

**PEMODELAN JARINGAN SARAF HODGKIN-HUXLEY (HH) NEURON  
DENGAN *SHORT-TERM PLASTICITY* (STP) MENGGUNAKAN  
SIMULATOR BRIAN2**

**TUGAS AKHIR**

Untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat Sarjana S-1

Program Studi Fisika



diajukan oleh :

Mochamad Fu'ad Hasyim

14620028

**PROGRAM STUDI FISIKA**

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**

**UIN 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-314/Un.02/DST/PP.00.9/01/2019

Tugas Akhir dengan judul : Pemodelan Jaringan Saraf Hodgkin-Huxley (HH) Neuron dengan Short-term Plasticity (STP) Menggunakan Simulator Brian2.

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : MOCHAMAD FU'AD HASYIM  
Nomor Induk Mahasiswa : 14620028  
Telah diujikan pada : Rabu, 16 Januari 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 Yuniaty, S.Si., M.Si  
NIP. 19830614 200901 2 009

Penguji I

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

Penguji II

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

Yogyakarta, 16 Januari 2019

UIN Sunan Kalijaga

Fakultas Sains dan Teknologi

DEKAN



Dr. Murtono, M.Si.

NIP. 19691213 200003 1 001

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Mochamad Fu'ad Hasyim

NIM : 14620028

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul "**Pemodelan Jaringan Saraf Hodgkin-Huxley (HH) Neuron dengan Short-term Plasticity (STP) Menggunakan Simulator Brian2**" 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, 26 Januari 2019

Penulis



Mochamad Fu'ad Hasyim  
NIM. 14620028



## **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 : MOCHAMAD FUAD HASYIM

NIM : 14620028

Judul Skripsi : PEMODELAN JARINGAN SARAF HODGKIN-HUXLEY (HH) NEURON DENGAN  
SHORT-TERM PLASTICITY (STP) MENGGUNAKAN SIMULATOR BRIAN2

sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Pendidikan Kimia Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Pendidikan Kimia

Dengan ini kami mengharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapan terima kasih.

*Wassalamu'alaikum wr. wb.*

Yogyakarta, 2 Januari 2019

Pembimbing

Anis Yunfati, M.Si, Ph.D.

NIP. 19830614 200901 2 009

## **MOTTO DAN PERSEMBAHAN**

### **MOTTO**

"Perlu jalan memutar untuk mendapatkan sesuatu yang lebih berharga dari pada tujuan kita. Sesuatu yang tidak dapat dilihat dengan mata."

### **PERSEMBAHAN**

- ❖ Allah SWT
- ❖ Nabi Muhammad SAW
- ❖ Keluarga tercinta
- ❖ Prodi Fisika
- ❖ Sahabat Fisika
- ❖ Almamater

## KATA PENGANTAR

السَّلَامُ عَلَيْكُمْ وَرَحْمَةُ اللَّهِ وَبَرَكَاتُهُ

*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 Jaringan Saraf Hodgkin-Huxley (HH) Neuron dengan Short-term Plasticity (STP) Menggunakan Simulator Brian2*” dengan lancar dan penuh hikmah. Penelitian ini bertujuan untuk membuat suatu replika atau tiruan dari objek yang mana objek tersebut merupakan ciptaan Allah SWT yang sempurna tanpa cacat. Objek pada penelitian ini adalah jaringan saraf. Diharapkan dari hasil pemodelan tersebut dapat membawa kita pada titik terang tentang bagaimana sebenarnya mekanisme kinerja otak manusia. Meskipun, tentunya pemodelan yang dibuat masih jauh dan bahkan tidak akan mendekati realita, akan tetapi hendaklah hasil penelitian ini dapat mengantarkan kita mengenal kebesaran Allah SWT melalui ciptaan-Nya. Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada seluruh pihak yang mendungkung 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;
2. Ibu Asih Melati, M. Sc. selaku Ibu dan sebagai Dosen Penasehat Akademik;
3. 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;

4. Bapak Cecilia Yanuarif, M. Si. dan Ibu Dr. Nita Handayani selaku Dosen Pengaji yang telah memberikan arahannya berupa kritik dan saran sehingga menjadi penyempurna penelitian ini;
5. Dosen Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga yang telah memberikan ilmu dan pengalamannya kepada penulis;
6. Seluruh staf dan karyawan bagian Tata Usaha Fakultas Sains dan Teknologi;
7. Bapak, Ibu, Kakak dan Istrinya, serta kedua Adikku yang memberikan semangat, ridho, dan doanya;
8. Seluruh teman-teman Fisika angkatan 2014 atas dukungan dan ilmu yang dibagi, rekan satu bidang minat Shella Aisyah Diva, dan Dya Nida A'yunin atas semangatnya, teman-teman sholawat khususnya Yadal Fataa, serta Asking Alexandria atas lagu "*Alone in a Room*" yang senantiasa menemani dalam pengerjaan Tugas Akhir.

