

ANALISIS DINAMIKA POTENSIAL MEMBRAN MODEL NEURON

ADAPTIVE EXPONENTIAL INTEGRATE AND FIRE (Ad-Ex IF)

DENGAN STIMULASI ARUS KONSTAN

TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk

memperoleh gelar sarjana S-1

Program Studi Fisika



Disusun oleh:

Garetto Mahendra

20106020006

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

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI 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-1580/Un.02/DST/PP.00.9/08/2024

Tugas Akhir dengan judul : Analisis Dinamika Potensial Membran Model Neuron Adaptive Exponential Integrate and Fire (Ad- Ex IF) Dengan Stimulasi Arus Konstan

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : GARETTO MAHENDRA
Nomor Induk Mahasiswa : 20106020006
Telah ditujikan pada : Kamis, 22 Agustus 2024
Nilai ujian Tugas Akhir : A

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

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

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

Valid ID: 66cb245363589



Penguji I

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

Valid ID: 66cb1a636fe57



Penguji II

Dr. Widayanti, S.Si. M.Si.
SIGNED

Valid ID: 66e90d7af24ee



Yogyakarta, 22 Agustus 2024
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 66cc39e830b57

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Garetto Mahendra
NIM : 20106020006
Program Studi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Analisis Dinamika Potensial Membran Model Neuron *Adaptive Exponential Integrate and Fire* (Ad-Ex IF) Dengan Stimulasi Arus Konstan” 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, 12 Agustus 2024

Penulis



Garetto Mahendra
NIM. 20106020006

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 : Garetto Mahendra
NIM : 20106020006
Judul Skripsi : Analisis Dinamika Potensial Membran Model Neuron Adaptive Exponential Integrate and Fire (Ad-Ex IF) Dengan Stimulasi Arus Konstan

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 dimunaqosyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 17 Agustus 2024
Pembimbing

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

**ANALISIS DINAMIKA POTENSIAL MEMBRAN MODEL NEURON
ADAPTIVE EXPONENTIAL INTEGRATE AND FIRE (Ad-Ex IF)
DENGAN STIMULASI ARUS KONSTAN**

Garetto Mahendra

20106020006

INTISARI

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis variasi pola lonjakan (*spiking*), ledakan (*bursting*), dan adaptasi (*adaptation*) dinamika potensial membran pada model neuron *Adaptive Exponential Integrate and Fire* (Ad-Ex IF) dengan stimulasi arus konstan. Studi ini dilakukan dengan menggunakan metode Euler dalam simulasi komputasi. Model Ad-Ex IF digunakan untuk mensimulasikan aktivitas neuron yang berjumlah satu menggunakan *software* simulator Brian2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi parameter model mempengaruhi pola lonjakan (*spiking*), ledakan (*bursting*) dan adaptasi (*adaptation*) yang dihasilkan oleh neuron. Pola lonjakan kuat (*tonic spiking*), lonjakan sementara (*transient spiking*), lonjakan tidak teratur (*irregular spiking*), akselerasi tertunda (*delayed accelerating*), ledakan kondisi awal (*initial burst*), ledakan teratur (*regular bursting*), ledakan teratur tertunda (*delayed regular bursting*) dan adaptasi (*adaptation*) berhasil diamati dan dianalisis. Penelitian ini memberikan pemahaman lebih dalam mengenai dinamika potensial membran pada model neuron Ad-Ex IF dan dapat digunakan sebagai dasar untuk penelitian lebih lanjut dalam bidang neurokomputasi.

Kata Kunci: Ad-Ex IF, Brian2, *spiking*, *bursting*, Adaptasi, neuronal behavior.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

**ANALYSIS OF MEMBRANE POTENTIAL DYNAMICS IN THE ADAPTIVE
EXPONENTIAL INTEGRATE AND FIRE (AD-EX IF) NEURON MODEL
WITH CONSTANT CURRENT STIMULATION**

Garetto Mahendra

20106020006

ABSTRACT

This study aims to analyze the variation of spiking, bursting, and adaptation patterns of membrane potential dynamics in Adaptive Exponential Integrate and Fire (Ad-Ex IF) neuron model with constant current stimulation. This study was conducted using the Euler method in computational simulation. The Ad-Ex IF model was used to simulate the activity of one neuron using Brian2 simulator software. The results showed that the variation of model parameters affected the spiking, bursting and adaptation patterns produced by the neuron. The patterns of tonic spiking, transient spiking, irregular spiking, delayed accelerating, initial burst, regular bursting, delayed regular bursting and adaptation were successfully observed and analyzed. This research provides a deeper understanding of membrane potential dynamics in the Ad-Ex IF neuron model and can be used as a basis for further research in the field of neurocomputing.

Keywords: *Ad-Ex IF, Brian2, spiking), bursting, adaptation, neuronal behavior.*



MOTTO

Tidak ada perjuangan tanpa rasa sakit, tapi percayalah sakitnya sementara dan bahagia akan terasa selamanya. Banggalah dengan siapa dirimu, jangan malu dengan cara orang lain melihatmu.

“Sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan apabila engkau telah selesai (dengan suatu kebajikan), teruslah bekerja keras (untuk kebajikan yang lain)”

(Q.S Al-Insyirah:6-7)

“Allah tidak akan membebani seseorang, melainkan sesuai dengan kesanggupannya”

(Q.S Al-Baqarah:286)

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

PERSEMBAHAN

Karya kecil ini adalah wujud terima kasihku

untuk:

Allah Sang Maha Cinta yang mencipta segala rasa dan keindahan, yang tanpa-Nya
tiadalah segalanya.

Para kekasih-Nya yang mencurahkan syafa'at dan tarbiyah, yang gelap jalanku
tanpanya;

Ibu Anis Yuniati yang membimbingku dengan sabar dan tulus dengan segenap
perhatian. Seorang ibu hebat yang menjadi rumah kedua bagiku untuk pulang dan
menjadi pengobat rindu akan seorang ibu. Kasih dan sayang Tuhan semoga selalu
terlimpahkan kepada beliau dan keluarganya;

Alm Ayah (Gunadi) dan Ibu (Yatimah) yang tiada waktu tanpa doa dan dukungan
beliau di setiap langkahku;

Adiku dan Kakakku, Ardian Renot dan Muhammad denis zanuvar, yang dengan
nasihat dan perhatian mereka selalu menguatkan serta menjadi penyemangat ku;

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah, serta inayah-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan laporan penelitian tugas akhir yang berjudul “*Analisis Dinamika Potensial Membran Model Neuron Adaptive Eksponential Integrate and Fire Dengan Stimulasi Arus Konstan*” dengan lancar dan penuh hikmah. Penelitian ini bertujuan untuk membuat suatu replika atau tiruan dari objek yang mana objek tersebut merupakan ciptaan Allah SWT yang sempurna tanpa cacat. Objek pada penelitian ini adalah jaringan saraf. Diharapkan dari hasil pemodelan tersebut dapat membawa kita pada titik terang tentang bagaimana sebenarnya mekanisme kinerja otak manusia. Meskipun, tentunya pemodelan yang dibuat masih jauh dan bahkan tidak akan mendekati realita, akan tetapi hendaklah hasil penelitian ini dapat mengantarkan kita mengenal kebesaran Allah SWT melalui ciptaan-Nya. Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada seluruh pihak yang mendukung dan membantu dalam menyelesaikan penelitian ini. Untuk itu, dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Anis Yuniati, S. Si., M. Si., Ph.D. selaku Kepala Jurusan Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga dan selaku Bunda sekaligus Dosen Pembimbing dalam penelitian ini. Terima kasih atas waktu, kesabaran dan ilmunya baik di bangku perkuliahan maupun dalam proses penyelesaian Tugas Akhir. Terima kasih atas motivasi dan bimbingannya;
2. Ibu Dr Widayanti, S. Si., M. Si. selaku Ibu dan sebagai Dosen Penasehat Akademik;
3. Ibu Dr. Nita Handayani, S. Si., M. Si. dan Dr Widayanti, S. Si., M. Si. selaku

Dosen Penguji yang telah memberikan arahnya berupa kritik dan saran sehingga menjadi penyempurna penelitian ini;

4. Dosen Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga yang telah memberikan ilmu dan pengalamannya kepada penulis;
5. Seluruh staf dan karyawan bagian Tata Usaha Fakultas Sains dan Teknologi;
6. Ibu, bapak dan Saudaranya yang memberikan semangat, ridho, dan doanya;
7. Teman dekat pencari ilmu di Yogyakarta selama perkuliahan, terkhusus kepada Muhammad Faizal, Haikal Zefhan Lazuardi, Dinan Nur Khofifah, Afif Nazila dan Silviana Indrawati, yang senantiasa menemani dalam pengerjaan Tugas Akhir;
8. Seluruh teman-teman Fisika angkatan 2020 (gravitees'20) atas dukungan dan ilmu yang dibagi.

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun selalu dinantikan. Penulis berharap dengan adanya laporan ini, semoga dapat memberikan inspirasi dan motivasi dalam belajar dan mengembangkan ilmu pengetahuan

Yogyakarta, 17 Agustus

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	7
1.3 Tujuan Penelitian	7
1.4 Batasan Penelitian	8
1.5 Manfaat Penelitian	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Studi Pustaka	9
2.2 Landasan Teori	12
2.2.1 Sistem Saraf	12
2.2.2 Neuron	19

2.2.3	Potensial aksi	23
2.2.4	Model Neuron <i>Integrate and Fire</i> (IF)	28
2.2.5	Model Neuron <i>Adaptive-Exponential Integrate and Fire</i> (Ad-Ex IF).....	31
2.2.6	Pola Lonjakan Aktifitas Neuron	36
2.2.7	Metode <i>Euler</i>	38
2.2.8	Simulator Brian2	40
BAB III METODE PENELITIAN		42
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	42
3.2	Alat Penelitian	42
3.3	Tahapan Penelitian.....	42
3.3.1	Studi literatur	43
3.3.2	Instalasi simulator Brian 2.....	44
3.3.3	Membuat Program Simulasi	47
3.3.4	Analisis Data.....	53
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		55
4.1	Hasil Simulasi.....	55
4.1.1	Lonjakan (<i>Spiking</i>)	55
4.1.2	Ledakan (<i>Bursting</i>).....	58
4.1.3	Adaptasi (<i>Adaptation</i>).....	59
4.2	Pembahasan	60
4.2.1	Lonjakan (<i>Spiking</i>)	60
4.2.2	Ledakan (<i>Bursting</i>).....	71
4.2.3	Adaptasi (<i>Adaptation</i>).....	80
BAB V PENUTUP		84
5.1	Kesimpulan.....	84

