

**SIMULASI PEMBENTUKAN SINAPSIS, SINYAL ANTAR NEURON, DAN
MODEL PLASTISITAS SINAPSIS**

TUGAS AKHIR

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

Program Studi Fisika



diajukan oleh:

Ahyunadi

1710602005

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

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA

YOGYAKARTA

2021



**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-239/Un.02/DST/PP.00.9/01/2022

Tugas Akhir dengan judul : Simulasi Pembentukan Sinapsis, Sinyal antar Neuron dan Model Plastisitas Sinapsis

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : AHYUNADI
Nomor Induk Mahasiswa : 17106020005
Telah diujikan pada : Senin, 24 Januari 2022
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.

SIGNED

Valid ID: 61f0a055ee54d



Penguji I

Dr. Widayanti, S.Si. M.Si.

SIGNED

Valid ID: 61f0966b1d599



Penguji II

Frida Agung Rakhmadi, S.Si., M.Sc.

SIGNED

Valid ID: 61efc21eb22b9



Yogyakarta, 24 Januari 2022 UIN

Sunan Kalijaga

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

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

SIGNED

Valid ID: 61f0e87352c48



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 : AHYUNADI
NIM : 17106020005
Judul Skripsi : SIMULASI PEMBENTUKAN SINAPSIS, SINYAL ANTAR NEURON DAN MODEL PLASTISITAS SINAPSIS

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

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

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 14 Januari 2022

Pembimbing

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



KEMENTERIAN AGAMA REPUBLIK INDONESIA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS AUSHULUDDIN DAN PEMIKIRAN ISLAM

Alamat : Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274)512840, Fax.(0274)545614
<http://www.uin-suka.ac.id> Yogyakarta 55281

PERNYATAAN KEASLIAN DAN BEBAS PLAGIARISME

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : AHYUNADI
Nim : 17106020005
Prodi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi

menyatakan bahwa naskah skripsi ini adalah hasil penelitian dan karya penulis kecuali pada bagian-bagian yang dirujuk sumbernya dan bebas dari plagiarisme. Jika di kemudian hari terbukti bukan karya sendiri atau melakukan plagiasi maka penulis siap ditindak sesuai dengan ketentuan hukum yang berlaku.

Yogyakarta, 26 Januari 2022

Yang menyatakan

Ahyunadi
Nim.17106020005



MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

“Sesuatu yang tidak bisa kamu lakukan seluruhnya, jangan kamu tinggalkan seluruhnya. Kerjakanlah meskipun sedikit!”

PERSEMBAHAN

- ❖ Allah SWT
- ❖ Nabi Muhammad SAW
- ❖ Keluarga besar Al-Ustmaniy
- ❖ Ibu Anis tercinta
- ❖ Prodi Fisika
- ❖ Sahabat Fisika
- ❖ Sahabat The Joint
- ❖ Keluarga besar Arrisalah
- ❖ Almamater

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum warahmatullahi wabarokatuh.

Alhamdulillah rabbil 'aalamiin, puji syukur ke hadirat Allah swt atas segala limpahan rahmat, hidayah, serta inayah-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan laporan penelitian tugas akhir yang berjudul “*Simulasi Pembentukan Sinapsis, Sinyal Antar Neuron, dan Model Plastisitas 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. Ibu Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku bunda, Kepala Jurusan Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga, Dosen Penasehat Akademik, 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. Ibu Dr. Widayanti, M.Si. dan Bapak Frida Agung Rakhmadi, M.Sc. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan arahnya berupa kritik dan saran sehingga menjadi penyempurna penelitian ini;
3. Dosen Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga yang telah memberikan ilmu dan pengalamannya kepada penulis;
4. Seluruh staf dan karyawan bagian Tata Usaha Fakultas Sains dan Teknologi

5. Bapak, Ibu, kakak serta adikku di Lombok yang telah memberikan semangat, ridho, dan doanya;
6. Bapak Zuhri dan Ibu Maimunah beserta keluarga yang telah banyak memberikan ilmu dan bimbingan selama saya tinggal di pondok pesantrennya.
7. Seluruh teman-teman Fisika angkatan 2017 atas dukungan dan ilmu yang dibagi.
8. Seluruh teman-teman seperjuangan di pondok pesantren Arrisalah yang saling menasihati, memotivasi, memberi semangat dan banyak memberi warna selama di Jogja.
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.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

