

**PEMODELAN INTERAKSI NEURON-ASTROCYTE
PADA JARINGAN SARAF**

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh derajat Sarjana S-1

Program Studi Fisika



FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

**UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA**

2020

**PEMODELAN INTERAKSI NEURON-ASTROCYTE PADA
JARINGAN SARAF**

Itsainiyah Hafizhoh

16620030

INTISARI

Telah dilakukan pemodelan interaksi neuron-*astrocyte* pada jaringan saraf. Model neuron yang digunakan adalah Integrate and Fire, sedangkan model jaringan *astrocyte* didefinisikan dengan persamaan Li-Rinzel yang melibatkan fraksi aktivasi IP3Rs (q) yang mempengaruhi nilai konsentrasi kalsium pada *astrocyte*. Pemodelan interaksi antara jaringan neuron dan *astrocyte* ini melibatkan empat jenis koneksi, yaitu koneksi antar neuron yang dihubungkan oleh sinapsis, koneksi antar *astrocyte* berupa gap-junction channels (GJCs), koneksi sinapsis ke *astrocyte* dan koneksi *astrocyte* ke sinapsis. Koneksi sinapsis ke *astrocyte* dibuat sebagai pemicu aktivasi *astrocyte* dengan pelepasan neurotransmitter. Koneksi *astrocyte* ke sinapsis dibuat sebagai sebagai jalan produksi gliotransmitter. Variasi arus eksternal diberikan pada pemodelan untuk melihat perbedaan aktivitas sinkronisasi jaringan saraf. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan simulator Brian 2. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa fraksi aktivasi IP3Rs (q) dapat mempengaruhi perambatan gelombang kalsium pada *astrocyte* melalui aktivasi reseptor IP3. Pada pemodelan ini dapat ditunjukkan mekanisme transfer informasi yang dilakukan oleh neuron berupa perambatan gelombang arus listrik, sedangkan transfer informasi yang dilakukan oleh *astrocyte* berupa perambatan gelombang kalsium.

Kata Kunci : neuron, *astrocyte*, *Integrated-and-Fire*, Li-Rinzel, Gliotransmitter,
Gap-Junction Channels, Simulator *Brian2*

**NEURON-ASTROCYTE INTERACTION MODELING IN NERVE
NETWORKS**

Itsainiyah Hafizhoh

16620030

ABSTRACT

Neuron-astrocyte interaction modeling in neural networks has been carried out. The neuron model used is Integrate and Fire, while the astrocyte network model is defined by the Li-Rinzel equation, which involves the IP3Rs (q) activation fraction that affects the value of calcium concentration in astrocytes. The modeling of the interaction between neuron networks and astrocytes involves four types of connections, that are connections between neurons connected by synapses, connections between astrocytes in the form of gap-junction channels (GJCs), synaptic connections to astrocytes, and astrocyte connections to synapses. The synaptic connection to the astrocytes is built to trigger the activation of the astrocytes by releasing the neurotransmitter. The astrocyte connection to the synapses is established as a route for the production of the gliotransmitter. Variations in external currents are given in the model to observe the differences in synchronization of firing activity of neural networks. Modeling was done using Brian 2 simulator. Modeling results show that the IP3Rs (q) activation fraction can affect the propagation of calcium waves in astrocytes through activation of IP3 receptors. In this model, it can be shown that the information transfer mechanism by neurons is in the form of electric current wave propagation, while the information transfer by astrocyte is in the form of calcium wave propagation.

Keyword : Neuron, Astrocyte, Integrated-and-Fire, Li-Rinzel, Gliotransmitter, Gap-Junction Channels, Simulator Brian2

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Itsnainiyah Hafizhoh

NIM : 16620030

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul "Pemodelan Interaksi Neuron-Astrocyte Pada Jaringan Saraf" 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, 25 November 2020

Penulis



Itsнainiyah Hafizhoh

NIM. 16620030



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 : ITSNAINIYAH HAFIZHOH

NIM : 16620030

Judul Skripsi : PEMODELAN INTERAKSI NEURON-ASTROCYTE PADA JARINGAN SARAF

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 ucapan terima kasih.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 01 Desember 2020

Pembimbing

Anis Yuniati, Ph. D.

NIP. 19830614 200901 2 009



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-2842/Un.02/DST/PP.00.9/12/2020

Tugas Akhir dengan judul : Pemodelan Interaksi Neuron-Astrocyte Pada Jaringan Saraf

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : ITSNAINIYAH HAFIZHOH
Nomor Induk Mahasiswa : 16620030
Telah diujikan pada : Kamis, 10 Desember 2020
Nilai ujian Tugas Akhir : A

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

TIM UJIAN TUGAS AKHIR

Ketua Sidang

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

Valid ID: 5fdd933024b23

Pengaji I

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

Valid ID: 5fe0173bd1fc

Pengaji II

Cecilia Yanuarief, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 5fdd8ba68eb09

Yogyakarta, 10 Desember 2020
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

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

Valid ID: 5fe04f56bc3c2



MOTTO

Dan (ingatlah), tatkala Tuhanmu memaklumkan; “Sesungguhnya jika kamu bersyukur. Niscaya Aku akan menambah (nikmat) kepada mu, dan jika kamu mengingkari (nikmat-Ku), maka sesungguhnya azab-Ku sangat pedih”.

