

**PEMODELAN ASTROCYTE LI-RINZEL DENGAN
STIMULASI NEUROTRANSMITTER SINAPSIS**

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat Sarjana S-1

Program Studi Fisika



Diajukan oleh:

Syifa Fauzia

15620024

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

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA

YOGYAKARTA

2019



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-5309/Un.02/DST/PP.00.9/12/2019

Tugas Akhir dengan judul : PEMODELAN ASTROCYTE LI-RINZEL DENGAN STIMULASI
NEUROTRANSMITTER SINAPSIS

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : SYIFA FAUZIA
Nomor Induk Mahasiswa : 15620024
Telah diujikan pada : Jumat, 13 Desember 2019
Nilai ujian Tugas Akhir : A

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

TIM UJIAN TUGAS AKHIR

Ketua Sidang

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

Penguji I

Dr. Nita Handayani, S.Si., M.Si.
NIP. 19820126 200801 2 008

Penguji II

Cecilia Yantuarief, M.Si.
NIP. 19840127 201503 1 001

YOGYAKARTA

Yogyakarta, 13 Desember 2019

UIN Sunan Kalijaga

Fakultas Sains dan Teknologi

Dekan



Dr. Murtono, M.Si.

NIP. 19691212 200003 1 001

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Syifa Fauzia

NIM : 15620024

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul "Pemodelan Astrocyte Li-Rinzel Dengan Stimulasi Neurotransmitter 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.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

Yogyakarta, 29 November 2019

Penulis



Syifa Fauzia
NIM. 15620024

MOTTO

“Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, dan silih bergantinya malam dan siang terdapat tanda-tanda bagi orang-orang yang berakal (ulul albab).

(yaitu) orang-orang yang mengingat Allah sambil berdiri atau duduk atau dalam keadaan berbaring dan mereka memikirkan tentang penciptaan langit dan bumi

(seraya berkata): “Ya Tuhan kami, tiadalah Engkau menciptakan ini dengan sia-sia, Maha Suci Engkau, maka peliharalah kami dari siksa”

(Ali Imran : 190-191)

“I have no special talents, I am only passionately curious”

(Albert Einstein)

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 “*Pemodelan Astrocyte Li-Rinzel dengan Stimulasi Neurotransmitter Sinapsis*” 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 kedua Adikku yang memberikan semangat, ridho, dan doanya;
7. Mas Fuad dan Mbak Shella yang telah banyak membantu, meluangkan waktu untuk berdiskusi dan senantiasa memberikan semangat.
8. Seluruh teman-teman Fisika angkatan 2015 atas dukungan dan ilmu yang dibagi, rekan satu bidang minat Itsna, April, Nisa dan Sahid atas motivasinya.
9. Teman-teman seperjuangan di asrama, Nuurun, Lulu, Rizka, Nuri, Shafira, Syifa RH, Rinna, Zahro, Rai, dan Alfi yang saling menasihati, memotivasi, memberi semangat dan banyak memberi warna selama di Jogja.
10. 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, 18 Desember 2019

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

Penulis

PEMODELAN ASTROCYTE LI-RINZEL DENGAN STIMULASI NEUROTRANSMITTER SINAPSIS

Syifa Fauzia
15620024

INTISARI

Pemodelan *astrocyte* Li-Rinzel dengan stimulasi neurotransmitter sinapsis telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan membuat model *astrocyte* yang diaktivasi oleh neurotransmitter sinapsis antar neuron (Y_s), menganalisis dinamika fraksi aktivasi reseptor *astrocyte* Γ_A , menentukan pola produksi enzim oleh *phospholipase* $C\beta$ (J_β), $C\delta$ (J_δ) dan konstanta produksi IP_3 oleh sumber stimulus eksogen (J_{ex}), menganalisis dinamika IP_3 dalam perambatan gelombang kalsium, menganalisis dinamika variabel q dan membandingkannya dengan *gating variable* h , menganalisis pola fluks CICR (J_r), fluks kalsium bocor dari RE (J_l), dan pengambilan kalsium dari sitosol kembali ke RE dengan pompa ATP (J_p), menganalisis mekanisme perambatan gelombang kalsium $[Ca^{2+}]$ pada sel glia / *astrocyte*, serta menganalisis pengaruh frekuensi rata-rata *spike* pada perambatan gelombang kalsium. Pemodelan dibuat dengan menggunakan simulator *Brian 2*. Model neuron yang digunakan adalah model neuron sederhana, model sinapsis tidak melibatkan perubahan plastisitas sinapsis, dan *astrocyte* dimodelkan menggunakan persamaan Li-Rinzel. Model *astrocyte* yang diaktivasi oleh neurotransmitter sinapsis antar neuron (Y_s) telah berhasil disusun dengan menghubungkan 2 neuron menggunakan simulator *Brian 2*, menggunakan model neuron dan sinapsis sederhana. Di dalam sinapsis dihasilkan peningkatan konsentrasi neurotransmitter yang merangsang aktivitas sel glia (*astrocyte*). Dinamika fraksi aktivasi reseptor *astrocyte* (Γ_A) bergantung pada konsentrasi neurotransmitter sinapsis (Y_s), ditandai dengan kenaikan fraksi Γ_A pada waktu (t) yang bersamaan dengan meningkatnya konsentrasi neurotransmitter (Y_s). Produksi IP_3 dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti produksi enzim oleh *phospholipase* $C\beta$ (J_β), $C\delta$ (J_δ) dan konstanta produksi IP_3 oleh sumber stimulus eksogen (J_{ex}). Dinamika fraksi aktivasi IP_3 Rs (q) berpengaruh pada penyebaran konsentrasi kalsium melalui aktivasi reseptor IP_3 . Mekanisme perambatan gelombang kalsium menjelaskan rata-rata konsentrasi kalsium sitosolik sel. Frekuensi lebih tinggi menghasilkan simulasi gelombang kalsium dengan konsentrasi yang cenderung lebih tinggi, dikarenakan pengulangan aktivitas *spike* lebih banyak, sehingga lebih sering menstimulasi fraksi aktivasi reseptor *astrocyte*, yang selanjutnya akan mempengaruhi konsentrasi kalsium.

