

**DINAMIKA PEMODELAN JARINGAN
MULTIKOMPARTEMEN DENGAN VARIASI ARUS SINAPSIS**

TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk mencapai derajat Sarjana S-1

Program Studi Fisika



Alyaun Nida

STATE ISLAMIC UNIVERSITY

SUNAN KALIJAGA

YOGYAKARTA

PROGRAM STUDI FISIKA

FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS ISLAM SUNAN KALIJAGA

YOGYAKARTA

2024

LEMBAR 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-2353/Un.02/DST/PP.00.9/12/2024

Tugas Akhir dengan judul : Dinamika Pemodelan Jaringan Multikompartment Dengan Variasi Arus Sinapsis

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : ALYAUN NIDA
Nomor Induk Mahasiswa : 20106020039
Telah diujikan pada : Jumat, 20 Desember 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 Yunianti, S.Si., M.Si., Ph.D.
SIGNED

Valid ID: 676a2cea20950



Pengaji I

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

Valid ID: 676a1cf043d49



Pengaji II

Dr. Asih Melati, S.Si., M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 676a256e81b9a



Yogyakarta, 20 Desember 2024

UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

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

Valid ID: 676a693579d28

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Alyaun Nida

NIM : 20106020039

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul "Dinamika Pemodelan Jaringan Multikompartment Dengan Variasi Arus 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, 8 Desember 2024

Penulis



Alyaun Nida

NIM. 20106020039

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	:	ALYAUN NIDA
NIM	:	20106020039
Judul Skripsi	:	Dinamika Pemodelan Jaringan Multikompartment Dengan Variasi Arus 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 mengharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 8 Desember 2024

Pembimbing

Anis Yunianti, S.Si., M.Si., Ph.D.
NIP. 19830613 200901 2 009

Dinamika Pemodelan Jaringan Multikompartment Dengan Variasi Arus Sinapsis

Alyaun Nida
20106020039

INTISARI

Penelitian tentang dinamika pemodelan jaringan multikompartment dengan variasi arus sinapsis berhasil dibuat. Penelitian ini bertujuan untuk membuat model sel sederhana dan jaringan multikompartment beserta grafik dinamika dari kedua model ini dengan memvariasikan nilai arus. Selain itu, penelitian ini juga untuk menunjukkan aktivitas *firing* pada jaringan multikompartment dengan memvariasikan nilai arus sinapsis. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan simulator NEURON yang diintegrasikan dengan pemrograman Python untuk menampilkan pemodelan, dinamika, dan aktivitas *firing*. Pemodelan dibuat dengan menggunakan soma yang memiliki panjang dan diameter yang sama yaitu $12,6157 \mu\text{m}$, sedangkan untuk dendrit memiliki panjang $200 \mu\text{m}$ dan diameter $1 \mu\text{m}$. Selain itu, menambahkan resistansi aksial sebesar $100 \Omega\text{cm}$, nilai kapasitansi membran $1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$, kinetika Hodgkin-Huxley berupa nilai konduktansi sodium $0,12 \text{ S}/\text{cm}^2$, nilai konduktansi potassium $0,036 \text{ S}/\text{cm}^2$, nilai konduktansi kebocoran (*leak*) $0,0003 \text{ S}/\text{cm}^2$, dan nilai potensial pembalikan (*Reversal Potential*) $-54,3 \text{ mV}$, arus pasif berupa nilai konduktansi pasif $0,001 \text{ S}/\text{cm}^2$ dan nilai potensial pembalikan kebocoran (*Leak Reversal Potential*) -65 mV . Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan nilai arus mempengaruhi grafik dinamika dari soma dan dendrit pada sel sederhana maupun jaringan multiompartemen. Pada soma memiliki amplitudo yang lebih tinggi karena berperan sebagai pusat inisiasi potensial aksi, sementara dendrit memiliki amplitudo lebih rendah karena fungsinya sebagai integrator sinyal. Selain itu, perubahan arus sinapsis mempengaruhi aktivitas firing jaringan. Arus sinapsis yang lebih besar akan menghasilkan frekuensi firing lebih tinggi dan membentuk pola *spike* yang lebih teratur. Sedangkan arus sinapsis yang kecil akan menghasilkan frekuensi firing lebih rendah dan membentuk pola spike yang tidak terkoordinasi karena jaraknya yang terlalu besar. Pola *spike* pada aktivitas firing jaringan ini menunjukkan pentingnya arus sinapsis dalam mengatur eksitasi neuron dan dinamika jaringan saraf.

KATA KUNCI : Aktivitas *firing*, Hodgkin-Huxley, multikompartment, simulator NEURON, sinapsis.

Dynamics of Multicompartment Network Modeling with Variations in Synaptic Current

Alyaun Nida
20106020039

ABSTRACT

Research on the dynamics of multi-compartment network modeling with variations in synaptic current has been successfully conducted. This study aims to create a simple cell model and a multi-compartment network model, along with graphs depicting the dynamics of both models under varying current values. Additionally, it seeks to demonstrate firing activity in the multi-compartment network by varying synaptic current values. The research was carried out using the NEURON simulator integrated with Python programming to visualize the modeling, dynamics, and firing activities. The modeling involved a soma with equal length and diameter of $12,6157\text{ }\mu\text{m}$, while the dendrites had a length of $200\text{ }\mu\text{m}$ and a diameter of $1\text{ }\mu\text{m}$. Furthermore, axial resistance was set to $100\text{ }\Omega\text{cm}$, membrane capacitance to $1\text{ }\mu\text{F/cm}^2$, and Hodgkin-Huxley kinetics were applied with sodium conductance at 0.12 S/cm^2 , potassium conductance at 0.036 S/cm^2 , leak conductance at 0.0003 S/cm^2 , and reversal potential at -54.3 mV . Passive current included a passive conductance value of 0.001 S/cm^2 and a leak reversal potential of -65 mV . Results of the study indicate that changes in current values influence the dynamic graphs of the soma and dendrites in both simple cells and multi-compartment networks. The soma showed higher amplitude as it serves as the center for action potential initiation, whereas dendrites displayed lower amplitude due to their role as signal integrators. Moreover, variations in synaptic current significantly impacted network firing activity. Larger synaptic currents produced higher firing frequencies with more regular spike patterns, while smaller synaptic currents resulted in lower firing frequencies with uncoordinated spike patterns due to larger inter-spike intervals. These spike patterns in network firing activity underscore the importance of synaptic currents in regulating neuronal excitation and neural network dynamics.

Keywords: Firing activity, Hodgkin-Huxley, multi-compartment, NEURON simulator, synapse.

MOTTO

(*Dan orang-orang yang bersungguh-sungguh untuk (mencari keridaan) Kami, benar-benar akan Kami tunjukkan kepada mereka jalan-jalan Kami. Dan sungguh, Allah beserta orang-orang yang berbuat baik.*)

(Q.S Al-‘Ankabut : 69)

"Janganlah kamu merasa lelah dalam menuntut ilmu, karena bagi setiap lelahmu ada pahala. Ketahuilah, seseorang akan menjadi mulia bukan karena hartanya, melainkan karena ilmu dan akhlaknya."

(Umar bin Khattab)



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur dan kerendahan hati, saya persembahkan karya ini kepada :

~

Yang terhormat Dosen Pembimbing sekaligus Ibu, Ibu Anis Yuniaty

Terima kasih telah dengan sabar membimbing penulis. Terima kasih telah memberikan pengetahuan dan inspirasi dalam setiap langkah perjalanan yang dilalui.

Terima kasih telah mengajarkan arti sabar yang tak terbatas, kekuatan yang tak tergoyahkan, dan kasih yang sangat tulus kepada penulis.

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

~

. Kedua orang tua tercinta, Kakak, dan kedua Adek

Terima kasih sudah menjadi pilar kekuatan dalam hidup. Terima kasih atas semua kasih sayang yang selalu diberikan, terima kasih atas dukungannya yang ak pernah putus, terima kasih atas doa yang tak hentinya, dan pengorbanan yang dilakukan.

Terima kasih telah membimbing dengan sabar dan penuh kasih dalam setiap langkah penulis dan menjadikan pribadi yang lebih kuat.

SUNAN KALIJAGA
STATE ISLAMIC UNIVERSITY
TOGAKAKUJA

Keluaga Besar Pondok Pesantren Inayatullah, khusunya Abah Yai Chamdani Yusuf dan Umi Nailil Izzah

Terima kasih atas dukungan, semangat, dan doa yang diberikan kepada penulis. Terima kasih buat Abah Yai dan Umi atas bimbingan dan pengajarannya untuk tetap menjadi pribadi yang baik dan istiqomah ketika didunia luar. Terima kasih atas doanya untuk penulis sehingga penulis bisa mencapai dititik ini.

KATA PENGANTAR

السَّلَامُ عَلَيْكُمْ وَرَحْمَةُ اللَّهِ وَبَرَكَاتُهُ

Alhamdulillahirabbil 'alamiin, puji dan Syukur atas kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan penelitian akhir yang berjudul “*Dinamika Pemodelan Jaringan Multikompartemen Dengan Variasi Arus Sinapsis*” dengan lancar dan hikmat. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu sumber pengetahuan mengenai sistem saraf dan mengantarkan untuk mengetahui kebesaran Allah SWT melalui ciptaan-Nya. Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada seluruh pihak yang membantu dan mendukung dalam menyelesaikan penelitian ini. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si selaku Kepala Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga.
2. Ibu Anis Yuniati, S.Si., M.Si selaku Dosen Pembimbing dalam penelitian ini. Terima kasih atas waktu, ilmu dan kesabarannya dalam memberikan arahan dan saran selama proses penelitian dan penulisan laporan tugas akhir ini. Terima kasih atas motivasi dan bimbingannya.
3. Ibu Dr. Nita Handayani, S.Si., M.Si. selaku dosen pengaji tugas akhir yang telah memberikan arahan dan saran untuk penyempurnaan penelitian ini.
4. Ibu Asih Melati, S.Sc., M.Si., Ph.D selaku dosen pengaji yang telah memberikan arahannya.
5. Bapak Andi, M.Sc selaku dosen penasihat akademik. Terima kasih atas bimbingannya selama perkuliahan.
6. Segenap dosen Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga yang telah memberikan ilmu dan pengalamannya kepada penulis.
7. Cinta pertamaku, bapak Abdul Basith, dan ibunda, ibu Nur Hidayah. Terima kasih telah mendidik, membimbing, dan mengasuh penulis dengan tulus serta

tidak pernah berhenti memberikan dorongan, perhatian, dan doa terhadap penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lancar.

8. Kakak, M. Ali Khudzaifi dan kedua Adek, Salma Rizqiyya dan Ahmad Ubay. Terima kasih atas semua doa, dukungan, motivasi, semangat, dan canda tawa yang telah diberikan kepada penulis untuk berjuang dan bertahan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Para sahabat dan keluarga besar Pondok Pesantren Inayatullah yang selalu memberikan doa, dukungan dan semangat dalam bentuk apapun kepada penulis.
10. Keluarga besar Fisika UIN Sunan Kalijaga khususnya teman-teman Angkatan 2020.
11. Semua pihak yang telah mengajarkan apapun itu dalam hidup dan memberikan dukungan dalam bentuk apapun itu.
12. Yang terakhir, terima kasih untuk diri sendiri, karena telah mampu berusaha dan berjuang sejauh ini, mampu mengendalikan diri dari berbagai tekanan diluar keadaan dan tidak pernah memutuskan menyerah sesulit apapun prosesnya. Ini merupakan pencapaian yang patut dibanggakan untuk diri sendiri. Tetap semangat dan jangan putus asa.

Penulis menyadari bahwa penelitian dan penulisan tugas akhir ini masih terdapat banyak kekurangan dan masih jauh dari kesempurnaan. Besar harapan, hal tersebut dapat menjadi pendorong bagi penulis dan pembaca untuk memberikan yang terbaik dalam berkarya di masa mendatang. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun selalu dinantikan. Penulis berharap dengan adanya laporan ini dapat memberikan inspirasi dan motivasi dalam belajar dan mengembangkan ilmu pengetahuan.

Yogyakarta, Desember 2024

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI	iii
INTISARI	iv
ABSTRACT	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMPAHAN	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	7
1.3 Tujuan Penelitian.....	8
1.4 Batasan Penelitian.....	8
1.5 Manfaat Penelitian.....	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Studi Pustaka	10
2.2 Landasan Teori	15
2.2.1 Neuron	15
2.2.2 Morfologi Sel.....	18
2.2.3 Geometri Sel.....	20
2.2.4 Mekanisme Biofisika Membran.....	23
2.2.5 Model Neuron Hodgkin-Huxley	33
2.2.6 Potensial Aksi	37
2.2.7 Sinapsis.....	41
2.2.8 Simulator NEURON+Python	45
2.2.9 Perspektif Al-Qur'an Tentang Sistem Saraf Manusia.....	48

BAB III METODE PENELITIAN	51
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	51
3.2 Alat Penelitian	51
3.3 Tahapan Penelitian.....	51
3.3.1 Instalasi Simulator NEURON, Python, dan modul Matplotlib	52
3.3.2 Pembuatan Model Untuk Analisis Dinamika Sel Sederhana	56
3.3.3 Pembuatan Model Untuk Analisis Dinamika Jaringan Multikompartment	
65	
3.3.4 Pembuatan Aktivitas Firing Jaringan Multikompartment Dengan Variasi Nilai Arus Sinapsis	73
3.4 Analisis Data	79
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	81
4.1 Pemodelan dan Dinamika Potensial Membran terhadap Waktu pada Sel Sederhana	81
4.2 Pemodelan dan Dinamika Potensial Membran terhadap Waktu Dengan Variasi Arus pada Jaringan Multikompartment	94
4.3 Aktivitas Firing Model Jaringan Multikompartment Dengan Variasi Arus Sinapsis.....	102
4.4 Integrasi Interkoneksi Neurosains Dalam Islam	108
BAB V PENUTUP.....	110
5.1 Kesimpulan.....	110
5.2 Saran	111
DAFTAR PUSTAKA.....	112
LAMPIRAN.....	116

DAFTAR TABEL

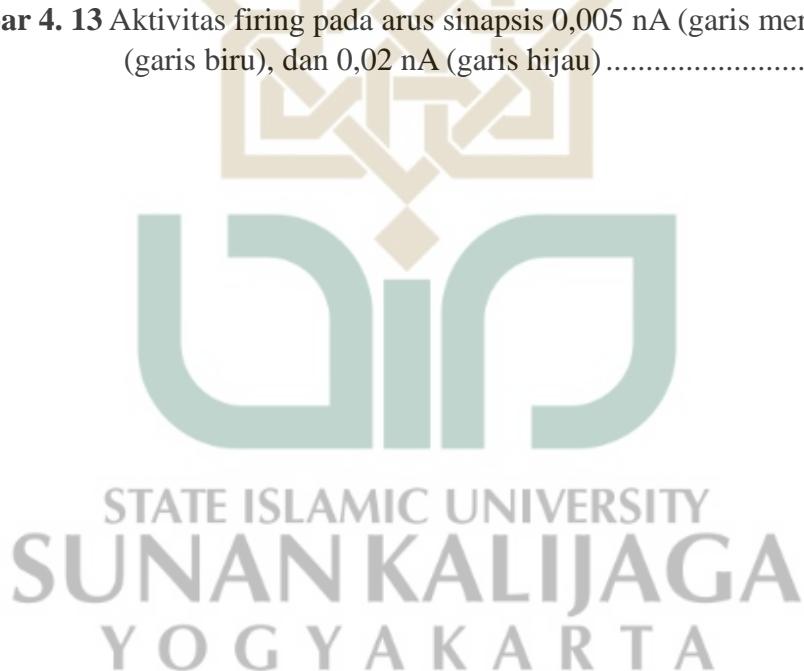
Tabel 2. 1 Penelitian yang berkaitan.....	13
Tabel 3. 1 Alat Penelitian.....	51