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 Januari 2019

Penulis

**PEMODELAN JARINGAN SARAF HODGKIN-HUXLEY (HH) NEURON  
DENGAN *SHORT-TERM PLASTICITY* (STP) MENGGUNAKAN  
SIMULATOR BRIAN2**

Mochamad Fu'ad Hasyim  
14620028

**INTISARI**

Penelitian pemodelan jaringan saraf Hodgkin-Huxley (HH) neuron dengan *Short-term Plasticity* (STP) menggunakan simulator Brian2 telah dilakukan. Jaringan saraf yang dimodelkan memiliki sub grup neuron eksitaori dan inhibitori dengan jumlah neuron masing-masing 40 dan 10 neuron. Neuron-neuron tersebut dihubungkan secara acak dengan variasi probabilitas konektivitas jaringannya. Variasi pertama, nilai probabilitas konektivitas neuron eksitatori ( $pe$ ) divariasi dari 0.05 s.d. 0.7 dengan nilai probabilitas konektivitas neuron inhibitori ( $pi$ ) dibuat tetap sebesar 0.2. Variasi kedua, nilai  $pi$  divariasi dari 0.2 s.d. 0.9 dengan nilai  $pe$  dibuat tetap sebesar 0.05. Pada setiap variasi tersebut, untuk masing nilai  $pe$  dan  $pi$  tinggi maka masing-masing koneksi antar neuron semakin banyak dan sinapsis yang terbentuk juga semakin banyak. Selanjutnya, semakin besar nilai  $pe$  dengan nilai  $pi$  lebih kecil dari  $pe$ , maka jaringan saraf menjadi semakin sinkron. Semakin besar nilai  $pe$  dan  $pi$  menyebabkan nilai konduktansi post-sinapsisnya semakin besar dan menyebabkan neuron mengalami *spike* pada waktu yang hampir bersamaan. Hal ini dapat dilihat dari simulasi dinamika potensial membran. Sementara itu, pola transmisi sinapsisnya dipengaruhi oleh terjadinya *spike* dari neuron. Dari pemodelan jaringan saraf ini didapatkan hasil nilai rata-rata frekuensi jaringan saraf sebesar 13.44 Hz.

**Kata kunci :** Hodgkin-Huxley (HH) neuron, *Short-term Plasticity* (STP), simulator Brian2, probabilitas konektivitas neuron

**MODELING NEURAL NETWORK WITH HODGKIN-HUXLEY (HH)  
NEURON MODEL AND SHORT-TERM PLASTICITY (STP) USING  
BRIAN2 SIMULATOR**

Mochamad Fu'ad Hasyim  
14620028

**ABSTRACT**

The research on modeling neural network with Hodgkin-Huxley (HH) neuron model and short-time plasticity (STP) using brian2 simulator has been done. Neural network modeled has subgroup of 40 excitatory and 10 inhibitory neurons. These neurons are connected randomly with the probability of network connectivity. First, the value of probability connectivity of excitatory neurons ( $pe$ ) is varied from 0.05 to 0.7 with fixed value of probability connectivity of inhibitory neurons ( $pi$ ) at 0.2. Second, the value of  $pi$  is varied 0.2 to 0.9 with fixed value of  $pe$  0.05. In these variations, the higher each value of  $pe$  and  $pi$ , the more connectivity and synapses are formed. Furthermore, the higher value of  $pe$  with smaller  $pi$ , the neural network becomes more synchronous. The greater the value of  $pe$  and  $pi$  causes the greater value of the post-synaptic conductance and the neurons spike at almost the same time. This can be seen from the simulation of membrane potential dynamics. Meanwhile, the pattern of synaptic transmission is influenced by the occurrence of spikes from neurons. From this modeling, the average value of neural network frequency is 13.44 Hz.

**Keyword:** Hodgkin-Huxley (HH) neuron, *Short-term Plasticity (STP)*, Brian2 simulator, probability connectivity of neurons.

## DAFTAR ISI

SAMPUL DEPAN .....	i
PENGESAHAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR .....	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI .....	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN .....	v
KATA PENGANTAR .....	vi
INTISARI.....	viii
ABSTRACT .....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xvi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Penelitian .....	6
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Studi Pustaka .....	8
2.2 Landasan Teori .....	12
2.2.1 Neuron .....	12
1. Anatomi Neuron .....	13
2. Jenis-jenis Neuron .....	15
2.2.2 Impuls Saraf .....	18
1. Kesetimbangan dan Permeabilitas Selektif .....	18
2. Permulaan Potensial Aksi dan Aktivasi Gerbang Na+ .....	20
3. Akhir Potensial Aksi: In-aktivasi Gerbang Na+ dan Aktivasi Gerbang K+ .....	22
4. Sifat Potensial Aksi .....	22
2.2.3 Sinkronisasi Jaringan Saraf .....	23
1. Rentang Frekuensi .....	25