SIMULASI PEMBENTUKAN SINAPSIS, SINYAL ANTAR NEURON, DAN MODEL PLASTISITAS SINAPSIS

Ahyunadi
17106020005

INTISARI

Sinapsis merupakan celah pertemuan antar neuron yang bersifat plastis. Penelitian mengenai pemodelan sinapsis pada studi komputasi jaringan saraf masih terus dikembangkan karena masih banyak mengandung perdebatan yang muncul dari para ahli neurosains terkait pemodelan atau pun parameter yang digunakan. Sinapsis memiliki peran penting bagi neuron di mana melalui sinapsis, informasi yang didapatkan oleh neuron dapat ditransmisikan ke neuron lainnya. Pada penelitian ini dibuat simulasi pembentukan sinapsis dengan variasi probabilitas koneksi, simulasi sinyal antar neuron dengan variasi penambahan bobot sinapsis dan waktu delay sinyal, simulasi model sinapsis STDP dan *inverse* STDP. Simulasi dibuat menggunakan Simulator Brian2. Pembentukan sinapsis dibuat dengan variasi probabilitas koneksi 0,2; 0,5; dan 1,0 serta jumlah neuron yang ditetapkan sebanyak 15 neuron. Pada pembuatan simulasi sinyal antar neuron dengan penambahan bobot sinapsis dan waktu delay ditetapkan jumlah neuron sebanyak 4, yaitu neuron 0, 1, 2, dan 3. Masing-masing neuron tersebut memiliki persamaan diferensial potensial membran yang sama, tetapi memiliki nilai yang berbeda untuk parameter I dan t . Neuron 0 memiliki $I = 3$ dan $t = 10$ ms. Neuron 1, 2 dan 3 memiliki $I = 0$ dan $t = 100$ ms. Simulasi model sinapsis STDP dibuat dengan jumlah neuron 100, t_{maks} 50 ms, τ_{pre} dan τ_{post} 20 ms, A_{pre} 0,02 dan A_{post} 1,05. Model sinapsis *inverse* STDP dibuat dengan parameter dan nilai yang sama seperti STDP dengan nilai A_{pre} negatif. Bentuk visual masing-masing hasil simulasi seperti tertampil pada bagian hasil penelitian.

Kata kunci: Probabilitas koneksi, bobot sinapsis, waktu delay, STDP, *inverse* STDP

SIMULATION OF SYNAPSIS FORMATION, INTERNEURON SIGNAL, AND SYNAPSIS PLASTICITY MODEL

Ahyunadi
17106020005

ABSTRACT

Synapses are plastic junctions between neurons. Research on synapse modeling in computational neural network studies is still being developed because there are still many debates that arise from neuroscientists regarding the modeling or the parameters used. Synapses have an important role for neurons where through synapses, information obtained by neurons can be transmitted to other neurons. In this study, simulations of synapse formation were made with variations in connection probabilities, simulations of signals between neurons with variations in the addition of synaptic weights and signal delay times, simulations of STDP synapses and STDP inverse models. The simulation was created using the Brian2 Simulator. Synapse formation is made with a variation of the connection probability 0.2; 0.5; and 1.0 and the number of neurons set is 15 neurons. In making a signal simulation between neurons with the addition of synaptic weights and delay time, the number of neurons is set to 4, namely neurons 0, 1, 2, and 3. Each of these neurons has the same membrane potential differential equation, but has different values for the parameters. I and t . Neuron 0 has $I = 3$ and $t = 10$ ms. Neurons 1, 2 and 3 have $I = 0$ and $t = 100$ ms. The STDP synapse model simulation was made with 100 neurons, t_{\max} 50 ms, τ_{pre} and τ_{post} 20 ms, A_{pre} 0.02 and A_{post} 1.05. While the STDP inverse synapse model is made with the same parameters and values as STDP with a negative A_{pre} value. The visual form of each simulation result is shown in the research results section

Key word: Probabilitas koneksi, bobot sinapsis, waktu delay, STDP, *inverse* STDP

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI	iii
PERNYATAAN KEASLIAN DAN BEBAS PLAGIARISME	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR	vi
INTISARI	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3. Tujuan Penelitian.....	5
1.4. Batasan Masalah.....	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

2.2.2	Potensial Membran dan Potensial Aksi.....	15
2.2.3	Konektivitas Antar Neuron	19
2.2.4	Sinapsis dan Plastisitas Sinapsis	20
2.2.5	<i>Short-term Plasticity</i> (Plastisitas Jangka Pendek).....	22
2.2.6	<i>Long-term Plasticity</i> (Plastisitas Jangka Panjang)	23
2.2.7	<i>Learning</i> dan Memori	24
2.2.8	<i>Spike-timing Dependent Plasticity</i> (STDP) dan <i>inverse</i> STDP..	26
2.2.9	Teori Jaringan.....	31
2.2.10	Simulator Brian2	34
2.2.11	Wawasan Islam tentang Sistem Saraf Pusat Otak.....	35
BAB III	METODE PENELITIAN	36
3.1.	Waktu dan Tempat Penelitian.....	36
3.2.	Alat Penelitian	36
3.3.	Prosedur Penelitian	36
3.3.1.	Instalasi Perangkat Lunak Simulator Brian2.....	37
3.3.2.	Pembuatan Program Simulasi Pembentukan Sinapsis	40
3.3.3.	Pembuatan Program Simulasi Sinyal Antar Neuron dengan Penambahan Bobot Sinapsis dan Waktu Delay.....	43
3.3.4.	Pembuatan Program Simulasi STDP	47
3.3.5.	Pembuatan Program Simulasi <i>Inverse</i> STDP.....	52
3.3.6.	Analisis Data	57
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	58

