kemaslahatan dan kemajuan pengetahuan. Penulis menyadari bahwa semua ini tidak akan mampu terselesaikan tanpa bantuan dan keterlibatan berbagai pihak. Oleh karena itu, sudah sepatutnya Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Phil. Al Makin, M.A. selaku Rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
2. Ibu Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
3. Ibu Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Fisika, sekaligus Dosen Pembimbing Skripsi.
4. Ibu Dr. Nita Handayani, S.Si., M.Si. selaku dosen penguji Tugas Akhir dan pembina *Study club* Biofisika dan Fisika Medis. Terima kasih atas arahannya berupa kritik dan saran untuk penyempurna penelitian ini. Terima kasih atas waktu, kesabaran, dan ketotalitasan dalam memberikan ilmu selama perkuliahan serta motivasi dan bimbingannya.

5. Bapak Andi, M.Sc. selaku dosen penguji tugas akhir dan dosen penasihat akademik. Terima kasih atas arahnya berupa kritik dan saran untuk penyempurna penelitian ini.
6. Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si. selaku dosen penasihat akademik. Terimakasih atas bimbingannya selama perkuliahan.
7. Segenap jajaran dosen Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga yang telah memberikan ilmu dan pengalamannya kepada penulis.
8. Teman dekat seperantauan di Yogyakarta selama perkuliahan, terkhusus kepada Fadlan Agustina Firdaus, Garethto Mahendra, dan Haikal Zefhan Lazuardi, yang senantiasa kebersamaan dalam suka dan duka perkuliahan.
9. Teman dekat di Perum Polri Gowok F29, kepada Jaly Sulthon Abdallah yang senantiasa menjadi teman diskusi di sela-sela penulisan tugas akhir.
10. Seluruh teman yang tergabung dalam studi club biofisika dan fisika medis serta fisika 2020 (graviteez'20).

Terima kasih atas semua pelajaran berharga yang telah diberikan. Semoga Allah SWT selalu melimpahkan kasih dan sayang-Nya di dunia dan di surga-Nya. Aamiin. Penulis mengakui bahwa penelitian ini sangat jauh dari kesempurnaan. Dengan demikian, kritik dan saran yang konstruktif sangat diharapkan. Penulis berharap laporan ini dapat memberikan inspirasi dan dorongan untuk belajar dan mengembangkan ilmu pengetahuan.

Yogyakarta, 29 Juli
2024

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI	iv
INTISARI	v
ABSTRACT	vi
MOTTO	vii
PERSEMBAHAN	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	8
1.3 Tujuan Penelitian	9
1.4 Batasan Penelitian	9
1.5 Manfaat Penelitian	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	11
2.1 Studi Pustaka	11
2.2 Landasan Teori	15
2.2.1 Sistem Saraf.....	15
2.2.2 Neuron	20
2.2.3 Elektrofisiologi Neuron	27

2.2.4 Model Neuron Izhikevich.....	32
2.2.5 Sinapsis.....	37
2.2.6 Metode Euler	45
2.2.7 Teori Jaringan dalam Otak	47
2.2.8 Matrix Laboratory (MATLAB).....	50
2.2.9 Simulator Brian2	51
BAB III METODE PENELITIAN	53
3.1 Instrumen Penelitian	53
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	54
3.3 Prosedur Penelitian	54
3.3.1 Studi Literatur	54
3.3.2 Simulasi Aktivitas <i>Spiking</i> Neuron Izhikevich	55
3.3.3 Analisis data <i>Spiking</i> Neuron	60
3.3.4 Simulasi Pemodelan jaringan saraf Izhikevich	61
3.3.5 Analisis Data Pemodelan Jaringan Saraf.....	69
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	71
4.1 Hasil Penelitian	71
4.1.1 Aktivitas <i>Spiking</i> Neuron Kortikal Sederhana Izhikevich.....	71
4.1.2 Aktivitas <i>Spiking</i> Neuron Kortikal Kompleks Izhikevich.....	75
4.1.3 Pemodelan Jaringan Saraf Izhikevich.....	85
4.2 Pembahasan Penelitian	87
4.2.1 Aktivitas <i>Spiking</i> Neuron Kortikal Sederhana Izhikevich.....	88
4.2.2 Aktivitas <i>Spiking</i> Neuron Kortikal Kompleks Izhikevich.....	102
4.2.3 Pemodelan Jaringan Neuron Izhikevich	135
4.2.4 Integrasi Interkoneksi Neurosains Dalam Islam	145

BAB V PENUTUP	149
5.1 Kesimpulan.....	149
5.2 Saran	151
DAFTAR PUSTAKA	152
LAMPIRAN	162



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka	14
Tabel 2.2 Variabel Neuron Izhikevich	34
Tabel 3.2 Instrumen Penelitian	53



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Saraf Tubuh Manusia	17
Gambar 2.2 Struktur Anatomi Otak	18
Gambar 2.3 Bagian-bagian <i>Cerebrum</i>	18
Gambar 2.4 Bagian-bagian <i>Cerebellum</i>	19
Gambar 2.5 Bagian-bagian <i>Brainstem</i>	20
Gambar 2.6 Struktur Neuron.....	21
Gambar 2.7 Tipe neuron berdasarkan strukturnya	24
Gambar 2.8 Diagram Potensial Aksi	29
Gambar 2.9 Grafik Model RS	36
Gambar 2.10 Grafik Model IB.....	36
Gambar 2.11 Grafik Model FS	37
Gambar 2.12 Sinapsis	38
Gambar 2.13 Sinapsis Eksitatori dan Inhibitori	41
Gambar 2.14 B-graph dari 0 sampai 1.....	49
Gambar 2.15 Jendela Kerja MATLAB	51
Gambar 3.1 Tahapan Penelitian.....	54
Gambar 3.2 Tahapan Simulasi <i>Spiking</i> neuron Izhikevich	55
Gambar 3.3 Prosedur Penelitian Simulasi <i>Spiking</i> Neuron Izhikevich	58
Gambar 3.4 Prosedur Instalasi Simulator Brian2	61
Gambar 3.5 Prosedur Pemodelan Jaringan Neuron Neuron Izhikevich.....	64
Gambar 4.1 <i>Regular Spiking (RS)</i>	71
Gambar 4.2 <i>Fast Spiking (FS)</i>	72
Gambar 4.3 <i>Intrinsic Bursting (IB)</i>	72
Gambar 4.4 <i>Chattering (CH)</i>	73
Gambar 4.5 <i>Thalamo-Cortical (TC)</i>	73
Gambar 4.6 <i>Thalamo-Cortical Burst (TC B)</i>	74
Gambar 4.7 <i>Resonator (RZ)</i>	74
Gambar 4.8 <i>Low Threshold Spiking (LTS)</i>	75
Gambar 4.9 <i>Tonic Spiking</i>	75
Gambar 4.10 <i>Phasic Spiking</i>	76