Kata kunci : *astrocyte*, Li- Rinzel, neurotransmitter, neuron, sinapsis, simulator *Brian 2*

MODELING OF ASTROCYTE LI-RINZEL'S WITH THE STIMULATION OF NEUROTRANSMITTER SYNAPSES

Syifa Fauzia
15620024

ABSTRACT

Modeling of Li-Rinzell's astrocyte by the stimulation of neurotransmitter synapses was carried out. This study aims to create an astrocyte model that is activated by neurotransmitter synapses between neurons (Y_s), analyze the dynamics of the activation of the astrocyte receptor Γ_A , to determine the pattern of enzyme production by phospholipase C_β (J_β), C_δ (J_δ) and IP_3 production constants by exogenous stimulus sources (J_{ex}), analyze the dynamics of IP_3 in the propagation of calcium waves, analyze the dynamics of the q variable and compare it with the gating variable h , analyze the CICR flux pattern (J_r), the calcium flux leak from RE (J_l), and calcium uptake from the cytosol back to the RE with the ATP pump (J_p), analyzing the mechanism of calcium wave propagation [Ca^{2+}] on glia / astrocyte cells, and analyzing the effect of spike rate on calcium wave propagation. Modeling was made using the Brian 2 simulator. The neuron model used is a simple neuron model, the synapses model does not involve changes in synaptic plasticity, and astrocytes are modeled using the Li-Rinzell equation. The astrocyte model activated by neurotransmitter synapses between neurons (Y_s) has been successfully compiled by connecting 2 neurons using Brian 2 simulators, using simple neuron and synapses models. In synapses an increase in the concentration of neurotransmitters stimulates the activity of glia cells (astrocytes). The dynamics of the astrocyte receptor activation fraction (Γ_A) depend on the concentration of the neurotransmitter synapses (Y_s), characterized by an increase in the Γ_A fraction at time (t) which coincides with an increase in the concentration of the neurotransmitter (Y_s). IP_3 production is influenced by various factors, such as the production of enzymes by phospholipase C_β (J_β), C_δ (J_δ) and IP_3 production constant by exogenous stimulus sources (J_{ex}). The dynamics of the activation fraction of IP_3 Rs (q) affect the spread of calcium concentration through activation of IP_3 receptors. The mechanism of calcium wave propagation explains the average concentration of cell cytosolic calcium. Higher frequencies produce simulations of calcium waves with concentrations that tend to be higher, due to the repetition of more spike activity, so it more often stimulates the astrocyte receptor activation fraction, which in turn affects calcium concentration.

Key words : *astrocyte*, Li- Rinzell, neurotransmitter, neuron, synapses, Brian 2 simulator

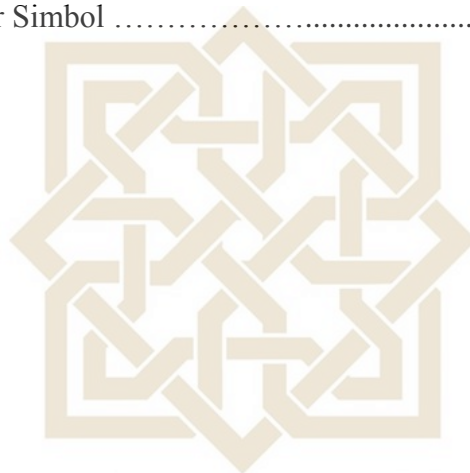
DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PENGESAHAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR.....	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iii
MOTTO	iv
KATA PENGANTAR	v
INTISARI.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	6
1.4 Batasan Penelitian.....	6
1.5 Manfaat Penelitian.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1 Studi Pustaka.....	9
2.2 Landasan Teori.....	11
2.2.1 Neuron.....	11
2.2.2 Glia.....	14
2.2.3 Sinapsis.....	17
2.2.4 <i>Calcium Induced Calcium Release</i>	18
2.2.5 Persamaan Li-Rinzel.....	21
2.2.6 Simulator Brian 2.....	24
2.2.7 Neurosains dalam Perspektif Al-Qur'an dan Sunnah.....	27
BAB III METODE PENELITIAN.....	35
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	35
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	35
3.3 Tahapan Penelitian:.....	35
3.3.1 Menentukan Parameter yang Digunakan.....	36
3.3.2 Membuat Pemodelan <i>Astrocyte</i> di Simulator Brian2.....	36
3.3.3 Analisis Data.....	46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	48
4.1 Hasil Simulasi.....	48
4.1.1 Simulasi Pemodelan Neuron dan Sinapsis Sederhana.....	48
4.1.2 Dinamika Fraksi Aktivasi Reseptor <i>Astrocyte</i> Γ_A	48
4.1.3 Pola Produksi Enzim Oleh <i>Phospolipase Cβ</i> (J_β), <i>Cδ</i> (J_δ) dan Konstanta Produksi IP_3 Oleh Sumber Stimulus Eksogen (J_{ex}).....	49
4.1.4 Dinamika IP_3	49
4.1.5 Dinamika Fraksi Aktivasi IP_3Rs (q).....	50