5.2 Saran.....	84
DAFTAR PUSTAKA.....	86
LAMPIRAN.....	91



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Studi Pustaka.....	12
Tabel 2.2 Perbandingan Model Neuron <i>Spiking</i>	29
Tabel 2.3 Perbandingan <i>Spiking</i> Neuron Model dalam hal perilaku saraf.....	29
Tabel 3.1 Alat Penelitian	42



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Saraf Pusat dan Sistem Saraf Tepi.....	13
Gambar 2.2 Simpatik dan parasimpatis dari sistem saraf otonom	15
Gambar 2.3 Bagian Utama Otak dan Fungsinya.....	16
Gambar 2.4 Bagian otak besar	17
Gambar 2.5 Bagian tengah sagital otak kecil.....	18
Gambar 2.6 Anatomi Neuron.....	21
Gambar 2.7 Potensial Aksi.....	25
Gambar 2.8 Proses Potensial Aksi	28
Gambar 2.9 Rangkaian RC model neuron <i>integrate and fire</i>	31
Gambar 2.10 Aktivitas <i>Regular Spiking</i>	37
Gambar 2.11 Aktivitas <i>Fast Spiking</i>	38
Gambar 2.12 Aktivitas <i>Intrinsic Bursting</i>	38
Gambar 4.1 lonjakan kuat (<i>Tonic Spiking</i>).....	56
Gambar 4.2 Lonjakan sementara (<i>Transient Spiking</i>).....	56
Gambar 4.3 lonjakan tidak teratur (<i>Irregular Spiking</i>)	57
Gambar 4.4 Akselerasi Tertunda (<i>Delayed accelerating</i>)	57
Gambar 4.5 Ledakan kondisi awal (<i>Initial Burst</i>).....	58
Gambar 4.6 Ledakan teratur (<i>Regular Bursting</i>)	58
Gambar 4.7 Ledakan Teratur tertunda (<i>Delayed Regular Bursting</i>).....	59
Gambar 4.8 Adaptasi (<i>Adaptation</i>)	59

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Manusia sebagai makhluk sempurna yang diciptakan oleh Tuhan Yang Maha Esa, merupakan gagasan yang melekat dalam kesadaran mereka. Kehadiran otak sebagai pusat kontrol semua tindakan dan aktivitas manusia menjadi bukti akan keutamaan dan kecanggihan yang dimiliki. Dengan begitu, manusia diakui sebagai ciptaan yang penuh potensi dan kemampuan untuk berkembang serta berfungsi secara optimal dalam menjalani kehidupan. Kesadaran akan keberadaan dirinya sebagai bagian dari ciptaan yang agung, memotivasi mereka untuk terus menggali potensi diri dan bertanggung jawab atas peran dalam menjaga keseimbangan alam semesta (Huda dan Suyadi, 2020).

Otak merupakan organ kunci dalam menjaga keseimbangan fisik dan psikis manusia sepanjang rentang kehidupannya, mulai dari tahapan perkembangan di dalam kandungan hingga usia lanjut. Seiring dengan proses pertumbuhan dari masa bayi, kanak-kanak, remaja, hingga dewasa, otak memainkan peran vital dalam membimbing perilaku manusia, baik yang bersifat positif maupun negatif. Respons otak terhadap lingkungan sekitarnya menjadi faktor penentu, dimana dalam lingkungan yang kondusif, otak cenderung berfungsi secara positif, sementara dalam situasi yang negatif, kemungkinan besar otak akan mengalami perkembangan yang bersifat negatif pula. Dengan demikian, peran otak dalam mengatur reaksi dan adaptasi manusia terhadap lingkungan mencerminkan kompleksitas serta fleksibilitas organ tersebut dalam mendukung kesejahteraan

individu. Otak memiliki bagian-bagian yang memiliki fungsi masing-masing sesuai dengan hasil kajian ilmiah para ahli saraf (Jannah, 2023).

Dalam kaitannya dengan otak terdapat istilah kata نَاسِيَةٌ "nāṣiyah" dalam Al-Qur'an surat Al-Alaq ayat 15-16 yang berbunyi

16 ۞ كَذَّبُوا مَا كَانُوا يُوعَىٰ بِهَا
 ۞ نَاسِيَةً ۚ وَالْحَقُّ أَنزَلْنَاهُ لِقَوْمٍ يُعَذِّبُونَ
 ۞ نَاسِيَةً ۚ وَالْحَقُّ أَنزَلْنَاهُ لِقَوْمٍ يُعَذِّبُونَ
 ۞ نَاسِيَةً ۚ وَالْحَقُّ أَنزَلْنَاهُ لِقَوْمٍ يُعَذِّبُونَ

“Sekali-kali tidak! Sungguh, jika dia tidak berhenti (berbuat demikian), niscaya Kami tarik ubun-ubunnya (ke dalam neraka) (15), (yaitu) ubun-ubun orang yang mendustakan (kebenaran) dan durhaka (16).”