Gambar 4.11 <i>Tonic Bursting</i>	76
Gambar 4.12 <i>Phasic Bursting</i>	77
Gambar 4.13 <i>Mixed Mode</i>	77
Gambar 4.14 <i>Spike Frequency Adaptation</i>	78
Gambar 4.15 <i>Class 1 Excitable</i>	78
Gambar 4.16 <i>Class 2 Excitable</i>	79
Gambar 4.17 <i>Spike Latency</i>	79
Gambar 4.18 <i>Subthreshold Oscillation</i>	80
Gambar 4.19 <i>Resonator</i>	80
Gambar 4.20 <i>Integrator</i>	81
Gambar 4.21 <i>Rebound Spike</i>	81
Gambar 4.22 <i>Rebound Burst</i>	82
Gambar 4.23 <i>Threshold Variability</i>	82
Gambar 4.24 <i>Bistability</i>	83
Gambar 4.25 <i>Depolarizing After-Potential</i>	83
Gambar 4.26 <i>Accommodation</i>	84
Gambar 4.27 <i>Inhibition Induced Spiking</i>	84
Gambar 4.28 <i>Inhibition Induced Bursting</i>	85
Gambar 4.29 Pola aktivitas sinkronisasi jaringan saraf	85
Gambar 4.30 Dinamika potensial membran untuk pola transmisi sinapsis sederhana	86
Gambar 4.31 Aktivitas sinkronisasi jaringan saraf dengan STP	86
Gambar 4.32 Dinamika potensial membran dengan STP pada variasi p_e 0.08 dan p_i 0.02	87
Gambar 4.33 Pola konduktansi sinapsis STP	141
Gambar 4.34 Pola transmisi sinapsis STP (a) u_s dan x_s (b) r_s	143

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Manusia adalah makhluk paling mulia dibanding dengan makhluk lainnya. Kesempurnaan yang tidak lain karena manusia dianugerahi akal dan pikiran. Keduanya memberikan manusia kemampuan untuk meningkatkan taraf kehidupan. Secara etimologi kata akal bermakna daya fikir atau mengerti atau memahami (KBBI Daring, 2016). Secara terminologi akal merupakan daya pikir yang ada dalam jiwa manusia, yang digambarkan Al-Qur'an untuk memperoleh pengetahuan dengan memperhatikan alam sekitar (Nasution, 1986).

Manusia berakal tidak merasa puas terhadap pencapaian yang diraih dan mendorongnya untuk terus berusaha mengubah situasi yang ada menjadi lebih baik. Ketidakpuasan seringkali menjadi pendorong bagi terciptanya perubahan-perubahan yang membentuk peradaban dunia yang maju (Katoningsih, 2012). Hal ini senada dengan pandangan islam yang mengharuskan manusia untuk menggunakan akalanya dalam segala hal terlebih mengenali rahasia alam semesta (Yulita, 2015) tertuang dalam Al-Qur'an surat al hadid ayat 17 sebagai berikut:

إِذْ عَلَّمْنَا أَنْ لَا إِلَهَ إِلَّا اللَّهُ يُحْيِي الْأَرْضَ بَعْدَ مَوْتِهَا ۚ قَدْ بَيَّنَّا لَكُمُ الْآيَاتِ لَعَلَّكُمْ تَعْقِلُونَ

“Ketahuilah olehmu bahwa Sesungguhnya Allah menghidupkan bumi sesudah matinya. Sesungguhnya Kami telah menjelaskan kepadamu tanda-tanda kebesaran (Kami) supaya kamu memikirkannya.” (QS. Al-Hadid [57]: 17)

Ibnu Katsir menafsirkan bahwa pada ayat ini Allah SWT memberikan isyarat bagi orang-orang yang berakal dengan memberikan petunjuk bagi yang berada dalam kebingungan dan jalan keluar bagi yang berada dalam kesulitan (Abdullah, 2008). Al-Jalalain menafsirkan bahwa manusia yang senantiasa berfikir mengenai tanda-tanda kekuasaan Allah akan mendapatkan petunjuk dan pemahaman (Al-Mahalli dan As-Suyuthi, 2008). Tafsir Al Azhar berpandangan yang sama dengan ahli tafsir lainnya menjelaskan bahwa manusia tanpa akal seperti tanah yang mati, kosong tanpa kehidupan (Hamka, 2007).

Perspektif sains mengenai akal merupakan suatu bagian yang ada dalam otak manusia maupun hewan. Ketika otak bekerja menghasilkan rangsangan-rangsangan saraf sehingga manusia mampu berfikir untuk beradaptasi dengan alam sekitar itu disebut dengan akal (Noor, 2019). Akal dalam sains juga digunakan untuk memperindah pikiran dan pemahaman rasionalitas tentang alam semesta (Sari dan Setiadi, 2020). Kajian otak dan akal masuk kedalam ranah ilmu sistem saraf yang disebut dengan neurosains.

Neurosains menunjukkan bagaimana sistem saraf bekerja. Sejatinya, sistem saraf terdiri dari jutaan sel saraf yang saling berkomunikasi yang disebut dengan neuron (Meutia dkk., 2021). Neuron merupakan unit dasar pada sistem saraf yang menjadi elemen pokok dalam struktur dan fungsi otak manusia dan hewan (Pradnyawati dan Sucandra, 2017). Neuron bertanggung jawab atas penerimaan, penyimpanan informasi, dan transmisi sinyal listrik dan kimia keseluruhan tubuh sehingga memungkinkan komunikasi yang kompleks antar

sel-sel saraf dan memainkan peran kunci dalam pengaturan berbagai fungsi fisiologis (National Research Council (US), 1992).

Komunikasi antar-neuron terjadi karena adanya pulsa-pulsa listrik atau disebut dengan potensial aksi. Potensial aksi terjadi karena adanya perubahan tegangan drastis pada membran plasma. Terjadinya potensial aksi dikarenakan adanya rangsangan (*excitatory*) dan hambatan (*inhibitory*) (Kappen, 2008). Komunikasi neuron ini terjadi di daerah yang bernama sinapsis. Sinapsis adalah lokasi dimana terjadi pertukaran sinyal antara dua neuron (Fauji, 2012). Pada sinapsis terdapat neuron yang mengirim sinyal disebut dengan pre-sinapsis dan neuron yang menerima sinyal disebut post-sinapsis (Putra, 2010).

Pada riset komputasi sebagian besar penelitian menggunakan kondisi sinapsis yang konstan, sedangkan dalam jaringan saraf biologis, sinapsis mengalami perubahan terus-menerus seiring dengan pertumbuhan sel dan selama proses pembelajaran serta penyimpanan memori di otak. Proses ini dikenal sebagai plastisitas sinapsis (Han dkk., 2012). Plastisitas sinapsis dianggap sebagai komponen penting dalam perkembangan dan fungsi otak, serta adaptabilitas terhadap lingkungan. Selain itu, tingkat plastisitas sinapsis memiliki dampak signifikan terhadap kondisi kejiwaan dan kesehatan mental seseorang (Appelbaum dkk., 2023). Plastisitas sinapsis berperan penting dalam mengatur efektivitas komunikasi antar-neuron. Kekuatan komunikasi antara neuron-neuron tersebut tergantung pada kekuatan sinapsisnya, yang bersifat dinamis dan dapat berubah baik dalam jangka pendek atau *short-term plasticity* (STP) yang berlangsung dalam beberapa milidetik hingga menit, maupun

jangka panjang atau *long-term plasticity* (LTP) yang berlangsung dalam hitungan jam hingga tahun (Astuti, 2023).