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Struktur Neuron	16
Gambar 2. 2 Proses Difusi Sederhana	25
Gambar 2. 3 Proses Difusi terfasilitas	26
Gambar 2. 4 Proses Terjadinya Osmosis	27
Gambar 2. 5 Proses Terjadinya Transpor Membran Aktif	28
Gambar 2. 6 Proses Eksositosis	30
Gambar 2. 7 Jenis Endositosis	32
Gambar 2. 8 Rangkaian Listrik Model Neuron Hodgkin-Huxley	34
Gambar 2. 9 Proses Terjadinya Potensial Aksi	38
Gambar 2. 10 Proses Transmisi Sinyal dengan Sinapsis Kimia	43
Gambar 2. 11 Tampilan Fitur GUI.....	46
Gambar 2. 12 Tampilan Jendela nrngui	47
Gambar 2. 13 Menghubungkan NEURON ke Python	48
Gambar 3. 1 Tahapan Instalasi Simulator NEURON	52
Gambar 3. 2 Tampilan jendela nrngui	53
Gambar 3. 3 Tampilan jendela main menu NEURON	53
Gambar 3. 4 Tahapan Instalasi Aplikasi Anaconda	54
Gambar 3. 5 Tampilan Website Resmi Anaconda	55
Gambar 3. 6 Tampilan Aplikasi Anaconda	55
Gambar 3. 7 Menghubungkan NEURON dengan Python.....	55
Gambar 3. 8 Menginput modul Bokeh ke Jupyter Notebook.....	56
Gambar 3. 9 Menginput modul Matplotlib ke Jupyter Notebook	56
Gambar 3. 10 Diagram alir pembuatan dan dinamika pemodelan sel sederhana	57
Gambar 3. 11 Diagram alir pembuatan dinamika jaringan multikompartemen dengan penambahan mekanisme biofisika	65
Gambar 3. 12 Diagram alir pembuatan aktivitas firing jaringan multikompartemendengan variasi nilai arus sinapsis	74
Gambar 4. 1 Representasi pemodelan sel sederhana yang terdiri dari soma (persegi) dan dendrit (garis memanjang).....	81
Gambar 4. 2 Dinamika potensial membran terhadap waktu pada soma dengan nilai arus berbeda.....	83
Gambar 4. 3 Dinamika potensial membran terhadap waktu pada soma (garis halus) dan dendrit (garis putus-putus) dengan nilai arus berbeda .	84
Gambar 4. 4 Dinamika potensial membran terhadap waktu pada soma (garis halus tebal dan tipis) dan dendrit dengan dua segmen (garis putus- putus tebal dan tipis) dengan nilai arus berbeda.....	87

Gambar 4. 5 Dinamika potensial membran terhadap waktu pada soma dendrit yang memiliki satu segmen (garis tebal) dan dua segmen (garis tipis).....	89
Gambar 4. 6 Dinamika potensial membran terhadap waktu pada dendrit yang memiliki satu segmen (garis tebal) dan dua segmen (garis tipis)..	90
Gambar 4. 7 Representasi Pemodelan Jaringan Multikompartemen.....	95
Gambar 4. 8 Dinamika potensial membran terhadap waktu pada jaringan multikompartemen sebelum sel dihubungkan	96
Gambar 4. 9 (a) Grafik perubahan potensial terhadap waktu (b) Grafik arus sinapsis terhadap waktu	98
Gambar 4. 10 Dinamika potensial membran terhadap waktu pada jaringan multikompartemen setelah sel dihubungkan dalam jaringan	100
Gambar 4. 11 Aktivitas firing pada arus sinapsis 0,005 nA	103
Gambar 4. 12 Aktivitas firing pada arus sinapsis 0,005 nA (garis biru) dan 0,01 nA (garis merah).....	104
Gambar 4. 13 Aktivitas firing pada arus sinapsis 0,005 nA (garis merah), 0,01 nA (garis biru), dan 0,02 nA (garis hijau)	106



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Allah SWT menciptakan alam semesta ini dengan memiliki tujuan masing-masing. Salah satu dari ciptaan itu adalah manusia. Penciptaan manusia merupakan ciptaan yang paling sempurna di antara ciptaan yang lain. Hal ini karena hanya manusia yang dikarunia oleh Allah SWT berupa *al-'aql* (kemampuan untuk berpikir), *al-'ilm* (ilmu pengetahuan), dan *al-tamyiz* (kemampuan menerapkan dan mengambil keputusan) sehingga dapat membedakan yang *haq* dan *bathil* dalam kehidupan (Dawang, 2011). Kemampuan inilah yang menjadi peran penting dalam memajukan kehidupan. Adapun bidang yang mempelajari mengenai *al-'aql* pada manusia adalah bidang neurosains.

Neurosains merupakan bidang ilmu yang mempelajari sistem saraf, khususnya pada sel saraf (neuron). Istilah yang berkaitan dengan neurosains ditemukan dalam Al-Qur'an yang mengacu pada otak yang dikaitkan dengan ubun-ubun menggunakan sebutan *naashiyah* (Noor, 2019) pada surat Ar-Rahman ayat 41 sebagai berikut.

يُعْرَفُ الْمُجْرِمُونَ بِسِنْلَهُمْ فَيُؤْخَذُ بِالْوَاصِبَيْنَ وَالْأَقْدَامَ ﴿٤١﴾

“Para pendosa dikenali dengan tanda-tandanya, lalu direnggut ubun-ubun dan kakinya,” (Q.S Ar-Rahman : 41)

Ayat dalam surah Ar-Rahman ini berfokus pada satu kata “*nawaashy*” yang merupakan bentuk jama' dari kata *naashiyah* yang memiliki arti ubun-ubun.

Ayat tersebut memiliki makna yang mengarah pada kecaman dan peringatan bagi kaum muslimin maupun beberapa orang yang melakukan suatu hal yang melanggar dan mendustakan agama. Kata *naawashy* ini menunjukkan bahwa pusat kendali dari aktifitas berada pada bagian otak. Oleh karena itu, perkataan dan perbuatan ditinjau dari kerja otak frontal lobe. Salah satu fungsi dari otak frontal lobe adalah mengendalikan semua aktivitas yang dilakukan manusia.

Otak manusia merupakan organ yang sangat kompleks dan memproses informasi dengan cara yang sangat rumit. Oleh karena itu, memahami bagaimana otak bekerja dan bagaimana informasi diproses didalamnya merupakan tantangan yang besar bagi para peneliti dibidang neurosains. Dalam riset neurosains, pembuatan model jaringan saraf merupakan metode penting karena dapat membantu para peneliti untuk memahami kompleksitas sistem saraf manusia. Dengan menggunakan model jaringan saraf, para ilmuwan dapat mensimulasikan perilaku neuron dan jaringan saraf, mempelajari interaksi antar neuron, serta mengidentifikasi mekanisme yang mendasari fungsi otak (Kramer dkk., 2019).

Dalam pemodelan secara komputasi terdapat tahapan dalam membuat model yang dimulai dari pembuatan model sel sederhana sampai dengan pembuatan jaringan multikompartemen. Model sel sederhana dapat dibangun dengan membuat dua buah kompartemen sebagai soma dan dendrit dengan karakter yang spesifik secara geometri dan morfologi. Sel yang telah dibangun dapat dipasang mekanisme biofisikanya dan disimulasikan untuk mengamati dinamikanya. Sedangkan jaringan multikompartemen dibangun dengan

membuat sejumlah sel kompartemen yang saling terhubung secara berurutan dimana sel n membuat sinapsis eksitatori ke sel n+1 hingga sel terakhir dalam jaringan akan terhubung dengan sel pertama. Stimulus diberikan ke sel pertama sehingga terjadi lonjakan potensial aksi dan perambatan arus serta potensial membran dalam jaringan. Model jaringan multikompartemen merupakan salah satu representasi neuron individu yang paling detail dan realistik secara biofisika yang digunakan untuk mensimulasikan aktivitas listrik neuron dengan membagi morfologi kompleksnya menjadi kompartemen yang lebih kecil dan saling terhubung. Selain itu, penggunaan model ini juga sangat berguna untuk mempelajari berbagai fitur dinamika saraf, seperti sifat dendrit aktif (Gidon dkk., 2020) dan peran segmen awal akson dalam letusan potensial aksi (Hallermann dkk., 2012). Dinamika saraf merupakan studi tentang bagaimana neuron berinteraksi dan bekerja bersama dalam sistem saraf yang melibatkan analisis dinamika impuls yang ditransmisikan antara sel-sel saraf, serta bagaimana perubahan input dapat mempengaruhi perilaku sistem saraf. Dinamika jaringan saraf secara umum dapat diamati dari perubahan potensial membran terhadap waktu dan aktivitas firing atau sinkronisasi jaringan saraf dimana sel neuron di dalam jaringan mengalami *spike* atau lonjakan pada waktu bersamaan.

Salah satu model pembuatan jaringan saraf dan dinamikanya yang paling umum digunakan dalam riset neurosains adalah model neuron Hodgkin-Huxley (HH). Model neuron HH diperkenalkan pada tahun 1952 berdasarkan eksperimen inovatif pada akson cumi-cumi raksasa dan memberikan deskripsi

matematis yang akurat tentang perambatan potensial aksi (Hodgkin & Huxley, 1952). Kekuatan model neuron Hodgkin-Huxley terletak pada kemampuannya menggambarkan dinamika membran saraf dengan mempertimbangkan berbagai saluran ion seperti saluran kalium, natrium, dan kebocoran. Pendekatan biofisika ini menghasilkan simulasi perilaku neuron yang sangat realistik dan menangkap detail respon unik neuron terhadap rangsangan. Meskipun terdapat model yang lebih sederhana seperti *Integrate-and-Fire* yang memiliki keunggulan dalam hal efisiensi komputasi (Gerstner & Kistler, 2002), model HH tetap unggul dalam menyajikan rincian biofisika yang detail sehingga membuat model ini ideal untuk penelitian yang memerlukan representasi dinamika intrinsik neuron yang akurat (Izhikevich, 2003).

Dalam membuat pemodelan jaringan saraf, memasukkan sinapsis bukan hanya sebuah pilihan, tetapi sebuah kebutuhan. Sinapsis merupakan tempat transmisi impuls saraf listrik antara dua sel saraf (neuron). Sebagai tempat transmisi impuls antar neuron, sinapsis menjadi dasar pemrosesan informasi di otak. Sinapsis bukan hanya sebagai jembatan statis, tetapi juga memiliki sifat yang sangat dinamis. Fenomena seperti potensiasi jangka panjang atau *Long-Term Potentiation* (LTP) dan depresi jangka panjang atau *Long-Term Depression* (LTD) pada sinapsis merupakan hal mendasar bagi kemampuan otak untuk mempelajari dan menyimpan ingatan (Markram dkk, 2011). Dengan memasukkan sinapsis ke dalam model jaringan, para ilmuwan dapat mempelajari bagaimana perubahan kekuatan sinapsis dari waktu ke waktu berkontribusi pada fungsi kognitif tingkat tinggi, dan memberikan sebuah

wawasan yang tidak dapat diperoleh hanya dengan model neuron tunggal. Selain itu, banyak penyakit neurologis, mulai dari penyakit Alzheimer hingga skizofrenia, yang dihubungkan dengan disfungsi sinapsis (Stephan dkk, 2009). Oleh karena itu, pemodelan sinapsis tidak hanya meningkatkan pemahaman tentang fungsi otak yang sehat, namun juga memberikan wawasan berharga mengenai patofisiologi penyakit neurologis dan dapat membuka jalan bagi intervensi terapeutik yang inovatif.

Dalam mewujudkan model jaringan saraf yang kompleks ini, peneliti dapat menggunakan simulator NEURON, sebuah perangkat lunak simulasi yang sangat membantu dalam neurosains komputasional. Simulator NEURON semakin efektif ketika digabungkan dengan Python, sebuah bahasa pemrograman yang mudah digunakan. Python menyediakan berbagai pustaka analisis data, visualisasi, dan pembelajaran mesin yang dapat dengan mudah diintegrasikan ke dalam simulator NEURON. Selain itu, antarmuka Python NEURON memungkinkan pembuatan skrip yang lebih efisien, sehingga memudahkan pembuatan model yang kompleks dan besar. Python juga memiliki komunitas yang besar. Ini berarti ada banyak sumber daya dan dukungan yang tersedia. Kombinasi ini menawarkan fleksibilitas, efisiensi, dan daya komputasi yang tinggi, menjadikannya pilihan pertama bagi banyak ahli saraf komputasi.

Penelitian Mahmut Emin (2021) yang berjudul *Multi-Compartmental Modeling for Extracellular Stimulation of Neocortex* bertujuan melakukan pemodelan komputasi yang memberikan hasil dinamika pada sel piramidal

dengan memodelkan stimulasi ekstraseluler pada neokorteks. Penelitian tersebut menggunakan simulator NEURON v8.0. Penelitian lain yang berkaitan dengan dinamika pemodelan jaringan multikompartment adalah penelitian yang dilakukan oleh Qianjin Lin, dkk (2017). Penelitian ini melakukan analisis dinamika model neuron dua kompartemen yang dimodifikasi dan implementasikan menggunakan *Field-Programmable Gate Array* (FPGA). Penelitian lain dilakukan oleh Andreas Stockel dan Chris Eliasmith (2022) yang berjudul *Computational properties of multi-compartment LIF neurons with passive dendrites*. Pada penelitian ini dilakukan dengan menganalisis perilaku neuron model LIF dengan membentuk model *ring cell* menggunakan simulasi komputasional pada neuron multikompartment dengan dendrit pasif. Kemudian penelitian yang berjudul *The upper threshold phenomenon in a pyramidal neuron simulated with a multicompartment model* yang dilakukan oleh Isabel Burian pada tahun 2017. Penelitian ini menggunakan model multikompartment dengan perangkat lunak NEURON untuk mensimulasikan berbagai konfigurasi sel piramidal, termasuk model yang lebih sederhana (soma, akson, dan dendrit) dan akan menghasilkan representasi sel dalam bentuk *ring*.

Pada pemodelan jaringan saraf dapat menggunakan beberapa macam simulator seperti simulator Brian2, NEST (*Neural Simulation Tool*), dan simulator NEURON. Simulator Brian2 merupakan simulator untuk mensimulasikan pemodelan jaringan saraf berbasis Python tanpa adanya jendela GUI sebagai interface. NEST (*Neural Simulation Tool*) merupakan

simulator yang dirancang untuk memodelkan jaringan neuron besar dengan fokus pada populasi neuron secara efisien, namun penggunaannya terbatas pada platform Linux *Environment*. Simulator NEURON adalah simulator yang dirancang untuk memodelkan neuron dan jaringan neuron pada berbagai tingkat kompleksitas. Pada penelitian ini akan digunakan simulator NEURON yang terintegrasi dengan bahasa pemrograman Python dengan membuat dinamika pemodelan sel sederhana dan jaringan multikompartment menggunakan model neuron *Hodgkin-Huxley* (HH) dan melakukan variasi pada arus sinapsis. Kelebihan menggunakan simulator NEURON daripada menggunakan simulator lain adalah simulator ini mempunyai jendela interface (GUI Neuron) dan dapat diintegrasikan dengan bahasa pemrograman python sehingga serta mampu mensimulasikan jaringan besar dengan banyak neuron dan sinapsis yang penting untuk mempelajari dinamika jaringan saraf dan interaksi antar neuron.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian pemodelan jaringan multikompartment menggunakan simulator NEURON dan Python ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimanakah dinamika potensial membran terhadap waktu dengan variasi arus pada model sel sederhana?
2. Bagaimanakah dinamika potensial membran terhadap waktu dengan variasi arus pada jaringan multikompartment?

3. Bagaimanakah pengaruh variasi arus sinapsis terhadap aktivitas *firing* jaringan multikompartemen?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah pada uraian diatas maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat model sel sederhana dan menganalisis dinamika potensial membran terhadap waktu dengan variasi arus.
2. Membuat model jaringan multikompartemen dan menganalisis dinamika potensial membran terhadap waktu dengan variasi arus.
3. Menganalisis aktivitas *firing* model jaringan multikompartemen dengan variasi arus sinapsis.

1.4 Batasan Penelitian

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python yang diintegrasikan dengan simulator NEURON versi 8.2.4.
2. Pemodelan jaringan menggunakan model Hodgkin-Huxley.
3. Jumlah sel yang akan digunakan yaitu 8 sel.
4. Variasi nilai arus sinapsis yang digunakan adalah 0,005 nA, 0,01 nA, dan 0,02 nA

1.5 Manfaat Penelitian

Beberapa manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan sel sederhana dan jaringan multikompartemen menggunakan simulator NEURON terintegrasi pemrograman Python dapat digunakan untuk menganalisis kasus yang lebih spesifik.
2. Memahami parameter yang berpengaruh dalam dinamika jaringan saraf sehingga dapat menggunakannya untuk pemodelan yang lebih kompleks.
3. Sebagai referensi bagi penelitian selanjutnya terutama berkaitan dengan pemodelan jaringan saraf yang realistik.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dengan analisis yang dilakukan, kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Representasi model sel sederhana dan dinamikanya berhasil dibuat menggunakan simulator NEURON yang diintegrasikan dengan pemrograman Python. Representasi model tersebut membantu memahami bagaimana neuron memproses dan menghantarkan sinyal. Dapat dilihat bahwa dinamika potensial membran dipengaruhi oleh arus yang diberikan. Perbedaan antara soma dan dendrit, serta variasi respons antar-dendrit pada bentuk dinamikanya mencerminkan kemampuan neuron untuk mengolah masukan dari berbagai sumber secara simultan.
2. Representasi model jaringan multikompartemen dan dinamikanya berhasil dibuat menggunakan simulator NEURON yang diintegrasikan dengan pemrograman Python. Dinamika potensial membrannya menunjukkan bahwa soma memiliki amplitudo potensial membran yang lebih tinggi karena berperan sebagai pusat inisiasi potensial aksi, sementara dendrit memiliki amplitude potensial membran lebih rendah karena fungsinya sebagai integrator sinyal. Dapat dilihat juga bahwa arus sinapsis pada dendrit memicu depolarisasi, yang kemudian diteruskan ke soma untuk menghasilkan potensial aksi.

3. Nilai arus sinapsis sangat mempengaruhi waktu yang terjadi dan pola *firing* dalam jaringan saraf. Semakin besar nilai arus sinapsis, maka semakin cepat terjadinya *firing*. Pada arus yang kecil yaitu 0.005 nA, aktivitas *firing* terjadi jarang dan independen. Ketika arus meningkat menjadi 0.01 nA, frekuensi *firing* bertambah dan mulai menunjukkan keteraturan. Pada arus yang lebih besar yaitu 0,02 nA, *firing* menjadi paling sering dengan pola yang paling terkoordinasi. Peningkatan arus sinapsis memperkuat interaksi antar-neuron, yang memungkinkan jaringan untuk menunjukkan aktivitas yang lebih terstruktur dan efisien.

5.2 Saran

Dari keseluruhan hasil dalam penelitian ini, maka saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Membuat sel dan jaringan yang lebih spesifik pada bagian tertentu di sistem saraf, seperti pada bagian pendengaran atau yang lainnya.
2. Menggunakan model sinapsis tertentu misalnya seperti *Spike Timing Dependent Plasticity* (STDP) untuk perubahan sinapsis jangka panjang.
3. Memasukkan pengaruh produksi neurotransmitter dalam perubahan plastisitas sinapsis jangka pendek.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustiana, I Gusti Ayu. 2014. *Konsep Dasar IPA Aspek Biologi*. Yogyakarta: Penerbit Ombak
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2002). *Molecular Biology of the Cell* (4th ed.). Garland Science.
- Ardiansyah, Rian. 2018. *Konsep Akal Dalam Tafsir Al-Misbah*. Lampung: Fakultas Ushuluddin dan Studi Agama Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung
- Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2007). *Neuroscience: Exploring the Brain* (3rd ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Botero, dkk. 2013. The Hodgkin-Huxley neuron model on the fast phase plane. *Academic Journal, Vol.8 No.20 Mei 2013*: 1049-1057.
- Bray, D. 2001. *Cell Movements: From Molecules to Motility* (2nd ed.). Garland Science.
- Campbell NA, Reece JB, Mitchell LG. 2002. *Biologi Edisi Kelima Jilid I*. Jakarta: Erlangga. Hal:154-155
- Carnevale dan Hines. 2004. *The NEURON Book*. USA: Cambridge.
- Cooper, J. R., Bloom, F. E., & Roth, R. H. 2003. *The Biochemical Basis of Neuropharmacology* (8th ed.). Oxford University Press.
- Dawang, M. 2011. *Kemuliaan Manusia dalam Al-Qur'an (Kajian Tahlili Surah Al-Isro' ayat 70)*. (Tugas Akhir), Jurusan Tafsir Hadits, Fakultas Ushuluddin dan Filsafat, UIN Alauddin, Makassar
- Diva, Shella Aisyah, dan Anis Yuniati. 2019. *Simulator NEURON : Panduan Praktis Pemrograman Dalam Bidang Neurosains*. Disunting oleh Shella Aisyah Diva. Yogyakarta: CV Cahaya Kata.
- Feriyawati, Lita. 2006. *Anatomi Sistem Saraf dan Peranannya dalam Regulasi Kontraksi Otot Rangka*. Sumatera Utara: USU Repository.
- Fox, S.I. 2004. *Human Physiology Eight Ed.*, McGraw-Hill Companies, inc. New York. Hal.152-181.
- Friedman, Avner. 2005. "Introduction to Neurons." Dalam *Tutorials in Mathematical Biosciences*, 1–20. Berlin: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-31544-5_1.