4.1. Hasil.....	58
4.1.1. Bentuk Sinapsis dari konektivitas antar neuron	58
4.1.2. Bentuk Sinyal antar Neuron dengan Penambahan Bobot Sinapsis dan Waktu Delay	60
4.1.3. Simulasi Model Sinapsis STDP	61
4.1.4. Bentuk Hasil Simulasi inverse STDP	63
4.2. Pembahasan	63
4.2.1. Pembentukan Sinapsis.....	63
4.2.2. Pembuatan simulasi sinyal antar neuron dengan penambahan bobot sinapsis dan waktu delay	65
4.2.3. Simulasi model sinapsis STDP (Spike Timing Dependent Plasticity)	68
4.2.4. Simulasi model sinapsis inverse STDP (Spike Timing Dependent Plasticity)	71
BAB V KESIMPULAN	73
5.1 Kesimpulan.....	73
5.2 Saran	73
DAFTAR PUSTAKA	75
LAMPIRAN.....	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bagian-bagian neuron.....	13
Gambar 2.2 Konsentrasi ion di luar dan di dalam sel.....	16
Gambar 2.3 Potensial aksi	18
Gambar 2.4 Aktivitas sinapsis dan aktivitas neuron <i>pre</i> -sinapsis dan neuron <i>post</i> -sinapsis.....	21
Gambar 2.5 STDP (<i>Spike Timing Dependent Plasticity</i>)	27
Gambar 2.6 <i>Inverse</i> STDP (<i>Spike-Timing Dependent Plasticity</i>)	30
Gambar 3.1 Diagram alir tahapan instalasi Simulator Brian2.....	39
Gambar 3.2 Diagram alir pembuatan program simulasi pembentukan sinapsis	43
Gambar 3.3 Diagram alir pembuatan program simulasi sinyal antar neuron dengan penambahan bobot sinapsis dan waktu delay	46
Gambar 3.4 Diagram alir pembuatan program simulasi STDP.....	51
Gambar 3.5 Diagram alir pembuatan program simulasi <i>inverse</i> STDP	55
Gambar 4.1 (a) Bentuk sinapsis dan (b) konektivitas antar neuron dengan probabilitas $p = 0.2$	58
Gambar 4.2 (a) Bentuk sinapsis dan (b) konektivitas antar neuron dengan probabilitas $p = 0.5$	59
Gambar 4.3 (a) Bentuk sinapsis dan (b) konektivitas antar neuron dengan probabilitas $p = 1.0$	59
Gambar 4.4 Bentuk sinyal antar neuron dengan penambahan bobot sinapsis dan waktu delay	60

Gambar 4.5 Grafik hasil simulasi STDP	61
Gambar 4.6 (a) Grafik hasil simulasi bentuk a_{pre} dan a_{post} dimana a_{pre} mengalami lonjakan lebih dahulu dibandingkan a_{post} (b) Grafik hasil simulasi bobot sinapsis (w) yang bernilai positif	62
Gambar 4.7 (a) Grafik hasil simulasi bentuk a_{pre} dan a_{post} dimana a_{post} mengalami lonjakan lebih dahulu dibandingkan a_{pre} (b) Grafik hasil simulasi bobot sinapsis (w) yang bernilai negatif	63
Gambar 4.8 Grafik hasil simulasi <i>inverse</i> STDP.....	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya.....	10
Tabel 3.1 Alat Penelitian	38



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

Manusia merupakan makhluk Tuhan dengan sebaik-baik ciptaan di antara lainnya yang tinggal di muka bumi. Hal ini karena manusia dikaruniai otak yang dapat digunakan untuk berpikir dalam menjalani hidup dan menghadapi segala persoalan. Otak manusia berperan penting untuk mengendalikan segala fungsi tubuh manusia.

Terkait dengan otak, perilaku dan kejadian di dalamnya, sejak 14 abad yang lalu Allah SWT telah menyinggungnya di dalam Al-Qur'an surat Ali Imran ayat 190-191 (Mujtahidin, 2015), yaitu:

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لَآيَاتٍ لِّأُولِي الْأَلْبَابِ ﴿١٩٠﴾ الَّذِينَ يَذْكُرُونَ اللَّهَ قِيَمًا وَقُعُودًا وَعَلَىٰ جُنُوبِهِمْ وَيَتَفَكَّرُونَ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ رَبَّنَا مَا خَلَقْتَ هَذَا بَطْلًا سُبْحَانَكَ فَقِنَا عَذَابَ النَّارِ ﴿١٩١﴾

“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” (<https://quran.kemenag.go.id/>)

Seseorang yang berpikir dengan benar dan mendalam akan menjadikannya dapat memahami segala sesuatu merupakan ciptaan dan representasi dari adanya

Sang Pencipta yaitu Allah SWT. Manusia sendiri diberikan suatu kelebihan berupa akal yang dapat digunakannya untuk berpikir. Penyebutan akal di dalam Al-Qur'an tidak kurang dari 49 kali sehingga akal menjadi salah satu perhatian Al-Qur'an dalam memberikan penjelasan mengenai sifat dan perilaku manusia (Suadu, 2019). Berdasarkan hasil penelitian bahwa ukuran otak manusia merupakan yang terbesar dari mamalia lainnya. Saat ini telah banyak peneliti yang mengkaji otak baik dari segi fungsi, perilaku, dan lainnya. Dengan sebab itu, tidak dipungkiri jika otak merupakan karunia terbesar yang diberikan Allah SWT kepada manusia (Ikrar, 2015).