Komputasi neurosains memberikan spekulasi tentang bagaimana otak beroperasi yang direalisasikan lewat penggabungan studi eksperimental sistem saraf dengan simulasi numerik (Izhikevich, 2003). Aktivitas *Spiking* neuron bagian penting dalam penelitian komputasi neurosains. Aktivitas *spiking* merupakan bentuk dari perilaku neuron yang menggambarkan kondisi tertentu dari sebuah neuron. Pola yang berbeda menunjukkan kondisi yang berbeda. Misalnya, pola *spiking* yang konsisten dan teratur menunjukkan kondisi stabil dari suatu neuron, seperti dalam keadaan homeostasis. Di sisi lain, pola *spiking* yang tidak teratur atau berlebihan dapat mengindikasikan kondisi patologis seperti epilepsi atau gangguan neurologis lainnya. Model *spiking* neuron dapat digunakan dalam simulasi atau implementasi berbagai aplikasi jaringan saraf seperti simulasi jaringan saraf dalam (Pfeiffer dan Pfeil, 2018) dan representasi data yang alami, karena meniru cara otak memproses informasi dengan menggunakan waktu *spike* (Ning dkk., 2023). Faktor penting yang dapat dipertimbangkan untuk memilih satu dari model neuron yang tersedia adalah efisien secara komputasi dan mampu menghasilkan bentuk aktivitas *spiking* yang akurat secara biologis (Syahid, 2020).

Selain aktivitas *spiking* neuron, Pemodelan jaringan juga penting dalam riset komputasi neurosains, karena dapat dijadikan solusi alternatif dalam memperoleh data yang dapat menyokong riset eksperimen maupun teoritis. Model yang dibuat dalam komputasi neurosains harus dapat diuji secara

eksperimental (Syahid, 2020). Pengujian digunakan untuk penyempurnaan model yang mengarah pada pengembangan suatu pendekatan baru yang dapat memajukan pemahaman tentang sistem otak. Dengan kata lain, pengembangan dan evaluasi model adalah dasar dari komputasi neurosains (Trappenberg, 2010). Ragam penelitian telah dilakukan untuk menghasilkan model jaringan saraf yang kompleks dan efisien. Beberapa model neuron dalam penelitian jaringan saraf meliputi Hodgkin-Huxley (Hodgkin dan Huxley, 1952), FitzHugh-Nagumo (FitzHugh, 1961; Nagumo dkk., 1962), Nagumo-Sato (Nagumo dan Sato, 1972), Wilson-Cowan (Wilson dan Cowan, 1972), Morris-Lecar (Morris dan Lecar, 1981), Hindmarsh-Rose (Hindmarsh dan Rose, 1984), dan Izhikevich (Izhikevich, 2003).

Pemodelan jaringan harus memperhatikan syarat penting diantaranya efisien secara komputasi dan akurat secara biologis (Izhikevich, 2003). Hodgkin-Huxley (HH) menunjukkan model neuron yang akurat dan kompleks secara biologis, namun tidak efisien secara komputasi, sedangkan model Integrate-Fire (IF) menunjukkan komputasi yang efisien namun tidak akurat secara biologis. Dalam hal ini, Izhikevich menggabungkan antara kedua model neuron tersebut, sehingga menghasilkan bentuk model neuron yang akurat secara biologis seperti model HH dan efisien secara komputasi seperti model IF. Hal ini memudahkan model neuron Izhikevich untuk mereproduksi berbagai perilaku neuron dalam otak.

Sebelum membuat pemodelan jaringan saraf secara komputasi, sangat penting untuk memahami bagaimana aktivitas sinkronisasi jaringan saraf

terjadi. Hal ini penting dalam mengetahui bagaimana otak melakukan berbagai fungsi kognitif, sensorik, dan motorik. Aktivitas yang sinkron di antara neuron-neuron menunjukkan bahwa mereka bekerja bersama untuk memproses informasi, membuat keputusan, atau mengontrol gerakan. Hal penting lainnya adalah mengetahui bagaimana sel-sel otak berkomunikasi, baik menggunakan sinyal listrik atau kimiawi. Pemahaman ini melibatkan mekanisme dasar dari potensial membran neuron. Potensial membran adalah dasar dari transmisi sinyal listrik di sepanjang akson neuron dan transmisi sinyal kimiawi di sinapsis (Drukarch dan Wilhelmus, 2023). Potensial membran terbentuk karena distribusi ion-ion di dalam dan di luar sel yang tidak seimbang, yang menciptakan perbedaan muatan listrik. Ketika sebuah neuron menerima rangsangan yang cukup kuat, potensial membrannya dapat berubah secara drastis melalui mekanisme yang dikenal sebagai potensial aksi. Potensial aksi ini kemudian merambat sepanjang akson dan memicu pelepasan *neurotransmitter* di sinapsis, memungkinkan sinyal untuk ditransmisikan ke neuron berikutnya atau ke sel efektor lainnya.

Ahli neurosains mengembangkan teknologi *software* simulator untuk memudahkan dalam pemodelan jaringan saraf. Namun, beberapa simulator memerlukan bahasa domain khusus dalam pemrograman tertentu. Misalnya, NMODL untuk simulator NEURON (Hines dan Carnevale, 2000) dan NESTML untuk simulator NEST (Plotnikov dkk., 2016). Namun, terdapat salah satu simulator yang menawarkan penulisan sintaks yang lebih sederhana dan fleksibel, yaitu Brian2 Simulator (Goodman dan Brette, 2009)

Pada penelitian ini, digunakan *software* pemodelan jaringan saraf berupa Simulator Brian2, didalamnya menggunakan bahasa pemrograman yang sederhana dan praktis yakni bahasa pemrograman Python (Stimberg dkk., 2019). Sedangkan, untuk penelitian aktivitas *spiking* neuron *software* yang digunakan adalah *Matrix Laboratory* (MATLAB). Penggunaan MATLAB untuk analisis aktivitas *spiking* neuron Izhikevich karena MATLAB merupakan *software* matematis yang fleksibel dan memiliki toolbox (kotak alat) yang cukup spesifik untuk desain grafik (Sianipar, 2015) yang akan dibuat.

