

**SINKRONISASI JARINGAN SARAF
MODEL NEURON MORRIS-LECAR
DENGAN *SHORT-TERM SYNAPTIC PLASTICITY*
(*STSP*)**

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat Sarjana S-1

Program Studi Fisika



Diajukan oleh:

Retno Dwi Astuti

17106020001

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

2023

HALAMAN PENGESAHAN



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.00.9/01/2023

Tugas Akhir dengan judul : SINKRONISASI JARINGAN SARAF MODEL NEURON MORRIS-LECAR DENGAN SHORT-TERM SYNAPTIC PLASTICITY (STSP)

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : RETNO DWI ASTUTI
Nomor Induk Mahasiswa : 17106020001
Telah diujikan pada : Kamis, 12 Januari 2023
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: 6300a5b0d3def



Penguji I

Dr. Thaqibul Fikri Niyartama, S.Si., M.Si.
SIGNED

Valid ID: 63ef3ac3f024f



Penguji II

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

Valid ID: 63d098a44a309



Yogyakarta, 12 Januari 2023
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

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

Valid ID: 63d0e7731ef1b

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Retno Dwi Astuti

NIM : 17106020001

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Sinkronisasi Jaringan Saraf Model Neuron Morris-Lecar dengan *Short-Term Synaptic Plasticity (STSP)*” merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 25 Januari 2023

Penulis



Retno Dwi Astuti
NIM. 17106020001

HALAMAN PERSETUJUAN SKRIPSI



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/R0

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 : RETNO DWI ASTUTI

NIM : 17106020001

Judul Skripsi : SINKRONISASI JARINGAN SARAF MODEL NEURON MORRIS-LECAR
DENGAN *SHORT-TERM SYNAPTIC PLASTICITY (STSP)*

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 dimunaqosyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 04 Januari 2023

Pembimbing

Anis Yuniati, S.Si. M.Si., Ph.D

NIP. 19830614 200901 2 009

**SINKRONISASI JARINGAN SARAF MODEL NEURON
MORRIS-LECAR DENGAN *SHORT-TERM SYNAPTIC PLASTICITY*
(*STSP*)**

**Retno Dwi Astuti
17106020001**

INTISARI

Riset terkait sinkronisasi jaringan saraf model neuron Morris-Lecar dengan *Short-Term Synaptic Plasticity (STSP)* telah berhasil dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan bentuk konektivitas dan pola sinapsis dari model jaringan saraf pada nilai probabilitas koneksi tertentu, membuat model jaringan saraf dan menganalisis aktivitas sinkronisasi yang terjadi, menganalisis pola konduktansi post-sinapsis pada model jaringan saraf yang dibuat, menganalisis dinamika potensial membran jaringan saraf dalam keadaan sinkron, menganalisis pola transmisi sinapsis dengan *Short-Term Plasticity (STP)*, serta menentukan besarnya frekuensi sinkronisasi dari model jaringan saraf yang dibuat. Studi berbasis komputasi ini dilakukan menggunakan Simulator Brian2 dan solusi persamaan diferensial diselesaikan dengan metode Euler. Total neuron dalam jaringan yang dimodelkan ialah 60 yang terdiri atas 50 neuron eksitatori dan 10 neuron inhibitori. Probabilitas konektivitas antar-neuron divariasikan dari 0,5 sampai 0,8 untuk neuron eksitatori (p_e) dan 0,1 sampai 0,4 untuk variasi probabilitas konektivitas neuron inhibitori (p_i). Hasil menunjukkan bahwa semakin besar probabilitas konektivitasnya, maka semakin banyak koneksi dan sinapsis yang terbentuk. Nilai p_e yang semakin besar menyebabkan aktivitas jaringan saraf semakin sinkron, sedangkan nilai p_i yang semakin besar berdampak pada berkurangnya sinkronisasi jaringan saraf. Jaringan saraf yang sinkron menandakan bahwa aktivitas *spike* terjadi secara koinsiden. *Spike* yang koinsiden menyebabkan potensial membran dan konduktansi post-sinapsis semakin mudah terdeteksi. Terjadinya *spike* juga berpengaruh terhadap pelepasan neurotransmitter sehingga mempengaruhi pola transmisi sinapsis yang terbentuk. Frekuensi rata-rata sinkronisasi jaringan saraf pada penelitian ini ialah 15,1959 Hz.

Kata kunci: Model neuron Morris-Lecar, *Short-Term Synaptic Plasticity (STSP)*, Simulator Brian2, sinkronisasi jaringan saraf,

NEURAL NETWORK SYNCHRONY OF THE MORRIS-LECAR NEURON MODEL COUPLED WITH SHORT-TERM SYNAPTIC PLASTICITY (STSP)

Retno Dwi Astuti
17106020001

ABSTRACT

A study of neural network synchrony using the Morris-Lecar neuron model coupled with Short-Term Synaptic Plasticity (STSP) has been conducted. This research was designed to simulate neuronal connectivity and synaptic patterns at certain connection probabilities, model a neural network and analyze synchrony activity, examine the post-synaptic conductance patterns in the modeled neural network, investigate the dynamics of the neural network membrane potentials in the synchronous state, analyze the Short-Term Plasticity (STP) synaptic transmission patterns, and determine the frequency of neural network synchrony. This computational-based study was executed using the Brian2 Simulator and the differential equation solution was solved by the Euler method. The total number of neurons in the modeled network was 60, consisting of 50 excitatory neurons (n_e) and 10 inhibitory neurons (n_i). The inter-neuron connection probability varied from 0,5 to 0,8 for excitatory neuron connection probability (p_e) and 0,1 to 0,4 for inhibitory neuron connection probability (p_i). The results reveal that the higher the connectivity probability, the more connections and synapses are formed. The greater the value of p_e , the more synchronous the neural network activity is. In contrast, the higher the value of p_i , the less synchronous the neural network activity is. A synchronous neural network implies that the spikes occur coincidentally. Coincidental spikes lead to easily detectable membrane potentials and post-synaptic conductance. Furthermore, spikes affect the release of neurotransmitters, thereby affecting synaptic transmission patterns. The final average frequency of this neural network synchrony is 15,1959 Hz.

Keywords: *Brian2 Simulator, Morris-Lecar neuron model, neural network synchrony, Short-Term Synaptic Plasticity (STSP)*

MOTTO

إِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا
(QS 94:6)

“If you use your tests and trials to flee to Him and to get closer to Him, you will never lose.”

(**Dunia Shuaib** dalam ‘From the Few: An Interactive Program to Cultivate an Attitude of Gratitude’)

“There is only one way to learn. It’s through action. When a person really desires something, all the universe conspires to help that person to realize his dream.”

(**Paulo Coelho** dalam ‘The Alchemist’)

*“You can see the change you want to
Be what you want to be.”*

(**Coldplay** dalam ‘A Head Full of Dreams’)

*“Go on and try to tear me down
I will be rising from the ground
Like a skyscraper”*

(**Demi Lovato** dalam ‘Skyscraper’)

“Ey dost! Derdin ne olursa olsun umudun her zaman Allah Olsun.”

(**Mevlânâ Celâleddin Mehmed Rûmi**)

“Tak ada yang mudah dalam meretas cita setinggi langit karena usahamu harus melebihi angkasa. Sejatinya, kita punya kesempatan yang sama. Yang paling beranilah yang berhasil mendapatkannya.”

(**Ario Muhammad** dalam ‘Antara Laut Halmahera & Eropa’)

“Terkadang seseorang harus bekerja dan berusaha lebih keras untuk mendapatkan sesuatu yang dengan mudah didapatkan orang lain.”

(**Ario Muhammad** dalam ‘Inspirasi dari Tanah Eropa’)

“Tidak ada yang mudah dalam meraih cita-cita. Pastikan ridha Allah tetap menyertai kemanapun takdir akan membawa kita.”

(**Monika Oktora** dalam ‘The Power of PhD Mama’)

“

*Cry the tears you need to cry. But in the midst of your pain, do not forget that
your Lord loves you deeply and sees you fully.
Place your trust in the Divine and let Him lead you back into the embrace of His
everlasting love.
You are an intentional creation of a perfect God. You are far more beautiful than
mirrors can sing about. You are far too intricate for language to weave into
words. The love of God purposely overflowed to create you and everything in
existence.*

”

(A. Helwa dalam ‘Secrets of Divine Love’)

“

*We were born in the womb of the stars. We are made of celestial light and earth.
We breathe the breath of the trees. Our breaths mingle with the leaves, with each
other, with the swaying tides of the sea. We are part of the wind that lifts the
wings of the birds and the bees.
Our breath plays an ever-changing melody through the instrument of our bodies.
Every moment we are a new song.
This body I see in the mirror is just a vehicle, a canvas that holds the paint of
God’s masterpiece of life. The clouds don’t belong to the sky. The stars don’t
belong to the night. The sun does not belong to the horizon it rises upon.
Everything we see is just passing through.*

*You may have prayed for a star,
but Allah may have had universe destined for you.
You may have longed for the fragrance of a flower,
but Allah may have had eternal gardens destined for you.
You may have desired for the tiniest drop,
but Allah may have had infinite oceans destined for you.
Whatever you may want,
know that Allah wants better for you.*

”

(A. Helwa dalam ‘From Darkness into Light’)

HALAMAN PERSEMBAHAN

Gugusan madah dalam konstelasi sahifah ini kupersembahkan:



To my beloved teacher and mother, Bu Anis Yuniati.