Beberapa ahli tafsir mengartikan kata ubun ubun (*Nāṣiyah*) sebagai "mahkota" atau kepala bagian depan, yang dalam perspektif neurosains dikaitkan dengan *korteks prefrontal*, pusat kendali berbagai fungsi kognitif dan perilaku manusia. Penelitian ini merujuk pada studi kepustakaan yang dilakukan baik secara manual maupun digital, terutama menitikberatkan pada paradigma tafsir *Nāṣiyah*. Hal ini menunjukkan bahwa pemahaman tentang Al-Qur'an tidak hanya terbatas pada dimensi keagamaan, tetapi juga mengaitkannya dengan pemahaman ilmiah yang terus berkembang di era modern ini (Jailani dkk., 2023).

Otak bekerja karena adanya neuron. Neuron dapat saling berinteraksi menggunakan sinyal listrik yang disebut sebagai potensial aksi atau *spike*. Neuron yang memulai potensial aksi disebut sebagai neuron perangsang, sementara yang menghambat atau memodulasi potensial aksi disebut neuron penghambat (Kappen, 2008). Pertukaran informasi antara neuron terjadi di wilayah yang disebut sinapsis, yang merupakan tempat dimana data dipindahkan dari neuron pertama (*neuron presinaptik*) ke neuron target (*neuron postsinaptik*). Menurut Feriyawati, seperti yang disebutkan dalam (Diva & Yuniati, 2020),

sinapsis merupakan satu-satunya tempat dimana impuls dapat disampaikan dari satu neuron ke neuron lainnya. Setiap neuron dalam korteks otak dapat terhubung dengan lebih dari 10.000 neuron lainnya melalui *sinapsis*. Jumlah besar *neuron* dan *sinapsis* ini mewakili jaringan saraf yang sangat kompleks (Han dkk., 2012).

Penelitian tentang otak telah menjadi subjek penting dalam berbagai bidang ilmiah, pendekatan eksperimental dan komputasi menjadi dua pendekatan utama dalam menjelajahi kompleksitas otak manusia. Pendekatan eksperimental ini melibatkan penggunaan beragam metode, seperti pencitraan otak, rekaman aktivitas saraf, dan studi perilaku, untuk menyelidiki struktur dan fungsi otak manusia dalam berbagai konteks. Perilaku neuron (*neuronal behavior*) merupakan aktivitas kelistrikan neuron yang dinyatakan dalam bentuk hubungan antara potensial membran terhadap waktu. Aktivitas kelistrikan ini penting untuk diteliti atau disimulasikan karena dapat memberikan pemahaman yang lebih dalam tentang mekanisme dasar fungsi otak dan gangguan neurologis. Perilaku neuron tersebut terlihat dalam berbagai bentuk yang berbeda yang dikenal dengan istilah *firing pattern* dengan pola umum lonjakan (*spiking*), ledakan (*bursting*), *integrator*, *resonator*, *chaos*, dan lain lain. Sementara itu, pendekatan komputasi menggunakan persamaan matematika dan teknologi informasi untuk memodelkan aktivitas otak, baik secara terperinci maupun sebagai simulasi (Ikrar & Council, 2017). Gabungan kedua pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk mendapatkan pemahaman yang lebih mendalam tentang bagaimana otak beroperasi, bagaimana ia menghasilkan perilaku, serta potensi aplikasinya dalam bidang seperti pengobatan neurologis, pengembangan kecerdasan buatan, dan

pemahaman lebih lanjut tentang sifat manusia. Penelitian ini menjadi penting dalam menjawab pertanyaan-pertanyaan mendasar tentang fungsi otak dan bagaimana kita dapat memanfaatkannya untuk meningkatkan kualitas hidup manusia (Markram dkk., 2015). Komputasi neurosains telah menjadi pusat perhatian dalam memahami kompleksitas otak manusia melalui pendekatan simulasi menggunakan berbagai model neuron yang telah dikembangkan. Para ilmuwan telah menciptakan beberapa model neuron dan mensimulasikan aktivitas listrik pada neuron untuk memperoleh pemahaman tentang cara kerja sistem saraf dan otak (Hu dkk., 2016).