Beberapa penelitian terkait pemodelan jaringan saraf Izhikevich telah dilakukan baru-baru ini. Penelitian-penelitian ini mencakup pengembangan model Izhikevich dengan berbagai parameter tambahan, seperti pada penelitian Teka dkk (2018) mengintegrasikan model orde pecahan ke dalam persamaan neuron Izhikevich dan mempelajari berbagai jenis osilasi yang timbul dari dinamika pecahan tersebut. Penelitian Gunasekaran dkk (2019) mengevaluasi *Regular Spiking* dan *Intrinsically Bursting* neuron Izhikevich dengan menghitung konvergensi urutan *spike* yang dihasilkan dari langkah waktu diskritisasi. Penelitian Fang dkk (2022) yang menggabungkan antara memristor dengan model Izhikevich. Penelitian Vivekanandhan dkk (2022) menambahkan medan magnet dalam analisis lanjutan model neuron Izhikevich. Penelitian Aristides dkk (2023) menggabungkan filter kalman pada model Izhikevich untuk pengujian pemulihan parameter dan kopling neuron.

Penelitian-penelitian yang disebutkan diatas, tidak secara rinci dalam menjelaskan masalah plastisitas sinapsis dalam membuat pemodelan jaringan saraf, sedangkan hal ini berperan penting untuk memahami bagaimana neuron pada jaringan saraf berinteraksi dan bagaimana pola aktivitas mereka mempengaruhi fungsi kognitif dan perilaku. Dengan demikian, berdasarkan uraian tersebut, maka dilakukan penelitian untuk menganalisis aktivitas *spiking* dan pemodelan jaringan neuron model Izhikevich dengan variasi sinapsis. Pemodelan jaringan saraf dengan model neuron Izhikevich, dengan memasukan model sinapsis untuk model STP belum pernah dilakukan sebelumnya. Pada penelitian ini juga menggunakan metode euler untuk menyelesaikan persamaan diferensial yang menggambarkan dinamika potensial membran terhadap waktu. Penggunaan metode euler pada persamaan Izhikevich sangat membantu dalam implementasi kode program simulasi neuron. Hal ini disebabkan metode euler relatif cepat secara komputasi karena menggunakan pendekatan numerik yang didasarkan pada dua suku pertama dari deret Taylor.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, peneliti menentukan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana bentuk aktivitas *spiking* sederhana model neuron Izhikevich pada kortikal?
2. Bagaimana bentuk aktivitas *spiking* kompleks model neuron Izhikevich pada kortikal?

3. Bagaimana aktivitas sinkronisasi jaringan saraf dan dinamika potensial membran terhadap waktu pada jaringan saraf Izhikevich?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis aktivitas *spiking* sederhana model neuron Izhikevich pada kortikal.
2. Menganalisis aktivitas *spiking* kompleks model neuron Izhikevich pada kortikal.
3. Menganalisis aktivitas sinkronisasi jaringan saraf dan dinamika potensial membran terhadap waktu pada jaringan saraf Izhikevich.

1.4 Batasan Penelitian

Batasan yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Metode penyelesaian persamaan diferensial yang dipakai adalah Metode Euler dengan langkah waktu $h = 0,25$ ms untuk aktivitas *spiking* neuron dan $h = 1$ ms untuk pemodelan jaringan neuron.
2. Jumlah neuron eksitatori (ne) dan neuron inhibitori (ni) dalam pemodelan jaringan saraf dengan transmisi sinapsis sederhana masing-masing adalah 640 dan 160 dan dengan STP masing-masing 40 dan 10.
3. Simulasi aktivitas *spiking* neuron menggunakan *software* MATLAB.
4. Menggunakan dua variasi sinapsis pada jaringan neuron, yakni transmisi sinapsis sederhana dan STP.

5. Simulasi pemodelan jaringan saraf menggunakan *software* Brian2 Simulator.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dalam penelitian sebagai berikut:

1. Memahami karakteristik dan bentuk aktivitas *spiking* dari model neuron Izhikevich yang disimulasikan.
2. Memahami konsep dan parameter fisis model neuron Izhikevich.
3. Memahami proses terjadinya *firing* dalam jaringan saraf.
4. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai referensi penelitian selanjutnya yang berkaitan.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data yang telah dilakukan mengenai aktivitas *spiking* dan pemodelan jaringan neuron Izhikevich dengan variasi sinapsis menghasilkan 3 poin kesimpulan, yaitu:

1. Simulasi untuk model neuron Izhikevich pada aktivitas *spiking* model sederhana bagian kortikal, menghasilkan 8 macam pola aktivitas neuron, yaitu: *Reguler Spiking* (RS), *Fast Spiking* (FS), *Intrinsic Bursting* (IB), *Chatterig* (CH), *Thalamo-Cortical* (TC), *Thalamo-Cortical Burst* (TC-B), *Resonator* (RZ), dan *Low-Threshold Spiking* (LTS). Masing-masing pola lonjakan menghasilkan fungsi yang berbeda-beda dan kondisi fisiologis yang berbeda-beda juga. Pola lonjakan yang dianalisis fokus pada bagian kortikal yang berfungsi untuk pemrosesan informasi, memori dan pembelajaran.
2. Simulasi untuk model neuron Izhikevich pada aktivitas *spiking* model kompleks bagian kortikal, menghasilkan 20 macam pola aktivitas neuron, yaitu: *Tonic Spiking*, *Phasic Spiking*, *Tonic Bursting*, *Phasic Bursting*, *Mixed Mode*, *Spike Freq. adpt*, *Class I Excitable*, *Class II Excitable*, *Spike Latency*, *Subthreshold. Osc*, *Resonator*, *Integrator*, *Rebound Spike*, *Rebound Burst*, *Thresh. Variability*, *Bistability*, *Depolarizing Afterpotential*, *Accomodation*, *Inhibition Induced Spiking*, dan *Inhibition Induced Bursting*. Pola lonjakan yang dihasilkan lebih kompleks dan spesifik pada model yang dibuat. Pola lonjakan menunjukkan fungsi

fisiologi mamalia dalam pemrosesan informasi. Pola ini memiliki kelebihan bahwa setiap lonjakan memiliki kondisi yang berbeda-beda, bergantung pada kondisi yang sedang dialami mamalia.

3. Pada pemodelan jaringan neuron Izhikevich dengan variasi transmisi sinapsis sederhana aktivitas sinkronisasi untuk neuron eksitatori menghasilkan pola penembakan lebih tersebar dengan aktivitas secara periodik dan neuron inhibitori juga tersebar namun lebih acak, selanjutnya pada dinamika potensial membran grafik menunjukkan potensial aksi yang tersebar sepanjang periode waktu 800 mil second menunjukkan neuron aktif secara periodik dengan interval waktu antar lonjakan cukup konsisten menunjukkan pola *firing* yang reguler. Kemudian untuk variasi sinapsis dengan STP aktivitas sinkronisasi menghasilkan pola teratur dan sejajar satu sama lain. Titik-titik yang sejajar tersebut menunjukkan bahwa neuron-neuron melakukan lonjakan secara bersamaan. Sinkronisasi yang terlihat mengindikasikan adanya komunikasi yang terkoordinasi di antara neuron dalam jaringan tersebut. Selanjutnya, untuk dinamika potensial membran, diperoleh bahwa nilai probabilitas koneksi neuron sangat berpengaruh terhadap pola lonjakan dinamika potensial membran. Probabilitas neuron eksitatori (p_e) yang lebih besar dari probabilitas neuron inhibitori (p_i) berpengaruh terhadap pola sinkronisasi yang dihasilkan dari jaringan. Hal ini ditunjukkan pada lonjakan potensial aksi yang koinsiden berimplikasi pada semakin berhimpitnya dinamika potensial membran.