I'm so grateful for your presence in my life.

Terima kasih telah membersamai dalam tumbangku, mendukung dalam bangkitku, dan mengiringi dalam prosesku tanpa menghakimi dan menjatuhkanku. Terima kasih telah mengajarkanku tentang kasih, sayang, sabar, kuat, harapan, dan pasang surut kehidupan. *Thank you for everything.*

You are an incredible inspiration! I owe you and admire you sincerely.

May Allah loves you and your family abundantly, endlessly.



To my only sibling, yang percaya mimpi-mimpi gilaku. Let's make it happen and pursue the world we yearn to establish in the future!

To whom I miss fondly, my parents. I believe ye love me more than I love you,

Pak, Ma. :”)



To my dear self, yang selalu berani menjadi dirimu. Thank you for being you.

I believe thou are resilient enough to be thee.

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
السَّلَامُ عَلَيْكُمْ وَرَحْمَةُ اللَّهِ وَبَرَكَاتُهُ

أَلْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ وَالصَّلَاةُ وَالسَّلَامُ عَلَى أَشْرَفِ الْأَنْبِيَاءِ وَالْمُرْسَلِينَ سَيِّدِنَا وَمَوْلَانَا مُحَمَّدٍ

Beribu syukur terhatur pada Sang Maha Luhur dan berjuta selawat terlimpah pada Baginda Rasulallah. Berkat anugerah-Nya yang meruah, terangkai sudah untaian tulisan dalam susunan lembaran yang berjudul “Sinkronisasi Jaringan Saraf Model Neuron Morris-Lecar dengan *Short-Term Synaptic Plasticity (STSP)*”. Hulu dan hilir penelitian ini tidak lain adalah upaya untuk merenungkan ayat-ayat-Nya yang tersurat dan tersirat di jagat raya sebagai salah satu bentuk syukur atas karunia-Nya. Memikirkan isyarat keagungan-Nya menjadi salah satu cara menyelami lautan kalam-Nya. Mempelajari perihal otak adalah upaya untuk menjelajahi bentangan horizon ilmu-Nya yang tak bertepi. Mengeksplorasi neurosains juga menjadi sarana memaksimalkan potensi akal dan mengoptimalkan kemampuan berpikir yang diberkati-Nya serta diharapkan dapat menghasilkan adicita bagi kemaslahatan bersama. Penulis menyadari bahwa semua ini tak akan mampu terselesaikan tanpa bantuan dan keterlibatan berbagai pihak. Oleh karenanya, sudah sepantasnya Penulis ucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Phil. Al Makin, M.A. selaku Rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta
2. Ibu Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

3. Ibu Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Fisika, Dosen Penasihat Akademik, dan Dosen Pembimbing Skripsi
4. Bapak Dr. Thaqibul Fikri Niyartama, S.Si., M.Si. dan Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si. selaku Dosen Penguji Tugas Akhir yang telah banyak memberikan sarannya
5. Ibu Asih Melati, S.Si., M.Sc. dan teman-teman *study club* Fisika Material yang telah banyak membimbing dan menginspirasi
6. Seluruh dosen dan staff di UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta, terkhusus di lingkungan Prodi Fisika serta Fakultas Sains dan Teknologi
7. Teman-teman Fisika 2017, percayalah, setiap diri kalian luar biasa
8. Untuk setiap jiwa dan segala hal yang pernah hadir menyapa, baik yang membawa bahagia atau meninggalkan luka. Setiap kejadian dan pertemuan tak ada yang sia-sia karena semua atas kehendak-Nya. Tak ada sesal di dalamnya karena semua pastilah membawa makna.

Terima kasih atas segala pelajaran berharga yang telah diajarkan, yang mendidik Penulis menjadi pembelajar sepanjang masa. Semoga Allah SWT senantiasa mencurahkan limpahan kasih dan sayang-Nya di dunia dan di surga-Nya. Aamiin. Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karenanya, kritik dan saran yang konstruktif sangatlah diharapkan guna perbaikan di masa yang akan datang.

Yogyakarta, 04 Januari 2023

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iii
HALAMAN PERSETUJUAN SKRIPSI	iv
INTISARI	v
ABSTRACT	vi
MOTTO	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR.....	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	10
1.3 Tujuan Penelitian.....	11
1.4 Batasan Penelitian	11
1.5 Manfaat Penelitian.....	12
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	13
2.1 Studi Pustaka	13
2.2 Landasan Teori	17
2.2.1 Sistem Saraf	17
2.2.2 Neuron.....	24
2.2.3 Sinapsis	32
2.2.4 Plastisitas Sinapsis dan <i>Short-Term Plasticity</i> (STP)	37
2.2.5 Potensial Aksi	40
2.2.6 Sinkronisasi Jaringan Saraf	42
2.2.7 Jaringan Saraf Model Neuron Morris-Lecar	46
2.2.8 Simulator Brian2	52

2.2.9	Wawasan Keislaman tentang Otak.....	53
BAB III	METODE PENELITIAN	56
3.1.	Waktu dan Tempat Penelitian	56
3.2.	Alat Penelitian	56
3.3.	Tahapan Penelitian	56
3.3.1.	Instalasi Simulator Brian2.....	57
3.3.2.	Pemodelan Jaringan Saraf	63
3.3.3.	<i>Output</i> : Hasil Simulasi Berupa Grafik dan Data <i>t Spike</i>	73
3.3.4.	Analisis Data	73
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	76
4.1	Hasil.....	76
4.1.1	Bentuk Konektivitas dan Pola Sinapsis.....	76
4.1.2	Aktivitas Sinkronisasi Jaringan Saraf	81
4.1.3	Pola Konduktansi Post-sinapsis	83
4.1.4	Dinamika Potensial Membran.....	84
4.1.5	Pola Transmisi Sinapsis	86
4.1.6	Frekuensi Sinkronisasi Jaringan Saraf	86
4.2	Pembahasan	87
4.2.1	Bentuk Konektivitas dan Pola Sinapsis.....	87
4.2.2	Aktivitas Sinkronisasi Jaringan Saraf	91
4.2.3	Pola Konduktansi Post-sinapsis	93
4.2.4	Dinamika Potensial Membran.....	96
4.2.5	Pola Transmisi Sinapsis	99
4.2.6	Frekuensi Sinkronisasi Jaringan Saraf	101
4.2.7	Integrasi-Interkoneksi Islam dan Neurosains.....	103
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	108
5.1	Kesimpulan.....	108
5.2	Saran	110
DAFTAR PUSTAKA		111
LAMPIRAN.....		120

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 (a) Sistem Saraf Pusat (SSP) atau <i>Central Nervous System (CNS)</i> dan (b) Sistem Saraf Tepi (SST) atau <i>Peripheral Nervous System (PNS)</i> (Dumper et al., 2022).....	17
Gambar 2.2 Contoh aktivitas yang melibatkan saraf simpatik dan parasimpatik (Dumper et al., 2022).....	19
Gambar 2.3 Bagian-bagian otak (The Johns Hopkins Medicine, 2022)	21
Gambar 2.4 Bagian-bagian otak besar (<i>cerebrum</i>) (Marieb dan Hoehn, 2012)..	22
Gambar 2.5 Bagian-bagian otak kecil (<i>cerebellum</i>) (Marieb dan Hoehn, 2012)	23
Gambar 2.6 Anatomi neuron (Woodruff, 2019).....	25
Gambar 2.7 Struktur akson (Khan Academy, 2018)	27
Gambar 2.8 Jenis-jenis neuron berdasarkan strukturnya (a) <i>multipolar</i> (b) <i>unipolar</i> (c) <i>bipolar</i> (d) <i>piramidal</i> (e) <i>purkinje</i> (Szymik, 2011).....	31
Gambar 2.9 Sinapsis (Khan Academy, 2018)	33
Gambar 2.10 Jenis-jenis sinapsis berdasarkan lokasinya; (a) <i>axodendritic</i> (b) <i>axosomatic</i> dan (c) <i>axoaxonic</i> (Henley, 2022).....	34
Gambar 2.11 <i>Electrical synapse</i> (Pereda, 2014)	36
Gambar 2.12 <i>Chemical synapse</i> (Khan Academy, 2018).....	37
Gambar 2.13 Inisiasi potensial aksi terhadap waktu (Kriesel, 2007)	41
Gambar 2.14 Pola <i>asynchronous</i> pada 2 neuron eksitatori (E) dan 1 neuron inhibitori (I) (Golomb et al., 2001).....	43
Gambar 2.15 Pola <i>spike</i> neuron inhibitori yang sinkron (Golomb et al., 2001)..	44
Gambar 2.16 Pola <i>bursting</i> yang sinkron (Golomb et al., 2001)	44
Gambar 2.17 Rangkaian listrik yang ekuivalen dengan <i>space-clamped</i> sarkolema teritip (Morris dan Lecar, 1981)	51
Gambar 3.1 Tahapan Penelitian.....	57
Gambar 3.2 Tahapan instalasi Simulator Brian2.....	58
Gambar 3.3 Tampilan Anaconda setelah terinstal.....	59
Gambar 3.4 Tampilan Jupyter Notebook	61
Gambar 3.5 <i>Notebook</i> baru pada Jupyter Notebook.....	62