2. Keadaan Sinkron dan Tidak Sinkron.....	26
2.2.4 Model Neuron Hodgkin-Huxley (HH) .....	29
1. Asumsi Dasar.....	29
2. Keadaan Aktivasi dan Inaktivasi .....	31
3. Model Neuron Hodgkin-Huxley.....	33
2.2.5 Sinapsis.....	34
1. Struktur Sinapsis.....	35
2. Jenis Sinapsis.....	36
3. Potensial Neuron Post-sinapsis.....	38
2.2.6 Short-term Plasticity (STP) .....	40
2.2.7 Simulator Brian2 .....	42
1. Model dan Grup Neuron.....	43
2. Sinapsis.....	45
2.2.8 Ilmu Allah dalam Perspektif Al-Qur'an .....	46
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	51
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	51
3.2 Alat dan Bahan Penelitian .....	51
3.3 Tahapan Penelitian .....	51
3.3.1 Menentukan Parameter yang Digunakan.....	52
3.3.2 Membuat Pemodelan Jaringan Saraf di Simulator Brian2 .....	52
1. Instalasi Perangkat Lunak Simulator Brian2 .....	53
2. Penulisan Program.....	56
3. Menjalankan Simulasi .....	62
3.3.3 Analisis Data.....	63
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	64
4.1 Hasil Simulasi.....	64
4.1.1 Bentuk Konektivitas dan Sinapsis .....	64
4.1.2 Aktivitas Sinkronisasi Spike.....	69
4.1.3 Pola Konduktansi Post-sinapsis.....	70
4.1.4 Dinamika Potensial Membran .....	71
4.1.5 Pola Transmisi Sinapsis.....	72
4.1.6 Frekuensi Sinkronisasi.....	72
4.2 Pembahasan .....	72
4.2.1 Bentuk Konektivitas dan Sinapsis .....	72

4.2.2 Aktivitas Sinkronisasi Spike.....	75
4.2.3 Pola Konduktansi Post-sinapsis.....	76
4.2.4 Dinamika Potensial Membran .....	78
4.2.5 Pola Transmisi Sinapsis.....	79
4.2.6 Frekuensi Sinkronisasi.....	81
4.2.7 Integrasi Interkoneksi Luasnya Ilmu Allah .....	83
BAB V PENUTUP.....	85
5.1 Kesimpulan.....	85
5.2 Saran .....	86
DAFTAR PUSTAKA .....	88
LAMPIRAN .....	92

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Anatomi neuron (Kriesel, 2007) .....	13
<b>Gambar 2.2</b> Neuron unipolar (Ebneshahidi, 2006).....	17
<b>Gambar 2.3</b> Neuron bipolar (Ebneshahidi, 2006).....	17
<b>Gambar 2.4</b> Neuron multipolar (Ebneshahidi, 2006) .....	18
<b>Gambar 2.5</b> Perbedaan konsentrasi ion di dalam dan di luar sel (www.socratic.org) .....	19
<b>Gambar 2.6</b> Potensial aksi (Ruben, 2001) .....	21
<b>Gambar 2.7</b> Plot dua eksitatori neuron (E) dan satu inhibitori neuron (I) dalam keadaan yang tidak sinkron (Golomb, 2001).....	27
<b>Gambar 2.8</b> Raster plot neuron inhibitori yang sinkron (Golomb, 2001) .....	28
<b>Gambar 2.9</b> Keadaan bursting yang sinkron (Golomb, 2001).....	28
<b>Gambar 2.10</b> Rangkaian listrik potongan kecil akson cumi-cumi (Koch, 2004)	30
<b>Gambar 2.11</b> Transmisi informasi melalui sinapsis (www.khanacademy.org)...	35
<b>Gambar 2.12</b> Sinapsis (www.khanacademy.org) .....	35
<b>Gambar 2.13</b> Proses transmisi informasi melalui chemical synapses (Kappen, 2008).....	37
<b>Gambar 2.14</b> Electrical synapses (www.khanacademy.org) .....	38
<b>Gambar 2.15</b> Rangkaian listrik untuk tegangan bergantung pada sinapsis (Kappen, 2008) .....	39
<b>Gambar 3.1</b> Blok diagram tahapan penelitian .....	52
<b>Gambar 3.2</b> Tahapan pembuatan pemodelan jaringan saraf .....	53
<b>Gambar 3.3</b> Tahapan instalasi simulator Brian2 .....	54
<b>Gambar 3.4</b> Algoritma penulisan program .....	58
<b>Gambar 4.1</b> (a) Bentuk konektivitas subgrup neuron eksitatori pada pe 0.05 dan pi 0.2 .....	64
<b>Gambar 4.1</b> (b) Bentuk sinapsis subgrup neuron eksitatori pada pe 0.05 dan pi 0.2 .....	64
<b>Gambar 4.2</b> (a) Bentuk konektivitas subgrup neuron inhibitori pada pe 0.05 dan pi 0.2 .....	65
<b>Gambar 4.2</b> (b) Bentuk sinapsis subgrup neuron inhibitori pada pe 0.05 dan pi 0.2 .....	65
<b>Gambar 4.3</b> (a) Bentuk konektivitas subgrup neuron eksitatori yang terhubung seluruhnya .....	67