5.2 Saran

Penelitian yang dilakukan memiliki banyak kekurangan, dikarenakan keterbatasan peneliti dalam membuat kode program. Peneliti menyarankan hal lebih lanjut, diantaranya:

1. Menggunakan gangguan eksternal seperti medan magnet atau medan listrik dalam mensimulasikan aktivitas *spiking* neuron.
2. Menggunakan model variasi sinapsis lain, seperti menggunakan STDP (*Spike Timing Dependent Plasticity*) dalam pembuatan model jaringan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah bin Muhammad. 2008. *Tafsir Ibnu Katsir*, Terj. M. Abdul Ghafar E.M. Pustaka Imam Syafi'i. Jakarta.
- Al-Mahali, J., & As-Suyuthi, J. 2008. *Tafsir Jalalain dan Asbabun Nuzul*, Terj. Baahrun Abu Bakar. Sinar Baru Algensindo. Bandung.
- Appelbaum, L. G., Shenasa, M. A., Stolz, L., dan Daskalakis, Z. 2023. Synaptic Plasticity and Mental Health: Methods, Challenges and Opportunities. *Neuropsychopharmacology*, **Vol. 48 No. 1**, 113–120. <https://doi.org/10.1038/s41386-022-01370-w9>
- Arias-García, M. A., Tapia, D., Laville, J. A., Calderón, V. M., Ramiro-Cortés, Y., Bargas, J., dan Galarraga, E. 2017. Functional Comparison of Corticostriatal and Thalamostriatal Postsynaptic Responses in Striatal Neurons of The Mouse. *Brain Structure and Function*. <https://doi.org/10.1007/s00429-017-1536-6>
- Aristides, R. P., Pons, A. J., Cerdeira, H. A., Masoller, C., dan Tirabassi. 2023. Parameter and Coupling Estimation in Small Networks of Izhikevich's Neurons. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. **Vol. 33 No. 4**. DOI 10.1063/5.0144499
- Astuti, R. D. 2023. *Sinkronisasi Jaringan Saraf Model Neuron Morris-Lecar Dengan Short-Term Synaptic Plasticity (STSP)*. (Tugas Akhir). Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga, Yogyakarta.
- Azis, R. S., dan Ramli, I. 2021. Implementasi Metode Euler Pada Gerak Pegas Dengan Menggunakan Scilab. *APCP: Applied Physics of Cokroaminoto Palopo*, **Vol 2 No. 1**, 9–14.
- Barbas, H., dan García-Cabezas, M. Á. 2017. Prefrontal Cortex Integration of Emotion and Cognition. In *The Prefrontal Cortex as an Executive, Emotional, and Social Brain*. *Springer Japan*. https://doi.org/10.1007/978-4-431-56508-6_4
- Benda, J., dan Tabak, J. 2014. Spike-Frequency Adaptation. In D. Jaeger & R. Jung (Eds.), *Encyclopedia of Computational Neuroscience*. *Springer New York*. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7320-6_339-1
- Blankenburg, S., Wu, W., Lindner, B., dan Schreiber, S. 2015. Information Filtering in Resonant Neurons. *Journal of Computational Neuroscience*, **Vol. 39 No. 3**, 349–370. <https://doi.org/10.1007/s10827-015-0580-6>

- Bosch-Bouju, C., Hyland, B. I., dan Parr-Brownlie, L. C. 2013. Motor Thalamus Integration of Cortical, Cerebellar and Basal Ganglia Information: Implications for Normal and Parkinsonian Conditions. *Frontiers in Computational Neuroscience*. <https://doi.org/10.3389/fncom.2013.00163>
- Brian Authors. 2020. Brian 2 Documentation. diakses 28 Februari 2024 dari https://brian2.readthedocs.io/_/downloads/en/2.3/pdf/
- Buhaerah, Busrah, Z., dan Sanjaya, H. 2022. *Teori Graf dan Aplikasinya*. Living Spiritual Quotient (LSQ). Makassar.
- Cahyono, B. 2013. Penggunaan Software Matrix Laboratory (MATLAB) dalam Pembelajaran Aljabar Linier. *Phenomenon : Jurnal Pendidikan MIPA*, **Vol. 1**. <https://doi.org/10.21580/phen.2013.3.1.174>
- Cameron, J. R., Skofronick, J. G., dan Grant, R. M. 2015. *Fisika Tubuh Manusia: Edisi ke dua Fisika Kedokteran*. Sagung Seto. Yogyakarta.
- Carlson, N. 2012. *Fisiologi Perilaku Edisi Kesebelas Jilid 2*. Erlangga. Yogyakarta
- Carter, M., dan Shieh, J. C. 2010. Guide to Research Techniques in Neuroscience. *Academic Press Elseiver*. London.
- Citri, A., dan Malenka, R. C. 2008. Synaptic Plasticity: Multiple Forms, Functions, and Mechanisms. *Neuropsychopharmacology*, **Vol. 33 No. 1**, 18–41. <https://doi.org/10.1038/sj.npp.1301559>
- Connors, B. W., dan Gutnick, M. J. 1990. Intrinsic Firing Patterns of Diverse Neocortical Neurons. *Trends in Neurosciences*, **Vol. 13 No. 3**, 99–104. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(90\)90185-D](https://doi.org/10.1016/0166-2236(90)90185-D)
- Cortes, J. M., Desroches, M., Rodrigues, S., Veltz, R., Muñoz, M. A., dan Sejnowski, T. J. 2013. Short-Term Synaptic Plasticity in The Deterministic Tsodyks-Markram Model Leads to Unpredictable Network Dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **Vol. 110 No. 41**. <https://doi.org/10.1073/pnas.1316071110>
- Cymbalyuk, G., dan Shilnikov, A. 2005. Coexistence of Tonic Spiking Oscillations in a Leech Neuron Model. *Journal of Computational Neuroscience*, **Vol. 18 No. 1**, 255–263. <https://doi.org/10.1007/s10827-005-0354-7>
- Deng, P. Y., dan Klyachko, V. A. 2011. The Diverse Functions of Short-Term Plasticity Components in Synaptic Computations. *Communicative and Integrative Biology*, **Vol. 4 No. 5**, 543–548. <https://doi.org/10.4161/cib.15870>
- Dewi, C. T., Fitri, N. W., dan Soviya, O. 2018. Neurosains dalam Pembelajaran Agama Islam. *Ta'allum: Jurnal Pendidikan Islam*, **Vol. 6 No. 2**, 259–280. <https://doi.org/10.21274/taalum.2018.6.2.259-280>