Gambar 3.6 Tahapan pemodelan jaringan saraf	65
Gambar 4.1 Bentuk konektivitas variasi pi 0.1 dan pe 0.5 subgrup neuron eksitatori	76
Gambar 4.2 Pola sinapsis variasi pi 0.1 dan pe 0.5 subgrup neuron eksitatori ...	77
Gambar 4.3 Bentuk konektivitas variasi pi 0.1 dan pe 0.5 subgrup neuron inhibitori	77
Gambar 4.4 Pola sinapsis variasi pi 0.1 dan pe 0.5 subgrup neuron inhibitori ...	78
Gambar 4.5 Bentuk konektivitas variasi pi 0.4 dan pe 0.8 subgrup neuron eksitatori	79
Gambar 4.6 Pola sinapsis variasi pi 0.4 dan pe 0.8 subgrup neuron eksitatori ...	79
Gambar 4.7 Bentuk konektivitas variasi pi 0.4 dan pe 0.8 subgrup neuron inhibitori	80
Gambar 4.8 Pola sinapsis variasi pi 0.4 dan pe 0.8 subgrup neuron inhibitori ...	80
Gambar 4.9 Aktivitas sinkronisasi jaringan saraf dengan variasi pi 0.1 dan pe 0.5	81
Gambar 4.10 Aktivitas sinkronisasi jaringan saraf dengan variasi pi 0.1 dan pe 0.6	81
Gambar 4.11 Aktivitas sinkronisasi jaringan saraf dengan variasi pe 0.7 dan pi 0.1	82
Gambar 4.12 Aktivitas sinkronisasi jaringan saraf dengan variasi pe 0.7 dan pi 0.4	82
Gambar 4.13 Pola konduktansi post-sinapsis dengan variasi pe 0.6 dan pi 0.1 ..	83
Gambar 4.14 Pola konduktansi post-sinapsis dengan variasi pe 0.6 dan pi 0.2 ..	83
Gambar 4.15 Pola konduktansi post-sinapsis dengan variasi pe 0.5 dan pi 0.2 ..	84
Gambar 4.16 Dinamika potensial membran neuron eksitatori (atas) dan neuron inhibitori (bawah) pada variasi pi 0.2 dan pe 0.8	85
Gambar 4.17 Dinamika potensial membran neuron eksitatori (atas) dan neuron inhibitori (bawah) pada variasi pi 0.4 dan pe 0.6	85
Gambar 4.18 Pola transmisi sinapsis neuron ke-0 variasi pi 0.1 dan pe 0.6	86

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tinjauan Pustaka	16
Tabel 2.2	Kompleksitas model neuron (Abusnaina dan Abdullah, 2014)	48
Tabel 2.3	Model-model neuron beserta perilaku yang dapat ditampilkannya (Abusnaina dan Abdullah, 2014; Izhikevich, 2004)	48
Tabel 3.1	Daftar alat penelitian	55



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Allah SWT telah menciptakan langit, bumi, dan segala isinya. Dia-lah Sang Pengatur Semesta yang menjadikan manusia sebagai *khalifah* di muka bumi, yang melebihi derajatnya dari makhluk lain. Aisyah Bint Syati (seperti dikutip dalam Dawang, 2011) mengatakan bahwa hanya manusia yang dianugerahi Allah SWT *al-'ilm* (ilmu pengetahuan), *al-'aql* (kemampuan berpikir), dan *al-tamyiz* (kemampuan untuk menerapkan dan mengambil keputusan) sehingga mampu memikirkan serta memilah yang *haq* dan *bathil* dalam mengemban amanah kepemimpinan di dunia.

Abd Aziz Dahlan (seperti dikutip dalam Yusuf, 2013) menuturkan bahwa kata 'akal' dalam Al-Qur'an disebutkan dalam bentuk *fi'il* (kata kerja), baik *fi'il madhi* (kata kerja lampau) ataupun *fi'il mudhari* (kata kerja saat ini dan akan datang). Ibn Faris mengatakan (seperti dikutip dalam Yusuf, 2013) bahwa kata عقل mengandung makna kemampuan dalam mengontrol sesuatu berupa perbuatan, perkataan, atau keburukan.

Seperti dalam firman-Nya QS. Ar-Rum (30) ayat 24 yang berbunyi:

وَمِنْ آيَاتِهِ يُرِيكُمُ الْبُرْقَ حَوْفًا وَطَمَعًا وَيُنزِلُ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَيُحْيِي بِهِ الْأَرْضَ بَعْدَ مَوْتِهَا إِنَّ فِي ذَلِكَ لَآيَاتٍ

لِقَوْمٍ يَعْقِلُونَ (الروم: ٢٤)

*“Dan di antara tanda-tanda-Nya, Dia memperlihatkan kepada kamu kilat untuk menimbulkan ketakutan dan harapan, dan Dia menurunkan air dari langit lalu menghidupkan bumi dengannya sesudah matinya. Sesungguhnya pada yang demikian itu benar-benar terdapat tanda-tanda bagi kaum yang **berakal**.”*

Shihab (2002) dalam Tafsir Al-Mishbah mengatakan bahwa kaum yang berakal yakni orang-orang yang merenungkan dan memikirkan tanda-tanda kekuasaan Allah. Menurut Tafsir Kementerian Agama Republik Indonesia (2011), kata ‘akal’ di akhir ayat ini bermakna media untuk berpikir dan menyelidik. Hal senada terdapat dalam Tafsir Al-Jalalain yang menyebutkan bahwa kaum yang mempergunakan akal mereka ialah mereka yang berpikir (As-Suyuti dan Al-Mahalli, 2016).

“Berpikir” bermakna menggunakan akal budi untuk mempertimbangkan dan memutuskan sesuatu atau menimbang-nimbang dalam ingatan (KBBI Daring, 2016). Berdasarkan perspektif sains, berpikir merupakan suatu aktivitas yang terjadi di otak. Hal tersebut muncul ketika manusia menghadapi suatu persoalan dan ingin menemukan solusinya. Momen dimulainya proses pencarian penyelesaian masalah tersebut merupakan aktivitas pada otak yang disebut sebagai berpikir (Tekieh et al., 2017).

Otak merupakan bagian dari Sistem Saraf Pusat yang bertanggung jawab dalam menerima, memproses, serta merespon informasi (Thau et al., 2021). Otak manusia diestimasikan memiliki 100 milyar neuron (Kappen, 2008). Neuron juga dikenal sebagai sel saraf (*nerve cells*) (Hall, 1998). Seperti pada sel lainnya, sel saraf juga memiliki badan sel yang berisi inti sel (*nucleus*), retikulum endoplasma, ribosom, aparatus golgi, mitokondria, dan organel lainnya. Namun, khusus pada sel saraf struktur dendritnya memiliki tempat untuk kontak sinaptik

yang tercipta dari terminal sel saraf lain dan merupakan tempat menerima informasi (Kappen, 2008).

Melimpahnya teka-teki terkait neuron yang belum terjawab membuat para ahli terus mengembangkan penelitian di bidang tersebut hingga dewasa ini muncul suatu cabang keilmuan baru untuk mengungkap teka-teki saraf yang dikenal sebagai neurosains. Neurosains pada prinsipnya ditujukan untuk memberikan pemahaman terkait bagaimana sistem saraf bekerja (Ikrar, 2015). Sistem saraf mampu mengintegrasikan banyak informasi seperti untuk bertindak dan berpikir. Seluruh proses sistem organ pada makhluk hidup pada dasarnya terintegrasi oleh sistem saraf yang merupakan sistem koordinasi tubuh (Campbell et al., 2016). Melihat betapa vitalnya keberadaan sistem saraf pada tubuh makhluk hidup terlebih lagi pada manusia, maka kontinuitas riset terkait jaringan saraf perlu diperhatikan agar mampu memberikan dampak positif bagi kehidupan.