(QS Ibrahim : 7)

Saya belajar kebenaran bahwa tidak ada apapun di dunia ini yang mudah. Maka hiduplah dengan penuh usaha.

(Byun Baekhyun)



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, syukur penulis ucapkan kepada-Mu atas segala nikmatMu
Halaman ini sebagai persembahan untuk kalian atas segala dukungan dan doa
yang kalian telah dicurahkan untuk penulis:

Bapak Anshori, Ibu Siti Maliyah, Kholid Al Anshory, M. Abdul Hafid N.H

beserta keluarga kecilnya

Ibunda pembimbing dan keluarga Neurosains (Anak-Anak Ibunda)

Sahabat-sahabat Fisika 2016

UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta, Fakultas Sains dan Teknologi, program Studi

Fisika

Seluruh pejuang ilmu pengetahuan



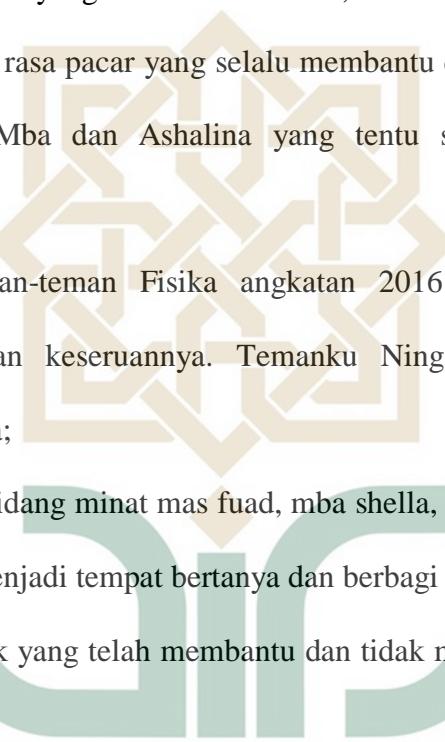
STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh

Alhamdulillaahi 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 “**Pemodelan Interaksi Neuron-Astrocyte Pada Jaringan Saraf**” dengan lancar dan penuh hikmah. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu sumber pengetahuan mengenai mekanisme kinerja otak manusia dan 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, Ph. D. selaku Kepala Jurusan Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga sekaligus Dosen Penasehat Akademik sekaligus 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;
2. Bapak Cecilia Yanuarif, M. Si. selaku Dosen Penguji dan Dosen Penasehat Akademik yang telah memberikan arahannya;
3. Ibu Dr. Nita Handayani selaku Dosen Penguji yang telah memberikan arahannya;

- 
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. Mamak, Bapak yang selalu mendoakan, memberi support dalam berbagai bentuk. Adik rasa pacar yang selalu membantu dan menemani kemanapun serta Mas, Mba dan Ashalina yang tentu selalu memberi semangat tersendiri;
 7. Seluruh teman-teman Fisika angkatan 2016 atas ilmu, pengalaman, dukungan dan keseruannya. Temanku Ning Nong atas pengalaman kenekatannya;
 8. Rekan satu bidang minat mas fuad, mba shella, mba syifa, mas syahid dan april yang menjadi tempat bertanya dan berbagi hal;
 9. 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.

Waalaikum warahmatullahi wabarakatuh

Yogyakarta, 11 Desember 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
INTISARI	ii
ABSTRACT	iii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iv
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI	v
LEMBAR PENGESAHAN	vi
HALAMAN MOTTO	vii
HALAMAN PERSEMPAHAN	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Studi Pustaka	8
2.2 Landasan Teori	11
2.2.1 Neuron	11
2.2.2 Potensial Aksi	14
2.2.3 Sinkronisasi Jaringan Saraf	15
2.2.4 Model Neuron <i>Integrated-and-Fire</i>	20
2.2.5 Sinapsis	24
2.2.6 Glia	26
2.2.7 <i>Calcium Induced Calcium Release</i>	28
2.2.8 <i>Gap-Junction Channels</i>	31
2.2.9 <i>Gliotransmission</i>	33