Di era sekarang ini, telah berkembang sebuah disiplin keilmuan baru yang mengkaji tentang otak dan misterinya, yaitu neurosains. Para ilmuwan neurosains terus melakukan penelitian tentang otak yang menjadikan neurosains mengalami kemajuan yang sangat pesat dan banyak memberikan pengaruh bagi kehidupan manusia di era modern ini. Prinsip dasar dari neurosains adalah serupa dengan cara kerja sistem saraf otak manusia. Dari hasil penelitian yang didapatkan, para ahli neurosains membuat rumusan tentang bagaimana sistem saraf bekerja, perkembangan dan kondisi otak hingga pada kegagalan fungsi saraf yang mengakibatkan gangguan kejiwaan atau neurologis (Dewi, 2020).

Di dalam otak terdapat sebuah sel yang dinamakan dengan sel neuron. Neuron merupakan jenis sel yang secara khusus berperan dalam pengiriman informasi. Neuron memiliki fungsi untuk menerima, melanjutkan dan memproses stimulus, merangsang perilaku sel tertentu dan melepaskan neurotransmitter serta informasi

lainnya yang dihubungkan melalui penghubung antar neuron yang disebut dengan sinapsis. Fungsi sinapsis adalah penghubung dari tombol terminal yang terletak pada ujung akson dari suatu membran neuron ke membran lainnya (Muhid, 2013). Membran pada tombol terminal dikenal sebagai membran *pre*-sinapsis, sedangkan membran pada neuron penerima dikenal sebagai membran *post*-sinapsis. Kedua membran tersebut dipisahkan oleh suatu celah sinapsis yang lebarnya kurang lebih 200-300 angstrom (Timotius, 2012).

Selain itu, sinapsis juga memiliki sifat plastis yang disebut dengan plastisitas sinapsis. Plastisitas sinapsis adalah sebuah perubahan aktivitas yang bergantung pada kekuatan sinapsis, yang memproses mekanisme penyimpanan memori. Menurut Hebb (1949) bahwa hubungan dua sel yang disebabkan oleh rangsangan antar sinapsis dapat diperkuat apabila dua sel tersebut diaktifkan secara bersama. Plastisitas sinapsis terbagi menjadi dua macam yaitu plastisitas jangka pendek dan plastisitas jangka panjang. *Pertama*, plastisitas jangka pendek yang terbagi menjadi dua yaitu penguatan jangka pendek atau *Short Term Potentiation* (STP) dan pelemahan jangka pendek atau *Short Term Depression* (STD). Perubahan potensi yang terjadi pada plastisitas jangka pendek berlangsung hanya beberapa detik hingga menit. *Kedua*, plastisitas jangka panjang juga terbagi menjadi dua yaitu penguatan jangka panjang atau *Long Term Potentiation* (LTP) dan pelemahan jangka panjang atau *Long Term Depression* (LTD). Perubahan potensi yang terjadi pada plastisitas jangka panjang berlangsung dalam waktu yang relatif lama yaitu hitungan jam hingga hari (Okorocho, 2015).

Perubahan terbesar yang terjadi pada sinapsis ketika adanya perbedaan waktu yang kecil antara lonjakan *pre*-sinapsis ke *post*-sinapsis dan adanya transisi yang tajam dari penguatan menuju pelemahan karena perbedaan waktu yang melewati nol disebut sebagai STDP (*Spike Timing Dependent Plasticity*). STDP digunakan untuk memodifikasi sinapsis yang bergantung pada perbedaan waktu lonjakan *pre*-sinapsis ke *post*-sinapsis dan merupakan proses biologis yang berfungsi mengatur kekuatan koneksi antar neuron di dalam otak, yang mengacu pada proses terjadinya LTP dan LTD. Melalui percobaan tersebut juga telah ditemukan adanya mekanisme *inverse* (kebalikan) dari STDP pada struktur otak kecil (Bi dan Poo, 2001). Penelitian yang menggunakan model STDP di antaranya penelitian oleh Bi dan Poo (2001), Sem dan Pfister (2014), Diva dan Yuniati (2017) serta Kolwankar dkk (2011).