Beberapa model neuron telah dikembangkan dalam bidang komputasi neurosains untuk mensimulasikan perilaku neuron yang dapat mendekati hasil perekaman secara eksperimen. Model-model neuron tersebut meliputi model *Hodgkin-Huxley* (Huxley, 1952), *FitzHugh-Nagumo* (Fitzhugh, 1961) (Nagumo, 1962) (Rinzel, 1978), *Nagumo-Sato* (Nagumo dkk., 1972), *Wilson-Cowan* (Wilson & Cowan, 1972), *Hindmarsh-Rose* (Hindmarsh dan Rose, 1984), *Izhikevich* (Izhikevich, 2003), dan *Morris-Lecar* (Morris & Lecar, 1981). Dari berbagai model tersebut, model yang bisa menggambarkan perilaku jaringan saraf biologis secara menyeluruh cenderung lebih sulit untuk direpresentasikan visualnya. Hal ini disebabkan oleh penggunaan persamaan diferensial tingkat tinggi dalam model tersebut, yang memerlukan sumber daya komputer yang besar dan waktu yang lebih lama untuk memodelkannya. Sebagai contoh ialah model neuron *Hodgkin-Huxley* (HH) yang menggunakan empat persamaan diferensial. Sebaliknya, model jaringan saraf yang lebih efisien secara komputasi memiliki

kompleksitas yang lebih rendah, sehingga tidak dapat menggambarkan jaringan saraf biologis dengan mendekati kondisi yang sebenarnya. Sebagai contoh, model *IF* hanya menggunakan satu buah persamaan diferensial tetapi tidak dapat mensimulasikan banyak perilaku neuron (Izhikevich, 2004).

Persamaan model neuron memberikan representasi matematis yang beragam terhadap perilaku neuron dalam sistem saraf yang dinyatakan dalam bentuk potensial membran terhadap waktu. Dengan menggunakan model-model ini, peneliti dapat mensimulasikan aktivitas neuron secara komputasional, memungkinkan untuk mempelajari dinamika jaringan saraf, mekanisme pemrosesan informasi, serta respons terhadap rangsangan eksternal dengan lebih terperinci. Penerapan pendekatan ini memberikan wawasan yang mendalam tentang cara kerja otak dalam skala yang lebih luas dan kompleks, serta potensinya dalam bidang-bidang seperti kecerdasan buatan, pengobatan neurologis, dan pemahaman fundamental tentang fungsi otak (Izhikevich, 2006). Model *Integrate-and-Fire* (IF) telah mengalami perkembangan menjadi model yang lebih kompleks yang dikenal sebagai *Adaptive Exponential Integrate-and-Fire* (Ad-Ex IF). Model *Ad-Ex IF* ini mengintegrasikan elemen adaptif yang memperhitungkan perilaku pada tingkat membran neuron, seperti adanya potensial aksi, hiperpolarisasi, dan fenomena adaptasi. Dengan demikian, model *Ad-Ex IF* memungkinkan simulasi yang lebih akurat terhadap perilaku neuron dalam respons terhadap sinyal masukan dan kondisi lingkungan yang berubah-ubah. Pengembangan ini memperluas pemahaman kita tentang mekanisme

komputasi neuron dalam jaringan saraf, serta relevansinya dalam konteks kecerdasan buatan dan pemodelan sistem saraf (Brette dkk., 2007).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk memodelkan neuron, masing-masing dengan pendekatan dan fokus yang berbeda. Souza menggunakan dua persamaan diferensial biasa turunan bilangan bulat ekstensi fraktal untuk memodelkan kompleksitas struktur dan fungsi neuron (Souza dkk., 2024). Marasco memodelkan input sinaptik realistis dari neuron piramidal hipokampus dan interneuron melalui model *Adaptif generalized leaky integrate and fire* (Marasco dkk., 2024). Marasco, disisi lain menerapkan model adaptif generalisasi untuk mensimulasikan berbagai jenis neuron (Marasco dkk., 2023). Depannemaecker memanfaatkan Model Eksponensial Adaptif berbasis Konduktansi Model Integrate-and-Fire (*CAd-Ex IF*) untuk meniru perilaku neuron (Depannemaecker dkk. 2021). Borges menambahkan gangguan eksternal pada setiap model neuron *Ad-Ex IF* untuk mempelajari pengaruhnya terhadap aktivitas neuronal (Borges dkk., 2017). Touboul & Brette fokus pada fitur subthreshold model *Ad-Ex IF* dan sifat dinamisnya untuk pola lonjakan (Touboul & Brette, 2008). Penelitian-penelitian ini memberikan wawasan berharga tentang kompleksitas dan fungsi neuron, serta membantu mengembangkan model komputasi yang lebih akurat untuk mempelajari jaringan saraf dan perilaku neuron. Berdasarkan dari latar belakang yang telah dipaparkan di atas maka akan dilakukan simulasi dinamika potensial membran dengan model *Ad-Ex IF* untuk lebih memahami karakteristik dan perilaku neuron apa saja yang dapat dihasilkan dari model tersebut. Model *Ad-Ex IF* merupakan model yang digunakan untuk

menggambarkan dinamika potensial membran neuron, yang dapat menghasilkan berbagai macam pola diantaranya lonjakan (*spiking*) berupa lonjakan kuat (*Tonic Spiking*), lonjakan sementara (*Transient spiking*), lonjakan tidak teratur (*Irregular spiking*) dan akselerasi tertunda (*delayed accelerating*); ledakan (*bursting*) berupa ledakan kondisi awal (*Initial Burst*), ledakan teratur (*Regular Bursting*) dan ledakan teratur yang tertunda (*Delayed Regular Bursting*) dan pola adaptasi (*adaptation*). Simulasi ini akan membantu untuk mengidentifikasi karakteristik-karakteristik yang unik dari model *Ad-Ex IF*, serta mengidentifikasi parameter yang penting dalam penggambaran dinamika potensial membran neuron (Fiorillo dkk., 2014).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah di paparkan maka rumusan masalah dalam penelitian ini ialah sebagai berikut.