2.2.10 Persamaan Li-Rinzel	34
2.2.11 Simulator Brian2	38
2.2.12 Jaringan Saraf Dalam Perspektif Islam	40
BAB III METODE PENELITIAN	44
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	44
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	44
3.3 Tahapan Penelitian	44
3.3.1 Instalasi Perangkat Lunak Simulator Brian2	44
3.3.2 Pemodelan Jaringan Saraf dan Interaksi Neuron- <i>Astrocyte</i>	47
3.3.2.1 Pemodelan Perambatan Gelombang Kalsium Pada Jaringan <i>Astrocyte</i>	48
3.3.2.2 Pemodelan Interaksi Neuron- <i>Astrocyte</i>	51
3.3.3 Analisis Data	57
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	58
4.1 Hasil	58
4.1.1 Pemodelan Perambatan Gelombang Kalsium Pada Jaringan <i>Astrocyte</i>	58
4.1.2 Pemodelan Interaksi Neuron- <i>Astrocyte</i>	61
4.2 Pembahasan	63
4.2.1 Pemodelan Perambatan Gelombang Kalsium Pada Jaringan <i>Astrocyte</i>	63
4.2.2 Pemodelan Interaksi Neuron- <i>Astrocyte</i>	67
BAB V PENUTUP	74
5.1 Kesimpulan	74
5.2 Saran	75
DAFTAR PUSTAKA	76
LAMPIRAN	80
A. Parameter dan Simbol yang Digunakan	80
B. Listing Program	82
C. Curriculum Vitae	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur neuron	12
Gambar 2.2 Keadaan potensial aksi	14
Gambar 2.3 Plot membran potensial dari dua neuron eksitatori (E) dan satu neuron inhibitori (I) dalam keadaan tidak sinkron.....	18
Gambar 2.4 <i>Spike</i> neuron inhibitori yang sinkron	19
Gambar 2.5 Keadaan <i>bursting</i> yang sinkron	19
Gambar 2.6 Koneksi sinapsis antar neuron	24
Gambar 2.7 Skema sinapsis	25
Gambar 2.8 Posisi <i>astrocytes</i> di sekitar pembuluh darah dan neuron	27
Gambar 2.9 Skema dinamika Ca^{2+} dan IP3	30
Gambar 2.10 <i>Gap-Junction</i> pada akson dalam keadaan istirahat	32
Gambar 3.1 Diagram alir instalasi simulator Brian2	45
Gambar 3.2 Diagram alir tahapan pemodelan perambatan gelombang kalsium pada jaringan <i>astrocyte</i>	48
Gambar 3.3 Diagram alir tahapan pemodelan interaksi neuron- <i>astrocyte</i>	52
Gambar 4.1 Koneksi jaringan 50 sel <i>astrocyte</i> dengan satu sel terstimulus	58
Gambar 4.2 Koneksi jaringan 50 sel <i>astrocyte</i> dengan dua sel terstimulus	58
Gambar 4.3 Koneksi jaringan 80 sel <i>astrocyte</i> dengan satu sel terstimulus	59
Gambar 4.4 Koneksi jaringan 80 sel <i>astrocyte</i> dengan dua sel terstimulus	59
Gambar 4.5 Koneksi jaringan 100 sel <i>astrocyte</i> dengan satu sel terstimulus	60
Gambar 4.6 Koneksi jaringan 100 sel <i>astrocyte</i> dengan dua sel terstimulus	60
Gambar 4.7 Desain model jaringan neuron- <i>astrocyte</i> pada Brian2	61
Gambar 4.8 Simulasi neuron- <i>astrocyte</i> dengan jumlah $N_e/N_i/N_a$ sebanyak 800/200/800	62
Gambar 4.9 Simulasi neuron- <i>astrocyte</i> dengan jumlah $N_e/N_i/N_a$ sebanyak 400/100/400	62
Gambar 4.10 Desain model jaringan <i>astrocyte</i> pada Brian2	63
Gambar 4.11 Hasil jaringan <i>astrocyte</i> pada penelitian Stimberg, dkk	67

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian-penelitian yang berkaitan	8
Tabel 3.1 Daftar Alat Penelitian	44



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Manusia diciptakan berbeda dengan makhluk yang lain, dimana manusia memiliki akal, hikmah, tabiat serta nafsu (Afrida, 2018). Akal sebagai keistimewaan utama manusia dijelaskan dalam sebuah hadist Qudsi yang diriwayatkan ketika Abdullah bin Salam bertanya kepada Rasulullah SAW yang bercerita tentang Arsy dan akal.