4.1.6	Pola Fluks CICR (J_r), Fluks Kalsium Bocor dari RE (J_i), dan Pengambilan Kalsium dari Sitosol Kembali ke RE dengan Pompa ATP (J_p)	50
4.1.7	Mekanisme Perambatan Gelombang Kalsium C	51
4.1.8	Pengaruh Frekuensi rata-rata <i>spike</i> pada Perambatan Gelombang Kalsium	51
4.2	Pembahasan	52
4.2.1	Pemodelan Neuron dan Sinapsis Sederhana	52
4.2.2	Dinamika Fraksi Aktivasi Reseptor <i>Astrocyte</i> Γ_A	54
4.2.3	Pola Produksi Enzim Oleh <i>Phospholipase</i> $C\beta$ (J_β), $C\delta$ (J_δ) dan Konstanta Produksi IP_3 Oleh Sumber Stimulus Eksogen (J_{ex})	55
4.2.4	Dinamika IP_3	56
4.2.5	Dinamika Fraksi Aktivasi IP_3Rs (q)	56
4.2.6	Pola Fluks CICR (J_r), Fluks Kalsium Bocor dari RE (J_i), dan Pengambilan Kalsium dari Sitosol Kembali ke RE dengan Pompa ATP (J_p)	58
4.2.7	Mekanisme Perambatan Gelombang Kalsium C	59
4.2.8	Pengaruh Frekuensi Rata-rata <i>Spike</i> pada Perambatan Gelombang Kalsium	62
4.2.9	Integrasi Interkoneksi	62
BAB V PENUTUP		64
5.1	Kesimpulan	64
5.2	Saran	66
DAFTAR PUSTAKA		67

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Penelitian-Penelitian yang berkaitan	9
Tabel 2.2	Persamaan dan Perbedaan dengan Penelitian Referensi	11
Tabel 3.1	Daftar alat penelitian	35
Tabel A.1	Parameter Neuron	71
Tabel A.2	Parameter Sinapsis	71
Tabel A.3	Parameter <i>Astrocyte</i>	72
Tabel A.4	Daftar Simbol	73



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Morfologi 2 jenis neuron, a. Intreuron multipolar, b. Neuron motorik (Lodish dkk, 2016)	13
Gambar 2.2	Pengaturan umum antara <i>astrocyte</i> , kapiler, dan neuron. <i>Astrocyte</i> (putih) biasanya membawa banyak proses yang banyak tersebar di sepanjang kapiler (coklat), berbatasan dengan neuron (hijau) atau berhubungan erat dengan terminal akson di persimpangan sinaptik (biru) (Jessen, 2004)	16
Gambar 2.3	Ultrastruktur sinapsis <i>axodendritic</i> (Fitzgerald dkk, 2012)	18
Gambar 2.4	Skema dinamika Ca^{2+} dan IP_3 . Panah padat, garis-garis, dan titik-titik masing-masing menunjukkan langkah reaksi / <i>transport</i> , interaksi regulasi, dan difusi molekuler. R, reseptor Agonis; G, G-protein (bentuk aktif dilambangkan dengan tanda bintang); IP_3R_i , konformasi tidak aktif dari reseptor IP_3 (Hofer dkk, 2002)	20
Gambar 2.5	Perbandingan Otak Mamalia (Kalat, 2009)	28
Gambar 3.1	Blok diagram tahap penelitian	35
Gambar 3.2	Tahapan pembuatan pemodelan <i>Astrocyte</i>	36
Gambar 3.3	Tahapan instalasi simulator <i>Brian2</i>	37
Gambar 3.4	Algoritma penulisan program	40
Gambar 4.1	Pola Aktivitas <i>Spike</i> Neuron	48
Gambar 4.2	Pola aktivitas Sinapsis	48
Gambar 4.3	Dinamika Fraksi Aktivasi Reseptor <i>Astrocyte</i> Γ_A	48
Gambar 4.4	Pola Produksi Enzim Oleh (a) <i>Phospolipase</i> $C\beta$ (J_β), (b) <i>Phospolipase</i> $C\delta$ (J_δ) dan (c) Konstanta Produksi IP_3 Oleh Sumber Stimulus Eksogen (J_{ex})	49
Gambar 4.5	Dinamika IP_3	49
Gambar 4.6	Dinamika Fraksi Aktivasi IP_3Rs (q)	50
Gambar 4.7	Pola fluks kalsium (a) Flux CICR (J_r), (b) Flux Kalsium Bocor dari RE (J_l), (c) Flux Pengambilan Kalsium dari Sitosol Kembali ke RE dengan Pompa ATP (J_p)	50
Gambar 4.8	Perambatan Gelombang Kalsium	51
Gambar 4.9	Perambatan gelombang kalsium (a) frekuensi rata-rata <i>spike</i> 2,00 Hz, (b) frekuensi rata-rata <i>spike</i> 1,00 Hz, (c) frekuensi rata-rata <i>spike</i> 0,50 Hz	51
Gambar 4.10	Desain Pemodelan <i>Astrocyte</i> yang Distimulasi oleh Input Neurotransmitter Sinapsis dalam <i>Brian2</i>	52
Gambar 4.11	<i>gating variable</i> (h) tanpa <i>noise</i> yang mengacu pada penelitian Stimberg dkk. (2017)	58
Gambar 4.12	Dinamika konsentrasi IP_3 dan Ca^{2+} (nM) dalam <i>astrocyte</i> dengan V adalah potensial membran saraf (mV). Kecepatan produksi $IP_3 = 0,8 \mu M/s$. Neuron dirangsang dengan arus $10 \mu A/cm^2$ selama 10 detik. Panah menunjukkan akhir periode	