Neuron dapat berkomunikasi satu sama lain melalui pulsa-pulsa listrik yang dikenal dengan sebutan *action potentials* (potensial aksi) atau *spikes*. Neuron yang memicu terjadinya potensial aksi disebut *excitatory neuron*, sedangkan yang menghambat terjadinya potensial aksi atau yang bersifat melemahkan disebut *inhibitory neuron* (Kappen, 2008). Sayangnya, seringkali riset komputasi jaringan saraf tidak melibatkan neuron inhibitori pada pemodelannya. Padahal, neuron inhibitori berperan dalam menjaga keseimbangan aktivitas pada otak (Swanson dan Maffei, 2019). Buzsáki, seorang profesor dari New York University's Langone Medical Center

menganalogikan pentingnya keberadaan neuron inhibitori ini seperti punggasi. Seseorang dapat berkomunikasi dengan baik satu sama lain salah satunya karena terdapat jeda pada kata dan kalimat yang diucapkannya, sehingga lawan bicara dapat memahami pesan yang hendak disampaikan. Begitupun dengan neuron yang akan berinteraksi dengan baik jika terdapat ‘jeda’ dalam komunikasinya (Wnuk, 2021).

Ketika aktivitas kelistrikan pada neuron-neuron itu terjadi secara keinsidental, dapat dikatakan jaringan saraf tersebut sinkron dan fenomena ini dikenal dengan *neuronal synchronization* atau sinkronisasi jaringan saraf (Timofeev et al., 2012; Grupo MContigo, 2020). Sinkronisasi jaringan saraf menjadi bagian penting dalam proses *learning* dan pembentukan memori. Neuron-neuron yang sebelumnya tidak teratur dan tidak terkoordinasi satu sama lain akan berubah polanya menjadi lebih sinkron saat proses pembentukan memori (University of New Hampshire, 2020). J. Creaser (seperti dikutip dalam Kunze, 2021) juga mengatakan para saintis telah mengobservasi bahwa terdapat perbedaan pola sinkronisasi aktivitas kelistrikan pada otak yang sehat dan yang tidak. Pada beberapa kasus yang berhubungan dengan disfungsi otak atau gangguan psikologis seperti demensia, skizofrenia, dan autisme didapati pola yang kurang sinkron pada aktivitas otaknya (Trafton, 2014; Grupo MContigo, 2020). Namun, aktivitas kelistrikan yang berlebih pada otak juga memicu pada kondisi yang terlalu sinkron antar-jaringan sarafnya yang mana hal tersebut teramati pada penderita epilepsi dan parkinson. Oleh karenanya, memahami aktivitas kelistrikan pada otak serta bagaimana pola-pola sinkronisasinya

merupakan langkah penting yang lebih lanjut dapat berkontribusi terhadap riset terkait diagnosis dan *treatment* yang tepat untuk pengidap kelainan otak tersebut (Kunze, 2021).

Sinkronisasi jaringan saraf terjadi pada rentang frekuensi yang bervariasi. Rentang frekuensi tersebut ialah pada rentang gelombang delta (0,5 - 4 Hz), teta (4 - 8 Hz), alfa (8 - 12 Hz), beta (12 - 35 Hz), dan gama (>35 Hz). Masing-masing gelombang terasosiasi dengan kondisi yang berbeda-beda. Misalnya gelombang delta, teta, alfa, beta, dan gama yang secara berurutan masing-masing terasosiasi dengan keadaan tertidur pulas, mengantuk, santai, sibuk, dan konsentrasi penuh (Abhang et al., 2016). Pada penderita skizofrenia, ketidakmampuan neuronnya melakukan osilasi pada rentang frekuensi beta dan gama di area otak tertentu menyebabkan defisiensi fungsi kognitif. Namun, pada area otak lain yang mengalami *hyper-connectivity* menyebabkan terjadinya halusinasi auditori maupun visual. Pada penderita epilepsi, frekuensi osilasi neuron yang terlalu tinggi (100 - 500 Hz) menyebabkan penderitanya mengalami kejang-kejang. Beberapa *brain disorders* tersebut relevan dengan abnormalitas frekuensi komunikasi antar-neuron pada jaringan saraf (Uhlhaas dan Singer, 2006)

Komunikasi antar-neuron terjadi pada daerah yang disebut sinapsis, yaitu lokasi di mana informasi dihantarkan dari neuron pertama (*presynaptic neuron*) ke neuron target (*postsynaptic neuron*) (Gerstner, 2009). Menurut Feriyawati (seperti dikutip dalam Diva, 2018), sinapsis adalah satu-satunya lokasi dimana impuls dihantarkan dari neuron satu ke yang lainnya. Setiap neuron pada korteks

otak dapat terkoneksi dengan lebih dari 10.000 neuron lain melalui sinapsis. Sejumlah besar neuron dan sinapsis tersebut merepresentasikan jaringan saraf (*neuronal network*) yang sangat kompleks. Namun, sebagian besar riset secara komputasi mengenai jaringan saraf menjaga konstan sinapsisnya. Padahal, dalam jaringan saraf biologis, sinapsis terus berubah seiring dengan pertumbuhan sel serta dalam proses *studying* dan *memorizing* pada otak. Hal tersebut dikenal dengan *synaptic plasticity* (plastisitas sinapsis) (Han et al., 2012).

Plastisitas sinapsis diyakini sebagai unsur vital dalam perkembangan dan fungsi otak, adaptabilitas terhadap lingkungan (Appelbaum et al., 2022), serta merupakan sebuah elemen kunci untuk memahami proses *learning* dan penyimpanan informasi pada otak dalam arsitektur *Spiking Neural Network* (*SNN*) (Vigeneron dan Martinet, 2020). Lebih luas lagi, kondisi plastisitas sinapsis juga berpengaruh terhadap kondisi kejiwaan dan kesehatan mental seseorang. Melalui proses penguatan kembali koneksi sinapsisnya, sistem saraf mampu meningkatkan ketahanan memori yang menjadi basis biologis fungsi mental seseorang. Hasil riset telah menunjukkan bahwa pada beberapa gangguan *neuropsychiatric* seperti *schizophrenia*, *Major Depressive Disorder (MDD)*, *Post-traumatic Stress Disorder (PTSD)*, bahkan pada kasus adiksi narkotika serta alkohol, terdapat indikasi disfungsi plastisitas sinapsis (Appelbaum et al., 2022).

Plastisitas sinapsis inilah yang memegang kontrol dalam keefektifan komunikasi antar-neuron (Feriyawati, seperti dikutip dalam Diva, 2018).

Kekuatan komunikasi neuron-neuron tersebut bergantung pada seberapa kuat sinapsisnya. Kekuatan sinapsis bersifat dinamis, yakni dapat berubah baik *long-term* maupun *short-term*. *Long-Term Plasticity (LTP)* merujuk pada perubahan kekuatan sinapsis yang dapat bertahan hingga beberapa jam, hari, bahkan tahun, sedangkan pada *Short-Term Plasticity (STP)* perubahan kekuatan sinapsisnya hanya muncul dalam skala waktu detik (Queensland Brain Institute, 2018). *Short-Term Plasticity* inilah yang mendukung pemrosesan *sensory memory*, *short-term memory*, *involuntary attention*, *selective attention*, dan *perceptual learning* (Jääskeläinen et al., 2011). Bukti penelitian menunjukkan bahwa neuroplastisitas ini diinisiasi oleh mekanisme sinkronisasi saraf (Rice, 2014). Oleh karenanya, riset terkait sinkronisasi saraf yang menyertakan aspek STP perlu dieksplorasi.

Struktur saraf yang sangat kecil, rentan, dan sensitif membuat riset eksperimen terkait saraf sangatlah terbatas. Sebagian mekanisme hasil riset belum mampu menggambarkan secara utuh apa yang sebenarnya terjadi di dalam otak (Mullner, 2015), sehingga pemodelan komputasi terkait jaringan saraf dapat dijadikan solusi alternatif untuk memperoleh data yang dapat menyokong riset eksperimen maupun teoritis. Pemodelan atau simulasi dapat diartikan sebagai metode pelatihan yang memeragakan sesuatu dalam bentuk tiruan yang mirip dengan keadaan yang sesungguhnya, atau penggambaran suatu sistem atau proses dengan peragaan berupa model statistik atau pemeranan (KBBI Daring, 2016). Oleh karenanya, riset komputasi memegang peranan penting dalam perkembangan penelitian neurosains modern.

Untuk memahami bagaimana sistem saraf dan otak bekerja, para ilmuwan telah mengembangkan beberapa model neuron dan menyimulasikan aktivitas kelistrikan pada neuron. Beberapa model neuron seperti yang disebutkan dalam Hu et al. (2016) antara lain model Hodgkin-Huxley (Hodgkin dan Huxley, 1952), FitzHugh-Nagumo (FitzHugh, 1961; Nagumo et al., 1962; Rinzel, 1978), Nagumo-Sato (Nagumo dan Sato, 1972), Wilson-Cowan (Wilson dan Cowan, 1972), Hindmarsh-Rose (Hindmarsh dan Rose, 1984), Izhikevich (Izhikevich, 2003), dan Morris-Lecar (Morris dan Lecar, 1981), serta beberapa model lain yang dirangkum Abusnaina dan Abdullah (2014) yaitu *Integrated and Fire (IF)*, *BVP*, serta *Spike Response Model (SRM)*. Di antara model-model tersebut, model yang mampu menggambarkan perilaku jaringan saraf biologis secara lengkap relatif lebih sulit untuk divisualisasikan karena menggunakan persamaan diferensial berorde tinggi, membutuhkan daya komputer yang besar dan waktu yang lebih lama untuk memodelkannya. Contohnya ialah model neuron Hodgkin-Huxley (HH) yang menggunakan persamaan 4 dimensi. Di sisi lain, model jaringan saraf yang relatif lebih efisien secara komputasi memiliki kompleksitas yang rendah sehingga tidak mampu menggambarkan jaringan saraf biologis yang mendekati kondisi riil. Contohnya ialah model IF yang hanya berupa persamaan 1 dimensi namun tidak banyak perilaku neuron yang dapat disimulasikan (Izhikevich, 2004; Abusnaina dan Abdullah, 2014). Model neuron Morris-Lecar (ML) menjadi salah satu model favorit dalam komputasi neurosains karena model neuron ini merupakan sistem dua dimensi (Lecar, 2007). Model tersebut diperoleh melalui reduksi persamaan diferensial 4

dimensi dari model neuron Hodgkin-Huxley (HH) menjadi persamaan diferensial 2 dimensi yang tetap mampu menggambarkan kompleksitas neuron biologis ekuivalen dengan model HH dengan tingkat efisiensi komputasi yang lebih baik dari model HH (Izhikevich, 2004).

Sebelum merekonstruksi otak menggunakan komputer, tentu hal yang paling utama adalah memahami bagaimana sel-sel dalam otak berkomunikasi dengan sel lain menggunakan sinyal-sinyal listrik ataupun sinyal kimiawi. Kemudian, aktivitas tersebut dideskripsikan menggunakan kode-kode untuk membangun *digital copies* dari jaringan saraf yang sangat kompleks untuk memahami lebih lanjut bagaimana jaringan saraf tersebut menginterpretasikan dan memproses informasi. Dewasa ini para neurosaintis mengembangkan simulator untuk memodelkan jaringan saraf. Sayangnya, beberapa simulator membutuhkan keahlian bahasa pemrograman khusus. Beberapa simulator menurut Stimberg et al. (2019) membutuhkan *domain-specific languages* seperti NMODL untuk NEURON (Hines dan Carnevale, 2000) dan NESTML untuk NEST (Plotnikov et al., 2016). Akan tetapi, seiring berkembangnya riset komputasi neurosains, kini terdapat suatu simulator yang menawarkan penulisan *syntax* yang lebih sederhana dan fleksibel, yaitu Brian2 Simulator (Stimberg, Goodman, et al., 2019). Brian2 ditulis menggunakan bahasa pemrograman Python. Model neuron dapat dideskripsikan menggunakan formula matematika dan menggunakan satuan fisika. Simulator ini juga mengizinkan penggunanya untuk mendefinisikan model sinapsis yang ingin digunakan (seperti *plasticity rules*) serta memungkinkan untuk menyertakan spesifikasi tertentu pada neuron

yang ingin dimodelkan (seperti *threshold* dan kondisi refraktori). Selain itu, simulator ini bebas diakses secara gratis (Stimberg et al., 2013).

Berdasarkan uraian di atas, pada penelitian ini dilakukan simulasi sinkronisasi jaringan saraf model neuron Morris-Lecar dengan *STSP* (*Short-Term Synaptic Plasticity*) menggunakan Simulator Brian2.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimanakah bentuk konektivitas dan pola sinapsis yang terbentuk dari model jaringan saraf dengan probabilitas koneksi tertentu?
2. Bagaimanakah aktivitas sinkronisasi yang terjadi pada jaringan saraf?
3. Bagaimanakah pola konduktansi post-sinapsis pada model jaringan saraf yang dibuat?
4. Bagaimanakah dinamika potensial membran jaringan saraf dalam keadaan sinkron?
5. Bagaimanakah pola transmisi sinapsis dengan *Short-Term Plasticity* (*STP*)?
6. Berapakah besarnya frekuensi sinkronisasi dari model jaringan saraf yang dibuat?

1.3 Tujuan Penelitian

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

1. Mensimulasikan bentuk konektivitas dan pola sinapsis dari model jaringan saraf pada nilai probabilitas koneksi tertentu
2. Membuat model jaringan saraf dan menganalisis aktivitas sinkronisasi yang terjadi
3. Menganalisis pola konduktansi post-sinapsis pada model jaringan saraf yang dibuat
4. Menganalisis dinamika potensial membran jaringan saraf dalam keadaan sinkron
5. Menganalisis pola transmisi sinapsis dengan *Short-Term Plasticity (STP)*
6. Menentukan besarnya frekuensi sinkronisasi dari model jaringan saraf yang dibuat

1.4 Batasan Penelitian

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Jumlah neuron eksitatori (ne) dan neuron inhibitori (ni) masing-masing adalah 50 dan 10
2. Variasi probabilitas konektivitas neuron eksitatori (pe) adalah 0.5, 0.6, 0.7, dan 0.8
3. Variasi probabilitas konektivitas neuron inhibitori (pi) adalah 0.1, 0.2, 0.3, dan 0.4

4. Metode solusi persamaan diferensial yang dipakai ialah Metode Euler
5. Pemodelan jaringan saraf menggunakan Simulator Brian2

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memahami konsep dan parameter fisis model Morris Lecar
2. Memahami dinamika hasil simulasi model Morris-Lecar
3. Memahami model realistik jaringan saraf yang melibatkan sinapsis
4. Sebagai referensi bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data yang telah dilakukan pada penelitian yang berjudul “Sinkronisasi Jaringan Saraf Model Neuron Morris-Lecar dengan *Short-Term Synaptic Plasticity (STSP)*”, dapat disimpulkan bahwa:

1. Bentuk konektivitas dan pola sinapsis dari jaringan saraf model neuron Morris-Lecar dengan variasi probabilitas koneksi neuron eksitatori (pe) dan variasi probabilitas koneksi neuron inhibitori (pi) telah berhasil dibuat. Probabilitas koneksi berpengaruh terhadap bentuk konektivitas dan pola sinapsisnya. Semakin besar probabilitas pe dan pi , maka semakin banyak pula koneksi dan sinapsis yang terbentuk.
2. Aktivitas sinkronisasi jaringan saraf pada model yang dibuat dipengaruhi oleh probabilitas koneksi neuron eksitatori dan inhibitori. Probabilitas koneksi neuron eksitatori (pe) yang semakin besar menyebabkan neuron-neuron dalam jaringan melakukan *spike* pada waktu yang hampir bersamaan, sehingga berdampak pada semakin sinkronnya aktivitas jaringan saraf. Sebaliknya, probabilitas koneksi neuron inhibitori (pi) yang besar berdampak pada berkurangnya sinkronisasi aktivitas jaringan saraf.

3. Probabilitas koneksi neuron eksitatori (pe) yang nilainya lebih besar dibandingkan dengan probabilitas koneksi neuron inhibitori (pi) memicu neuron target di jaringan saraf tersebut menerima arus yang menguatkan lebih dahulu, kemudian diikuti oleh diterimanya arus yang melemahkan. Semakin besar probabilitas terkoneksi satu neuron dengan neuron lain berarti semakin besar kemungkinan neuron tersebut menerima arus. Semakin banyak neuron yang berpeluang menerima arus, maka total arus yang diterima akan semakin besar sehingga nilai konduktansi semakin besar dan semakin mudah terdeteksi. Hal tersebut sejalan dengan teori $I = V.g$ dimana arus berbanding lurus dengan konduktansi.
4. Semakin kecil probabilitas koneksi neuron inhibitori (pi) dan semakin besar probabilitas koneksi neuron eksitatori (pe) membuat potensial aksi neuron-neuron dalam jaringan tersebut melakukan *spike* secara koinsiden. Hal tersebut berimplikasi pada semakin berhimpitnya grafik dinamika potensial membran yang dihasilkan yang mengindikasikan semakin sinkronnya aktivitas di jaringan saraf tersebut.
5. Pelepasan neurotransmitter dari sel pre-sinapsis menuju sel post-sinapsis dipicu oleh datangnya potensial aksi pada sel pre-sinapsis. Jika tidak terjadi *spike*, maka tidak ada pelepasan neurotransmitter sehingga nilainya 0. Semakin banyak neurotransmitter yang dilepaskan (r_s), artinya semakin banyak pula neurotransmitter yang menunggu dan siap untuk dilepas (u_s), sehingga persediaan total neurotransmitter (x_s) berkurang.

6. Nilai frekuensi sinkronisasi jaringan saraf yang dimodelkan ialah sebesar 15,1959 Hz. Berdasarkan teori, frekuensi tersebut tergolong gelombang Beta (β).

5.2 Saran

Dikarenakan keterbatasan yang ada pada penelitian ini, penulis menyarankan beberapa hal untuk dieksplorasi lebih lanjut terkait penelitian ini, yaitu:

1. Dilakukan simulasi untuk *neuronal behavior* yang lebih banyak sehingga mendapatkan gambaran yang komprehensif terkait perilaku neuron yang dimodelkan.
2. Penggunaan parameter yang lebih spesifik untuk kondisi tertentu, misalnya pada beberapa kasus *brain disorders*, sehingga dapat dijadikan studi pembandingan antara riset eksperimen dengan riset komputasi.
3. Dilakukan spesifikasi terkait area otak yang disimulasikan.
4. Dilakukan penilaian kuantitatif terkait sinkron dan tidak sinkronnya aktivitas jaringan saraf, besar konduktansinya, serta nilai potensial membrannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abhang, P. A., Gawali, B. W., dan Mehrotra, S. C. 2016. Technological Basics of EEG Recording and Operation of Apparatus. In *Introduction to EEG- and Speech-Based Emotion Recognition*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804490-2.00002-6>
- Abusnaina, A. A., dan Abdullah, R. 2014. Spiking Neuron Models : A Review. *International Journal of Digital Content Technology and Its Applications*, **Vol.8 Juni**: 14–21. <https://www.researchgate.net/publication/317579637>
- Appelbaum, L. G., Shenasa, M. A., Stolz, L., dan Daskalakis, Z. 2022. Synaptic Plasticity and Mental Health: Methods, Challenges and Opportunities. *Neuropsychopharmacology*, **Juni**: 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41386-022-01370-w>
- Ardiyanti, A. D. 2020. Perspektif Al-Qur'an tentang Sel Saraf dalam Kajian Integrasi Agama dan Sains. *Prosiding Konferensi Integrasi Interkoneksi Islam dan Sains*, **Vol.2**: 61–63. <http://sunankalijaga.org/prosiding/index.php/kiiis/article/view/375>
- As-Suyuti, J., dan Al-Mahalli, J. 2016. *Tafsir Jalalain - Jilid 2* Penerjemah: Bahrin Abubakar, LC dan H. Anwar Abubakar, LC. In *Tafsir Jalalain*: 1–1433. Sinar Baru Algensindo.
- Başar, E., Başar-Eroğlu, C., Karakaş, S., dan Schürmann, M. 2000. Brain Oscillations in Perception and Memory. *International Journal of Psychophysiology*, **Vol.35**: 95–124. [https://doi.org/doi:10.1016/s0167-8760\(99\)00047-1](https://doi.org/doi:10.1016/s0167-8760(99)00047-1)
- Bican, O., Minagar, A., dan Pruitt, A. A. 2013. The Spinal Cord. A Review of Functional Neuroanatomy. *Neurologic Clinics*, **Vol.31 No.1**: 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ncl.2012.09.009>
- Campbell, N. A. 2016. *Biology* (11th ed.). Pearson Education.
- Cherry, K. 2022. *What Is Neuroplasticity?* Verywell Mind Dotdash Media, Inc. New York. Diakses dari <https://www.verywellmind.com/what-is-brain-plasticity-2794886>
- Cortes, J. M., Desroches, M., Rodrigues, S., Veltz, R., Muñoz, M. A., dan Sejnowski, T. J. 2013. Short-Term Synaptic Plasticity in The Deterministic Tsodyks-Markram Model Leads to Unpredictable Network Dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **Vol.110 No.41**: 16610–16615. <https://doi.org/10.1073/pnas.1316071110>
- Dawang, M. 2011. *Kemuliaan Manusia dalam AL- Qur'an (Kajian Tahlili Surah Al- Isra' Ayat 70)*. (Tugas Akhir), Jurusan Tafsir Hadis, Fakultas Ushuluddin dan Filsafat, UIN Alauddin, Makassar. <http://repositori.uin->

alauddin.ac.id/3298/1/Muh. Dawang.pdf

- Departemen Agama RI. 2011. *Al-Qur'an dan Tafsirnya Jilid VII*. In *Al-Qur'an dan Tafsirnya*. Widya Cahaya. https://ia803409.us.archive.org/18/items/kemenag-al-quran-dan-tafsirnya/Kemenag - Al-Quran dan Tafsirnya_07.pdf
- Diva, S. A. 2018. *Pengaruh Konsentrasi Kalsium dalam Sel Neuron pada Plastisitas Sinapsis Model STDP (Spike Timing Dependent Plasticity)*. (Tugas Akhir), Jurusan Fisika, FST, UIN Sunan Kalijaga, Yogyakarta.
- Dumper, K., Jenkins, W., Lacombe, A., Lovett, M., dan Perimutter, M. 2022. *Introductory Psychology* (S. Swindell (ed.)). Washington State University. <https://opentext.wsu.edu/psych105/chapter/parts-of-the-nervous-system/>
- Fauzia, S. 2019. *Pemodelan Astrocyte Li-Rinzel dengan Stimulasi Neurotransmitter Sinapsis*. (Tugas Akhir), Jurusan Fisika, FST, UIN Sunan Kalijaga, Yogyakarta. <https://digilib.uin-suka.ac.id/id/eprint/38286/>
- Fitzhugh, R. 1961. Impulses and Physiological States in Theoretical Models of Nerve Membrane. *Biophysical Journal*, **Vol.1 No.6:** 445–466. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(61\)86902-6](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(61)86902-6)
- Frothingham, S. 2018. *Excitatory Neurotransmitters*. Healthline Media. Diakses pada 02 November 2022 dari <https://www.healthline.com/health/excitatory-neurotransmitters>
- Gerstner, W. 2009. Spiking Neuron Models. In L. R. Squire (Ed.), *Encyclopedia of Neuroscience*, 277–280. Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-008045046-9.01405-4>
- Gerstner, W., dan Kistler, W. M. 2002. *Spiking Neuron Models; Single Neurons, Populations, Plasticity*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Golomb, D., Hansel, D., dan Mato, G. 2001. Mechanisms of Synchrony of Neural Activity in Large Networks. In F. Moss dan S. Gielen (Eds.), *Handbook of Biological Physics*, **Vol.4:** 887–968. Elsevier Science B.V.
- Goodman, D., Brette, R., Diesmann, M., dan Brian, R. 2008. Brian : A Simulator for Spiking Neural Networks in Python. *Frontiers in Neuroinformatics*, **Vol.2 November:** 1–10. <https://doi.org/10.3389/neuro.11.005.2008>
- Goodman, D. F. M., Brette, R., Carnevale, N. T., dan Ekeberg, Ö. 2009. The Brian Simulator. *Frontiers in Neuroinformatics*, **Vol.3 No.2:** 192–197. <https://doi.org/10.3389/neuro.01.026.2009>
- Grupo MContigo. 2020. Neuronal Synchronization: Your Brain's Orchestra. *Exploring Your Mind*. Diakses dari <https://exploringyourmind.com/neuronal-synchronization-your-brains-orchestra/>
- Hagiwara, Susumu dan Nakajima, Shigehiro. 1966. Effects of the Intracellular Ca Ion Concentration upon the Excitability of the Muscle Fiber Membrane of a Barnacle. *J Gen Physiol*, **Vol.49 No.4:** 807-818.

- <https://doi.org/10.1085/jgp.49.4.807> Diakses dari <https://rupress.org/jgp/article/49/4/807/30869/Effects-of-the-Intracellular-Ca-Ion-Concentration>
- Hall, R. H. 1998. *The Neuron* Missouri University of Science and Technology, Missouri. Diakses dari https://web.mst.edu/~rhall/neuroscience/01_fundamentals/neuron.pdf
- Han, F., Lu, Q. S., Wiercigroch, M., Fang, J. A., dan Wang, Z. J. 2012. Firing Synchronization of Learning Neuronal Networks with Small-World Connectivity. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, **Vol.47**: 1161–1166. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2011.09.001>
- Hasyim, M. F. 2019. *Pemodelan Jaringan Saraf Hodgkin-Huxley (HH) Neuron dengan Short-Term Plasticity (STP) Menggunakan Simulator Brian2*. (Tugas Akhir), Jurusan Fisika, FST, UIN Sunan Kalijaga, Yogyakarta.
- Hasyim, M. F., & Yuniati, A. 2019. Pengaruh Probabilitas Konektivitas Neuron pada Sinkronisasi Jaringan Saraf Model HH Neuron dengan STP. *Sunan Kalijaga Journal of Physics*, **Vol.1 No.1**: 14–22. Diakses dari <https://ejournal.uin-suka.ac.id/saintek/physics/article/view/1629>
- Hathout, G. 2021. *Neurotheology Lecture Series*. IslamiCity. Diakses pada 15 Desember 2022 dari <https://www.islamicity.org/78771/>
- Heersink School of Medicine The University of Alabama. 2022. *What Does The Spinal Cord Do?* Diakses pada 25 Mei 2022 dari <https://www.uab.edu/medicine/sci/faqs-about-spinal-cord-injury-sci/what-does-the-spinal-cord-do>
- Heersink School of Medicine The University of Alabama. 2022). *What is The Spine?* Diakses pada 25 Mei 2022 dari <https://www.uab.edu/medicine/sci/faqs-about-spinal-cord-injury-sci/what-is-the-spine>
- Henley, C. 2022. Synapse Structure. In *Foundation of Neuroscience*. Michigan State University, Michigan. <https://openbooks.lib.msu.edu/neuroscience/chapter/synapse-structure/>
- Hindmarsh, J. L., dan Rose, R. M. 1984. A Model of Neuronal Bursting Using Three Coupled First Order Differential Equations. *Proceedings of The Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 87–102. <https://doi.org/10.1098/rspb.1984.0024>
- Hines, M. L., dan Carnevale, N. T. 2000. Expanding NEURON's Repertoire of Mechanisms with NMODL. *Neural Computation*, **Vol.12 No.5**: 995–1007. <https://doi.org/https://doi.org/10.1162/089976600300015475>
- Hiroshi, K., dan Yasuhiko, O. 1984. Analysis Of A Separatrix Loop in N-Dimensional Autonomous System. *IEICE Trans*, **Vol.67 No.11**: 1098–1099.
- Hodgkin, A. L., dan Huxley, A. F. 1952. A Quantitative Description of Membrane

- Current and Its Application to Conduction and Excitation in Nerve. *J. Physiol.*, 500–544.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1392413/pdf/jphysiol01442-0106.pdf>
- Hoffmann, M. 2013. The Human Frontal Lobes and Frontal Network Systems: An Evolutionary, Clinical, and Treatment Perspective. *ISRN Neurology*, **2013**: 1–34. <https://doi.org/10.1155/2013/892459>
- Hu, X., Liu, C., Liu, L., Ni, J., dan Li, S. 2016. An Electronic Implementation for Morris–Lecar Neuron Model. *Nonlinear Dynamics*, **Vol.84 No.4**: 2317–2332. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-2647-y>
- Huda, A. M., dan Suyadi. 2020. Otak dan Akal dalam Kajian Al-Quran dan Neurosains. *Jurnal Pendidikan Islam Indonesia*, **Vol.5 No.1**: 67–79. <https://doi.org/10.35316/jpii.v5i1.242>
- Ikrar, T. 2015. *Ilmu Neurosains Modern*. Pustaka Pelajar.
- IQWiG (Germany Institute for Quality and Efficiency in Health Care). 2009. *How Does The Nervous System Work?* (Ed. 20). InformedHealth.org. Cologne. <https://doi.org/Bookshelf ID: NBK279390>
- Izhikevich, E. M. 2003. Simple Model of Spiking Neurons. *IEEE Transactions on Neural Networks*, **Vol.14 No.6**: 1569–1572. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/TNN.2003.820440>
- Izhikevich, E. M. 2004. Which Model to Use for Cortical Spiking Neurons? *IEEE Transactions on Neural Networks*, **Vol.15 No.5**: 1063–1070. <https://doi.org/10.1109/TNN.2004.832719>
- Jääskeläinen, I. P., Ahveninen, J., Andermann, M. L., Belliveau, J. W., Raij, T., dan Sams, M. 2011. Short-term Plasticity as A Neural Mechanism Supporting Memory and Attentional Functions. *Brain Research*, **Vol.1422**: 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2011.09.031>
- Kalat, J. W. 2009. *Biological Psychology* (J. Potter, R. Deljon, R. Rosenberg, N. Albert, dan L. Keyes (eds.); 10th ed.). Wadsworth Cengage Learning, Belmont.
- Kappen, B. 2008. *Introduction to biophysics*. Department of Biophysics Radboud University Nijmegen, Nijmegen.
- Kawakami, H. 1984. Bifurcation of Periodic Responses in Forced Dynamic Nonlinear Circuits: Computation of Bifurcation Values of The System Parameters. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, **Vol.31 No.3**: 248–260. <https://doi.org/10.1109/TCS.1984.1085495>
- Kbah, S. N. S., dan Şengör, N. S. 2013. Investigating The Synchronization of Cortical Neurons using BRIAN Simulator. *IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, 0–4.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1109/INISTA.2013.6577669>

KBBI Daring. 2016. Badan Pengembangan dan Pembinaan Bahasa Kementerian Pendidikan Kebudayaan Riset dan Teknologi Republik Indonesia. Diakses pada 19 Mei 2022 dari <https://kbbi.kemdikbud.go.id/Beranda>
<https://doi.org/3.9.1.0-20220426202916>

Khan Academy. 2018. *Overview of Neuron Structure and Function*. Diakses pada 25 Mei 2022 dari <https://www.khanacademy.org/science/biology/human-biology/neuron-nervous-system/a/overview-of-neuron-structure-and-function>

Khan Academy. 2018. *The Synapse*. Diakses pada 25 Mei 2022 dari <https://www.khanacademy.org/science/biology/human-biology/neuron-nervous-system/a/the-synapse>

Kizirian, A. 2022. *Actions of Excitatory and Inhibitory Neurotransmitters*. Diakses pada 2 November 2022 dari <https://antranik.org/actions-of-excitatory-and-inhibitory-neurotransmitters/>

Kriesel, D. 2007. *A Brief Introduction to Neural Networks*. https://www.dkriesel.com/en/science/neural_networks

Kunze, J. 2021. *Domino Effects and Synchrony in Seizure Initiation*. Society for Industrial and Applied Mathematics. <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/01/210125191817.htm>

Lecar, H. 2007. Morris-Lecar Model. *Scholarpedia*, **Vol.2 No.10**: 1333. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4249/scholarpedia.1333>

Ludwig, P. E., Reddy, V., dan Varacallo, M. 2021. *Neuroanatomy, Neurons*. StatPearls. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK441977/>

Lust, J. M., Geuze, R. H., Groothuis, A. G. G., dan Bouma, A. 2011. Functional Cerebral Lateralization and Dual-Task Efficiency-Testing The Function of Human Brain Lateralization Using fTCD. *Behavioural Brain Research*, **Vol.217 No.2** 293–301. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2010.10.029>

Marieb, E. N., dan Hoehn, K. 2012. Brain Antomy (Advanced Human Anatomy dan Physiology). In *Human Anatomy dan Physiology* (9th ed.). Pearson. [http://www.wou.edu/~lemastm/Teaching/BI335/Laboratory_01 - Brain Anatomy.pdf](http://www.wou.edu/~lemastm/Teaching/BI335/Laboratory_01_-_Brain_Anatomy.pdf)

Medical Dictionary. 2009. Farlex, Inc. Diakses 22 Mei 2022 dari <https://medical-dictionary.thefreedictionary.com/rostromcaudal>

Miller, E. K., Freedman, D. J., dan Wallis, J. D. 2002. The Prefrontal Cortex: Categories, Concepts and Cognition. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **Vol.357 No.1424**: 1123–1136. <https://doi.org/10.1098/rstb.2002.1099>

Morris, C., dan Lecar, H. 1981. Voltage Oscillations in The Barnacle Giant Muscle Fiber. *Biophysical Journal*, **Vol.31 No.1**: 193–213.

[https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(81\)84782-0](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(81)84782-0)

- Mullner, F. E. 2015. Precision of Inhibition: Dendritic Inhibition by Individual GABAergic Synapses on Hippocampal Pyramidal Cells is Confined in Space and Time. *Neuron*, **Vol.87**: 576–589.
- Murayama, K., dan Lakshminarayanaiah, N. 1977. Some Electrical Properties of The Membrane of The Barnacle Muscle Fibers under Internal Perfusion. *The Journal of Membrane Biology*, **Vol.35 No.1**: 257-283. 10.1007/bf01869953
Diakses dari <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01869953>
- Nagumo, J., Arimoto, S., dan Yoshizawa, S. 1962. An Active Pulse Transmission Line Simulating Nerve Axon. *Proceedings Of The IRE*, **Vol.50 No.10**: 2061–2070. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/JRPROC.1962.288235>
- Nagumo, J., dan Sato, S. 1972. On a Response Characteristic of a Mathematical Neuron Model. *Kybernetik*, 155–164. <https://doi.org/10.1007/BF00290514>
- Nall, R. 2022. *Your Guide to Brain Plasticity*. Healthline Media. Diakses pada 22 Oktober 2022 dari <https://www.healthline.com/health/brain-plasticity-and-behavior>
- Newberg, A. B., Wintering, N. A., Yaden, D. B., Waldman, M. R., Reddin, J., dan Alavi, A. 2015. A Case Series Study of The Neurophysiological Effects of Altered States of Mind During Intense Islamic Prayer. *Journal of Physiology Paris*, **Vol.109 No.4**: 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2015.08.001>
- Nógrádi, A., dan Vrbová, G. 2013. Anatomy and Physiology of the Spinal Cord. In *Madame Curie Bioscience Database*. Landes Bioscience. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK6229/>
- Olman, C. 2022. *Introduction to Sensation and Perception*. University of Minnesota, Minneapolis. <https://pressbooks.umn.edu/sensationandperception/chapter/the-central-and-peripheral-nervous-system/>
- Pereda, A. E. 2014. Electrical Synapses and Their Functional Interactions with Chemical Synapses,. *Nature Reviews Neuroscience*, **Vol.15**: 250–263. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1038/nrn3708>
- Plotnikov, D., Rumpe, B., Inga, B., Ippen, T., Eppler, J. M., dan Morrison, A. 2016. *NESTML: A Modeling Language for Spiking Neurons* (A. Oberweis dan R. Reussner (Eds.)). Gesellschaft für Informatik. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1606.02882>
- Purwanto, A. 2012. *Nalar Ayat-Ayat Semesta*. Mizan.
- Queensland Brain Institute. 2018. *Types of neurons*. The University of Queensland Australia. Diakses pada 22 Oktober 2022 dari <https://qbi.uq.edu.au/brain/brain-anatomy/types-neurons>