<b>Gambar 4.4</b> (a) Bentuk koneksi subgrup neuron inhibitori yang terhubung seluruhnya .....	68
<b>Gambar 4.4</b> (b) Bentuk sinapsis subgrup neuron inhibitory yang terhubung seluruhnya .....	68
<b>Gambar 4.5</b> Aktivitas sinkronisasi spike pada variasi $\mu_e$ 0.7 dan $\mu_i$ 0.2 ..... <b>Error!</b> <b>Bookmark not defined.</b>	
<b>Gambar 4.6</b> Aktivitas sinkronisasi spike pada variasi $\mu_e$ 0.05 dan $\mu_i$ 0.9 .....	69
<b>Gambar 4.7</b> Pola konduktansi post-sinapsis pada variasi $\mu_e$ 0.7 dan $\mu_i$ 0.2 .....	70
<b>Gambar 4.8</b> Pola konduktansi post-sinapsis pada variasi $\mu_e$ 0.05 dan $\mu_i$ 0.9 .....	70
<b>Gambar 4.9</b> Dinamika potensial membran pada variasi $\mu_e$ 0.7 dan $\mu_i$ 0.2. (a) Neuron eksitatori dan (b) neuron inhibitori .....	71
<b>Gambar 4.10</b> Dinamika potensial membran pada variasi $\mu_e$ 0.05 dan $\mu_i$ 0.9. (a) Neuron eksitatori dan (b) inhibitori .....	71
<b>Gambar 4.11</b> Pola transmisi sinapsis (STP) neuron ke-0 pada variasi $\mu_e$ 0.7 dan $\mu_i$ 0.2 .....	72

## **DAFTAR TABEL**

<b>Tabel 2.1</b> Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya.....	10
<b>Tabel 2.2</b> Konstanta yang tersedia di Brian2.....	44
<b>Tabel 3.1</b> Daftar alat penelitian .....	51



## DAFTAR LAMPIRAN

A. Program Pemodelan Jaringan Saraf HH Neuron dengan STP .....	92
B. Konstanta yang Digunakan pada Penelitian .....	96
C. Hasil Simulasi Berdasarkan Variasi Probabilitas Konektivitas Neuron .....	97
<b>Gambar C.1</b> Probabilitas pe 0.05 .....	97
<b>Gambar C.2</b> Probabilitas pe 0.1 .....	97
<b>Gambar C.3</b> Probabilitas pe 0.2 .....	98
<b>Gambar C.4</b> Probabilitas pe 0.3 .....	98
<b>Gambar C.5</b> Probabilitas pe 0.4 .....	99
<b>Gambar C.6</b> Probabilitas pe 0.5 .....	99
<b>Gambar C.7</b> Probabilitas pe 0.6 .....	100
<b>Gambar C.8</b> Probabilitas pe 0.7 .....	100
<b>Gambar C.9</b> Probabilitas pi 0.3 .....	101
<b>Gambar C.10</b> Probabilitas pi 0.4 .....	101
<b>Gambar C.11</b> Probabilitas pi 0.5 .....	102
<b>Gambar C.12</b> Probabilitas pi 0.6 .....	102
<b>Gambar C.13</b> Probabilitas pi 0.7 .....	103
<b>Gambar C.14</b> Probabilitas pi 0.8 .....	103
<b>Gambar C.15</b> Probabilitas pi 0.9 .....	104
D. Waktu <i>Spike</i> Neuron pada Probabilitas Konektivitas pe 0.7 pi 0.2 .....	105
<b>Tabel D.1</b> Data waktu <i>spike</i> neuron .....	105
<b>Tabel D.2</b> Data delta waktu spike neuron .....	107
<b>Tabel D.3</b> Data frekuensi neuron .....	110

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Tubuh manusia memiliki sistem saraf yang melakukan aktivitas yang sangat komplek. Sistem saraf pusat misalnya, membawa informasi dari luar tubuh melalui saraf sensorik dan mengirimkannya ke organ tubuh lain sehingga dapat melakukan respon. Proses yang komplek tersebut terjadi hanya dalam orde milidetik sampai menit. Sistem saraf pusat ini tidak lain adalah otak dan sumsum tulang belakang.

Otak manusia terdiri dari milyaran neuron yang saling terhubung satu sama lain. Neuron dapat didefinisikan sebagai sel saraf (Hall, 1998) yang merupakan unit terkecil penyusun sistem saraf. Bagian-bagian neuron antara lain dendrit, badan sel (sel soma), akson, sel schwann, selubung mielin, dan nodus ranvier. Setiap bagian tersebut memiliki fungsi masing-masing dalam mengkomunikasikan informasi.

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 raksasa cumi-cumi. 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 (Nelson; Siciliano, 2012).

Neuron dapat saling berkomunikasi satu sama lain dengan pulsa-pulsa listrik yang disebut potensial aksi atau *spike* (Gerstner, 2009; Ruben, 2001). Transfer informasi dari neuron satu (*pre-synaptic neuron*) ke neuron yang lain (*post-synaptic neuron*) terjadi di ujung akson dan dendrit. Keduanya tidak saling terhubung secara langsung, akan tetapi dihubungkan oleh sinapsis. Perkiraan jumlah sinapsis pada masing-masing neuron adalah sekitar 2.500-15.000 koneksi. Jika neuron sumber mengalami *spike*, maka *neurotransmitter* akan mengantarkan impuls ke neuron target melalui sinapsis.