	stimulasi. Inset menggambarkan segmen waktu kecil dari penembakan neuron. (Nadkarni dan Jung, 2003)	61
Gambar 4.13	Panel atas potensi membrane. Stimulasi dihentikan setelah 10 detik (lihat panah). Tingkat produksi IP_3 $1,5 \mu M/s$. Neuronal spiking dengan frekuensi sekitar 90 Hz. (Nadkarnai dan Jung, 2004)	61
Gambar B.1	Frekuensi rata-rata <i>spike</i> 0,50 Hz	74
Gambar B.2	Frekuensi rata-rata <i>spike</i> 1,00 Hz	75
Gambar B.3	Frekuensi rata-rata <i>spike</i> 2,00 Hz	76
Gambar B.4	Pengaruh frekuensi rata-rata <i>spike</i> (a) 2.00 Hz, (b) 1.00 Hz, (c) 0,50 Hz	77



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
 YOGYAKARTA

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Parameter dan Simbol yang Digunakan pada Penelitian Ini ...	71
Lampiran 2.	Hasil Simulasi Pengaruh Frekuensi rata-rata <i>spike</i> pada Perambatan Gelombang Kalsium	74
Lampiran 3.	Listing Program	78
Lampiran 4.	Analisa Matematika Perbandingan Model Li-Rinzel oleh Stimberg dkk (2017) dan Suhita dan Jung (2003)	83
Lampiran 5.	<i>Curriculum vitae</i>	87



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Allah SWT. telah menciptakan bumi, langit dan segala isinya dengan berbagai misteri di baliknya. Dia-lah Sang *Khaliq*, dengan segala kekuasaan dan kehendak-Nya, Dia pula lah yang Maha Mengetahui atas segala misteri yang ada dibalik ciptaan-Nya. Akan tetapi, manusia sebagai makhluk unggul di bumi ini, adalah tugas kita untuk senantiasa mempelajari gejala-gejala alam yang telah ada, membongkar ilmu pengetahuan melalui tanda-tanda, pola-pola, hukum-hukum alam atau *sunnatullah* yang berlaku. Allah SWT berfirman dalam surat Ali Imran ayat 190-191:

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لآيَاتٍ لِّأُولِي الْأَلْبَابِ . الَّذِينَ يَذْكُرُونَ
اللَّهَ قِيَامًا وَقُعُودًا وَعَلَىٰ جُنُوبِهِمْ وَيَتَفَكَّرُونَ فِي خَلْقِ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ رَبَّنَا مَا خَلَقْتَ هَذَا بَطْلًا
سُبْحَانَكَ فَقِنَا عَذَابَ النَّارِ

“*Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, dan silih bergantinya malam dan siang terdapat tanda-tanda bagi orang-orang yang berakal (ulul albab). (yaitu) orang-orang yang mengingat Allah sambil berdiri atau duduk atau dalam keadan berbaring dan mereka memikirkan tentang penciptaan langit dan bumi (seraya berkata): “Ya Tuhan kami, tiadalah Engkau menciptakan ini dengan sia-sia, Maha Suci Engkau, maka peliharalah kami dari siksa”*”

Tafakkur atau berpikir yang benar akan mengantarkan pada kesimpulan bahwa Allah menciptakan sesuatu tidak ada yang sia-sia (Muchlisin, 2019). Manusia dibekali kelebihan berupa kecerdasan untuk berpikir. Akal menjadi salah satu perhatian Al-Qur'an dalam menjelaskan sifat-sifat manusia, dan disebutkan tidak kurang dari 49 kali (Suadu, 2018). Dalam sebuah data penelitian yang menunjukkan perbandingan otak manusia dengan beberapa jenis mamalia, diketahui bahwa otak manusia memiliki ukuran terbesar. Kajian tentang otak adalah belantara ilmu tanpa batas. Di situlah terletak misteri terbesar Allah SWT (Ikrar, 2015). Dewasa ini telah berkembang suatu cabang ilmu pengetahuan baru yang mencoba mengungkap misteri otak, yaitu neurosains.

Para ahli di dunia telah mengembangkan dan mendorong kemajuan neurosains dengan begitu pesatnya, sehingga menjadikan neurosains menjadi ilmu modern dan ilmu masa depan, yang secara nyata bisa berimplikasi sangat luas terhadap kehidupan umat manusia. Prinsip-prinsip dasar neurosains, dimaksudkan untuk memberikan pemahaman yang sangat mendasar tentang cara kerja sistem saraf manusia. Neurosains adalah bidang yang mempelajari secara khusus sistem saraf dalam tubuh makhluk hidup. Para ahli neurosains menggunakan berbagai alat dalam menajamkan penelitian dan ketepatan, untuk memahami sistem saraf. Berdasarkan penelitian tersebut, ilmuwan neurosains merumuskan bagaimana sistem saraf berkembang, beroperasi secara normal atau sehat, demikian pula kegagalan fungsi saraf dalam berbagai kasus penyakit neurologis atau kejiwaan (Ikrar, 2015).

Sistem saraf dibangun oleh dua jenis sel, yaitu sel neuron, yang secara langsung terlibat dalam transmisi elektrik dan pemrosesan informasi, serta sel glia. Jumlah sel glia melebihi sel neuron, dimana kedua jenis sel tersebut menempati ruang dalam jaringan saraf. Tipe sel glia yang utama pada sistem saraf pusat (SSP) adalah *astrocyte* dan *oligodendrocyte*, sedangkan pada sistem saraf tepi (SST) terdapat *schwann cell*, *enteric glial cell* dan *satellite cell* (Jessen, 2004).