Penelitian mengenai pemodelan sinapsis pada studi komputasi jaringan saraf masih terus dikembangkan karena masih banyak mengandung perdebatan yang muncul dari para ahli neurosains terkait pemodelan atau pun parameter yang digunakan. Sinapsis memiliki peran penting bagi neuron di mana melalui sinapsis, informasi yang didapatkan oleh neuron dapat ditransmisikan ke neuron lainnya. Berdasarkan perilaku dari sinapsis dan peran pentingnya bagi aktivitas neuron, pada penelitian ini akan dibuat simulasi pembentukan sinapsis dengan variasi probabilitas koneksi, simulasi sinyal antar neuron dengan variasi penambahan bobot sinapsis dan waktu delay sinyal, simulasi model sinapsis STDP dan simulasi model sinapsis *inverse* STDP. Simulasi dibuat menggunakan Simulator Brian2.

Simulator Brian2 tersedia sebagai paket bahasa pemrograman Python. Adapun keunggulan dari Simulator Brian2 adalah mudah dipelajari dan digunakan serta sangat fleksibel dan mudah dikembangkan (Stimberg, 2017).

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimanakah bentuk visual sinapsis dari konektivitas antar neuron dengan variasi probabilitas koneksi?
2. Bagaimanakah bentuk visual sinyal antar neuron dengan penambahan bobot sinapsis dan waktu delay?
3. Bagaimanakah simulasi model sinapsis STDP?
4. Bagaimanakah simulasi model sinapsis *inverse* STDP?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyimulasikan sinapsis berdasarkan konektivitas antar neuron dengan variasi probabilitas koneksi
2. Menyimulasikan sinyal antar neuron dengan penambahan bobot sinapsis dan waktu delay
3. Menyimulasikan model sinapsis STDP
4. Menyimulasikan model sinapsis *inverse* STDP

1.4. Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Koneksi antar neuron bersifat random
2. Jumlah neuron pada simulasi pembentukan sinapsis sebanyak 15 dengan variasi probabilitas koneksi sebesar 0,2; 0,5; dan 1,0.
3. Simulasi sinyal antar neuron berupa grafik potensial membran terhadap waktu
4. Jumlah neuron pada simulasi sinyal antar neuron sebanyak 4 dengan penambahan bobot sinapsis 0,3 dan waktu delay 3 ms
5. Konstanta parameter untuk simulasi STDP adalah τ_{pre} dan $\tau_{post} = 30$ ms, $w_{max} = 0.02$ dan $A_{pre} = 0.02$. Sementara parameter untuk *inverse* STDP adalah τ_{pre} dan $\tau_{post} = 30$ ms, $w_{max} = 0.02$ dan $A_{pre} = -0.02$

1.5. Manfaat Penelitian

Beberapa manfaat yang diharapkan dari dilakukannya penelitian ini antara lain:

1. Dapat memahami pengaruh probabilitas koneksi pada pembentukan sinapsis antar neuron.
2. Dapat memahami pengaruh bobot sinapsis dan waktu delay terhadap sinyal yang ditransmisikan antar neuron.
3. Dapat memahami pola model STDP dan *inverse* STDP serta menjadi referensi untuk pemodelan jaringan saraf yang lebih kompleks.

BAB V

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan kajian yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Bentuk visual sinapsis berdasarkan konektivitas antar neuron dengan variasi probabilitas koneksi 0,2; 0,5; dan 1,0 seperti pada gambar 4.1, 4.2 dan 4.3.
2. Bentuk visual sinyal antar neuron dengan penambahan bobot sinapsis dan waktu delay seperti yang terlihat pada gambar 4.4.
3. Sinapsis model STDP berhasil disimulasikan seperti yang ditampilkan pada gambar 4.5.
4. Sinapsis model *inverse* STDP berhasil disimulasikan seperti yang ditampilkan pada gambar 4.8.

5.2 SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, maka peneliti memiliki beberapa saran terkait dengan penelitian ini bagi peneliti selanjutnya. Adapun beberapa saran tersebut, antara lain:

1. Sebelum mulai membuat simulasi menggunakan Simulator Brian2 hendaknya mempelajari tutorial yang tersedia di website Simulator Brian2.
2. Penulisan perintah/sintaks di Jupyter Notebook ketika membuat *listing* program hendaknya dilakukan secara cermat dan teliti pada setiap tahapan sesuai tutorial agar tidak terjadi kesalahan (error) setelah me-*running* program.

3. Di dalam menyimulasikan model sinapsis STDP dan *inverse* STDP hendaknya memperhatikan aturan *pre*-sinapsis dan *post*-sinapsis pada sintaks `on_pre` dan `on_post` agar grafik yang muncul sesuai dengan yang diharapkan.