Komunikasi antar satu neuron dengan neuron yang lain menunjukkan aktivitas yang bervariasi dan bersifat dinamis (Lu dkk, 2008) dimana dinamika tersebut dapat mengantarkan kita mengetahui mekanisme kerja otak manusia. Beberapa penelitian telah dilakukan seperti penelitian yang dilakukan oleh Kitajima dan Kurts (2005) yang mengkaji efek dari gangguan (*noise*) dan masukan dari luar (*external input*) pada neuron yang terhubung secara global menunjukkan sedikit gangguan dapat mensinkronisasi *firing* dari neuron. Namun penelitian tersebut tidak memperhatikan aspek *learning* yang artinya bobot sinapsis tetap dijaga konstan. Pada kondisi nyata, pada jaringan saraf, bobot sinapsis berubah seiring dengan pertumbuhan sel. Hal ini disebut sebagai plastisitas sinapsis (*sinaptic plasticity*) (Han, 2011).

Dewasa ini telah berkembang studi yang memodelkan plastisitas sinapsis, antara lain *Hebbian rule*, *Oja rule*, STDP (*spike-timing dependent plasticity*), STP (*short-term plasticity*). *Hebbian rule* adalah permodelan yang paling mendasar yang menjelaskan plastisitas sinapsis. Model ini selanjutnya telah dikembangkan menjadi bentuk yang bervariasi dari plastisitas sinapsis dan sukses digunakan dalam studi jaringan (Bi dan Poo, 2001). Contoh penelitian yang menggunakan *Oja rule* sebagai model sinapsis adalah Han (2011). Selanjutnya penelitian yang menggunakan STDP antara lain Bi dan Poo (2001), Senn dan Pfister (2014), Kolwankar dkk (2011), dan Yuniati dkk (2017). Kemudian penelitian yang menggunakan STP sebagai model sinapsis adalah Tsodyks dkk (1998), Rotman dkk (2011), Hansel dan Mato (2013), dan Cortes dkk (2013). Pada model-model sinapsis tersebut bobot sinapsis berubah-ubah terhadap waktu. Akan tetapi yang membedakan model sinapsis satu dengan yang lainnya adalah parameter yang mendasari perubahannya.

Salah satu fenomena penting dari aktivitas otak adalah sinkronisasi jaringan saraf (Borges dkk, 2017). Aktivitas tersebut diketahui dan mulai banyak dikaji sejak ditemukannya *electroencephalography* (EEG) pada tahun 1930-an. Diawali dengan penelitian tentang  $\alpha$ -rhythm pada mamalia (Golomb, dkk., 2001), sinkronisasi jaringan saraf telah diteliti pada tahap awal perkembangan dan ditemukan pada hewan seperti serangga, katak, dan primata. Pada mamalia tingkat rendah, sinapsis antar neuron telah terbentuk pada masa awal perkembangan dan aktivitas yang mendorong sinkronisasi

neuron kemungkinan terjadi selama masa perkembangan dan pembelajaran (Markram, dkk., 1997).

Sinkronisasi jaringan saraf memiliki besar frekuensi tertentu yang dapat diperoleh dari data elektrofisiologi yang terekam. Data rekaman tersebut tidak lain adalah data dari aktivitas neuron yang berosilasi dengan ritme tertentu (*neural oscillation*). Data-data penelitian baru-baru ini menunjukkan fenomena tersebut terkait dengan fungsi kognitif, proses memori, perceptual, kemampuan motorik, dan transfer informasi (Borges dkk., 2017). Jika ditinjau dari fungsi kognitif, frekuensi sinkronisasi jaringan saraf dibagi menjadi beberapa batas tertentu, yaitu: delta (1-4 Hz), theta (4-8 Hz), alpha (8-14 Hz), beta (14-30 Hz), dan gamma (>30 Hz) (Clayton, 2015).

Pada penelitian ini, akan dibuat pemodelan jaringan saraf Hodgkin-Huxley (HH) neuron dengan model sinapsis STP. Setelah dibuat pemodelan, dilakukan analisis hasil dan analisis pengaruh probabilitas konektivitas neuron terhadap sinkronisasi *firing* dan dinamika membran potensial. Selanjutnya, besarnya frekuensi jaringan saraf juga akan dicari melalui data waktu *spike* neuron. Pemodelan ini dibuat menggunakan simulator Brian2. Simulator Brian tersedia sebagai paket bahasa pemrograman Python. Adapun keunggulan dari simulator Brian2 adalah mudah dipelajari dan digunakan, sangat fleksibel dan mudah dikembangkan (Stimberg, 2017).