Sel glia yang paling banyak dipelajari adalah *astrocyte*. Bertentangan dengan kepercayaan lama bahwa pemrosesan informasi di dalam otak adalah tugas neuron secara eksklusif, penelitian akhir-akhir ini mendemonstrasikan bahwa *astrocyte* mendengarkan komunikasi neuron, menjawab dan berbicara kembali ke neuron, sehingga memodulasi fungsi mereka (Nadkarni dan Jung, 2003). *Astrocyte* merupakan elemen pensinyalan dinamis yang mengintegrasikan input neuron, menunjukkan rangsangan kalsium, dan dapat memodulasi neuron yang berdekatan (Araque dkk, 2001).

Pemodelan komputasi adalah salah satu bagian penting dari penelitian neurosains modern (Abbott, 2008). Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia, Pemodelan adalah proses, cara, perbuatan membuat model, dimana model merupakan pola atau sesuatu yang akan dibuat atau dihasilkan. Pemodelan sel glia diperlukan untuk menjelaskan mekanisme kerja glia dalam peranannya yang ikut serta secara aktif dalam penyampaian atau transfer informasi dalam sel saraf / antar neuron. Sel neuron berperan aktif melalui transmisi sinyal elektrik, sedangkan sel glia memiliki peranan dalam memodulasi neuron

dengan perambatan gelombang kalsium. Terdapat beberapa simulator yang telah dibuat oleh *neuroscientist* sebagai sarana untuk membuat pemodelan dalam bidang neurosains. Meskipun terdapat bukti kuat bahwa sel glia dapat secara krusial mengatur jaringan saraf, sebagian besar simulator saraf yang tersedia mengabaikan kontribusi yang mungkin pada fisiologi neuron. Salah satu alasan untuk ini adalah bahwa model glia standar belum ditentukan, sehingga paket simulator secara umum tidak menyediakan model glia sebagai bahan dari *library* mereka. Meskipun beberapa simulator jaringan saraf yang terkenal memungkinkan untuk memperluas *library* bawaan mereka dengan model glia yang didefinisikan, hal ini pada umumnya tidak mudah karena memerlukan keahlian pemrograman khusus dalam bahasa tingkat rendah. Simulator Brian 2 menyediakan platform yang ideal untuk mensimulasikan fisiologi glia secara efisien, khususnya pengaruh *astrocyte* pada aktivitas saraf (Stimberg dkk, 2017).

Simulasi diperlukan untuk menggambarkan suatu sistem dengan model yang telah didefinisikan. Salah satu simulasi sel glia yang pernah dilakukan adalah pemodelan *astrocyte* oleh Marcel Stimberg dkk (2017). Simulasi ini menggunakan model neuron dan sinapsis sederhana untuk menstimulasi *astrocyte* serta menggunakan persamaan Li-Rinzel untuk memodelkannya. Pada sinapsis terdapat kenaikan konsentrasi neurotransmitter yang akan merangsang aktivasi reseptor *astrocyte* (Γ_A). Selanjutnya Γ_A akan merangsang produksi IP_3 , dimana konsentrasi IP_3 di dalam sel dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti *phospholipase C β* (J_β), $C\delta$ (J_δ) dan konstanta produksi IP_3 oleh

sumber stimulus eksogen (J_{ex}). Selanjutnya konsentrasi IP_3 akan mempengaruhi aktivasi reseptor IP_3 pada Retikulum Endoplasma (RE). Dalam hal ini, terdapat *gating variable* h yang bertanggungjawab terhadap membuka dan menutupnya *channel*. Penelitian lain yang dilakukan oleh Nadkarni dan Jung (2003) mendefinisikan aktivitas reseptor IP_3 pada RE sebagai fraksi aktivasi IP_3Rs (q). Reseptor IP_3 yang teraktivasi akan mempengaruhi pelepasan kalsium dari RE sebagai pemicu mekanisme CICR (*Calcium Induced Calcium Release*) yang mengatur konsentrasi kalsium *astrocyte*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian pemodelan *astrocyte* Li-Rinzel dengan stimulasi neurotransmitter sinapsis adalah sebagai berikut:

1. Bagaimanakah model *astrocyte* yang diaktivasi oleh neurotransmitter sinapsis antar neuron (Y_s) ?
2. Bagaimanakah dinamika fraksi aktivasi reseptor *astrocyte* (Γ_A) ?
3. Bagaimanakah pola produksi enzim oleh *phospholipase* $C\beta$ (J_β), $C\delta$ (J_δ) dan konstanta produksi IP_3 oleh sumber stimulus eksogen (J_{ex}) ?
4. Bagaimanakah dinamika IP_3 dalam perambatan gelombang kalsium?
5. Bagaimanakah dinamika fraksi dari aktivasi IP_3Rs (q) dan perbandingannya dengan *gating variable* (h) ?
6. Bagaimanakah pola fluks CICR (J_r), fluks kalsium bocor dari RE (J_l), dan pengambilan kalsium dari sitosol kembali ke RE dengan pompa ATP (J_p)?
7. Bagaimanakah mekanisme perambatan gelombang kalsium [Ca^{2+}] pada sel glia / *astrocyte*?