Kata Rasulullah SAW: “*Bertanya para malaikat kepada Allah SWT: “Wahai Tuhan kami, adakah Engkau menjadikan sesuatu yang lebih besar dari ‘Arsy?’ Maka menjawab Allah SWT: “Ada, yaitu akal”. Bertanya malaikat lagi: “Sampai dimana batas kebesarannya?” Allah SWT menjawab:”Tidak dapat dihinggakan dengan ilmu pengetahuan. Adakah bagimu pengetahuan tentang berapa jumlahnya pasir?”. Malaikat itu menjawab: “Tidak”. Maka Allah SWT berfirman: “Sesungguhnya Aku menjadikan akal itu bermacam-macam, seperti bilangan pasir. Sebagian ada yang diberikan dua biji, ada yang tiga biji, dan empat biji. Diantara mereka ada yang diberikan secupuk (seukuran gelas) dan ada pula diantaranya yang diberikan segantang (seliter) dan ada pula diantara mereka yang diberikan lebih banyak dari itu”* (HR. At-Tirmidzi).

Berdasarkan hadist Qudsi tersebut menerangkan kemuliaan manusia yang berada di atas ‘Arsy. Dengan kata lain, tidak ada ‘Arsy tanpa akal manusia karena justru ‘Arsy dibentuk sebagai tempat bagi akal manusia (Suadu, 2018).

Secara fisik dalam bahasa Indonesia, akal sering diidentikkan dengan otak atau *mind* yang diasumsikan berada di kepala. Menurut Harun Nasution, pengertian akal tidak sama persis dengan pengertian otak. Hal ini karena akal lebih merujuk pada daya pikir dan daya kritis yang ada pada

jiwa manusia, sedangkan otak dalam artian fisik tidak hanya dimiliki oleh manusia tetapi makhluk lain seperti binatang (Norhasanah, 2017). Otak merupakan salah satu organ yang fungsinya sangat vital bagi manusia. Otak termasuk dalam sistem saraf, dimana sistem saraf berperan penting untuk mengatur setiap aktivitas seperti melihat, berpikir, bergerak hingga mengatur berbagai kerja organ tubuh manusia.

Sistem saraf terdiri dari dua jenis sel yaitu neuron dan glia. Ditinjau dari segi fungsinya, neuron memiliki fungsi dalam menyampaikan sinyal dari satu sel ke sel lainnya, sedangkan glia berfungsi untuk melindungi, mendukung, merawat serta mempertahankan homeostatis cairan di sekeliling neuron. Meskipun keduanya memiliki perbedaan tetapi saling berkaitan dan dibutuhkan untuk transfer informasi dalam sistem saraf (Djuwita, 2013). Jenis glia yang memiliki populasi sekitar lima kali lebih banyak daripada neuron adalah *astrocyte*. *Astrocyte* mampu merespon stimulasi pada sistem saraf pusat sehingga neuron dan *astrocyte* bersama-sama mampu membangun sistem saraf pusat dan memiliki fungsi kompleks penting dalam sistem saraf pusat yang sehat (Sofroniew, 2010). Pada masa awal perkembangan ilmu pengetahuan tentang saraf, para ilmuwan menyatakan bahwa pemrosesan informasi di dalam otak hanya dijalankan neuron, namun penelitian akhir-akhir ini menunjukkan bahwa *astrocyte* memiliki kemampuan mendengarkan komunikasi neuron, menjawab dan berbicara kembali ke neuron, sehingga dapat memodulasi fungsi mereka (Nadkarni dan Jung, 2003). *Astrocytes* digambarkan mempunyai fungsi

untuk menyebarkan informasi neuron ke sinapsis tetangga (Wallach, 2014).

Hal ini terus menjadi topik pembahasan yang diperdebatkan karena belum terdapat penjelasan mengenai bagaimana mekanisme kerja sel glia pada sistem saraf.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk membantu menjelaskan mekanisme kerja glia adalah metode pemodelan komputasi. Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia, pemodelan adalah proses, cara, perbuatan membuat model, dimana model merupakan pola atau sesuatu yang akan dibuat atau dihasilkan. Beberapa pemodelan komputasi dapat menggunakan simulator untuk mempermudah pemodelan tersebut. Meskipun terbukti bahwa glia dapat secara krusial mengatur jaringan saraf, sebagian besar simulator saraf yang tersedia mengabaikan kontribusi yang mungkin dari glia pada fisiologi neuron. Salah satu alasan pengabaian ini adalah bahwa model glia standar belum ditentukan, sehingga paket simulator secara umum tidak menyediakan model glia sebagai bagian dari *library* mereka. Beberapa simulator jaringan saraf yang terkenal memungkinkan untuk memperluas *library* bawaan mereka dengan model glia yang didefinisikan, namun pada umumnya tidak mudah karena memerlukan keterampilan pemrograman khusus dalam bahasa tingkat tinggi. Simulator Brian2 menyediakan platform yang ideal untuk mensimulasikan fisiologi glia secara efisien, khususnya pengaruh *astrocyte* pada aktivitas saraf (Stimberg dkk, 2017).