1. Bagaimanakah variasi pola lonjakan (*spiking*) dinamika potensial membran yang dapat digambarkan oleh model neuron *Ad-Ex IF*?
2. Bagaimanakah variasi pola ledakan (*bursting*) dinamika potensial membran yang dapat digambarkan oleh model neuron *Ad-Ex IF*?
3. Bagaimanakah pola adaptasi (*adaptation*) dinamika potensial membran yang terbentuk dari model neuron *Ad-Ex IF*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah

1. Menganalisis variasi pola lonjakan (*spiking*) dinamika potensial membran *Ad-Ex IF*.
2. Menganalisis variasi pola ledakan (*bursting*) dinamika potensial membran *Ad-Ex IF*.
3. Menganalisis pola adaptasi (*adaptation*) dinamika potensial membran *Ad-Ex IF*.

1.4 Batasan Penelitian

Adapun Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dinamika potensial membran ditampilkan sebagai fungsi potensial membran terhadap waktu, yang didukung oleh fungsi arus (variabel adaptasi) terhadap waktu
2. Simulasi menggunakan Google Colaboratory yang diintegrasikan dengan Simulator Brian2.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian yang diharapkan dari peneliti ini adalah sebagai berikut:

1. Memahami karakteristik dan bentuk aktivitas *spiking* dari model neuron *Ad-Ex IF*
2. Memahami konsep dan parameter fisis model neuron *Ad-Ex IF*
3. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai referensi penelitian yang berkaitan.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis grafik yang telah dilakukan pada penelitian yang berjudul “Analisis Dinamika Potensial Membran Model Neuron Adaptif Eksponensial Integrate and Fire Dengan Menggunakan Stimulus Arus Konstan”, dapat disimpulkan bahwa:

1. Variasi pola lonjakan (*spiking*) yang dihasilkan oleh model neuron Ad-Ex IF meliputi lonjakan kuat (*Tonic Spiking*), lonjakan sementara (*Transient spiking*), lonjakan tidak teratur (*Irregular spiking*) dan akselerasi tertunda (*delayed accelerating*).
2. Variasi pola ledakan (*bursting*) yang dihasilkan oleh model neuron Ad-Ex IF meliputi ledakan kondisi awal (*Initial Burst*), ledakan teratur (*Regular Bursting*) dan ledakan teratur yang tertunda (*Delayed Regular Bursting*).
3. Pola adaptasi yang dihasilkan oleh model neuron Ad-Ex IF menunjukkan bahwa interval antar spike semakin besar dan frekuensi lonjakan semakin kecil seiring waktu.

5.2 Saran

Saran yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian berikutnya diantaranya:

1. Menggunakan arus stimulus yang bervariasi
2. Dilakukan simulasi untuk neuronal behavior yang lebih banyak sehingga mendapatkan gambaran yang komprehensif terkait perilaku neuron yang dimodelkan.

3. Penggunaan parameter yang lebih spesifik untuk kondisi tertentu, misalnya pada beberapa kasus brain disorders, sehingga dapat dijadikan studi pembandingan antara riset eksperimen dengan riset komputasi.
4. Dibuat pemodelan jaringan saraf dengan menggunakan model neuron Ad-Ex IF.



DAFTAR PUSTAKA

- Abusnaina, A. A. 2017. *Spiking Neuron Models : A Review Spiking Neuron Models : A Review*. June.
- Akademi Khan. 2024. *How do you know where you are right now?* <https://www.khanacademy.org/science/biology/human-biology/neuron-nervous-system/a/overview-of-neuron-structure-and-function>
- Alaui & Corson. 2014. *Asymptotic dynamics for slow-fast Hindmarsh-Rose neuronal system Introduction and neurophysiology Also called nerve cells , neurons are the most important cells of the nervous*. May.
- Antal Nógrádi ;Gerta Vrbová. 2013. *Anatomy and Physiology of the Spinal Cord*.
- Barry, W.1990. *Stimulus current*.
- Bican, Orhan. 2013. “*The Spinal Cord: a Review of Functional Neuroanatomy.*” **31**, **n**, **1-18**. https://www.unboundmedicine.com/medline/citation/23186894/The_spinal_cord:_a_review_of_functional_neuroanatomy_
- Borges, F. S., Protachevicz, P. R., Lameu, E. L., Bonetti, R. C., Iarosz, K. C., Caldas, I. L., Baptista, M. S., & Batista, A. 2017. *Synchronised firing patterns in a random network of adaptive exponential integrate-and-fire neuron model*. *Neural Networks*, **90**, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2017.03.005>
- Brette, R., & Gerstner, W. 2005. *Adaptive exponential integrate-and-fire model as an effective description of neuronal activity*. *Journal of Neurophysiology*, **94**(5), 3637–3642. <https://doi.org/10.1152/jn.00686.2005>
- Brette, R., Rudolph, M., Carnevale, T., Hines, M., Beeman, D., Bower, J. M., Diesmann, M., Morrison, A., Goodman, P. H., Harris, F. C., Zirpe, M., Natschläger, T., Pecevski, D., Ermentrout, B., Djurfeldt, M., Lansner, A., Rochel, O., Vieville, T. 2007. Simulation of networks of spiking neurons: A review of tools and strategies. *Journal of Computational Neuroscience*, **23**(3), 349–398. <https://doi.org/10.1007/s10827-007-0038-6>
- Brian authors. (2018). *Brian 2 Documentation*.
- Burns, R. B., & Dobson, C. B. 1984. *Introductory Psychology*. *Introductory Psychology*. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-6279-1>
- Cancer, T. U. S. N. 2024. *Introduction to the Nervous System. Surveillance, Epidemiology and End Results (SEER) Training Modules*. 2024.
- Daniel, D. 2008. *Computational Models Working Memory*. *Seeing Black and White*, 3(november), 189–212.