8. Bagaimanakah pengaruh frekuensi rata-rata *spike* pada perambatan gelombang kalsium ?

1.3 Tujuan Penelitian

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

1. Membuat model *astrocyte* yang diaktivasi oleh neurotransmitter sinapsis antar neuron (Y_s).
2. Menganalisis dinamika fraksi aktivasi reseptor *astrocyte* Γ_A .
3. Menentukan pola produksi enzim oleh *phospholipase C β* (J_β), *C δ* (J_δ) dan konstanta produksi IP_3 oleh sumber stimulus eksogen (J_{ex}).
4. Menganalisis dinamika IP_3 dalam perambatan gelombang kalsium.
5. Menganalisis dinamika variabel q dan membandingkannya dengan *gating variable* h .
6. Menganalisis pola fluks CICR (J_r), fluks kalsium bocor dari RE (J_l), dan pengambilan kalsium dari sitosol kembali ke RE dengan pompa ATP (J_p).
7. Menganalisis mekanisme perambatan gelombang kalsium $[Ca^{2+}]$ pada sel glia / *astrocyte*.
8. Menganalisis pengaruh frekuensi rata-rata *spike* pada perambatan gelombang kalsium.

1.4 Batasan Penelitian

Batasan penelitian dalam pemodelan *astrocyte* Li-Rinzel menggunakan stimulasi neurotransmitter sinapsis adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan dibuat dengan menggunakan simulator *Brian 2*.
2. Model neuron yang digunakan adalah model neuron sederhana.
3. Model sinapsis tidak melibatkan perubahan plastisitas sinapsis.
4. *Astrocyte* dimodelkan menggunakan persamaan Li-Rinzel.
5. Waktu *monitoring* adalah 30 detik.
6. Pemodelan tersusun atas 2 sel neuron dan 2 sel *astrocyte*.

1.5 Manfaat Penelitian

Beberapa manfaat yang diharapkan bisa didapatkan dari penelitian ini antara lain:

1. Memahami struktur pembentukan neurotransmitter sinapsis antar neuron yang dapat mengaktivasi *astrocyte*.
2. Memahami ketergantungan fraksi aktivasi reseptor *astrocyte* Γ_A terhadap konsentrasi neurotransmitter.
3. Memahami mekanisme produksi IP_3 yang dipengaruhi oleh enzim *phospholipase* $C\beta$ (J_β), $C\delta$ (J_δ) serta sumber stimulus eksogen (J_{ex}).
4. Memahami mekanisme dinamika IP_3 pada perambatan gelombang kalsium dalam sel.
5. Memahami konsep persamaan Li-Rinzel yang menggunakan *gating variable* h dan fraksi aktivasi IP_3Rs (q).
6. Memahami pola pembentukan gelombang kalsium yang dipengaruhi oleh fluks CICR (J_r), fluks kalsium bocor dari RE (J_l), dan pengambilan kalsium dari sitosol kembali ke RE dengan pompa ATP (J_p).

7. Memahami mekanisme perambatan gelombang kalsium [Ca^{2+}] pada sel glia / *astrocyte* akibat stimulasi neurotransmitter sinapsis.
8. Memahami aktivitas sel saraf pada frekuensi tertentu.
9. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi atau acuan penelitian selanjutnya yang merupakan salah satu bentuk kontribusi dalam pengembangan neurosains yang dapat diaplikasikan dalam pengembangan di berbagai bidang, seperti kedokteran, biologi modern, *Brain Supercomputer*, maupun psikologi melalui penelitian berkelanjutan.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang berjudul *Pemodelan Astrocyte Li-Rinzel dengan Stimulasi Neurotransmitter Sinapsis* dapat disimpulkan bahwa:

1. Model *astrocyte* yang diaktivasi oleh neurotransmitter sinapsis antar neuron (Y_s) telah berhasil disusun dengan menghubungkan 2 neuron menggunakan simulator Brian 2, menggunakan model neuron dan sinapsis sederhana. Di dalam sinapsis dihasilkan peningkatan konsentrasi neurotransmitter yang merangsang aktivitas sel glia (*astrocyte*).
2. Dinamika fraksi aktivasi reseptor *astrocyte* (Γ_A) bergantung pada konsentrasi neurotransmitter sinapsis (Y_s), ditandai dengan kenaikan fraksi Γ_A pada waktu (t) yang bersamaan dengan meningkatnya konsentrasi neurotransmitter (Y_s).
3. Produksi enzim oleh *phospholipase* $C\beta$ (J_β), $C\delta$ (J_δ) dan konstanta produksi IP_3 oleh sumber stimulus eksogen (J_{ex}) dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti fraksi aktivasi reseptor *astrocyte*, konsentrasi IP_3 , konsentrasi kalsium, dan berbagai parameter lain, yang meregulasi dinamika IP_3 secara *nonlinear*.
4. Produksi IP_3 dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti produksi enzim oleh *phospholipase* $C\beta$ (J_β), $C\delta$ (J_δ) dan konstanta produksi IP_3 oleh sumber stimulus eksogen (J_{ex}).