Penelitian Stimberg, dkk (2017) melakukan pemodelan komputasi fisiologis glia dan interaksi neuron-glia. Mereka mensimulasikan model neuron dan sinapsis, serta model *astrocyte*. Pada penelitian tersebut mereka menggunakan simulator Brian2. Penelitian lain yang berkaitan dengan pemodelan *astrocyte* adalah penelitian yang dilakukan oleh Nadkarni dan Jung (2003; 2004). Mereka meninjau pengaruh *astrocyte* terhadap sekitarnya yang dikaitkan dengan perambatan gelombang kalsium intraseluler. Koneksi neuron dan sinapsis akan mengakibatkan kenaikan konsentrasi neurotransmitter, dimana keadaan tersebut akan merangsang aktivasi reseptor *astrocyte*. Reseptor *astrocyte* yang sudah teraktivasi akan memicu produksi IP3. Konsentrasi IP3 akan mempengaruhi aktivasi reseptor IP3 pada Retikulum Endoplasma (ER). Dalam hal ini, terdapat *gating variable* yang bertanggungjawab terhadap membuka dan menutupnya saluran ion. Nadkarni dan Jung (2003) mendefinisikan aktivitas reseptor IP3 pada ER sebagai fraksi aktivasi IP3Rs (q). Reseptor IP3 yang teraktivasi akan mempengaruhi pelepasan kalsium dari ER sebagai pemicu mekanisme *Calcium Induced Calcium Release* (CICR) yang mengatur konsentrasi kalsium *astrocyte*.

Pada penelitian ini akan dibuat model perambatan gelombang kalsium pada jaringan *astrocyte* dan model interaksi neuron-*astrocyte* dengan model neuron *integrated-and fire* (IF) dan *astrocyte* dimodelkan dengan persamaan Li-Rinzel yang melibatkan fraksi aktivasi IP3Rs (q). Dalam pemodelan perambatan gelombang kalsium pada jaringan *astrocyte* dilakukan variasi

pada jumlah sel *astrocyte* dan jumlah sel yang distimulasi. Dalam pemodelan interaksi neuron-*astrocyte* dilakukan variasi jumlah neuron eksitatori, jumlah neuron inhibitori, dan jumlah *astrocyte* dengan melibatkan produksi gliotransmitter.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang mendasari adanya penelitian pemodelan interaksi neuron-*astrocyte* pada jaringan saraf adalah sebagai berikut:

1. Bagaimanakah pola perambatan gelombang kalsium pada jaringan *astrocyte* yang dihubungkan oleh *Coupling Gap-Junction Channels* ?
2. Bagaimanakah struktur dan mekanisme interaksi neuron-*astrocyte* dalam proses transfer informasi ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan diadakannya penelitian pemodelan interaksi neuron-*astrocyte* pada jaringan saraf adalah sebagai berikut:

1. Membuat model perambatan gelombang kalsium pada jaringan *astrocyte* dengan mekanisme difusi IP3 intraseluler melalui *Coupling Gap-Junction Channels*.
2. Membuat model jaringan kompleks dari interaksi neuron-*astrocyte* dan menganalisis mekanisme yang terjadi pada interaksi neuron-*astrocyte* dalam proses transfer informasi.

1.4 Batasan Penelitian

Hal-hal yang membatasi penelitian pemodelan interaksi neuron-*astrocyte* pada jaringan saraf adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan simulator *Brian2*.
2. Model neuron yang digunakan adalah model neuron *Integrated-and-Fire* (IF).
3. Model sinapsis yang digunakan adalah model sinapsis *trivial*.
4. *Astrocyte* dimodelkan dengan menggunakan persamaan Li-Rinzel.
5. Persamaan Li-Rinzel yang digunakan melibatkan fraksi aktivasi IP3Rs (q).
6. Variasi jumlah *astrocyte* dalam pemodelan perambatan gelombang kalsium pada jaringan *astrocyte* adalah 50 sel, 80 sel dan 100 sel dengan masing-masing terdapat variasi sel yang distimulus.
7. Variasi jumlah neuron eksitatori, inhibitori, dan sel *astrocyte* dalam pemodelan interaksi neuron-*astrocyte* adalah (800,200,800) dan (400,100,400) dengan masing-masing melibatkan produksi gliotransmitter.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian pemodelan interaksi neuron-*astrocyte* pada jaringan saraf adalah sebagai berikut:

1. Pemahaman mengenai mekanisme kelistrikan neuron dalam proses transfer informasi.
2. Pemahaman mengenai struktur dan konfigurasi sel glia dalam membentuk jaringan glia terutama untuk glia jenis *astrocyte*.
3. Pemahaman mengenai pola interaksi, mekanisme dan faktor-faktor yang mempengaruhi interaksi neuron-*astrocyte* pada jaringan saraf.

