

**SIMULASI AKTIVITAS *SPIKING* MODEL-MODEL
NEURON MENGGUNAKAN METODE EULER**

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan
mencapai derajat Sarjana-S1

Program Studi Fisika



Diajukan oleh:

Ahmad Syahid

15620003

PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA
2020



PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1896/Un.02/DST/PP.00.9/08/2020

Tugas Akhir dengan judul : SIMULASI AKTIVITAS SPIKING MODEL-MODEL NEURON MENGGUNAKAN METODE EULER

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : AHMAD SYAHID
Nomor Induk Mahasiswa : 15620003
Telah diujikan pada : Rabu, 29 Juli 2020
Nilai ujian Tugas Akhir : A

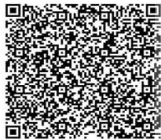
dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Valid ID: 5f28d3f9e91bc

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



Valid ID: 5f28dc6dd8b71

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



Valid ID: 5f28d468b87d9

Penguji II
Cecilia Yanuarief, M.Si.
SIGNED



Valid ID: 5f2a2b11d9e78

Yogyakarta, 29 Juli 2020
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
Dr. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED



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 : AHMAD SYAHID
NIM : 15620003
Judul Skripsi : SIMULASI AKTIVITAS SPIKING MODEL-MODEL NEURON
MENGUNAKAN METODE EULER

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.

Pembimbing I

Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D.
NIP. 1983014 2200901 2 009

Yogyakarta, 14 Juli 2020

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ahmad Syahid

NIM : 15620003

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Simulasi Aktivitas *Spiking* Model-Model Neuron Menggunakan Metode Euler” 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, 16 Juli 2020

Penulis



Ahmad Syahid
NIM. 15620003

MOTTO

“Keajaiban Hanya Terjadi Pada Mereka Yang Tidak Pernah Menyerah”



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum warahmatullahi wabarokatuh.

Alhamdulillah rabbil ‘aalamiin, puji syukur ke hadirat Allah swt atas segala limpahan rahmat, hidayah, serta inayah-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan laporan penelitian tugas akhir yang berjudul “Simulasi Aktivitas Spiking Model-Model Neuron Menggunakan Metode Euler” dengan lancar. 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. Bapak Dr. Thaqibul Fikri Niyartama, S. Si., M. Si. selaku Kepala Jurusan Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga sekaligus Dosen Penasehat Akademik.
2. Ibu Anis Yuniati, Ph. D. selaku Bunda dan 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.
3. Bapak Cecilia Yanuarif, M. Si. dan Ibu Dr. Nita Handayani 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. Bapak, Ibu, serta saudara yang memberikan semangat, ridho, dan doanya
7. Seluruh pihak yang telah membantu dan tidak mampu disebutkan satu per satu.

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, 26 juni 2020

Penulis

SIMULASI AKTIVITAS *SPIKING* MODEL-MODEL NEURON MENGGUNAKAN METODE EULER

AHMAD SYAHID
15620003

INTISARI

Simulasi aktivitas *spiking* model-model neuron menggunakan metode Euler telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan aktivitas *spiking* pada model neuron. Model neuron yang digunakan yaitu model neuron Hodgkin-Huxley, model neuron *Integrate and Fire*, model neuron Wilson, dan model neuron Izhikevich. Penelitian dilakukan dengan mengimplementasikan persamaan matematis dari setiap model neuron yang digunakan kemudian merekam perubahan potensial membran terhadap waktu menggunakan metode Euler, untuk mendapat bentuk aktivitas *spiking* yang berbeda dilakukan dengan memvariasikan nilai variabel dalam persamaan matematis setiap model neuron yang menggambarkan pemrosesan potensial aksi (*spike*) yang dipengaruhi aktivitas saluran ion. Hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan model neuron *Integrate and Fire* menghasilkan bentuk *regular spiking* (RS), model neuron Hodgkin-Huxley menghasilkan bentuk *regular spiking* (RS), model neuron Wilson menghasilkan bentuk *regular spiking* (RS), *fast spiking* (FS), dan *intrinsic bursting* (IB), model neuron Izhikevich menghasilkan bentuk *regular spiking* (RS), *fast spiking* (FS), *intrinsic bursting* (IB), *chattering* neuron (CH), dan *low threshold spiking* (LTS). Dari kompleksitas variabel yang digunakan dan bentuk aktivitas *spiking* yang dihasilkan setiap model neuron dapat memberikan gambaran terkait efisiensi komputasi dan kedekatannya dalam neuron biologis nyata.