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian pemodelan jaringan saraf Hodgkin-Huxley (HH) neuron dengan *short-term plasticity* (STP) adalah sebagai berikut:

1. Bagaimanakah membuat pemodelan jaringan saraf HH neuron dengan STP dan bagaimana bentuk konektivitas dan bentuk sinapsis dari pemodelan jaringan saraf pada nilai probabilitas tertentu?
2. Bagaimanakah aktivitas sinkronisasi *spike (firing event)* dari neuron eksitatori dan inhibitori pada jaringan saraf?
3. Bagaimanakah pola konduktansi post-sinapsis eksitatori dan inhibitori pada pemodelan jaringan saraf yang dibuat?
4. Bagaimanakah dinamika membran potensial pada keadaan sinkron dan tidak sinkron?
5. Bagaimanakah pola transmisi sinapsis dengan *short-term plasticity* (STP)?
6. Berapakah besarnya frekuensi sinkronisasi?

## 1.3 Tujuan Penelitian

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

1. Membuat pemodelan jaringan saraf HH neuron dengan STP dan menganalisis bentuk konektivitas dan bentuk sinapsis dari pemodelan jaringan saraf pada nilai probabilitas tertentu.
2. Menganalisis aktivitas sinkronisasi *spike (firing event)* dari neuron eksitatori dan inhibitori pada jaringan saraf.

3. Menganalisis pola konduktansi post-sinapsis eksitatori dan inhibitori pada pemodelan jaringan saraf yang dibuat.
4. Menganalisis dinamika membran potensial pada keadaan sinkron dan tidak sinkron.
5. Menganalisis pola transmisi sinapsis dengan *short-term plasticity* (STP).
6. Menentukan besarnya frekuensi sinkronisasi.

#### **1.4 Batasan Penelitian**

Batasan masalah dalam pemodelan jaringan saraf Hodgkin-Huxley (HH) neuron dengan short-term plasticity adalah sebagai berikut:

1. Variasi probabilitas konektivitas neuron eksitatori ( $pe$ ) sebesar 0.05-0.7 dengan probabilitas konektivitas neuron inhibitori ( $pi$ ) tetap sebesar 0.2.
2. Variasi probabilitas konektivitas neuron inhibitori ( $pi$ ) sebesar 0.2-0.9 dengan probabilitas konektivitas neuron eksitatori ( $pe$ ) tetap sebesar 0.05.
3. Jumlah neuron eksitatori dan inhibitori masing-masing adalah 40 dan 10.
4. Luas area simulasi adalah  $20000 \mu\text{m}^2$ .
5. Metode penyelesaian persamaan diferensial neuron menggunakan eksponensial Euler.
6. Tidak menggunakan masukan eksternal.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

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

1. Dapat mengetahui proses terjadinya sinkronisasi *firing* jaringan saraf.
2. Dapat mengetahui besar frekuensi sinkronisasi *firing* jaringan saraf.

3. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi atau acuan penelitian selanjutnya.



## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian yang berjudul Pemodelan Jaringan Saraf Hodgkin-Huxley (HH) Neuron dengan *Short-term Plasticity* (STP) Menggunakan Simulator Brian2 dapat disimpulkan bahwa:

1. Pemodelan jaringan saraf dengan parameter yang telah disebutkan telah berhasil dibuat. Adapun bentuk konektivitas dan sinapsisnya dipengaruhi oleh nilai probabilitas konektivitas neuron eksitatori ( $pe$ ) dan inhibitori ( $pi$ ). Semakin besar nilai  $pe$  dan  $pi$ , maka koneksi dan sinapsisnya akan semakin banyak. Sebaliknya, jika nilai  $pe$  dan  $pi$  kecil, maka akan menurunkan jumlah koneksi dan sinapsisnya.
2. Pengaruh probabilitas konektivitas baik eksitatori ( $pe$ ) maupun inhibitori ( $pi$ ) terhadap aktivitas sinkronisasi *spike (firing event)* jaringan saraf yang telah dibuat adalah jika  $pe$  lebih besar dari pada  $pi$ , maka jaringan saraf berada pada kondisi sinkron. Sebaliknya, jika  $pi$  lebih besar dari pada  $pe$ , maka kondisi jaringan saraf menjadi tidak sinkron.
3. Terdapat dua pengaruh yang dapat diamati dari hasil simulasi pengaruh probabilitas konektivitas neuron terhadap pola konduktansi post-sinapsis, yaitu besar nilainya dan waktu peningkatan nilainya. Jika  $pe$  lebih besar dari  $pi$ , maka nilai konduktansi post-sinapsis eksitatori naik mendahului nilai konduktansi post-sinapsis inhibitori. Sebaliknya, jika  $pi$  lebih besar dari pada  $pe$ , maka nilai konduktansi post-sinapsis inhibitori naik mendahului

nilai konduktansi post-sinapsis eksitatori. Sementara itu, besarnya nilai konduktansi post-sinapsis baik eksitatori dan inhibitori masing-masing berbanding lurus dengan besar nilai  $pe$  dan  $pi$ .