5. Dinamika fraksi aktivasi IP_3Rs (q) berpengaruh pada penyebaran konsentrasi kalsium melalui aktivasi reseptor IP_3 . Dinamika variabel q dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti konsentrasi IP_3 , konsentrasi kalsium, dan beberapa parameter lain. Hasil simulasi dan analisa matematika menunjukkan bahwa bahwa variabel q (fraksi aktivasi IP_3Rs) sesuai dengan *gating variable* (h).
6. Fluks CICR (J_r), fluks kalsium bocor dari RE (J_i), dan pengambilan kalsium dari sitosol kembali ke RE dengan pompa ATP (J_p) merupakan mekanisme yang mengatur konsentrasi gelombang kalsium, dengan J_r sebagai mekanisme yang paling dominan berpengaruh terhadap pembentukan gelombang kalsium karena menghasilkan penyebaran konsentrasi paling tinggi.
7. Mekanisme perambatan gelombang kalsium menjelaskan rata-rata konsentrasi kalsium sitosolik sel. Simulasi dengan frekuensi (frekuensi rata-rata *spike*) 0,5 Hz menunjukkan bahwa konsentrasi kalsium mengalami peningkatan pada waktu tertentu, kemudian menurun dan meningkat lagi tetapi tidak mencapai konsentrasi sebelumnya, dan mengalami fluktuasi yang cenderung pada kisaran $C = 0,25 - 0,50 \mu M$, sesuai dengan pola fraksi aktivasi IP_3Rs (q).
8. Frekuensi lebih tinggi menghasilkan simulasi gelombang kalsium dengan konsentrasi yang cenderung lebih tinggi, dikarenakan pengulangan aktivitas *spike* lebih banyak, pola peningkatan konsentrasi neurotransmitter lebih

banyak, sehingga lebih sering menstimulasi fraksi aktivasi reseptor *astrocyte*, yang selanjutnya akan mempengaruhi konsentrasi kalsium.

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. Variasi frekuensi rata-rata *spike* (frekuensi rata-rata *spike*) ditambah untuk rentang frekuensi gelombang lainnya, seperti theta (4 - 8 Hz), alpha (8 - 13 Hz), beta (13 – 30 Hz), dan gamma (35 – 45 Hz).
2. Model neuron dan sinapsis yang digunakan untuk menstimulasi sel glia didefinisikan dengan model lain.
3. Variasi kondisi awal ditambah untuk mengetahui perbedaan pola yang dihasilkan.
4. Pemodelan jaringan *astrocyte* dengan *gap junction*.
5. Pemodelan interaksi antara jaringan neuron dengan jaringan *astrocyte*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbott, L. F. (2008). Theoretical Neuroscience Rising. *Neuron* 60, 489-495.
- Agulhon, C., Petravicz, J., McMullen, A. B., Sweger, E. J., Minton, S. K., Taves, S. R., Casper, K. B., Fiacco, T. A., McCarthy, K. D. (2008). What Is the Role of *Astrocyte* Calcium in Neurophysiology? *Neuron* 59, 932-946.
- Akbar, A. (2014, 12 14). *Hidayatullah.com*. Diases pada 22 Oktober dari: <https://www.hidayatullah.com/kajian/oase-iman/read/2014/12/14/35062/tujuh-perumpamaan-orang-mukmin.html>
- Araque, A., Carmignoto, G., dan Haydon, P. G. (2001). Dynamic Signaling Between *Astrocytes* and Neurons. *Annu. Rev. Physiol.* , 63: 795-813.
- Berridge, M. J., Lipp, P., dan Bootman, D. (2000). The Versatility And Universality of Calcium Signalling. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 11-21.
- Brette, R., Rudolph, M., Davison, A. P., El Boustani, S., Carnevale, T., Hines, M., Beeman, D., Bower, J. M., Diesman, M., Morrison, A., Goodman, P. H., Harris, F.C., Jr., Zirpe, M., Natschläger, T., Pecevski, D., Ermentrout, B., Djurfeldt, M., Lansner, A., Rochel, O., Vieville, T., Muller, E., Destexhe, A. (2007). Simulation of Networks of Spiking Neurons: A Review of Tools and Strategies. *J Comput Neurosci*, 23 (3): 349-398.
- Brian authors. (2019, 10 20). *Brian 2 Documentation*. Retrieved from BRIAN: <https://brian2.readthedocs.io/en/stable/index.html>
- De Pitta, M., Brunel, N., dan Volterra, A. (2016). *Astrocytes*: Orchestrating Synaptic Plasticity. *Neuroscience*, 26, 323:43-61.
- De Pitta, M., Goldberg, M., Volman, V., Berry, H., dan Ben-Jacob, E. (2009). Glutamate Regulation of Calcium and IP₃ Oscillating and Pulsating Dynamics in *Astrocytes*. *J Biol Phys* 35, 383-411.
- De Pitta, M., Volman, V., Berry, H., Parpura, V., Volterra, A., dan Ben-Jacob, E. (2012). Computational Quest for Understanding the Role of *Astrocyte* Signaling in Synaptic Transmission. *frontiers in Computational Neuroscience*, (6):98.
- De Young, G. W., dan Keizer, J. (1992). A Single-Pool Inositol 1,4,5-Triphosphate-Receptor-Based Model Agonist-Stimulated Oscillation in Ca²⁺ Concentration. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 9895-9899.
- Fitzgerald, M. J., Gruener, G., dan Mtui, E. (2012). *Clinical Neuroanatomy and Neuroscience Sixth Edition*. Saunders Elsevier.
- Goldberg, M., De Pitta, M., Volman, V., Berry, H., dan Ben-Jacob, E. (2010). Nonlinear Gapjunctions Enable Long-Distance Propagation of Pulsating

- Calcium Waves in Astrocyte Networks. *PLoS Computational Biology* (6), e1000909.
- Goodman, D. F. (2010). Code Generation: A Strategy for Neural Network Simulators. *Neuroinform*, (8):183-196.
- Goodman, D. F., dan Brette, R. (2009). The Brian Simulator. *frontier in Neuroscience*, (3):192-197.
- Goodman, D., dan Brette, R. (2008). Brian: A Simulator for Spiking Neural Networks in Python. *frontiers in Neuroinformatics*, (2):5.
- Hasyim, M. F. (2019). *Pemodelan Jaringan Saraf Hodgkin-Huxley (HH) Neuron dengan Short-Term Plasticity (STP) menggunakan Simulator Brian2*. Yogyakarta: Skripsi. UIN Sunan Kalijaga.
- Haydon, P. G. (2001). Glia : Listening and Talking to the Synapse. *Nature Reviews Vol. 2*, 185-193.
- Hofer, T., Venance, L., dan Giaume, C. (2002). Control and Plasticity of Intercellular Calcium Waves in Astrocytes : A Modelling Approach. *The Journal of Neuroscience*, 22 (12) : 4850-4859.
- Ikrar, T. (2015). *Ilmu Neurosains Modern*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Jessen, K. R. (2004). Cells in Focus. *The International of Biochemistry dan Cell Biology* 36, 1861-1867.
- Kager, H., Wadman, W. J., dan Somjen, G. G. (2000). Simulated Seizures and Spreading Depression in a Neuron Model Incorporating Interstitial Space and Ion Concentrations. *Journal of Neurophysiology* 84, 495-512.
- Kager, H., Wadman, W. J., dan Somjen, G. G. (2002). Conditions for the Triggering of Spreading Depression Studied with Computer simulations. *Journal of Neurophysiology* 88, 2700-2712.
- Kager, H., Wadman, W. J., dan Somjen, G. G. (2007). Seizure-like afterdischarge simulated in a model neuron. *Journal of Computational Neuroscience* 22, 105-128.
- Kalat, J. W. (2009). *Biological Psychology, Tenth Edition*. Wadsworth Cengage Learning.
- Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan.. KBBi Daring. Diakses pada 16 November 2019 dari: kbbi.kemdikbud.go.id
- Li, Y.-X., dan Rinzel, J. (1994). Equations for InsP3 Receptor-mediated $[Ca^{2+}]_i$ Oscillations Derived from a Detailed Kinetic Model : A Hodgkin-Huxley Like Formalism. *J. theor. Biol.* 166, 461-473.

- Li, Y.-X., Rinzel, J., Keizer, J., dan Stojilkovic, S. S. (1994). Calcium Oscillations in Pituitary Gonadotrophs : Comparison of Experiment and Theory. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA Vol. 91*, 58-62.
- Lodish, H., Berk, A., Kalsner, C. A., Krieger, M., Bretscher, A., Ploegh, H., Amon, A., Martin, K. C. (2016). *Molecular Cell Biology Eight Edition*. New York: W. H. Freeman and Company.
- Maulida, L. (2017, 05 04). *Hadits dan Sains Jelaskan Kerjasama Organ Tubuh dalam Penyembuhan*. Diakses pada 22 Oktober 2019 dari: <https://techno.okezone.com/read/2017/05/03/56/1682407/hadits-dan-sains-jelaskan-kerjasama-organ-tubuh-dalam-penyembuhan>
- Muchlisin. (2019, 8 8). *Surat Ali Imran Ayat 190-191, Arab Latin, Arti, Tafsir dan Kandungan*. Diakses pada 21 Oktober 2019 dari: <https://bersamadakwah.net/surat-ali-imran-ayat-190-191/>
- Nadkarni, S., dan Jung, P. (2003, Desember 31). 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.
- Nimmerjahn, A. (2009). Astrocytes going live: advances and challenges. *J Physiol* 587.8 : 1639–1647.
- Parpura, V., dan Haydon, G. P. (2000). Physiological Astrocytic Calcium Levels Stimulate Glutamate Release to Modulate Adjacent Neurons. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (97)*, 8629-8634.
- Poskanzer, K. E., dan Yuste, R. (2016). Astrocytes Regulate Cortical State Switching in Vivo . *Proceedings of the National Academy of Sciences*, E2675–E2684.
- Sari, E. M. (2014, 10). *Otak, Akal Dan Al-Qur'an*. Diakses pada 22 Oktober 2019 dari: <http://ekamustikasarii.blogspot.com/2014/10/otak-akal-dan-al-quran.html>
- 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.
- Stimberg, M., Brette, R., dan Goodman, D. F. (2019). Brian 2, an Intuitive and Efficient Neural Simulator. *eLife (8)*, e47314.
- Stimberg, M., Goodman, D. F., Benichoux, V., dan Brette, R. (2014). Equation-Oriented Specification of Neural Models for Simulations. *frontier in Neuroinformatics*, (8).

- Stimberg, M., Goodman, D. F., Brette, R., dan De Pitta, M. (2017). Modelling neuron-glia interactions with the Brian 2 simulator. 1-33.
- Suadu, F. (2018). *Manusia Unggul Neurosains dan Alqur'an*. Jakarta: PT. Penjuru Ilmu Sejati.
- Tembesi, K. (2014, 10). *Kebenaran Ilmiah Hadits Nabi Muhammad Saw*. Retrieved from <https://www.kholistembesi.com/2014/10/kebenaran-ilmiah-hadits-nabi-muhammad.html>
- 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.
- Young, G. W., dan Keizer, J. (1992). A Single-pool Inositol 1,4,5-Triphosphate-Receptor-Based Model for Agonist-Stimulated Oscillation in Ca^{2+} Concentration. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA Vol. 89*, 9895-9899.
- Yulianto, E., Susanto, A., Widodo, T. S., dan Wibowo, S. (2013). Spektrum Frekuensi Sinyal EEG Terhadap Pergerakan Motorik dan Imajinasi Pergerakan Motorik. *Forum Teknik Vol. 35*, 21-32