- Depannemaecker, D., dkk. 2020. *Conductance-based Adaptive Exponential integrate-and-fire model* To cite this version : HAL Id : hal-02507596 *Conductance-based Adaptive Exponential integrate-and-fire model*.
- Destexhe, A. 1999. *Spatiotemporal analysis of local field potentials and unit discharges in cat cerebral cortex during natural wake and sleep states. Journal of Neuroscience, 19(11), 4595–4608.*
- Diva, S. A., & Yuniati, A. 2020. *Analysis of Modification in Synaptic Plasticity STDP (Spike Timing Dependent Plasticity) Model by Changing Intracellular Calcium Concentration.*
- Fiorillo, C. D. 2014. *The meaning of spikes from the neuron's point of view: predictive homeostasis generates the appearance of randomness. Frontiers in Computational Neuroscience, 8.* <https://doi.org/10.3389/fncom.2014.00049>
- Fitzhugh, R. 1961. *Impulses And Physiological States In Theoretical Models Of Nerve Membran. 1(6)(1948), 445–466.*
- Fletcher, A. 2008. *Action potential: generation and propagation. Anaesthesia & Intensive Care Medicine, 9(6), 251–255.* <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2008.04.004>
- Fourcaud-Trocmé, N. 2003. *How Spike Generation Mechanisms Determine the Neuronal Response to Fluctuating Inputs. Journal of Neuroscience, 23(37), 11628–11640.* <https://doi.org/10.1523/jneurosci.23-37-11628.2003>
- Fuhrmann, G. 2002. Spike frequency adaptation and neocortical rhythms. *Journal of Neurophysiology, 88(2), 761–770.*
- Han, F., Lu, Q. S. 2012. *International Journal of Non-Linear Mechanics Firing synchronization of learning neuronal networks with small-world connectivity (Vol. 47).* <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2011.09.001>
- Harris, K. D. 2001. Temporal interaction between single spikes and complex spike bursts in hippocampal pyramidal cells. *Neuron, 32(1), 141–149.*
- Hu, X., Liu, C., & Liu, L. 2016. *An electronic implementation for Morris – Lecar neuron model An electronic implementation for Morris – Lecar neuron. Nonlinear Dynamics, October 2018.* <https://doi.org/10.1007/s11071-016-2647-y>
- Huda, & Suyadi. 2020. *Otak dan Akal dalam Kajian Al-Quran dan Neurosains. Jurnal Pendidikan Islam Indonesia, 5(1), 67–79.* <https://doi.org/10.35316/jpii.v5i1.242>
- Huxley, A. L. H. A. F. 1952. *A quantitative description of membran current and its application to conduction and excitation in nerve. 500–544.*
- Ikrar, T., & Council, I. M. 2017. *Neurosains , Menelusuri Misteri Otak Manusia (Issue December 2015).*