DAFTAR PUSTAKA

- Abbott, L.F., Varela, J.A., Sen, K., Nelson, S.B. (1997). Synaptic Depression and Cortical Gain Control. *Science*. Vol.275: 220-224
- Alawiyah, K. (2018) Pembelajaran Spasial dan Memori serta Morfologi Dendrit Neuron Dentate Gyrus setelah Pemberian Ekstrak Getah Kemenyan (Styrax benzoin) pada Mencit. Thesis. *Bogor Agricultural University (IPB)*. Vol.34 : 234-238.
- Bagir, Haidar. (2017) Islam Tuhan, Islam Manusia. *PT. Mizan Pustaka Bandung*.
- Balleine, B.W., Liljeholm, M. Ostlund, S.B. (2009). The Integrative Function Of The Basal Ganglia In Instrumental Conditioning. *Behavioural Brain Research*, Vol. 199 No.1 : 43–52.
- Bear, M.F. (1995). Mechanism For A Sliding Synaptic Modification Threshold. *Neuron*, Vol. 5 No.1 : 1–4.
- Beatty, J. (2001). The Human Brain: Essentials Of Behavioral Neuroscience /. *Thousand Oaks (Calif.)* Vol.7 : 87-91.
- Beeman, David. (1999). The Modeler's Workspace: a distributed digital library for neuroscience. *Future Generation Computer Systems*. Vol.16 No.1 : 111-121
- Ben Achour, S. Pascual, O. (2010). Glia: The Many Ways To Modulate Synaptic Plasticity. *Neurochemistry International*, Vol.57 No.4 : 440–445.
- Berberian, N. (2009). Towards an Embodied Understanding of Neural Computation. Vol.3 : 163.
- Bi, G. Poo, M. (2001). Synaptic Modification by Correlated Activity: Hebb's Postulate Revisited. *Annual review of neuroscience*, Vol.24 : 139–66.
- Bliss, T.V.P. (2003). The discovery of long-term potentiation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, Vol.358 No.1432 September 2003: 617–620.
- Berger, Theodore W. Dong Song. Vasilisi Z. Marmarelis. (2009). Parametric And Non-Parametric Modeling Of Short-Term Synaptic Plasticity. Part I: Computational Study. *SpringerLink*. Vol.26 No.1 : 272
- Borges, R.R. (2017). Synaptic Plasticity and Spike Synchronisation in Neuronal Networks. *Brazilian Journal of Physics*, Vol.47 No.6 : 678–688.
- Brette, Romain. (2007). Simulation of Networks of Spiking Neuron: A Review of Tools and Strategies. *Journal of Computational Neuroscience*. Vol. 23 No. 3: 349-98

- Campbell NA, Reece JB, Mitchell LG. (2002) . Biologi, Edisi Kelima, Jilid I. Jakarta: Erlangga. Hal:153, 126 ISBN 979-688-468-2
- Cortes, Corinna. Daniel D. Lee. Roman Garnett. Neil D. Lawrence. masashi Sugiyama. (2013). Advances in Neural Information Processing Systems 28. *Proseedings*.
- Curtis, C.E. D’Esposito, M. (2003). Persistent Activity In The Prefrontal Cortex During Working Memory. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.7 No.9 : 415–423.
- DeWeerd, Sarah (2019). How to Map The Brian. *Gale Academic OneFile*. Vol.571 No. 7766 : 300-309
- De Lucia, M. (2005). Topological Approach To Neural Complexit. *Physical Review E*, Vol.7 No.1 : 114-119
- Dewi, K.Y.F. (2020). Disleksia dan Anatomi Otak. *Daiwi Widya*, Vol.7. No.1 : 29-34
- Diesmann. Gewaltig. (2007). NEST (NEural Simulation Tool). *Scholarpedia*.
- Diva, S.A. dan Yuniati, A. (2020). Analysis of Modification in Synaptic Plasticity STDP (Spike Timing Dependent Plasticity) Model by Changing Intracellular Calcium Concentration. *ISSN*. Vol.26 No.2 : 29-35.
- Duncan, J. Watts. Steven H. Strogartz. (1998) Collective Dynamics Of ‘Small-World’ Networks. *Nature*. Vol.393 : 440-442.
- Franco R, Bortner CD, Cidlowski JA (2006). Potential roles of electrogenic ion transport and plasma membrane depolarization in apoptosis. *J. Membr. Biol.* Vol.209 (1): 43–58.
- Frigyes Karinty. (1929) Hungarian Priority in Network Theory. *Science*. Vol.304 No.5678 : 1745.
- Fu'ad Hasyim, Muhammad. (2019). Jaringan saraf Hodkon-Hoxley (HH) Neuron Dengan Short-Term Plasticity (STP) Menggunakan Simulator Brian2. *UIN Sunan Kalijaga*.
- Gerner, Schmidt. (2003) Short And Long Term Mortality Associated With Foodborne Bacterial Gastrointestinal Infections: Registry Based Studycommentary: Matched Cohorts Can Be Useful. *Blackburn.gov.uk*. Vol.326 : 357
- Goodman, Dan F. M.(2009).The Brian Simulator. *Frontiers in Neuroscience*. 15 September 2009. <https://doi.org/10.3389/neuro.01.026.2009>
- Hall, W. Charless. Michael M. Behbehani. (1998). Synaptic effects of nitric oxide on enkephalinergic, GABAergic, and glutamatergic networks of the rat periaqueductal gray. *Brian Research*. Vol.805: 69-87.
- Han, F. (2012). Firing Synchronization Of Learning Neuronal Networks With Small-World Connectivity. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol.47 No.10 : 1161–1166.

- Hansel, D. dan Mato, G. (2013). Short-Term Plasticity Explains Irregular Persistent Activity in Working Memory Tasks. *Journal of Neuroscience*, Vol.33 No.1 : 133–149.
- Hebb, D.O. (1949). *The Organization of Behavior*. New York: Wiley
- Hines, M. L., & Carnevale, N. T. (1997). The NEURON Simulation Environment. *Neural Computation*, Vol.9 No.6 : 1179–1209.
- Hiratani, Naoki. Tomoki Fukai. (2018) Redundancy In Synaptic Connections Enables Neurons To Learn Optimally. *Salk Institute for Biological Studies*. Vol.115 No.29
- Holthoff, K., & Tsay, D. (2002). Dynamic Confocal Imaging of Living Brain Calcium dynamics in spines : link to synaptic plasticity *Experimental Physiology : Experimental Physiology : Experimental Physiology*, Vol.87 No.6 : 725-731.
- <https://quran.kemenag.go.id/>
- Ikrar, T. (2015). *Ilmu Neurosains Modern*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Kempler, Richard. Wulfram Gerstner. J. Leo van Hemmen. (1999) Hebbian Learning And Spiking Neurons. *Physical Review*. Vol.59 : 4498
- Khanna, D. (2012). American College of Rheumatology guidelines for management of gout. Part 1: Systematic nonpharmacologic and pharmacologic therapeutic approaches to hyperuricemia. *Arthritis Care & Research*, Vol.64 No.10 ; 1431–1446.
- Kolwankar, K. M, Quansheng ren, Areejit Samal, Jurgen jost. (2011). Learning and structure of neuronal networks. *Pramana*. Vol.77 : 817-826
- Kriesel, D. (2000). A Brief Introduction On Neural Networks. The Role Of Magnesium In Immunity. *Journal of Nutritional Immunology*, 2(3), 107–126.
- Kryukov, K. A., Kim, K. K., Magazanik, L. G., & Zaitsev, A. V. (2016). Status Epilepticus Alters Hippocampal Long-Term Synaptic Potentiation In A Rat Lithium-Pilocarpine Model. *NeuroReport*, 27(16), 1191–1195.
- Lailatul, Ngarofah (2021) Modul Pembelajaran Fisiologi Hewan. *Undergraduate Thesis*, Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung.
- Lisman, J. (1989). A mechanism for the Hebb and the anti-Hebb processes underlying learning and memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 86(23), 9574–9578
- Lodish. (2000). *Molecular Cell Biology*. 4th edition Section 21.1. New York: W. H. Freeman: 2000.

- Makhrus. 2009. *Berpikir Dengan Jantung (Studi Terhadap Relasi ‘Aql dan Qalb dalam al-Qur’an)*. (Tugas Akhir), Jurusan Tafsir Hadits, Fakultas Ushuluddin, IAIN Walisongo, Semarang.
- Malenka, R.C. Bear, M.F. (2004) ‘LTP and LTD: An Embarrassment of Riches’, *Neuron*, Vol.44 No.1 :. 5–21.
- Meyer, D., Bonhoeffer, T. Scheuss, V. (2014). Balance and Stability of Synaptic Structures during Synaptic Plasticity. *Neuron*, Vol.82 No.2 : 430–443.
- Meric-Bernstam, F., & Mills, G. B. (2004). Mammalian target of rapamycin. *Seminars in Oncology*, 31(SUPPL. 16).
- Mitoma, H. (2021). Physiology of Cerebellar Reserve: Redundancy and Plasticity of a Modular Machine. *International Journal of Molecular Sciences*, Vol.22 No.9 : 4777.
- Muhid, A. (2013) *Psikologi Umum: Buku Perkuliahan Program S-1 Program Studi Psikologi Fakultas Dakwah IAIN Sunan Ampel Surabaya*. Surabaya: IAIN SA Press.
- Mujtahidin, N.D. (2015) *Pengantar Psikologi dan Pandangan Al-Qur’an Tentang Psikologi*. Kencana.
- Newman, M. (2010) *Networks: An Introduction*. Oxford: *Oxford University Press*. Vol.34 No4 November 2010 : 39-45.
- Okorocho, Albert. (2015). Short review on the role of intracellular calcium in synaptic plasticity. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT)*. Volume 9, Issue 10 Ver. II 2015 : 32-38.
- Parameswaran, S., Vijayamma, A. K. T., & Pillai, A. M. (2019). Efficacy of Short Term Video Eeg in Detecting Psychogenic Non-Epileptic Seizures. *MNJ (Malang Neurology Journal)*, Vol.5 No.2 : 65–67.
- Perea, G., Gómez, R., Mederos, S., Covelo, A., Ballesteros, J. J., Schlosser, L., Hernández-Vivanco, A., Martín-Fernández, M., Quintana, R., Rayan, A., Díez, A., Fuenzalida, M., Agarwal, A., Bergles, D. E., Bettler, B., Manahan-Vaughan, D., Martín, E. D., Kirchhoff, F., & Araque, A. (2016). Activity-dependent switch of gabaergic inhibition into glutamatergic excitation in astrocyte-neuron networks. *ELife*, 5(DECEMBER2016), 1–26.
- Perea, G., Sur, M. Araque, A. (2014). Neuron-glia networks: integral gear of brain function, *Frontiers in Cellular Neuroscience*, Vol.8 : 378.
- Plasticity, A., Dentate, O. F. A., In, C., Model, A. R. A. T., Mesial, O. F., & Lobe, T. (2019). *Cells In A Rat Model Of Mesial Temporal Lobe*. 734, 187–196..