Kata Kunci : aktivitas *spiking*, model neuron, *Integrate and Fire*, Hodgkin-Huxley, Wilson, Izhikevich.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

SIMULATION SPIKING ACTIVITIES OF NEURON MODELS USING EULER METHOD

AHMAD SYAHID
15620003

ABSTRACT

Simulation spiking activity models of neurons using Euler method has been done. This study aims to simulate activity spiking in neuron models. The neuron models used are the Hodgkin-Huxley neuron model, the Integrate and Fire neuron model, the Wilson neuron model, and the Izhikevich neuron model. The research was carried out by implementing mathematical equations of each neuron model used then recording changes in membrane potential over time using the Euler method, to get form of activity spiking a different carried out by varying the value of the variables in the mathematical equation of each neuron model that describes the processing of action potentials (spikes) that influenced ion channel activity. The results of the research show that the neuron model Integrate and Fire produces the regular spiking (RS) form, the Hodgkin-Huxley neuron model produces the regular spiking (RS) form, the Wilson neuron model produces the regular spiking (RS), fast spiking (FS), and intrinsic form bursting (IB), the Izhikevich neuron model produces forms of regular spiking (RS), fast spiking (FS), intrinsic bursting (IB), chattering neurons (CH), and low threshold spiking (LTS). From the complexity of the variables used and the activity spiking generated by each neuron model, it can give an idea related to computational efficiency and proximity in real biological neurons.

Keyword : spiking activity, neuron models, Integrate and Fire, Hodgkin-Huxley, Wilson, Izhikevich.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR ISI

COVER.....	i
HALAMAN PENGESAHAN	iv
HALAMAN PERSETUJUAN SKRIPSI	iv
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iv
MOTTO	v
KATA PENGANTAR.....	vi
INTISARI.....	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Studi Pustaka.....	5
2.2. Landasan Teori	7
2.2.1. Neuron	7
2.2.2. Elektrofisiologi Neuron	9
2.2.3. Potensial Aksi.....	10
2.2.4. Perilaku Spiking Neuron	12
2.2.5. Model-model Neuron	16
2.2.6. Metode Penyelesaian Persamaan Differensial.....	21
2.2.7. Software Matlab	22
2.2.8. Otak dalam Al-Qur'an	24
BAB III METODE PENELITIAN	26
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	26
3.2. Alat dan Bahan Penelitian.....	26
3.3. Tahapan Penelitian.....	26
3.3.1. Review Literatur	26
3.3.2. Simulasi Model Neuron.....	27
3.3.3. Analisis Data	30

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1. Hasil Simulasi	31
4.1.1. Hasil simulasi aktivitas spiking model neuron integrate and fire....	31
4.1.2. Hasil simulasi aktivitas spiking model neuron Hodgkin-Huxley	32
4.1.3. Hasil simulasi aktivitas spiking model neuron Wilson	32
4.1.4. Hasil simulasi aktivitas spiking model neuron Izhikevich	33
4.2. Pembahasan	36
4.2.1. Aktivitas <i>spiking</i> model neuron <i>integrate and fire</i>	36
4.2.2. Aktivitas spiking model neuron Hodgkin-Huxley.....	37
4.2.3. Aktivitas spiking model neuron Wilson	38
4.2.4. Aktivitas spiking model neuron Izhikevich.....	39
4.2.5. Integrasi interkoneksi	41
BAB V PENUTUP	42
5.1. Kesimpulan	42
5.2. Saran	42
DAFTAR PUSTAKA.....	43
LAMPIRAN	46