4. Jika probabilitas konektivitas neuron eksitatori ( $pe$ ) lebih besar dari pada inhibitori ( $pi$ ), maka terjadi dinamika membran potensial neuron hingga melewati ambang (*threshold*) dan menyebabkan terjadinya *spike* atau potensial aksi neuron-neuron dalam waktu yang hampir bersamaan. Sebaliknya, jika probabilitas konektivitas neuron inhibitori ( $pi$ ) lebih besar dari pada eksitatori ( $pe$ ), maka *spike* terjadi tidak dalam waktu yang hampir bersamaan.
5. Nilai variabel sinapsis ( $us$ ,  $x_s$ , dan  $r_s$ ) dipengaruhi oleh terjadinya potensial aksi. Sementara nilai  $r_s$  akan berpengaruh pada nilai konduktansi post-sinapsis.
6. Besarnya nilai rata-rata frekuensi sinkronisasi jaringan saraf yang dimodelkan adalah 13,44 Hz. Nilai tersebut termasuk dalam rentang gelombang alfa.

## 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. Jumlah neuron eksitatori dan inhibitori ditambah sehingga lebih mendekati realita jaringan saraf.

2. Probabilitas konektivitas neuron divariasi berdasarkan kelipatan 0.05 untuk eksitatori ( $pe$ ) dan 0.2 untuk inhibitori ( $pi$ ).
3. Pengembangan bahasan mengenai ingatan manusia (*working memory*) karena bahasan tersebut memiliki kaitan yang erat dengan model sinapsis STP. Ditambah lagi terdapat pembuktian dalam Al-Qur'an mengenai bagian otak yang menyimpan ingatan manusia.
4. Pengembangan bahasan mengenai penyakit yang berhubungan dengan frekuensi sinkronisasi jaringan saraf.
5. Perlu ditambahkan parameter lain seperti sel glia karena sel glia juga memiliki andil besar dalam sistem saraf.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bi, G. and Poo, M. 2001. *Synaptic Modification by Correlated Activity: Hebb's Postulate Revisited*. Annual Rev. Neurosci, 24:139-66
- 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. <https://doi.org/10.1007/s13538-017-0529-5>
- 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
- Brian Author. 2017. *Brian 2 Documentation*. Diakses 10 November 2018 dari <https://media.readthedocs.org/pdf/brian2/stable/brian2.pdf>
- 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
- Cortes, J., Desroches, M., Rodrigues, S., Veltz, R., Munoz, M.A., dan Sejnowski, T.J. 2013. *Short-term Synaptic Plasticity in Deterministic Tsodyks-Markram Model Leads to Unpredictable Network Dynamics*. PNAS. **Vol. 110 No. 41** 8 Oktober 2013: 16610-16615
- 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
- Ebneshahidi, Ali. 2006. *The Nervous System and Nervous Tissue*. Diakses 10 November 2018 dari <https://mymission.lamission.edu/userdata/ebnesha/docs/Chap%208-%20Nervous%20Tissue.pdf>
- Fellous, J. M., dan Sejnowski, T. J. 2000. *Cholinergic Induction of Oscillations in the Hippocampal Slice in the Slow (0.5-2 Hz), Theta (5-12 Hz), and Gamma (35-70 Hz) Bands*. Hippocampus 10:187-197 (2000)
- Gerstner, W. 2009. *Spiking Neuron Models*. Encyclopedia of Neuroscience. Halaman: 277-280. <https://doi.org/10.1016/B978-008045046-9.01405-4>.
- Golomb, D., Hansel, D., dan Mato, G. 2001. *Mechanisms of Synchrony of Neural Activity in Large Networks*. Handbook of Biological Physics. **Vol. 4** Halaman 887-968. [https://doi.org/10.1016/S1383-8121\(01\)80024-5](https://doi.org/10.1016/S1383-8121(01)80024-5)

Goodman, Dan F. M., dan Brette R. 2009. *The Brian Simulator*. Frontiers in Neuroscience. 15 September 2009. <https://doi.org/10.3389/neuro.01.026.2009>

Goodman, Dan F. M., dan Brette, Romain. 2013. *Brian Simulator*. Scholarpedia. Vol. 8 No. 1: 10883

Gurney, Kevin. 1997. *An Introduction to Neural Network*. UCL Press. London.

Hall, Richard H. 1998. *The Neuron*. Diakses 9 Oktober 2018 dari [http://web.mst.edu/~rhall/neuroscience/01\\_fundamentals/neuron.pdf](http://web.mst.edu/~rhall/neuroscience/01_fundamentals/neuron.pdf).

Han, F., Lu, Q.S., Wierciroch, M., Fang, J.A., dan Wang, Z.J. 2012. *Firing Synchronization of Learning Neuronal Networks with Small-World Connectivity*. International Jurnal of Non-Linear Mechanics, halaman: 1161-1166

Hansel, D., dan Mato, G. 2013. *Short-term Plasticity Explains Irregular Persistent Activity in Working Memory Tasks*. The Journal of Neuroscience, 33(1): 133-149, DOI:10.1523/JNEUROSCI.3455-12.2013

Kappen, Bert. 2008. *Introduction to Biophysics*. Diakses 10 November 2018 dari <http://www.snn.ru.nl/~bertk/biofysica/handouts.pdf>

Khan Academy. 2018. *Neurotransmitter and Receptors*. Diakses 10 November 2018 dari <https://www.khanacademy.org/science/biology/human-biology/neuron-nervous-system/a/neurotransmitters-their-receptors>