- Priyanto, D. et al. (2019). Studi Literatur Konsep Dasar Machine Learning Dan Neural Network. *Prosiding SiManTap : Seminar Nasional Matematika dan Terapan*, 1, pp. 160–166.
- Purwanto, A. 2015. *Ayat-Ayat Semesta* (edisi kedua). Penerbit Mizan, Bandung.
- Qowim, A. N. 2018. Tafsir Tarbawi: Tinjauan Al-Quran Tentang Term Kecerdasan. *IQ: Jurnal Pendidikan Islam*, Vol.1 No.1: 114-136.
- Rada, Y.H.M. Aji, P. (2019). Prediction of Concrete Strength Based on Design Parameters, Hammer Test and Test UPV by Using Artificial Neural Network (ANN). *Journal of Civil Engineering*, Vol.34 No.1 : 18–23.
- Ramon y Cajal, S. (1894). The Croonian lecture.—La fine structure des centres nerveux, *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol.55 No.1 : 444–468.
- Rotman, M. Christopher U. Jones, M.D., Daniel Hunt, Ph.D., David G. McGowan, M.B., Ch.B., Mahul B. Amin, M.D., Michael P. Chetner, M.D., Deborah W. Bruner, R.N., Ph.D., Mark H. Leibenhaut, M.D., Siraj M. Husain, M.D. Luis Souhami, M.D., Howard M. Sandler, M.D., and William U. Shipley, M.D. (2011). Radiotherapy and Short-Term Androgen Deprivation for Localized Prostate Cancer. *The New England Journal Of Medicine*. **Vol. 365**:107-118
- Rotman. (2011). Synaptic Modifications in Cultured Hippocampal Neurons: Dependence on Spike Timing, Synaptic Strength, and Postsynaptic Cell Type | *Journal of Neuroscience*. Vol.2 No3 : 89-98.
- Ruben, J. E., Gerkin, R. C., Bi, G. Q., & Chow, C. C. (2005). Calcium Time Course As A Signal For Spike-Timing-Dependent Plasticity. *Journal of Neurophysiology*, Vol.93 No.5 : 2600–2613.
- Santoso, Totok Budi, Fitiryani, Wiwik. (2013). Efektifitas dan Kenyamanan Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation (TENS) Pulse Burst dan Arus Trabert dalam Mengurangi Nyeri Kronik di Lutut pada Usia Lanjut. *Universitas Muhammadiyah Surakarta*. Vol.5 No.3 : 29-36.
- Sem, Walter, Jean-Pascal Pfister. (2014). Spike-Timing Dependent Plasticity, Learning Rules. *Springer*. Vol.12 : 250-252.
- Song, Sen. Kenneth D. Miler. I. F. Abbott. (2000). Competitive Hebbian Learning Through Spike-Timing-Dependent Synaptic Plasticity. *Nature Neuroscience*. Vol.3 : 919-926.
- Stanley, Milgram. (1967). The Samll-Word Problem. *Psychology Today*. Vol.1 No.1 : 67
- Stevens, C.F. Wesseling, J.F. (1999). Augmentation Is a Potentiation of the Exocytotic Process Vol.22 No.1 Mei 1999 : 139–146.

- Stimberg, M. (2017) Sustainable computational science: the ReScience initiative. *Institut de la Vision*. Vol.7 : 399-405.
- Suadu F. (2019) Manusia Unggul : Neurosains dan Alqur'an. *Penjuru Ilmu Sejati*. Vol.3 No.4 : 77-70.
- Susilawati. (2018). Buku Biologi Dasar Terintegrasi. *Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau*.
- Timotius, P.D.K.H. (2012). Otak dan Perilaku. *Penerbit Andi Yogyakarta*. Vol.5 No.7: 38-40.
- Tsodyks, M.V. and Markram, H. (1997). The Neural Code Between Neocortical Pyramidal Neurons Depends On Neurotransmitter Release Probability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol.94 No.2 :719–723.
- Wiwi, Isnaeni (2008). Fisiologi Hewan. *ISBN*. Vol.8 No.22 : 22-29
- Zhang, L. X. (1998). Neural Plasticity And Emotional Memory. *Cambride University*. Vol.10 No.4 : 829-855
- Zucker, R.S. Regehr, W.G. (2002). Short-Term Synaptic Plasticity. *Annual Review of Physiology*, Vol.64 No.1 : 355–405.