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bagian-bagian neuron	7
Gambar 2.2 Potensial Aksi	10
Gambar 2.3 Proses Terjadinya Potensial Aksi	11
Gambar 2.4 <i>Regular Spiking</i> (RS)	13
Gambar 2.5 <i>Fast Spiking</i> (FS)	13
Gambar 2.6 <i>Intrinsic Bursting</i> (IB)	14
Gambar 2.7 <i>Chattering Neuron</i> (CH)	14
Gambar 2.8 <i>Low Threshold Spiking</i> (LTS)	15
Gambar 2.9 Rangkaian RC Model Neuron <i>Integrate and Fire</i>).....	16
Gambar 2.10 Rangkaian Listrik Model Neuron Hodgkin-Huxley	17
Gambar 2.11 Rangkaian Listrik Model Neuron Wilson.....	19
Gambar 2.12 Penulisan Program Pada <i>Script Editor</i>	23
Gambar 2.13 Menjalankan Program Dengan Klik <i>Run</i> Pada <i>Editor Bar</i>	24
Gambar 3.1 Tahapan Penelitian.....	26
Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi Model Neuron <i>Integrate and Fire</i>	27
Gambar 3.3 Diagram Alir Simulasi Model Neuron Hodgkin-Huxley	28
Gambar 3.4 Diagram Alir Simulasi Model Neuron Wilson.....	28
Gambar 3.5 Diagram Alir Simulasi Model Neuron Izhikevich.....	29
Gambar 4.1 <i>Regular spiking</i> (RS) model <i>neuron integrate and fire</i>	31
Gambar 4.2 <i>Regular spiking</i> (RS) model neuron Hodgkin-Huxley	32
Gambar 4.3 <i>Fast spiking</i> (FS) model neuron Wilson.....	32
Gambar 4.4 <i>Regular spiking</i> (RS) model neuron Wilson.....	33
Gambar 4.5 <i>Intrinsic bursting</i> (IB) model neuron Wilson.....	33
Gambar 4.6 <i>Regular spiking</i> (RS) model neuron Izhikevich	34
Gambar 4.7 <i>Fast spiking</i> (FS) model neuron Izhikevich	34
Gambar 4.8 <i>Chattering</i> neuron model neuron Izhikevich.....	35
Gambar 4.9 <i>Intrinsic bursting</i> (IB) model neuron Izhikevich.....	35
Gambar 4.10 <i>Low threshold spiking</i> (LTS) model neuron Izhikevich.....	36

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Studi Pustaka yang Terkait.....	5
---	---



DAFTAR LAMPIRAN

A. Program Simulasi	Aktivitas <i>Spiking</i> Model Neuron <i>Integrate and Fire</i>	46
B. Program Simulasi	Aktivitas <i>Spiking</i> Model Neuron Hodgkin-Huxley.....	46
C. Program Simulasi	Aktivitas <i>Spiking</i> Model Neuron Wilson.....	47
D. Program Simulasi	Aktivitas <i>Spiking</i> Model Neuron Izhikevich.....	49
E. Parameter yang digunakan dalam penelitian.....		53



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem saraf adalah sistem koordinasi berupa penghantaran impuls saraf ke susunan saraf pusat, pemrosesan impuls saraf dan pemberi tanggapan rangsangan (Feriyawati, 2006). Sistem atau susunan saraf merupakan salah satu bagian terkecil dari organ dalam tubuh, tetapi merupakan bagian yang paling kompleks. Susunan saraf manusia mempunyai arus informasi yang cepat dengan kecepatan pemrosesan yang tinggi dan tergantung pada aktivitas listrik (impuls saraf) (Bahrudin, 2013). Proses yang kompleks tersebut terjadi hanya dalam orde milidetik sampai menit. Sistem saraf pusat ini tidak lain adalah otak dan sumsum tulang belakang. Otak merupakan organ yang paling utama bagi manusia. Banyak teknik yang digunakan untuk mengetahui mekanisme yang terjadi di dalam otak, misalnya manipulasi genetik, merekam aktivitas sel dalam sel yang dikultur, irisan otak, atau bahkan seluruh otak, pencitraan optik, pengukuran psikofisik, dan komputasi neurosains.

Komputasi neurosains adalah studi teoritis tentang otak yang digunakan untuk mengungkap prinsip dan mekanisme yang memandu perkembangan, pemrosesan informasi, dinamika dan kemampuan mental sistem saraf. Komputasi neurosains dapat dipandang sebagai spesialisasi dalam neurosains secara teori yang menggunakan komputer untuk mensimulasikan model. Alasan utama menggunakan komputasi yaitu bahwa kompleksitas model di bidang neurosains sering melampaui kemampuan analisis, untuk itu perlu menggunakan eksperimen numerik yang dirancang dengan cermat untuk membandingkan model dengan data eksperimen. Komputasi neurosains mencoba berspekulasi tentang bagaimana otak beroperasi, kemudian dari spekulasi tersebut dikembangkan menjadi hipotesis dan direalisasikan ke dalam model. Fokus utama komputasi neurosains adalah pengembangan dan evaluasi model (Trappenberg, 2010).