- Fry, Chris dan Jabr, Rita. 2009. The Action Potential and Nervous Conduction. *Surgery Journal, Vol. 28 No. 28* Januari 2009 : 49-54.
- Gerstner, W., & Kistler, W. M. 2002. *Spiking Neuron Models: Single Neurons, Populations, Plasticity*. Cambridge University Press.
- Gidon, A., Zolnik, T. A., Fidzinski, P., Bolduan, F., Papoutsis, A., Poirazi, P., . . . Larkum, M. E. 2020. Dendritic action potentials and computation in human layer 2/3 cortical neurons. *Science*, 367(6473), 83–87
- Gumbiner, B. M. 1996. Cell adhesion: the molecular basis of tissue architecture and morphogenesis. *Cell*, 84(3), 345-357.
- Hallermann, S., De Kock, C. P., Stuart, G. J., & Kole, M. H. 2012. State and location dependence of action potential metabolic cost in cortical pyramidal neurons. *Nature Neuroscience*, 15(7), 1007–1014.
- Hille, B. 2001. *Ion Channels of Excitable Membranes* (3rd ed.). Sinauer Associates.
- Hines, M.L., dan n.t. Carnevale. 2001. “NEURON: A Tool for Neuroscientists.” *SAGE Publications* 7.
- Hines, Michael, dkk. 2009. Neuron and Python. *Frontiers in Neuroinformatics*, **Vol.3 No.1** Januari 2009: 1-12.
- Hodgin, A. L. dan Huxley, A. F. 1952. A Quantitative Description of Membrane Current and its Application to Conduction and Excitation in Nerve. *Journal of Physiology*, **Vol. 117 No.4 Agustus 1952:** 500-544. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1952.sp004764>.
- Ingber, D. E. 2006. Cellular mechanotransduction: putting all the pieces together again. *The FASEB Journal*, 20(7), 811-827.
- Izhikevich, E. M. 2003. Simple model of spiking neurons. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 14(6), 1569-1572.
- Kandel, E. R., Schwartz, J. H., & Jessell, T. M. 2000. *Principles of Neural Science* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Kappen, Bert. 2008. *Introduction to Biophysics*. Nijmegen: Radboud University.
- Kumar, V., Abbas, A. K., & Aster, J. C. 2014. *Robbins and Cotran Pathologic Basis of Disease* (9th ed.). Elsevier.
- Kumbhar, Pramod, Michael Hines, Jeremy Fouriaux, Aleksandr Ovcharenko, James King, Fabien Delalondre, dan Felix Schürmann. 2019.

- “CoreNEURON : An Optimized Compute Engine for the NEURON Simulator.” *Frontiers in Neuroinformatics* 13 (September). <https://doi.org/10.3389/fninf.2019.00063>.
- Lodish, H., Berk, A., Zipursky, S. L., Matsudaira, P., Baltimore, D., & Darnell, J. 2000. *Molecular Cell Biology* (4th ed.). W.H. Freeman.
- Marieb, Elaine N., dan Katja Hoehn. 2019. *Human Anatomy and Physiology*. New Jersey: Pearson Education.
- Markram, H., Gerstner, W., & Sjöström, P. J. 2011. A history of spike-timing-dependent plasticity. *Frontiers in Synaptic Neuroscience*, 3(4).
- Murray, A. W., & Hunt, T. 1993. *The Cell Cycle: An Introduction*. Oxford University Press.
- Noor, Fu’ad Arif. 2018. “Otak Dan Akal Dalam Ayat-Ayat Neurosains.” *Jurnal Ilmiah Studi Islam*, Juli 2018.
- Noor, Fuad Arif. 2019. Otak dan Akal dalam Ayat-Ayat Neurosains. *Jurnal Ilmu Al-Qur'an dan Tafsir*, Vol.4 No.1 : 32-52.
- Oliphant, Travis E. 2007. Python for Scientific Computing. *IEEE Computing in Science and Engineering*, Vol.9 No.1 Juni 2007: 10-20.
- Oswari, S., 2008. *Model Matematika Penjalaran Impuls Saraf pada Satu Sel Saraf di Subthalamic Nukleus*. Bandung: IPB Press.
- Pereda, A. E. 2014. *Electrical synapses and their functional interactions with chemical synapses*. Nature Reviews Neuroscience.
- Purves, Dale, George J. Augustine, David Fitzpatrick, William C. Hall, Anthony-Samuel Lamantia, James O. McNamara, dan S. Mark Williams. 2004. *Neuroscience*. Third Edition. Sunderland, USA: Sinauer Associates, Inc.
- Rothman, J. E. 1994. *Mechanisms of intracellular protein transport*. Nature.
- Schwieming, Crishtof J. 2012. A Brief Historical Perspective: Hodgin and Huxley. *Journal of Physiology*, Vol. 590 No. 11 Agustus 2012: 2571-2575.
- Setiowati T, Furqonita D. 2007. *Biologi Interaktif*. Jakarta: Azka Press.
- Sherwood Lauralee, et al. 2005. *Animal Physiology From Genes To Organisms*. United States Of America, Thomson. Brooks Cole.
- Sloane,Ethel.2003. *Anatomi dan Fisiologi untuk Pemula*. Jakarta: Penerbit Buku Kedokteran EGC.

Squire, Larry R., Floyd E. Bloom, Nicholas C. Spitzer, Sascha du Lac, Anirvan Ghosh, dan Darwin Berg. 2008. *Fundamental Neuroscience*. Disunting oleh Larry R. Squire, Floyd E. Bloom, Nicholas C. Spitzer, Sascha du Lac, Anirvan Ghosh, dan Darwin Berg. Third Edition. USA: Elsevier Inc.

Stephan, K. E., Friston, K. J., & Frith, C. D. 2009. Dysconnection in schizophrenia: from abnormal synaptic plasticity to failures of self-monitoring. *Schizophrenia Bulletin*, 35(3), 509-527.

Suharsono dan Egi N.. 2017 .Biologi Sel.Tasikmalaya: LPPM Universitas Siliwangi.

Vale, R. D. 2003. *The molecular motor toolbox for intracellular transport*. Cell.

Yusuf, H. Burhanuddin. 2013. "Akal Dalam Al-Qur'an." *Core : E-Jurnal UIN Alauddin Makassar*.