- IQWiG Germany. 2022. *IQWiG (Institute for Quality and Efficiency in Health Care)*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK279390/>
- Izhikevich, E. M. 2003. *Simple Model of Spiking Neurons*. **14(6)**, 1569–1572.
- Izhikevich, E. M. 2004. *Which Model to Use for Cortical Spiking Neurons ?* **15(5)**, 1063–1070.
- Izhikevich, E. M. 2006. *Dynamical Systems in Neuroscience*. The MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/2526.001.0001>
- Izhikevich, E. M. 2007. *Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting*.
- Jailani, M., Suyadi, S., dkk. 2023. *Critical Analysis of 'Aql and Brain in the Paradigm of the Qur'an and Neuroscience and Its Contribution to the Development of Islamic Education*. *Taqaddumi: Journal of Quran and Hadith Studies*, **3(1)**, 14–47. <https://doi.org/10.12928/taqaddumi.v3i1.8208>
- Jannah, M. 2023. *Perkembangan Otak Pada Anak Usia Dini:Kajian Dasar Neurologi Dan Islam*. *Bunayya : Jurnal Pendidikan Anak*, **9(1)**, 171. <https://doi.org/10.22373/bunayya.v9i1.18499>
- Kappen, B. 2008. *Introduction to biophysics*.
- Llinás, R. R., & Steriade, M. 2006. Bursting of thalamic neurons and states of vigilance. *Journal of Neurophysiology*, **95(6)**, 3297–3308.
- Marasco, A., Spera, E., De Falco, V., Iuorio, A., Lupascu, C. A., Solinas, S., & Migliore, M. (2023). *An Adaptive Generalized Leaky Integrate-and-Fire Model for Hippocampal CA1 Pyramidal Neurons and Interneurons*. *Bulletin of Mathematical Biology*, **85(11)**, 109. <https://doi.org/10.1007/s11538-023-01206-8>
- Marasco, A., Spera, E., dkk. 2023. *An Adaptive Generalized Leaky Integrate-and-Fire Model for Hippocampal CA1 Pyramidal Neurons and Interneurons*. *Bulletin of Mathematical Biology*, **85(11)**, 109. <https://doi.org/10.1007/s11538-023-01206-8>
- Maravall, M. 2007. Shifts in coding properties and maintenance of information transmission during adaptation in barrel cortex. *PLoS Biology*, **5(2)**, 0323–0334.
- Marieb, & Hoehn. 2012. *Brain Antomy (Advanced Human Anatomy & Physiology)*. *Human Anatomy & Physiology*, 1–16.
- Markram, H., Muller, E., Ramaswamy, S., Reimann, M. W., Defelipe, J., Hill, S. L., Segev, I., Schu, F., Markram, H., Muller, E. 2015. *Reconstruction and Simulation of Neocortical Reconstruction and Simulation of Neocortical Microcircuitry*. **456–492**. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2015.09.029>
- Morris, C., & Lecar, H. 1981. *Voltage Oscillations In The Barnacle Giant Muscle*

- Fiber. Biophysical Journal*, **35(1)**, 193–213. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(81\)84782-0](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(81)84782-0)
- Nagumo, J., Division, B., Air, B., & Space, F. 1972. *On a Response Characteristic of a Mathematical Neuron Model*. **155**, 155–164.
- Nagumot, J. 1962. *An Active Pulse Transmission Line Simulating Nerve Axon* *. 117(m V), 2061–2070.
- Naud, R., Marcille, N., dkk. 2008. *Firing patterns in the adaptive exponential integrate-and-fire model*. *Biological Cybernetics*, **99(4–5)**, 335–347
- Perdue, R. J. 2013. *ePrints Soton Existing Theory*.
- Rinzel, J. 1978. *Uklthcnlr162 Repetitive Activity and Hopf Bifurcation Under Point- Stimulation for a Simple FitzHugh-Nagumo Nerve Conduction Model*. **382**, 363–382.
- Rosidi, M. (2019). *Metode Numerik Menggunakan R Untuk Teknik Lingkungan*. **300**.
- Saladin, K. (2020). *Anatomy & Physiology The Unity Of Form And Function. Conflict in the Holy Land: From Ancient Times to the Arab-Israeli Conflicts*, **284–286**.
- Saunier, V. 2021. *Microélectrodes nanocomposites implantables couplant enregistrement-stimulation neuronale et détection électrochimique de neurotransmetteurs*. August.
- Singh., L. T. V. R. P. 2022. *Anatomy, Central Nervous System. Lauren Thau; Vamsi Reddy; Paramvir Singh*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK542179/>
- Souza, D. L. M., Gabrick, E. C., Protachevicz, P. R., Borges, F. S., Trobia, J., Iarosz, K. C., Batista, A. M., Caldas, I. L., & Lenzi, E. K. 2024. *Adaptive exponential integrate-and-fire model with fractal extension*. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, **34(2)**.
- Stimberg, M. 2020. *Modeling neuron – glia interactions with the Brian 2 simulator* (Issue January 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00817-8>
- Stimberg, M., Brette, R., & Goodman, D. F. M. 2019. *Brian 2 : an intuitive and efficient neural simulator*.
- Stimberg, M., Vision, I. De, Goodman, D. F. M., & Brette, R. 2017. *Modeling neuron – glia interactions with the Brian 2 simulator*.
- Syahid, A. 2020. *Simulasi Aktivitas Spiking Model-Model Neuron Menggunakan Metode Euler. Tugas Akhir*. <https://digilib.uin-suka.ac.id/id/eprint/42798/>
- The University of Alabama at Birmingham. (2024). *What is a spinal cord injury?* <https://www.uab.edu/medicine/sci/faqs-about-spinal-cord-injury-sci/what-is-a-spinal-cord-injury>

Touboul, J., & Brette, R. 2008. *Dynamics and bifurcations of the adaptive exponential integrate-and-fire model*. *Biological Cybernetics*, **99(4-5)**, 319–334.

Varacallo., 2023. *Neuroanatomy, Neurons*.

Wilson, H. R., & Cowan, J. D. 1972. *Excitatory And Inhibitory Interactions In Localized Populations Of Model Neurons*. *Biophysical Journal*, **12(1)**, 1–24.