Model dalam komputasi neurosains adalah kuantifikasi hipotesis untuk menyelidiki suatu hipotesis. Model yang dikembangkan dalam komputasi neurosains akan membuat suatu prediksi yang dapat diuji secara eksperimental. Perbandingan hasil eksperimen dengan model prediksi dapat digunakan untuk menyempurnakan suatu model dan mengarah pada pengembangan suatu pendekatan baru yang dapat memajukan pemahaman tentang sistem otak dan membuat prediksi baru yang harus dapat diuji secara eksperimental.

Hal yang mendasari prinsip dan mekanisme yang terjadi di dalam otak yaitu neuron. Pola yang terjadi pada neuron seperti aktivitas transfer informasi dan dinamika yang terjadi didalamnya dipelajari dan disimulasikan cara kerjanya ke dalam bentuk sebuah generalisasi model matematis dari pemahaman manusia. Di dalam otak manusia terdapat kurang lebih 10^{11} neuron. Neuron dapat saling berkomunikasi satu sama lain dengan pulsa-pulsa listrik yang disebut potensial aksi atau *spike* (Gertsner dan Naud, 2009) Transfer informasi dari neuron satu (*pre-synaptic neuron*) ke neuron yang lain (*post-synaptic neuron*) terjadi di ujung akson dan dendrit.

Neuron telah dimodelkan oleh beberapa ilmuwan sebagai objek kajian penelitian. Salah satu ilmuwan yang memodelkan neuron adalah Alan Lloyd Hodgkin bersama Andrew Fielding Huxley menggunakan objek akson cumi-cumi raksasa. Mereka berhasil menjelaskan mekanisme ionik yang mendasari terjadinya potensial aksi (Santamaria dan Bower, 2009). Keberhasilan ini kemudian ditulis dan dipublikasikan pada sebuah seri yang berisi lima paper. Paper pertama hingga paper keempat merupakan serangkaian eksperimen yang dilakukan untuk mengkarakterisasi membran. Sedangkan paper kelima menempatkan keseluruhan data eksperimen ke dalam kerangka teoritis yang mendasari pandangan modern terhadap neuron saat ini (Siciliano, 2012). Selama perkembangan pemodelan neuron, berbagai macam model telah diusulkan oleh para ilmuwan seperti model *Integrate and Fire*, model Wilson, dan model Izhikevich. Model-model tersebut digunakan untuk menggambarkan bagaimana kompleksitas otak secara alami yang membutuhkan pemodelan matematik dalam usaha pendekatannya seperti menganalisis dinamika neuron dan jaringan saraf seperti memperoleh gambaran tentang aktivitas *spiking* dari neuron. Berbagai model *spiking* neuron dapat digunakan dalam simulasi atau implementasi berbagai aplikasi *spiking* jaringan saraf seperti simulasi otak dan masalah teknik. Tingkat efisiensi secara biologis dan komputasi adalah faktor penting yang dapat dipertimbangkan untuk memilih satu dari model neuron yang tersedia dimana model neuron harus sederhana dan mampu menghasilkan bentuk aktivitas *spiking* yang sesuai dengan neuron biologis nyata.

Pada penelitian ini akan mensimulasikan aktivitas *spiking* dari model neuron *Integrate and fire*, model Hodgkin-Huxley, model Wilson dan model Izhikevich. Model *Integrate and fire* dipilih untuk disimulasikan karena model ini dapat dikatakan sebagai model yang paling sederhana dengan analogi rangkaian RC yang dapat digunakan untuk memahami hubungan antara variabilitas input dan output neuron dan sifat dasar jaringan

besar neuron. Kebalikan dengan model *Integrate and fire*, model Hodgkin-Huxley merupakan model dengan kompleksitas yang tinggi yang mampu memodelkan sifat-sifat neuron yang bermakna secara biologis dan biofisika. Persamaan model Hodgkin-Huxley melibatkan gerbang ion sodium, potassium, dan *leak* yang diturunkan dari eksperimen menggunakan akson cumi-cumi raksasa. Model Wilson dipilih karena model ini merupakan pengembangan dari model Hodgkin-Huxley, dimana terdapat tambahan gerbang kalsium dan gerbang potassium yang konduktansinya bergantung pada konsentrasi kalsium intraseluler. Penambahan variabel tersebut mewakili bentuk pemulihan (*recovery*), dimana efek dari penambahan variabel konduktansi tersebut menghasilkan hiperpolarisasi yang sangat nyata dari potensi membran yang dikenal sebagai saluran AHP (*after-hiperpolarization*). Model selanjutnya dipilih model Izhikevich karena model ini realistis secara biologis, efisien secara komputasi dan mampu menampilkan hampir semua perilaku neuron baik bentuk *spiking* maupun *bursting*. Secara keseluruhan model yang digunakan dalam bentuk persamaan diferensial, untuk itu persamaan setiap model neuron harus diselesaikan terlebih dahulu. Salah satu cara untuk menyelesaikan persamaan diferensial tersebut yaitu dengan menggunakan metode Euler.