- Queensland Brain Institute. 2018. *What is Synaptic Plasticity?* The University of Queensland Australia. Diakses pada 22 Oktober 2022 dari <https://qbi.uq.edu.au/brain-basics/brain/brain-physiology/what-synaptic-plasticity#:~:text=Short-term synaptic plasticity refers to changes in synaptic,conversation%2C but which reverts to “normal” soon afterwards.>
- Rice, D. M. 2014. Alzheimer’s and Mind–Brain Problems. In *Calculus of Thought: Neuromorphic Logistic Regression in Cognitive Machines*, 175–195. Academic Press, an imprint of Elsevier Inc. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410407-5.00007-6>
- Rinzel, J. 1978. Repetitive Activity and Hopf Bifurcation Under Point- Stimulation for a Simple FitzHugh-Nagumo Nerve Conduction Model. *Journal of Mathematical Biology*, **Vol.5**: 363–382. <https://doi.org/10.1007/BF00276107>
- Shihab, M. Q. 2002. Tafsir Al-Mishbah; Pesan, Kesan dan Keserasian Al-Qur’an. In *Tafsir Al-Mishbah; Pesan, Kesan dan Keserasian Al-Qur’an* (p. 41). Lentera Hati. https://www.academia.edu/42873578/Tafsir_Al_Mishbah_Jilid_11_Dr_M_Q_uraish_Shibab?auto=download
- Stimberg, M., Brette, R., dan Goodman, D. F. M. 2019. Brian 2, An Intuitive and Efficient Neural Simulator. *ELife*, **Vol.8**: 1–41. <https://doi.org/10.7554/eLife.47314>
- Stimberg, M., Goodman, D. F., Benichoux, V., dan Brette, R. 2013. Brian 2 - The Second Coming: Spikingneural Network Simulation in Python with Code Generation. *Twenty Second Annual Computational Neuroscience Meeting: CNS 2013*, **Vol.14**: 38. <https://doi.org/doi:10.1186/1471-2202-14-S1-P38>
- Stimberg, M., Goodman, D. F. M., Benichoux, V., dan Brette, R. 2014. Equation-oriented Specification of Neural Models for Simulations. *Frontiers in Neuroinformatics*, **Vol.8 No.1**. <https://doi.org/10.3389/fninf.2014.00006>
- Stimberg, M., Goodman, D. F. M., Brette, R., dan Pittà, M. De. 2019. Modeling Neuron–Glia Interactions with The Brian 2 Simulator. In M. De Pittà dan H. Berry (Eds.), *Computational Glioscience. Springer Series in Computational Neuroscience*. 471–505. Springer, Cham. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-00817-8_18
- Suadu, F. 2018. *Manusia Unggul Neurosains dan Al-Qur’an*. PT. Penjuru Ilmu Sejati.
- Swanson, O. K., dan Maffei, A. 2019. From Hiring to Firing: Activation of Inhibitory Neurons and Their Recruitment in Behavior. *Frontiers in Molecular Neuroscience*, **Vol.12 July**: 1–9. <https://doi.org/10.3389/fnmol.2019.00168>
- Szymik, B. 2011. *Neuron Anatomy*. Arizona State University School of Life Sciences - Ask A Biologist. Diakses pada 24 Mei 2022 dari <https://askbiologist.asu.edu/neuron-anatomy>

- Tekieh, E., Nikbin, M. H., Sahraei, H., Ghaneyi, M., Kazemi, M., dan Aliyari, H. 2017. What Is Thought: Take A Look at The Holy Quran and The Principles of Neuroscience. *Iranian Red Crescent Medical Journal*, **Vol.19 No.11**. <https://doi.org/10.5812/IRCMJ.61689>
- Thau, L., Reddy, V., dan Singh, P.(2021. *Anatomy, Central Nervous System*. StatPearls Publishing LLC. [https://doi.org/PMID: 31194336](https://doi.org/PMID:31194336)
- The Johns Hopkins Medicine. 2022. *Brain Anatomy and How the Brain Works*. John Hopkins School of Medicine, Baltimore. Diakses pada 20 Mei 2022 dari <https://www.hopkinsmedicine.org/health/conditions-and-diseases/anatomy-of-the-brain>
- The U.S. National Cancer Institute. 2022. *Introduction to the Nervous System*. Surveillance, Epidemiology and End Results (SEER) Training Modules. Diakses 20 Mei 2022 dari <https://training.seer.cancer.gov/anatomy/nervous/>
- Tikidji-hamburyan, R. A., Narayana, V., Bozkus, Z., dan El-ghazawi, T. A. 2017. Software for Brain Network Simulations: A Comparative Study. *Frontiers in Neuroinformatics*, **Vol.11 Juli: 1–16**. <https://doi.org/10.3389/fninf.2017.00046>
- Timofeev, I., Bazhenov, M., Seigneur, J., dan Sejnowski, T. 2012. Neuronal Synchronization and Thalamocortical Rhythms in Sleep , Wake and Epilepsy Chemical Synaptic Mechanisms of Synchronization. In *Jasper's Basic Mechanisms of the Epilepsies* (4th ed., pp. 1–23). Bethesda (MD): National Center for Biotechnology Information. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK98144/>
- Trafton, A. 2014. *Synchronized Brain Waves Enable Rapid Learning*. Massachusetts Institute of Technology (MIT) News, Cambridge. Diakses pada 22 Oktober 2022 dari <https://news.mit.edu/2014/synchronized-brain-waves-enable-rapid-learning-0612>
- Tsodyks, M., dan Wu, S. 2013. Short-term Synaptic Plasticity. *Scholarpedia*, **Vol.8 No.10: 3153**. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4249/scholarpedia.3153>
- Uhlhaas, P. J., dan Singer, W. 2006. Neural Synchrony in Brain Disorders : Relevance for Cognitive Dysfunctions and Pathophysiology. *Neuron*, **Vol.52 No.1: 155–168**. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.09.020>
- University of New Hampshire. 2020. *Synchronization of Neurons is Critical for Learning and Forming Memories*. ScienceDaily, Durham. Diakses pada 22 Oktober 2022 dari <https://www.sciencedaily.com/releases/2020/02/200206132341.htm>
- Vigneron, A., dan Martinet, J. 2020. A critical survey of STDP in Spiking Neural Networks for Pattern Recognition. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*. <https://doi.org/10.1109/IJCNN48605.2020.9207239>

- Wang, J., Lu, M., dan Li, H. 2008. Synchronization of Coupled Equations of Morris-Lecar Model. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **Vol.13** **No.6:** 1169–1179. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2006.09.016>
- Wilson, H. R., dan Cowan, J. D. 1972. Excitatory and Inhibitory Interactions in Localized Populations of Model Neurons. *Biophysical Journal*, **Vol.12 No.1:** 1–24. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(72\)86068-5](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(72)86068-5)
- Wnuk, A. 2021. *How Inhibitory Neurons Shape the Brain's Code*. BrainFacts Society for Neuroscience. Diakses pada 16 November 2022 dari <https://www.brainfacts.org/brain-anatomy-and-function/cells-and-circuits/2021/how-inhibitory-neurons-shape-the-brains-code-100621>
- Woodruff, A. 2019. *What is A Neuron?* Queensland Brain Institute, Brisbane. Diakses dari <https://qbi.uq.edu.au/brain/brain-anatomy/what-neuron>
- Yoshinaga, T., dan Kawakami, H. 1995. Bifurcation and Chaotic State in Forced Oscillatory Circuits Containing Saturable Inductors. *Nonlinear Dynamics in Circuits*, 89–119. https://doi.org/10.1142/9789812830609_0004
- Yusuf, B. 2013. Akal dalam Al-Qur'an. *Sulesana*, **Vol.8:** 73–82.