- Douglas, P. K., Harris, S., Yuille, A., dan Cohen, M. S. 2011. Performance Comparison of Machine Learning Algorithms and Number of Independent Components Used in fMRI Decoding of Belief vs. Disbelief. *NeuroImage*, **Vol. 56 No. 2**, 544–553. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.11.002>
- Drukarch, B., dan Wilhelmus, M. M. M. 2023. Thinking About the Action Potential: The Nerve Signal as A Window to The Physical Principles Guiding Neuronal Excitability. *Frontiers in Cellular Neuroscience*. <https://doi.org/10.3389/fncel.2023.1232020>
- Fang, X., Duan, S., dan Wang, L. 2022. Memristive Izhikevich Spiking Neuron Model and Its Application in Oscillatory Associative Memory. *Frontiers in Neuroscience*, **Vol. 16**, 1–18. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.885322>
- Farahani, F. V., Karwowski, W., dan Lighthall, N. R. 2019. Application of Graph Theory for Identifying Connectivity Patterns in Human Brain Networks: A Systematic Review. *Frontiers in Neuroscience*, **Vol. 13**. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00585>
- Fauji, S. A. 2012. *Analisis Fungsi Aktivasi Jaringan Syaraf Tiruan untuk Mendeteksi Karakteristik Bentuk Gelombang Spektra Babi dan Sapi*. (Tugas Akhir). Jurusan Matematika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim, Malang.
- Ghifari. 2021. *Identifikasi Penderita Covid-19 Berdasarkan Citra Ct Toraks Dengan Metode Support Vector Machine*. (Tugas Akhir). Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Komputer Indonesia, Bandung.
- Ghosh, S., Mondal, A., Ji, P., Mishra, A., Dana, S. K., Antonopoulos, C. G., dan Hens, C. 2020. Emergence of Mixed Mode Oscillations in Random Networks of Diverse Excitable Neurons: The Role of Neighbors and Electrical Coupling. *Frontiers in Computational Neuroscience*. <https://doi.org/10.3389/fncom.2020.00049>
- Goodman, D., dan Brette, R. 2008. Brian: A Simulator for Spiking Neural Networks in Python. *Frontiers in Neuroinformatics*, **Vol. 2**, 1 - 10. <https://doi.org/10.3389/neuro.11.005.2008>
- Goodman, D. F. M., dan Brette, R. 2009. The Brian Simulator. *Frontiers in Neuroscience*, **Vol. 3, No. 2**, 192–197. <https://doi.org/10.3389/neuro.01.026.2009>
- Gray, C. M., dan McCormick, D. A. 1996. Chattering Cells: Superficial Pyramidal Neurons Contributing to The Generation of Synchronous Oscillations in The Visual Cortex. *PubMed: National Center for Biotechnology Information*, **Vol. 274 No. 5284**, 13–109. <https://doi.org/doi:10.1126/science.274.5284.109>

- Gunasekaran, H., Spigler, G., Mazzoni, A., Cataldo, E., dan Oddo, C. M. 2019. Convergence of regular spiking and intrinsically bursting Izhikevich neuron models as a function of discretization time with Euler method. *Neurocomputing*, **Vol. 350**, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.03.021>
- Gutnisky, D. A., Yu, J., Hires, S. A., To, M.-S., Bale, M. R., Svoboda, K., dan Golomb, D. 2017. Mechanisms Underlying a Thalamocortical Transformation During Active Tactile Sensation. *PLOS Computational Biology*, **Vol. 13 No. 6**. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005576>
- Hadzriana, M. 2020. Neurosains Dalam Perspektif Islam. *Jurnal Pendidikan Dan Keislaman*, **Vol. 8 No. 2**.
- Haider, B., Duque, A., Hasenstaub, A. R., dan McCormick, D. A. 2006. Neocortical Network Activity In Vivo is Generated Through a Dynamic Balance of Excitation and Inhibition. *Journal of Neuroscience*, **Vol. 26 No. 17**, 4535–4545. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5297-05.2006>
- Hamka, B. 2007. *Tafsir Al-Azhar Jilid ke 3 edisi ke tujuh*. Pustaka Nasional PTE LTD. Singapura
- Han, C., Shapley, R., dan Xing, D. 2022. Gamma Rhythms in The Visual Cortex: Functions and Mechanisms. *Cognitive Neurodynamics*, **Vol. 16 No. 4**, 745–756. <https://doi.org/10.1007/s11571-021-09767-x>
- Han, F., Lu, Q. S., Wiercigroch, M., Fang, J. A., dan Wang, Z. J. 2012. Firing Synchronization of Learning Neuronal Networks With Small-world Connectivity. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, **Vol. 47 No. 10**, 1161–1166. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2011.09.001>
- Handayani, S. 2021. *Anatomi dan Fisiologi Tubuh Manusia*. Media Sains Indonesia. Bandung.
- Hasyim, M. F. 2019. *Pemodelan Jaringan Saraf Hodgkin-Huxley (HH) Neuron Dengan Short-Term Plasticity (STP) Menggunakan Simulator Brian2*. (Tugas Akhir). Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga, Yogyakarta.
- Houcque, D. 2005. *Introduction To Matlab for Engineering Students*. School of Engineering & Applied Science, Northwestern University. Illionis.
- Hu, H., Gan, J., dan Jonas, P. 2014. Fast-spiking, Parvalbumin+ GABAergic Interneurons: From Cellular Design to Microcircuit Function. *Science*, **Vol. 345 No. 6196**. <https://doi.org/10.1126/science.1255263>

- Huda, A. M., dan Suyadi. 2020. Otak dan Akal dalam Kajian Al-Quran dan Neurosains. *Jurnal Pendidikan Islam Indonesia*, **Vol. 5 No. 1**, 67–79. <https://doi.org/10.35316/jpii.v5i1.242>
- Ifdillah, F. A. 2015. *Representasi Graf Acak (Watts and Strogatz model) pada Small World Phenomenon: Degrees of Separation*. Paper. Program Studi Teknik Informatika, Sekolah Teknik Elektronika dan Informatika, Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Ikrar, T. 2015. *Ilmu Neurosains Modern*. Cetakan 1. Pustaka Pelajar. Yogyakarta..
- Ippolito, K. (2020). *Balancing Act in the Brain: Excitatory and Inhibitory Activity*. diakses pada tanggal 25 mei 2024, pada <https://mpfi.org>
- Irianto, K. 2012. *Anatomi dan Fisiologi untuk Mahasiswa*. Alfabeta. Bandung.
- Izhikevich, E. M. 2003. Simple model of spiking neurons. *IEEE Transactions on Neural Networks*, **Vol. 14, No. 6**, 1569–1572. <https://doi.org/10.1109/TNN.2003.820440>
- Izhikevich, E. M. 2004. Which model to use for cortical spiking neurons?. *IEEE Transactions on Neural Networks*, **Vol. 15, No. 5**, 1063–1070. <https://doi.org/10.1109/TNN.2004.832719>
- Izhikevich, E. M. 2007. *Dynamical in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting*. In The MIT Press. Cambridge.
- Kappen, B. 2008. An Introduction to Biophysics. In *Department of Biophysics Radboud University Nijmegen*. **Vol. 36, No. 8**. <https://doi.org/10.1097/00007611-194308000-00025>
- Katoningsih, S. 2012. *Pengelolaan Logical Thinking Pada Pembelajaran Bahasa Inggris Kelas X di SMA Negeri 1 Purwodadi*. (Tesis). Program Studi Magister Pendidikan Pasca Sarjana, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta. <http://eprints.ums.ac.id/id/eprint/20632>
- Kayser, C., Petkov, C. I., dan Logothetis, N. K. 2008. Visual Modulation of Neurons in Auditory Cortex. *Cerebral Cortex*, **Vol. 18 No. 7**, 1560–1574. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhm187>
- KBBI Daring. 2016. *Badan Pengembangan dan Pembinaan Bahasa Kementerian Pendidikan Kebudayaan Riset dan Teknologi Republik Indonesia*. diakses pada 1 Maret 2024 dari <https://kbbi.kemdikbud.go.id/Kelly>, D. A. (2022). Signaling Within Neural Circuits. <https://www.brainfacts.org/>
- Khadijah, S., Astuti, T., Widaryanti, R., dan Ratnaningsih, 2020. *Buku Ajar Anatomi & Fisiologi Manusia Edisi 1*. Universitas Respati Press. Yogyakarta.

- Kim, U., dan McCormick, D. A. 1998. The Functional Influence of Burst and Tonic Firing Mode on Synaptic Interactions in the Thalamus. *The Journal of Neuroscience*, **Vol. 18 No. 22**, 9500–9516.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.18-22-09500.19988>
- Koppelaar, H., Moghadam, P. K., Khan, K., Kouhkani, S., Segers, G., dan van Warmerdam, M. 2019. Reaction Time Improvements by Neural Bistability. *Behavioral Sciences*, **Vol. 9 No. 3**, 1–14.
<https://doi.org/10.3390/bs9030028>
- Laksono, H. D. 2017. *Pengantar Pemograman dengan Matlab (Aplikasi Pada Matematika Rekayasa)*. Lembaga Pengembangan Teknologi Informasi dan Komunikasi (LPTIK) Universitas Andalas. Padang.
- Ly, C., dan Doiron, B. 2017. Noise-Enhanced Coding in Phasic Neuron Spike Trains. *PLoS ONE*, **Vol. 12 No. 5**, 1–17.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176963>
- Manahan-Vaughan, D. 2019. *Handbook of in Vivo Neural Plasticity Techniques: A Systems Neuroscience Approach to the Neural Basis of Memory and Cognition*. dalam *Handbook of Behavioural Neuroscience*. Elseiver: Academic Press. London.
- Marieb, E. N., dan Hoehn, K. 2007. *Human Anatomy and physiology*. Pearson Education. Edinburgh.
- Martella, G. 2023. Molecular Mechanisms of Synaptic Plasticity: Dynamic Changes in Neuron Functions. *International Journal of Molecular Sciences*, **Vol. 24 No. 16**, 2–4. <https://doi.org/10.3390/ijms241612567>
- Mazzasette, C. 2021. *Structural Divisions of The Nervous System*. diakses 8 Februari 2024 dari <https://www.flickr.com/photos>.
- McKinley, M., dan O'Loughlin, V. 2006. *Human Anatomy First (1st) Edition*. McGraw-Hill. New York City.
- Meutia, S., Utami, N., Rahmawati, S., & Himayani, R. 2021. Sistem Saraf Pusat dan Perifer. *MEDULA: Medical Profession Journal of Lampung*, **Vol. 11, No. 2**, 306–311.
- Mormann, F., Osterhage, H., Andrzejak, R. G., Weber, B., Fernández, G., Fell, J., Elger, C. E., dan Lehnertz, K. 2008. Independent Delta/Theta Rhythms in The Human Hippocampus and Entorhinal Cortex. *Frontiers in Human Neuroscience*. <https://doi.org/10.3389/neuro.09.003.2008>
- Nasution, H. 1986. *Teologi Islam: Aliran Aliran Sejarah Analisa Perbandingan*. UI Press. Depok.

- National Research Council (US). 1992. *Committee on Neurotoxicology and Models for Assessing Risk. Environmental Neurotoxicology*. National Academic Press. Washington (DC).
- Ning, L., Dong, J., Xiao, R., Tan, K. C., dan Tang, H. 2023. Event-Driven Spiking Neural Networks With Spike-Based Learning. *Memetic Computing*, **Vol. 15 No. 2**, 205–217. <https://doi.org/10.1007/s12293-023-00391-2>
- Noor, F. A. 2019. Otak dan Akal dalam Ayat-Ayat Neurosains. *MAGHZA: Jurnal Ilmu Al-Qur'an Dan Tafsir*, **Vol. 4, No. 1**, 32–52. <https://doi.org/10.24090/maghza.v4i1.2329>
- Nurhastuti, dan Iswari, M. 2018. *Anatomi Tubuh dan Sistem Persyarafan Manusia*. Goresan Pena. Kuningan
- Parhusip, H. A. 2015. *Modul Metode Numerik*. Tisara Grafika. Salatiga.
- Pfeiffer, M., dan Pfeil, T. 2018. Deep Learning With Spiking Neurons: Opportunities and Challenges. *Frontiers in Neuroscience*, **Vol. 12**. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00774>
- Postnova, S., Voigt, K., dan Braun, H. A. 2007. Neural Synchronization at Tonic-to-Bursting Transitions. *Journal of Biological Physics*, **Vol. 33 No. 2**, 129–143. <https://doi.org/10.1007/s10867-007-9048-x>
- Poysancin, Y. M., dan Utomo, A. N. 2019. Rancang Bangun Sistem Deteksi Wajah Dengan Metode Viola-Jones untuk Mengidentifikasi Identitas Seseorang. *Incomtech*, **Vol. 8 No. 2**, 69–76.
- Pradnyawati, N. P. W., dan Sucandra, I. M. A. K. 2017. *Neurofisiologi. Buku Pegangan. Bagian Anestesi dan terapi Intensif*, RSUP Sanglah, Denpasar. Fakultas Kedokteran, Universitas Udayana, Bali.
- Prescott, S. A. 2014. Excitability: Types I, II, and III. In *Encyclopedia of Computational Neuroscience*. Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7320-6_151-1
- Putra, D. 2010. *Pengolahan Citra*. Andi. Yogyakarta.
- Raastad, M. 2019. The Slow Depolarization Following Individual Spikes in Thin, Unmyelinated Axons in Mammalian Cortex. *Frontiers in Cellular Neuroscience*. <https://doi.org/10.3389/fncel.2019.00203>
- Radulescu, A. R. 2010. Mechanisms Explaining Transitions Between Tonic and Phasic Firing in Neuronal Populations as Predicted by a Low Dimensional Firing Rate Model. *PLoS ONE*, **Vol. 5 No. 9**, 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012695>

- Rotman, Z., Deng, P. Y., dan Klyachko, V. A. 2011. Short-Term Plasticity Optimizes Synaptic Information Transmission. *Journal of Neuroscience*, **Vol. 31 No. 41**. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3231-11.2011>
- Rudy B., Fishell G., Lee S., dan Hjerling-Leffler J. 2011. *Three Groups of Interneurons Account for Nearly 100% of Neocortical GABAergic Neurons*. NIH: National Institutes of Health Public Acces. **Vol. 71 No. 1**. 45-66 [doi:10.1002/dneu.20853](https://doi.org/10.1002/dneu.20853).
- Safii, A. 2020. *Paradigma Al-Nashiyah dalam Ilmu Neurologi Perspektif Al-Qur'an (Studi Analisis I'jaz Ilmi)*. (Tugas Akhir). Program Studi Ilmu Al-Quran dan Tafsir, Fakultas Ushuluddin, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim, Riau.
- Saladin, K. S. 2008. *Human Anatomy*. Mc Graw-Hill. New York City.
- Samuel, J. 2007. *Fenomena Small-World dan Aplikasinya Dalam Sistem Penyebaran Informasi Pure P2P*. Paper. Program Studi Teknik Informatika, Sekolah Teknik Elektronika dan Informatika, Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Santos, B. A., Gomes, R. M., & Husbands, P. 2021. The Role of Rebound Spikes in The Maintenance of Self-Sustained Neural Spiking Activity. *Nonlinear Dynamics*, **Vol. 105 No. 1**, 767–784. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06581-2>
- Sari, R. M., dan Setiadi, Y. 2020. Keselarasan Islam dan Sains. *Ushuluna: Jurnal Ilmu Ushuluddin*, **Vol. 3, No. 2**, 1–26. <https://doi.org/10.15408/ushuluna.v3i2.15193>
- Sheffield. 2023. *Electrical Synapsis Neuron Chemical Synapsis Neuron*. diakses 19 Februari 2024 dari <https://www.cleanpng.com/png-electrical-synapse-neuron-chemical-synapse-gap-jun-3044003/>
- Sherman, S. M. 2001. Tonic and Burst Firing: Dual Modes of Thalamocortical Relay. *Trends in Neurosciences*, **Vol. 24 No. 2**, 122–126. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(00\)01714-8](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(00)01714-8)
- Shier, D., Butler, J., dan Lewis, R. 2003. *Hole's Essential of Human Anatomy & Physiology (Edisi ke 18)*. Mc Graw-Hill. New York City
- Sianipar, R. H. 2015. *Pemrograman Matlab: 150+ Soal dan Penyelesaian*. Andi. Yogyakarta.
- Sidiropoulou, K., dan Poirazi, P. 2012. Predictive Features of Persistent Activity Emergence in Regular Spiking and Intrinsic Bursting Model Neurons. *PLoS Computational Biology*, **Vol. 8 No. 4**. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1002489>

- Stimberg, M., Brette, R., dan Goodman, D. F. M. 2019. Brian 2, an Intuitive and Efficient Neural Simulator. *ELife*, **Vol. 8**. <https://doi.org/10.7554/eLife.47314>
- Stoll, A., Maier, A., Krauss, P., Gerum, R., dan Schilling, A. 2023. Coincidence Detection and Integration Behavior in Spiking Neural Networks. *Cognitive Neurodynamics*. <https://doi.org/10.1007/s11571-023-10038-0>
- Südhof, T. C. 2021. The cell biology of synapse formation. *Journal of Cell Biology*, **Vol. 220 No. 7**. <https://doi.org/10.1083/jcb.202103052>
- Syahid, A. (2020). *Simulasi Aktivitas Spiking Model-Model Neuron Menggunakan Metode Euler*. (Tugas Akhir). Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga, Yogyakarta. <https://digilib.uin-suka.ac.id/id/eprint/42798/>
- Teka, W. W., Upadhyay, R. K., dan Mondal, A. 2018. Spiking and Bursting Patterns of Fractional-Order Izhikevich Model. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. **Vol. 56**. 161-176. DOI.10.1016/j.cnsns.2017.07.026.
- Trappenberg, T. P. 2010. *Fundamentals of Computational Neuroscience*. Oxford University Press. London
- Vantomme, G., Osorio-Forero, A., Lüthi, A., dan Fernandez, L. M. J. 2019. Regulation of Local Sleep by The Thalamic Reticular Nucleus. *Frontiers in Neuroscience*. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00576>
- Vivekanandhan, G., Hamarash, I. I., Ali, A. M., He, S., dan Sun, K. 2022. Firing Patterns of Izhikevich Neuron Model Under Electric Field and Its Synchronization Patterns. *The European Physical Journal*. **Vol. 231 No. 22-23**. 4017-4023. [10.1140/epjs/s11734-022-00636-0](https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-022-00636-0).
- Wahyuningsih, H. P., dan Kusmiyati, Y. 2017. *Bahan Ajar Anatomi Fisiologi*. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. Jakarta.
- Wei, J. R., Hao, Z. Z., Xu, C., Huang, M., Tang, L., Xu, N., Liu, R., Shen, Y., Teichmann, S. A., Miao, Z., dan Liu, S. 2022. Identification of visual cortex cell types and species differences using single-cell RNA sequencing. *Nature Communications*, **Vol. 13 No. 1**, 1–21. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34590-1>
- Woodruff, A. 2019. *What is a Neuron?*. diakses pada tanggal 2 juli 2024 pada <https://qbi.uq.edu.au/brain/brain-anatomy/what-neuron>
- Wu, D. 2021. Paper Summary: “*Simple Model of Spiking Neurons*.” diakses pada 5 Maret 2024 dari <https://medium.com/geekculture/the-izhikevich-neuron-model-fb5d953b41e5>

Yahya, N. I., Mamonto, K. A., Nurwan, N., Yahya, L., Wungguli, D., dan Nashar, L. O. 2022. Bilangan Terhubung Titik Pelangi Kuat Graf Octa-Chain (OCm). *Euler : Jurnal Ilmiah Matematika, Sains Dan Teknologi*, **Vol. 10 No. 1**, 131–139. <https://doi.org/10.34312/euler.v10i1.15177>

Yulita, E. 2015. Akal dan Pengetahuan Dalam Al-Quran. *Jurnal Mitra PGMI*, **Vol. 1, No. 1**, 78–96.