Model neuron yang dipilih untuk disimulasikan memiliki kompleksitas secara biologis dan komputasi yang berbeda dari variabel yang digunakan dalam mewakili model neuron, perilaku yang dihasilkan oleh masing-masing model neuron. Setelah melakukan simulasi aktivitas *spiking* neuron dilakukan analisis aktivitas neuron yaitu *spiking* yang kemudian akan dibandingkan model neuron mana yang bentuk dan karakteristiknya memenuhi syarat sesuai dengan sistem biologis dan memiliki efisiensi komputasi yang efektif. Simulasi aktivitas *spiking* neuron dibuat dengan menggunakan metode Euler.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimanakah bentuk dan karakteristik aktivitas *spiking* model neuron *Integrate and fire*?
2. Bagaimanakah bentuk dan karakteristik aktivitas *spiking* model neuron Hodgkin-Huxley?
3. Bagaimanakah bentuk dan karakteristik aktivitas *spiking* model neuron Wilson?
4. Bagaimanakah bentuk dan karakteristik aktivitas *spiking* model neuron Izhikevich?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mensimulasikan dan menganalisis aktivitas *spiking* model neuron *Integrate and fire*.
2. Mensimulasikan dan menganalisis aktivitas *spiking* model neuron Hodgkin-Huxley.
3. Mensimulasikan dan menganalisis aktivitas *spiking* model neuron Wilson.
4. Mensimulasikan dan menganalisis aktivitas *spiking* model neuron Izhikevich.

1.4 Batasan Penelitian

1. Model neuron yang disimulasikan adalah model neuron *Integrate and fire*, model Hodgkin-Huxley, model Wilson dan model Izhikevich.
2. Metode penyelesaian persamaan diferensial yang digunakan yaitu metode Euler dengan langkah waktu $h = 0,01$ ms.
3. Simulasi yang dilakukan hanya sebatas aktivitas *spiking* neuron
4. Simulasi aktivitas *spiking* neuron dilakukan menggunakan software MATLAB.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memahami karakteristik aktivitas *spiking* dari setiap model neuron yang disimulasikan.
2. Memberikan gambaran tentang karakteristik aktivitas *spiking* dari setiap model neuron yang dapat dipertimbangkan oleh peneliti lain terkait pemilihan model neuron yang diperlukan untuk penelitian di bidang komputasi neurosains.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Simulasi aktivitas *spiking* model neuron *Integrate and Fire* telah berhasil dilakukan menghasilkan bentuk *regular spiking* (RS). Model neuron *Integrate and Fire* mempunyai tingkat realistis biologis rendah, tetapi memiliki efisiensi yang tinggi dalam komputasi.
2. Simulasi aktivitas *spiking* model neuron Hodgkin-Huxley telah berhasil dilakukan menghasilkan bentuk *regular spiking* (RS). Model neuron Hodgkin-Huxley mempunyai tingkat realistis biologis yang tinggi, tetapi memiliki efisiensi yang rendah dalam komputasi.
3. Simulasi aktivitas *spiking* model neuron Wilson telah berhasil dilakukan menghasilkan bentuk *regular spiking* (RS), *fast spiking* (FS), dan *intrinsic bursting* (IB). Model neuron Wilson mempunyai tingkat realistis biologis yang tinggi, tetapi memiliki efisiensi yang rendah dalam komputasi.
4. Simulasi aktivitas *spiking* model neuron Izhikevich telah berhasil dilakukan menghasilkan bentuk *regular spiking* (RS), *fast spiking* (FS), *intrinsic bursting* (IB), *chattering neuron* (CH), dan *low threshold spiking* (LTS). Model neuron Izhikevich mempunyai tingkat realistis biologis tinggi dan juga memiliki efisiensi yang tinggi dalam komputasi.