4. Hasil yang diperoleh dapat digunakan sebagai referensi atau acuan penelitian selanjutnya.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

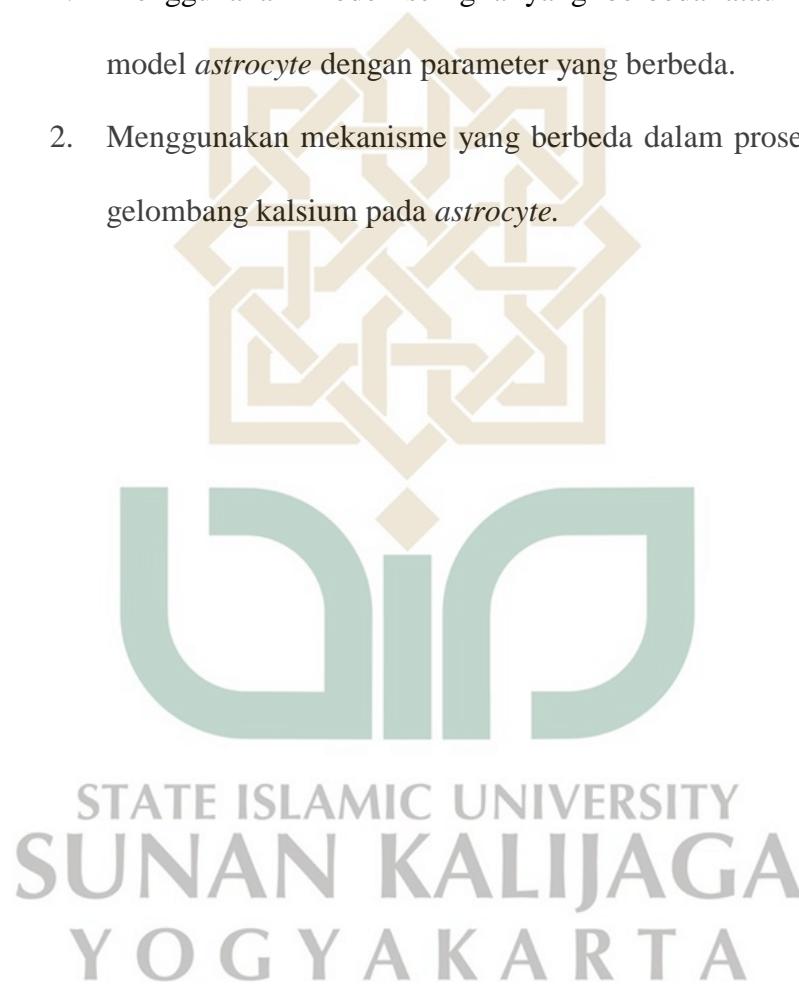
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dan hasil yang dianalisis, kesimpulan untuk penelitian yang berjudul Pemodelan Interaksi Neuron-*Astrocyte* Pada Jaringan Saraf adalah sebagai berikut.

1. Pemodelan perambatan gelombang kalsium pada jaringan *astrocyte* telah berhasil dibuat. Koneksi jaringan *astrocyte* yang dimodelkan melibatkan *Coupling Gap-Junction Channels* (GJCs) sebagai mekanisme difusi IP3 antar *astrocyte*. Parameter lain yang ikut mempengaruhi konfigurasi jaringan *astrocyte* yang terbentuk adalah fraksi aktivasi IP3Rs (q), dimana parameter ini mempengaruhi perambatan gelombang kalsium pada *astrocyte* melalui aktivasi reseptor IP3.
2. Transfer informasi yang dilakukan oleh neuron berupa perambatan gelombang arus listrik, sedangkan transfer informasi yang dilakukan oleh *astrocyte* berupa perambatan gelombang kalsium. Sehingga interaksi neuron-*astrocyte* yang dimodelkan melibat empat jenis koneksi, diantaranya koneksi antar neuron oleh sinapsis, koneksi dua arah dari sinapsis dan *astrocyte*, serta koneksi antar *astrocyte* oleh GJCs. Koneksi dua arah dari sinapsis dan *astrocyte* berupa pemicu aktivasi *astrocyte* dan jalan produksi gliotransmitter.

5.2 Saran

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini tentu memiliki kekurangan. Oleh karenanya, terdapat beberapa saran yang dapat dilakukan untuk mengembangkan topik penelitian ini antara lain :

1. Menggunakan model sel glia yang berbeda atau menggunakan model *astrocyte* dengan parameter yang berbeda.
2. Menggunakan mekanisme yang berbeda dalam proses perambatan gelombang kalsium pada *astrocyte*.



DAFTAR PUSTAKA

- Afrida. 2018. Hakikat Manusia dalam Perspektif Al-Qur'an. *Jurnal Kajian Ilmu-Ilmu Hukum*. Vol.16 No.2 Desember 2018 : 54.59
- Allen NJ, Barres BA. 2009. Neuroscience: Glia - more than just brain glue. *Nature*. 457 (7230): 675–7
- Araque, A., Carmignoto, G., Haydon, P. G., Oliet, S. H. R., Robitaille, R., dan Volterra, A. 2014. Gliotransmitters Travel in Time and Space. *Cell Press*. **Neuron** 81, 19 Februari 2014
- Brette, Romain., 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
- Bootman, M. D., Berridge, M. J., dan Roderick. H. L. 2002. Calcium Signalling: More Messengers, More Channels, More Complexity. *Current Biology*. Vol.12 20 Agustus 2002 : R563–R565
- Bordal, Per. 2010. *The Central Nervous System*. New York: Oxford University Press.
- Borges, R. R., Borges F. S., Lameu, E. L. dkk. 2017. *Synaptic Plasticity and Spike Synchronisation in Neuronal Networks*. Brazilian Journal of Physics. Vol. 47 No. 6 Desember 2017: 678-688
- The Editors of Encyclopedia Britannica. 2020. *Astrocyte*. Diakses pada 17 Mei 2020 dari <https://www.britannica.com/science/astrocyte>
- Botero, W. A., Salas, A. H., dan Colorado, S. J. Gonzalez. 2013. The Hodgkin-Huxley Neuron Model on the Fast Phase Plane. *International Journal of Physical Sciences*. Vol. 8(20) 30 May 2013 : pp. 1049-1057.
- Brian Simulator Team. 2017. *Brian 2 Documentation*. Diakses 20 April 2020 dari <https://media.readthedocs.org/pdf/brian2/stable/brian2.pdf>
- Burkitt, A.N. 2006. A Review of the Integrate-and-fire Neuron Model: I. Homogeneous Synaptic Input. Article in *Biological Cybernetics*. 20 March 2006
- Cherry, K. 2019. *Synapses in the Nervous System*. Diakses 20 Mei 2020 dari <https://www.verywellhealth.com/synapse-anatomy-2795867>
- Clayton, M. S., Yeung, N., dan Kadosh, R. C. 2015. *The Roles of Cortical Oscillations in Sustained Attention*. Trends in Cognitive Science, 19 April 2015: 188-95. doi: 10.1016/j.tics.2015.02.004
- Dhamala, M., Jirsa, Viktor K., dan Ding, M. 2004. *Enhancement of Neural Synchrony by Time Delay*. Physical Review Letters. Vol. 92 No. 7 19 Februari 2004. DOI: 10.1103/PhysRevLett.92.074104

- Djuwita, Ita., dkk. 2013. Induksi Ekstrak Pegangan Secara *in vitro* terhadap Proliferasi dan Diferensiasi Sel-Sel Otak Besar Anak Tikus. *Jurnal Veteriner*, Vol.14 No.2 September 2013: 138-144.
- Donachy, Shaun. 2015. *Spiking Neural Networks: Neuron Models, Plasticity, and Graph Applications*. (Tesis dan Disertasi) B.S. Computer Science, Virginia Commonwealth University, Richmond, Virginia.
- Fauzia, Syifa. 2019. *Pemodelan Astrocyte Li-Rinzel Dengan Stimulasi Neurotransmitter Sinapsis*. (Tugas Akhir), Prodi Fisika, UIN Sunan Kalijaga, Yogyakarta.
- Feriyawati, Lita. 2006. *Anatomi Sistem Saraf dan Perannya dalam Regulasi Kontraksi Otot Rangka*. Sumatera Utara: USU Repository.
- Fry, Chris dan Jabr, Rita. 2009. The Action Potential and Nervous Conduction. *Surgery Journal*, Vol.28 No.28 Januari 2009 : 49-54.
- Gerstein, G.L. dan Mandelbrot, B. 1964. Random walk models for the spike activity of a single neuron. *Biophys J*. 4 :41–68
- Golomb, D., Hansel, D., dan Mato, G. 2001. *Mechanisms of Synchrony of Neural Activity in Large Networks*. Handbook of Biological Physics. Vol. 4 : 887-968.
- Goodenough, Daniel A. dan Paul, David L. 2009. Gap Junctions. *Cold Spring Harb Perspect Biol*. 1 : a002576
- Goodman, Dan F. M., dan Brette R. 2009. The Brian Simulator. *Frontiers in Neuroscience*. 15 September 2009
- Harada, K., Kamiya, T., dan Tsuboi, T. 2016. Gliotransmitter Release from Astrocytes: Functional, Developmental, and Pathological Implications in the Brain. *Front. Neurosci*. 9 : 499.
- Hasyim, M. F. (2019). *Pemodelan Jaringan Saraf Hodgkin-Huxley (HH) Neuron dengan Short-Term Plasticity (STP) menggunakan Simulator Brian2*. (Tugas Akhir), Prodi Fisika, UIN Sunan Kalijaga, Yogyakarta.
- Hill, A. V. 1936. Excitation and accommodation in nerve. *Proc R Soc B*. 119 : 305–355
- Hofer, T., Venance, L., dan Giaume, C. 2002. Control and Plasticity of Intercellular Calcium Waves in Astrocytes : A Modelling Approach. *The Journal of Neuroscience*, Vol.22 No.12 : 4850-4859.
- Ikrar, Taruna. 2015. *Ilmu Neurosains Modern*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar
- Irianto, Kus. 2004. *Struktur dan Fungsi Tubuh Manusia Paramedis*. Bandung: Yrama Widya
- Khan Academy. 2020. *Overview of Neuron Structure and Function*. Diakses 10 Mei 2020 dari <https://www.khanacademy.org/science/biology/human-biology/neuron-nervous-system/a/overview-of-neuron-structure-and-function>