Khan Academy. 2018. *Overview of Neuron Structure and Function*. Diakses 10 November 2018 dari <https://www.khanacademy.org/science/biology/human-biology/neuron-nervous-system/a/overview-of-neuron-structure-and-function>

Khan Academy. 2018. Q & A: Neuron depolarization, hyperpolarization, and Action potentials. Diakses 10 November 2018 dari <https://www.khanacademy.org/science/biology/human-biology/neuron-nervous-system/a/depolarization-hyperpolarization-and-action-potentials>

Khan Academy. 2018. *The Membrane Potential*. Diakses 10 November 2018 dari <https://www.khanacademy.org/science/biology/human-biology/neuron-nervous-system/a/the-membrane-potential>

Khan Academy. 2018. *The Synapse*. Diakses 10 November 2018 dari <https://www.khanacademy.org/science/biology/human-biology/neuron-nervous-system/a/the-synapse>

- Kitajima, H. dan Kurths, J. 2005. *Synchronized Firing of FitzHugh-Nagumo Neurons by Noise*. American Institute of Physics. DOI: 10.1063/1.1929687
- Klimesch, Wolfgang. 2012. *Alpha-band Oscillations, Attention, and Controlled Access to Stored Information*. Trends in Cognitive Science. **Vol. 16 No. 12** Desember 2012: 606-617
- Koch, Christof. 2004. *Biophysics of Computation: Information Processing in Single Neuron*. Oxford University Press, New York
- Kolwankar, K.M., Ren, Q., Samal, A., Jost, J. 2011. *Learning and Structure of Neuronal Networks*. Journal of Physics, **Vol. 77, No. 5**: 817-826
- Kriesel, David. 2007. *A Brief Introduction to Neural Networks*. Available at <http://www.dkriesel.com>
- Lu, Q.S., Gu, H.G., Yang, Z.Q., Shi, X., Duan, L.X., Zeng, Y.H. 2008. *Dynamics of Firing Pattern, Synchronization and Resonances in Neuronal Electrical Activities: Experiment and Analysis*. Acta Mechanica Sinica, halaman: 302-309.
- Mailasari, Dewi Ulya. 2014. *Membumikan Pesan-pesan Al-Qur'an dalam Konteks Kekinian: Pendekatan Tafsir Semantik*. Hermeunetik, **Vol. 8, No. 1** Juni 2014: Halaman 21-38
- Markram, H., Lubke, J., Frotscher, M., dan Sakmann, B. 1997. *Regulation of Synaptic Efficacy by Coincidence of Postsynaptic APs and EPSPs*. Science 10 Januari 1997: 275, 213
- Rahajeng, Unita W. 2016. *Neuron dan Hormon*. Diakses 10 November 2018 dari <http://unita.lecture.ub.ac.id/files/2016/09/5.-NEURON-HORMON.pdf>
- Rotman, Z., Deng, P., dan Klyachko, V.A. 2011. *Short-term Plasticity Optimizes Synaptic Information Transmission*. The Journal of Neuroscience, doi:10.1523/JNEUROSCI.3231-11.2011
- Ruben, Peter C. 2001. *Action Potentials: Generation and Propagation*. Encyclopedia of Life Science, halaman: 1-7.
- Santamaria, F., dan Bower, J. M. 2009. *Hodgkin-Huxley Models*. Encyclopedia of Neuroscience, 2009: 1173-1180
- Senn, W., dan Pfister, J. 2014. *Spike-Timing Dependent Plasticity, Learning Rules*. Encyclopedia of Computational Neuroscience, Article 683-1

Stimberg, M., Goodman, D. F. M., Benichoux, V., dan Brette, R. 2014. *Equation-oriented Specification of Neural Models for Simulations*. Frontiers in Neuroinformatics. doi: 10.3389/fninf.2014.00006

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>

Tim Tafsir Ilmiah Salman ITB. 2014. *Tafsir Salman: Tafsir Ilmiah Juz 'Amma*. Penerbit Al-Mizan, Bandung

Tsodyks, M. 2005. *Course 7 – Activity-Dependent Transmission in Neocortical Synapses*. Les Houches. Vol. 80: 245-247, 249-265 [https://doi.org/10.1016/S0924-8099\(05\)80013-7](https://doi.org/10.1016/S0924-8099(05)80013-7)

Tsodyks, M.V. dan Markram, H. 1997. *The Neural Code Between Neocortical Pyramidal Neurons Depends on Neurotransmitter Release Probability*. Neurobiology, Vol. 94: 719-723

Tsodyks, M., Pawelzik, K., dan Markram, H. 1998. *Neural Networks with Dynamic Synapses*. Neural Computation, Vol. 10: 821-835

Tsodyks, M., dan Wu, Si. 2013. *Short-term Synaptic Plasticity*. Scholarpedia. Vol. 8 No. 10: 3153

Yuniati, A., Mai, T., dan Chen, C. 2017. *Synchronization and Inter-Layer Interactions of Noise-Driven Neural Networks*. Frontiers in Computational Neuroscience, Vol. 11 No. 2 Januari 2017, doi:10.3389/fncom.2017.00002