5.2. Saran

Setelah serangkaian proses penelitian yang telah dilakukan, tentunya terdapat kekurangan pada hasil penelitian ini. Adapun beberapa saran untuk melengkapi penelitian ini antara lain:

1. Penelitian selanjutnya dapat menambahkan lebih banyak model neuron yang dapat disimulasikan untuk menghasilkan pola aktivitas *spiking* yang lebih beragam baik dari segi biologis maupun komputasi.
2. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan masing-masing model neuron ke dalam bentuk pemodelan jaringan saraf kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- Abusnaina, A. 2014. Spiking Neuron Models : A Review. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications (JDCTA)*, **Vol.8 No.3 Juni 2014** : 1-9.
- Al-Syeikh, A.M.A.I. 2004. *Tafsir Ibnu Katshir (Jilid 1)*. Pustaka Imam Syafi'i. Bogor
- Bahrudin, M. 2013. *Neurologi Klinis (Edisi Pertama)*. UMM press. Malang
- Brette, R., dkk. 2007. Simulation of Networks of Spiking Neuron: A Review of Tools and Strategies. *Journal of Computational Neuroscience*, **Vol. 23 No. 3 12 Juli 2007** : 349-98
- Clark., dkk. 2009. Electrogenic Tuning of the Axon Initial Segment. *Neuroscientist*, **Vol. 16 No. 6 10 Desember 2009** : 651-668.
- Corson, N., dan Alau, M. A. 2008. Asymptotic dynamics for slow-fast Hindmarsh-Rose neuronal system. *Laboratoire de Mathématiques Appliquées du Havre. Le Havre*. 1-15
- Cahyono, B. (2013). Penggunaan *Software Matrix Laboratory (MATLAB)* Dalam Pembelajaran Aljabar Linier. *Jurnal PHENOMEON*, **Vol.1 No.1 13 Juli 2013** : 45–62.
- Dastidar, S. G., dan Adeli, H. 2009. SPIKING NEURAL NETWORK. *International Journal of Neural Systems*, **Vol. 19 No. 4 2009** : 295–308.
- Feriyawati, L. 2006. *Anatomi Sistem Saraf dan Peranannya Dalam Regulasi Kontraksi Otot Rangka (Disertasi)*, Fakultas Kedokteran Sumatra Utara, Medan.
- Fletcher, A. 2016. Action Potential : Generation and Propagation. *Anaesthesia and intensive care medicine*, **Vol. 17 No. 4 2016** : 251-255.
- Gertsner, W., dan Kistler, W. M. 2002. *Spiking Neuron Models*. Cambridge Univ. Press. Cambridge

- Gerstner, W., dan Naud, R. 2009. How Good Are Neuron Models?. *SCIENCE*. **Vol.379 No.5951 2009** : 379-380.
- Gilani, T. S., dan Hovel, P. 2013. *Dynamical Systems in Neuroscience*. Technische Universität Berlin Hardenbergstrabe. Berlin
- Hodgkin, A. L., dan Huxley, A. F. 1954. A quantitative description of membrane current and application to conduction and excitation in nerve. *J.Physiol.***Vol.117 1952** : 500-544.
- Izhikevich, E. M. 2007. *Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry*.The MIT Press.Cambridge.
- Izhikevich, E. M. 2003. Simple Model of Spiking Network. *IEEE Trans.Neural Network*. **Vol. 14 No. 6 November 2003** :1569-1572.
- Koch, Christof. 2004. *Biophysics of Computation: Information Processing in Single Neuron*. Oxford University Press, New York
- Kriesel, D. 2007. *A Brief Introduction to Neural Networks*. Diakses 13 Februari 2020 dari http://www.dkriesel.com/en/science/neural_networks.pdf.
- Lodish., dkk. 2000. *Molecular Cell Biology*. (4th edition Section). W. H. Freeman. New York.
- Nugroho, G. 2013. *ANATOMI FISILOGI SISTEM SARAF*. Diakses 2 Januari 2020 dari <http://staff.unila.ac.id/gnugroho/files/2013/11/ANATOMI-FISIOLOGI-SISTEM-SARAF.pdf>.
- Orhan, E. 2012 The Leaky Integrate-and-Fire Neuron Mode. Diakses pada 3Maret 2020 dari <https://www.cns.nyu.edu/~eorhan/notes/lif-neuron.pdf>
- Santamaria, F., dan Bower, J. M. 2009. Hodgkin–Huxley Models. *Encyclopedia of Neuroscience* : 1173–1180.
- Siciliano , R. (2012). The Hodgkin-Huxley Model Its Extensions, Analysis and Numerics. **6 Maret 2012**

Trappenberg, T. P. 2010. *Fundamentals off Computational Neuroscience* (Second Edition). Oxford University Press. Oxford.