- Klimesch, Wolfgang. 2012. *Alpha-band Oscillations, Attention, and Controlled Acces to Stored Information*. Trends in Cognitive Science. **Vol. 16 No. 12** Desember 2012: 606-617
- Koesoemah dan Dwiastuti. 2017. *Histologi dan Anatomi Fisiologi Manusia*. Jakarta: BPPSDMK.
- Kriesel, David. 2007. *A Brief Introduction to Neural Networks*. Available at <http://www.dkriesel.com>
- Lapicque, L. 1907. Recherches quantitatives sur l'excitation électrique des nerfs traitée comme une polarization. *J Physiol Pathol Gen (Paris)*. **9** : 620–635
- Manninen T, Havela, R., dan Linne, M. L. 2018. Computational Models for Calcium-Mediated Astrocyte Functions. *Front. Comput. Neurosci.* **12**:14.
- Nadkarni, S., dan Jung, P. 2003. Spontaneous Oscillation of Dressed Neurons : A New Mechanism for Epilepsy? *Physical Review Letters*. **Vol.91 No.26**: 1-4.
- Nadkarni, S., dan Jung, P. 2004. Dressed Neurons : Modelling Neural-Glia Interactions. *Physical Biologi*. 35-41.
- Noor, Fuad A. 2019. Otak dan Akal dalam Ayat-Ayat Neurosains. *Jurnal Ilmu Al-Qur'an dan Tafsir*. **Vol.4 No.1 Januari-Juni 2019**
- Norhasanah. 2017. Pengaruh Konsep Akal Dalam Pengembangan Pendidikan Islam. *Jurnal NALAR*. **Vol.1 No.2 Desember 2017** : 138
- Savtchouk, Iaroslav dan Volterra, Andrea. 2018. Gliotransmission: Beyond Black-and-White. *The Journal of Neuroscience*. **38(1) 3 Januari 2018** : 14 –25
- Science Education. 2020. *Neurons, Brain Chemistry, and Neurotransmission*. Diakses 20 Mei 2020 dari <https://science.education.nih.gov/supplements/webversions/BrainAddiction/guide/lesson2-1.html>
- Sofroniew, M.V., dan Vinters, H. V. 2010. Astrocytes: biology and pathology. *Acta Neuropathol* **119**:7–35
- Somjen, G. G., Kager, H., dan Wadman, W. J. 2008. Computer Simulations of Neuron-Glia Interactions Mediated by Ion Flux. *J Comput Neurosci*, **25**:349-365
- Stein, R. B. 1965. A theoretical analysis of neuronal variability. *Biophys J*. **5**:173–194
- Stein, R. B. 1967. Some models of neuronal variability. *Biophys J*. **7** : 37–68
- Stimberg, M., Goodman, Dan F.M., Brette, R., De Pitta, M. 2017. *Modeling Neuron-Glia Interactions with The Brian 2 Simulator*. doi: <https://doi.org/10.1101/198366>
- Suadu, Fikri. 2018. *Manusia Unggul Neurosains dan Al Qur'an*. Jakarta: PT. Penjuru Ilmu Sejati.
- Tang, J., Luo, Jin-Ming, dan Ma, Jun. 2013. Information Transmission in a Neuron-Astrocyte Coupled Model. *PLoS ONE* **8(11)**: e80324

Traub, R.G., A Model of CA3 Hippocampal Pyramidal Neuron Incorporating Voltage-Clamp Data On Intrinsic Conductances. *Journal Of Neurophysiology*. Vol.66 No.2 August 1991

Tondas, Alexander Edo dan Yuniadi, Yoga. 2010. Role of Gap Junction in Atrial Fibrillation Pathophysiology. *Jurnal Kardiologi Indonesia*. Vol.31 No.1 Januari-April 2010 : 48-57

Wallach, G., Lallouette, J., Herzog, N., De Pitta, M., Jacob, E. B., Berry, H., dan Henein, Y. (2014). Glutamate Mediated Astrocytic Filtering of Neuronal Activity. *PLOS Computational Biology* (10), e1003964