Wallich, P. 2009. *MATLAB for neuroscientists : an introduction to scientific computing in MATLAB*. Academic Press. San Diego.

Wilson, H. R. 1999. Simplified Dynamics of Human and Mammalian Neocortical Neurons. *Journal of Theoretical Biology*. **Vol. 200** : 375-388.



LAMPIRAN

A. Program Simulasi Aktivitas *Spiking Model Neuron Integrate and Fire*

```

clear
% arus input
I = 5 % mA
% Kapasitansi dan resistansi kebocoran
C = 1 % nF
R = 50 % m ohms
% I & F implementasi  $dV/dt = -V/RC + I/C$  dengan langkah waktu  $h = 1$ 
ms, metode Euler
V = 0;
tstop = 50;
abs_ref = 2; % periode refraktori absolut
ref = 3; % periode refraktori absolut awal
V_trace = []; % tegangan yang terekam untuk plot grafik
V_th = 10; % ambang batas
for t = 1:tstop
    if ~ref
        V = V - (V/(R*C)) + (I/C)
    else
        ref = ref - 1;
        V = 0.2*V_th; % pemulihan potensial membran
    end
    if (V > V_th)
        V = 50; % nilai spike maksimal
        ref = abs_ref;
    end
    V_trace = [V_trace V];
end
plot(V_trace)
xlabel('Time [ms]');
ylabel('Potential Membran [mV]');
title('aktivitas spiking model neuron I&F')

```

B. Program Simulasi Aktivitas *Spiking Model Neuron Hodgkin-Huxley*

```

clear; clf;
% konduktansi maksimum (dalam mS/cm^2); 1=K, 2=Na, 3=R
g(1)=36; g(2)=120; g(3)=0.3;
% tegangan saluran ion (dalam mV); 1=n, 2=m, 3=h
E(1)=-12; E(2)=115; E(3)=10.613;
% inisiasi variabel
I_ext=0; V=-10; x=zeros(1,3); x(3)=1; t_rec=0;
% langkah waktu untuk integrasi numerik
dt=0.01;
% integrasi dengan menggunakan metode Euler
for t=-30:dt:200
    if t==10; I_ext=10; end % memasukkan arus eksternal saat t=10
    % fungsi alpha yang digunakan Hodgkin-and Huxley
    Alpha(1)=(10-V)/(100*(exp((10-V)/10)-1));
    Alpha(2)=(25-V)/(10*(exp((25-V)/10)-1));
    Alpha(3)=0.07*exp(-V/20);
    % fungsi beta yang digunakan Hodgkin-and Huxley
    Beta(1)=0.125*exp(-V/80);
    Beta(2)=4*exp(-V/18);
    Beta(3)=1/(exp((30-V)/10)+1);

```

CURICULUM VITAE

A. Biodata Pribadi

Nama : Ahmad Syahid
Jenis Kelamin : Laki-laki
Tempt. Tanggal Lahir: Gunungkidul 27 Maret 1996
Alamat Asal : RT/RW 05/18, pucungmalang,
semin, semin Gunungkidul
Alamat Tinggal :Jl. Samirono 228B,
Caturtunggal, Depok, Sleman
Email : ahmad.syahid171717@gmail.com
No. HP :0822862899



B. Latar Belakang Pendidikan Formal

Jenjang	Nama Sekolah	Tahun
SD	SDN SAWUR	2004-2009
SMP	SMP NEGERI 1 SEMIN	2009-2012
SMA	SMA NEGERI 1 SEMIN	2012-2015
S1	UIN SUNAN KALIJAGA YOGYAKARTA	2015-2020

C. RIWAYAT ORGANISASI

1. Anggota Study Club Fisika Instrumentasi UIN Sunan Kalijaga
2. Anggota Himpunan Mahasiswa Islam (HMI) Kom. Fakultas Sains dan Teknologi
3. Pengurus Himpunan Mahasiswa Islam (HMI) Kom. Fakultas Sains dan Teknologi
4. Koordinator dept. KOMINFO Himpunan Mahasiswa Fisika (HMPS) UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta