

**ANALISIS MORFOLOGI DAN KARAKTERISTIK
POTENSIAL MEMBRAN PADA MODEL SEL PURKINJE
REALISTIK DAN REDUKSI**

TUGAS AKHIR

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



diajukan oleh :

Nurul Emaniyah
18106020005

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA
2025

LEMBAR 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-1875/Un.02/DST/PP.00.9/08/2025

Tugas Akhir dengan judul : ANALISIS MORFOLOGI DAN KARAKTERISTIK POTRNSIAL MEMBRAN PADA
MODEL SEL PURKINJE REALISTIK DAN REDUKS

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : NURUL EMANIYAH
Nomor Induk Mahasiswa : 18106020005
Telah diujikan pada : Rabu, 20 Agustus 2025
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: 68a72e5754d24



Penguji I

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

Valid ID: 68a729f9e9969



Penguji II

Andi, M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 68a7821005c29



Yogyakarta, 20 Agustus 2025
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

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

Valid ID: 68a7ce5f5d457

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nurul Emaniyah
NIM : 18106020005
Program Studi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul "*ANALISI MORFOLOGI DAN POTENSIAL MEMBRAN PADA MODEL SEL PURKINJE REALISTIK DAN REDUKSI*" 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, 08 Agustus 2025

Penulis



Nurul Emaniyah
18106020005

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 : NURUL EMANIYAH

NIM : 18106020005

Judul Skripsi : ANALISI MORFOLOGI DAN POTENSIAL MEMBRAN PADA MODEL SEL PURKINJE
REALISTIK DAN REDUKSI

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, 08 Agustus 2025

Pembimbing

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

NIP. 19830614 200901 2 009

MOTTO

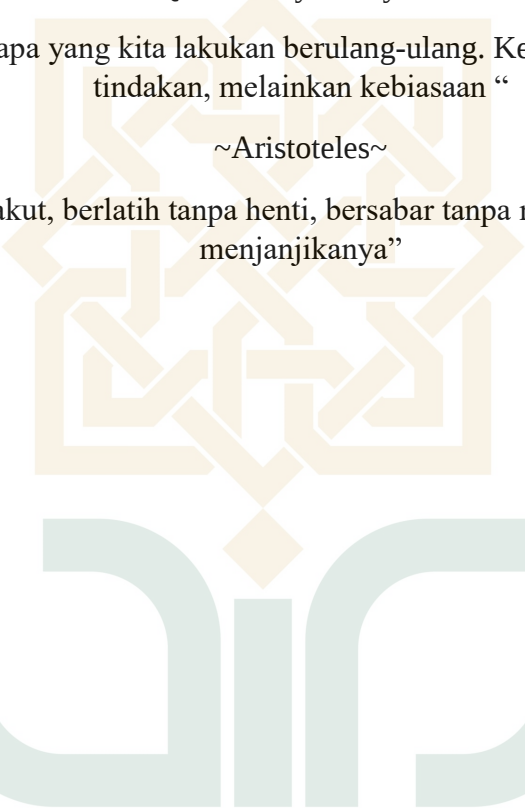
“Sesungguhnya di balik kesulitan itu ada kemudahan “

-Q.S Al-Insyirah ayat 6-

“Kita adalah apa yang kita lakukan berulang-ulang. Keunggulan bukanlah tindakan, melainkan kebiasaan “

~Aristoteles~

“Berjalan tanpa takut, berlatih tanpa henti, bersabar tanpa ragu, karena Allah telah menjanjikanya”



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN PERSEMBAHAN

Jejak langkah dalam perjalananku yang tertuang dalam tulisan ini merupakan wujud terimakasih ku untuk:

Allah SWT, Sang Pemilik kehidupan, atas kasih sayang-Nya, rahmat-Nya dan pertolongan-Nya yang senangtiasa menuntunku dalam setiap perjalanan.

Para kekasih-Nya yang memberikan taulandan dalam kehidupan ini.

Seorang Ayah (Dino Suprianto) dan Ibu (Suniati) yang selalu membersamai perjalananku dengan dukungan, pengorbanan, dan doa yang tiada henti.

Kakak-kakak perempuan tercinta ku (Siti Asrina Ayundari dan Riska Setianingrum) dan adik ku tersayang (Ivan Ardias) yang selalu mendukung dan menyemangatiku.

Ibu Anis Yuniati yang selalu bersabar dalam membimbing ku, tempat ku kembali ketujuan ketika mengalami kebuntuan dan menjadi ibu kedua ku yang senangtiasa menunggu ku kembali dan tidak meninggalkan ku sendiri. Semoga Allah senangtiasa melimpahkan kasih sayang-Nya kepada beliau dan keluarganya.

Seluruh FISIKA dan seluruh keluarga besar UIN Sunan Kalijaga.

Semua orang yang telah mendukungu dan mengajari ku tentang perjalanan ini.

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullah Wabarakatuh

Alhamdulillah, segala puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis diberi kekuatan dan kesempatan menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Analisis Morfologi dan Karakteristik Potensial Membran Pada model Sel Purkinje Realistik Dan Reduksi”. Shalawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW yang dinantikan syafa’at-nya di hari akhir. Selesaiannya tugas akhir ini tidak terlepas dari dukungan dan kerjasama dari banyak pihak yang telah terlibat. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si. selaku Ketua Program Studi Fisika dan dosen penguji.
2. Ibu Anis Yuniati, M.Si., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir.
3. Ibu Dr. Nita Handayani, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing akademik.
4. Bapak Andi, M.Sc. selaku dosen penguji.
5. Bapak dan ibu dosen program studi Fisika UIN Sunan Kalijaga.
6. Bapak dan ibu dosen UIN Sunan Kalijaga selaku pengajar.
7. Staf dan karyawan UIN Sunan Kalijaga khususnya di lingkup fakultas Sains dan Teknologi.
8. Ayah, Ibu, Kakak, Adik dan kerabat yang senantiasa memberikan dukungan doa dan semangat yang luar biasa.

9. Keluarga besar Fisika UIN Sunan Kalijaga khususnya teman-teman Angkatan 2018.
10. Yang selalu sedia memberikan arahan dan dukungan; Siti Nur Azizah, Nisa Fajria, Zahrotul Aeni, dan Khoirun Nisa.
11. Semua pihak yang telah mengajarkan apapun itu dalam hidup dan memberikan dukungan dalam apapun itu.

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, penulis dengan senang hati menerima kritik, saran, dan masukan yang bersifat membangun demi perbaikan dan kemajuan penulis di masa yang akan datang. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberi manfaat positif dan menambah pengetahuan bagi penulis, pembaca, dan seluruh pihak. Aamiin

Wassalamu'alaikum Warahmatullah Wabarakatuh.

Yogyakarta, 08 Agustus 2025

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

Penulis

ANALISIS MORFOLOGI DAN KARAKTERISTIK POTENSIAL MEMBRAN PADA MODEL SEL PURKINJE REALISTIK DAN REDUKSI

Nurul Emaniyah
18106020005

INTISARI

Sel Purkinje merupakan sel yang memiliki dendrit dengan cabang yang sangat banyak, mempunyai struktur yang kompleks, dan mempunyai morfologi dan elektrofisiologi dengan ciri khas tertentu. Sel Purkinje memiliki peran utama dalam integrasi sinyal motorik di *cerebellum* dan menjadi satu-satunya keluaran sinyal pada korteks *cerebellum*. Morfologi sel Purkinje yang kompleks dengan percabangan yang sangat banyak membutuhkan kemampuan yang besar untuk membuat pemodelan dalam komputasi. Penggunaan model reduksi dapat menjadi alternatif dalam pemodelan sel yang kompleks. Pemodelan reduksi adalah penyederhanakan model dengan mempertahankan karakteristik dari aktivitas neuron. Penelitian ini mensimulasikan struktur morfologi sel Purkinje realistik dan sel Purkinje reduksi, dan membandingkan karakteristik potensial membran pada sel Purkinje realistik dan reduksi menggunakan simulator NEURON. Model sel Purkinje realistik terdiri dari satu soma, 86 *smooth dendrite*, dan 1028 *spiny dendrite*. Model sel Purkinje reduksi terdiri dari satu soma, *main dendrite*, *smooth distal dendrite long*, *smooth distal dendrite short*, *spiny distal dendrite*, *spine neck*, *adjacent dendrite* dan tiga *spine*, ditambah enam percabangan *smooth dendrite* dan *spiny dendrite*. Model reduksi dibuat dengan memperhatikan empat parameter yaitu rasio luas permukaan, kapasitansi dan resistansi, radius jari-jari setiap segmen ekuivalen, dan panjang setiap silinder ekuivalen. Model saluran dibuat dengan mengikuti model Hodgkin-Huxley. Potensial membran direkam pada bagian soma, *main dendrit*, *smooth dendrit*, *spiny dendrit* dan *spine* pada kedua model. Hasil simulasi dari kedua model menunjukkan pola *simple spike* dan *complex spike* dengan pola yang identik. Model reduksi yang dibuat dapat merepresentasikan spike yang identik dengan yang dihasilkan model realistik, dan lebih hemat sumber daya dalam pembuatannya. Studi ini menekankan pentingnya memilih jenis model sesuai tujuan penelitian, apakah untuk ketelitian biologi atau efisiensi simulasi.

Kata kunci: *cerebellum*, model realistik, model reduksi, potensial membran, sel Purkinje

MORPHOLOGY AND CHARACTERISTICS ANALYSIS OF MEMBRANE POTENTIAL IN REALISTIC AND REDUCED PURKINJE CELL MODELS

Nurul Emaniyah

18106020005

ABSTRACT

Purkinje cells are distinguished by their extensively branched dendritic trees, complex structural organization, and unique morphological and electrophysiological properties. They play a pivotal role in integrating motor signals within the cerebellum and serve as the sole output neurons of the cerebellar cortex. The complex morphology of Purkinje cell, with their extensive branching, requires substantial computational capacity for modeling. The use of reduce models can serve as an alternative for simulating such complex cells. This study simulates both realistic and reduced morphological models of Purkinje cells and compares their membrane potential characteristics using the NEURON simulator. The realistic model comprises a soma, 86 smooth dendrites, and 1,028 spiny dendrites. The reduced model consists of a soma, a main dendrite, a long smooth distal dendrite, a short smooth distal dendrite, a spiny distal dendrite, a spine neck, an adjacent dendrite, and three spines, along with six branches of smooth and spiny dendrites. The reduced model is constructed by considering four parameters: determining the surface area ratio, capacitance and resistance, the radius of each equivalent segment, and the length of each equivalent cylinder. The ion channel dynamics were modeled according to the Hodgkin–Huxley framework. Membrane potentials were recorded from the soma, main dendrite, smooth dendrite, spiny dendrite, and spine in both models. The simulation results demonstrated that both models produced identical simple spike and complex spike patterns. The reduced model successfully reproduced spikes equivalent to those of the realistic model while requiring fewer computational resources. These findings underscore the importance of selecting an appropriate modeling approach based on research objectives, balancing biological accuracy and computational efficiency.

Keywords: cerebellum, realistic model, reduced model, membrane potential, Purkinje cell

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN	iii
HALAMAN PERSETUJUAN SKRIPSI	iv
MOTTO	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR	vii
INTISARI	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Batasan Penelitian.....	6
1.5 Manfaat Penelitian	7
BAB II DASAR TEORI	8
2.1 Studi Pustaka	8
2.2 Landasan Teori	12
2.2.1 Struktur Neuron.....	12
2.2.2 Otak.....	15
2.2.3 Sel Purkinje	24
2.2.4 Metode Reduksi	28
2.2.5 Kinetika Saluran Ion Aktif (Model Hodgkin-Huxley).....	31
2.2.6 Potensial Aksi	35
2.2.7 Simulator NEURON	38
2.2.8 Otak dan Akal dalam Perspektif Al-Qur'an.....	42
BAB III METODE PENELITIAN	45

3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	45
3.2	Alat Penelitian	45
3.3	Tahapan Penelitian	46
3.3.1	Instalasi Simulator NEURON	46
3.3.2	Pemodelan Sel Purkinje	47
3.4	Analisis Data	57
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		58
4.1	Struktur Morfologi Sel Purkinje.....	58
4.2	Potensial Membran.....	61
BAB V PENUTUP		70
5.1	Kesimpulan.....	70
5.2	Saran	71
DAFTAR PUSTAKA		72
LAMPIRAN.....		75
CURRICULUM VITE.....		84



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Struktur Neuron (Saladin, 2009).....	12
Gambar 2. 2 Bagian-bagian otak manusia (Bear dkk, 2016).....	16
Gambar 2. 3 Lobus pada serebrum(Bear dkk, 2016).....	17
Gambar 2. 4 Struktur cerebellum pada manusia(Bear dkk, 2016)	20
Gambar 2. 5 Lapisan pada korteks cerebellum (Bear dkk., 2016)	22
Gambar 2. 6 Sirkuit Cerebellum (Iskusnykh dkk, 2024).....	23
Gambar 2. 7 Struktur Sel Purkinje (Kappen, 2008)	24
Gambar 2. 8 Model neuron tereduksi (Brown, dkk. 2011).....	31
Gambar 2. 9 Model neuron Hodgkin-Huxley (Squire, dkk. 2008)	32
Gambar 2. 10 Skema mekanisme potensial aksi (Saladin, 2009).....	35
Gambar 3. 1 Tahapan instalansi simulator NEURON.....	46
Gambar 3. 2 Tampilan jendela GUI	47
Gambar 3. 3 Neuron main menu	47
Gambar 3. 4 Diagram alir pembuatan model sel Purkinje	48
Gambar 3. 5 Tahapan perekaman model sel Purkinje	53
Gambar 3. 6 Script tools point process manager.....	54
Gambar 3. 7 Script pengaturan injeksi arus atau IClamp	55
Gambar 4. 1 Model sel Purkinje realistik hasil simulasi.....	58
Gambar 4. 2 Model sel Purkinje reduksi	59
Gambar 4. 3 Bagian-Bagian model sel Purkinje reduksi.....	60
Gambar 4. 4 Spike Potensial membran sel Purkinje pada bagian soma. A) Pada model realistik dan B) pada model reduksi.....	61
Gambar 4. 5 Spike potensial membran sel Purkinje pada bagian <i>spine</i> . A) Pada model realistik dan B) Pada model reduksi	63
Gambar 4. 6 <i>Spike</i> potensial membran sel Purkinje pada bagian <i>main dendrite</i> . A) Potensial membran pada model realistik dan B) Potensial membran pada model reduksi.....	64
Gambar 4. 7 Spike potensial membran sel Purkinje pada bagian <i>spiny dendrite distal</i> . A) Pada model realistik dan B) pada model reduksi.....	65
Gambar 4. 8 Spike potensial membran sel Purkinje pada bagian <i>smooth dendrit distal</i> . A) Pada model realistik dan B) pada model reduksi	67

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Manusia merupakan makhluk ciptaan Allah yang paling sempurna jika dibandingkan dengan makhluk yang lain. Allah memberikan keistimewaan berupa organ yang sangat penting yaitu otak. Di dalam Al-Qur'an istilah otak tidak termuat secara eksplisit. Konsep otak dalam Al-Qur'an termuat dalam beberapa surah, salah satunya surah Al-Alaq ayat 15-16 dengan lafaz sebagai berikut.

كَلَّا لَئِنْ لَّمْ يَنْتَهِ ۚ لَنَسْفَعًا بِالنَّاصِيَةِ ۚ ١٥ نَاصِيَةٍ كَاذِبَةٍ خَاطِئَةٍ (١٦)

Artinya: “*Sekali-kali tidak! Sungguh, jika dia tidak berhenti (berbuat demikian), niscaya Kami tarik ubun-ubunnya (ke dalam neraka). (Yaitu) ubun-ubun orang yang mendustakan (kebenaran) dan durhaka*”.

Dalam surah Al-Alaq terdapat kata “nasyiah” yang disebut juga ubun-ubun. Dalam tafsir Ibnu Katsir yang dimaksud ubun - ubun adalah ubun-ubun Abu Jahal yang penuh kebohongan dalam perkataannya dan menyimpang perbuatannya (Sutrisna & Suyadi, 2022). Ubun-ubun termasuk bagian otak besar atau serebrum yang terletak pada bagian paling depan atau lebih tepatnya pada korteks prefrontal. Dalam penelitian neurologi modern menunjukkan bahwa korteks prefrontal berperan penting dalam fungsi kognitif maupun eksekutif seperti pengendalian emosi, perhatian, pengambil keputusan, dan nilai moral (Joyce et al., 2025). Hal tersebut selaras dengan ayat di atas, bahwa perilaku manusia berkaitan dengan fungsi dari otak. Allah akan menarik ubun-ubun

akibat dari perilaku berbohong dimana ubun-ubun merupakan bagian otak yang berkaitan dengan kemampuan manusia dalam mengatur emosi dan pengambilan keputusan serta nilai moral.

Otak adalah organ tubuh manusia yang menjadi bagian dari sistem saraf pusat. Sistem saraf pusat terdiri atas otak dan sumsum tulang belakang. Bagian otak yang bertanggung jawab terhadap kontrol gerakan seperti bahasa, emosi, dan kognitif adalah *cerebellum* (Buckner dkk, 2011; Ma dkk, 2023; Heijden & Sillitoe, 2021; Overwalle dkk, 2020). *Cerebellum* memiliki korteks yang memiliki tiga lapisan yang berbeda yaitu lapisan molekul, lapisan Purkinje, dan lapisan granular. Lapisan molekul terdiri dari dua jenis neuron penghambat, stellate dan basket. Lapisan sel Purkinje monolayer terdiri dari soma yang berbentuk buah pir. Lapisan terakhir adalah lapisan granular yang merupakan lapisan terdalam dari korteks *cerebellum*. Lapisan granular terdiri dari sel granula yang bersifat memberikan rangsangan dan sel Golgi yang bersifat menghambat (Moini & Piran, 2020).

Sel Purkinje adalah salah satu neuron terbesar pada sistem saraf pusat dan terletak pada korteks otak kecil (Dusart & Flamant, 2012). Purkinje merupakan sel yang paling kompleks dengan sifat morfologi dan elektrofisiologi yang mempunyai ciri khas tersendiri (Masoli et al., 2024). Purkinje memiliki dendrit yang cabangnya sangat banyak yang memungkinkan Purkinje menerima banyak input dari neuron lainnya. Purkinje memegang peran penting dalam rangkaian neuron pada serebral korteks. Sel Purkinje bertanggung jawab dalam mengintegrasikan masukan untuk koordinasi motorik, dan menjadi satu-satunya

keluaran korteks *cerebellum*. Semua hasil pemrosesan informasi di korteks *cerebellum* akan ditransmisikan oleh akson sel Purkinje menuju inti *cerebellum* dan vestibular (A. M. Brown et al., 2020; Hirano, 2018). Gangguan pada transmisi informasi sel Purkinje dapat menyebabkan beberapa penyakit seperti ataksia, gangguan tidur, tremor esensial, dystonia, parkison, skizofrenia, bipolar, gangguan depresi mayor, kecemasan, dan gangguan obesif (Hirano, 2018; Leon dkk., 2024)

Aktivitas listrik pada sel Purkinje merupakan salah satu aspek yang penting. Potensial membran sel Purkinje, yang dihasilkan oleh pergerakan ion seperti Na^+ , K^+ , dan Ca^{2+} , memainkan peran penting dalam proses integrasi sinyal yang diterima oleh sel Purkinje. Aktivitas listrik ini memungkinkan sel Purkinje mentransmisikan informasi secara akurat ke inti *cerebellar*. Apabila dalam pemrosesan informasi sel Purkinje terdapat gangguan, maka sel Purkinje akan menunjukkan anomali pada pola output yang dihasilkan. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai dinamika potensial membran dan pola lonjakan listrik sangat penting untuk memahami perilaku sel Purkinje secara keseluruhan.

Penelitian terkait sel Purkinje telah banyak dilakukan baik secara eksperimen, analisis numerik, maupun komputasi. Sel Purkinje dapat dimodelkan secara komputasi dengan mensimulasikan aktivitas listrik dan potensial membran (Brown, dkk. 2011). Simulasi akan menghasilkan pola lonjakan atau *spike* yang dapat digunakan untuk mengetahui apakah sel Purkinje mengalami gangguan atau tidak. Pemodelan secara komputasi dapat dilakukan

dengan pendekatan model realistik dan model reduksi (Booth, dkk. 1997; Hendrickson, dkk 2011). Model realistik dibuat untuk menggambarkan struktur morfologi sel, *spike* dendrit, respon sinaptik, dan dinamika potensial membran (Masoli, 2015). Sel Purkinje mempunyai cabang dendrit yang sangat banyak sehingga membutuhkan kemampuan yang besar untuk membuat pemodelannya secara komputasi. Morfologi neuron yang kompleks membuat pemodelan realistik membutuhkan perhitungan yang rumit untuk simulasi jaringan skala besar sehingga perlu dibuat model yang lebih sederhana atau model yang direduksi (An dkk., 2019).

Bebeda dengan model realistik, model reduksi merupakan model neuron yang struktur morfologi dan kompleksitas neuronnya disederhanakan. Model reduksi dapat dibuat dengan mengurangi jumlah kompartemen tanpa mengubah karakteristik aktivitas listrik dari neuron (An, dkk. 2019). Brown memodelkan sel Purkinje dengan mengurangi jumlah kompartemen model Masoli (2001) yang lebih realistik. Pengurangan dilakukan dengan mengambil satu jalur untuk menjadi bagian utama. Percabangan dendrit disekitar jalur utama digabungkan untuk menjadi cabang baru. Brown melakukan penyesuaian parameter pasif seperti resistansi membran (R_m), kapasitas membran (C_m), dan resistansi internal (R_i). Penggunaan model reduksi dapat mengurangi beban komputasi, terutama pada pemodelan neuron yang kompleks. Selain itu model reduksi cenderung memerlukan waktu simulasi yang lebih cepat di bandingkan dengan simulasi model realistik.

Pemodelan dapat dibuat dengan bantuan simulator. Terdapat beberapa simulator yang dapat digunakan dalam pemodelan sel atau jaringan saraf. Simulator tersebut antara lain simulator NEURON, GENESIS, NEST, Emergent, BRIAN, dan lain sebagainya. Simulator NEURON sering digunakan dalam penelitian karena menawarkan fleksibilitas dalam memodelkan berbagai tingkat kompleksitas neuron, mulai dari model molekuler hingga jaringan. NEURON juga dapat merepresentasikan perubahan potensial membran neuron. Dengan simulator NEURON, peneliti dapat memvisualisasikan respons listrik sel, mengeksplorasi dinamika sinaptik, dan memvalidasi model terhadap data eksperimental (Carnevale & M.L. Hines, 1997). Penggunaan simulator NEURON mempermudah pengembangan model reduksi maupun realistik.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan maka akan dilakukan penelitian dengan membuat model sel Purkinje realistik dan sel Purkinje reduksi secara komputasi menggunakan simulator NEURON. Pada penelitian ini pemodelan dilakukan dengan mengadopsi model yang telah dibuat oleh Brown (2011). Model dibuat dengan memodifikasi kompartemen pada model Brown menjadi 22 kompartemen. Model yang telah dibuat digunakan untuk mengamati dan membandingkan morfologi dan karakteristik potensial membran pada model sel Purkinje realistik dan sel Purkinje reduksi.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimanakah struktur morfologi sel Purkinje realistik dan struktur morfologi sel Purkinje yang direduksi?
2. Bagaimanakah karakteristik potensial membran pada sel Purkinje realistik dan sel Purkinje yang direduksi?

1.3 Tujuan Penelitian

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

1. Menganalisis morfologi sel Purkinje realistik dan sel Purkinje yang direduksi
2. Menganalisis potensial membran terhadap waktu pada sel Purkinje realistik dan sel Purkinje yang direduksi.

1.4 Batasan Penelitian

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pemodelan dibuat dengan menggunakan simulator NEURON versi 7.8.2.
2. Sel yang dimodelkan merupakan sel Purkinje yang terdapat di otak kecil (*cerebellum*).
3. Pemodelan sel Purkinje menggunakan model neuron Hodgkin-Huxley.
4. Model sel Purkinje realistik terdiri dari 1115 kompartemen yang diadopsi dari Miyasho (2001) dan terdiri dari soma, *smooth dendrite*, dan *spiny dendrite*.

5. Model sel Purkinje reduksi diadopsi dari model Brown (2011) terdiri dari 22 kompartemen yang terdiri dari soma, *smooth dendrite*, *spiny dendrite*, dan *spine*.
6. Perekaman potensial membran terhadap waktu dilakukan pada bagian, soma, *main dendrite*, *smooth distal dendrite*, *spiny dendrite*, dan *spine*

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Memberikan tambahan referensi dalam pemodelan sel Purkinje reduksi dan melihat perbandingannya dengan model realistik
2. Mengetahui pola karakteristik lonjakan potensial membran pada bagian yang berbeda dari pemodelan sel Purkinje, sehingga dapat digunakan untuk membandingkan model realistik dan reduksi secara komputasi.
3. Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi bahan rujukan untuk penelitian selanjutnya sehingga dapat memperluas keilmuan terkait komputasi terutama dalam bidang neurosains

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Sel Purkinje memiliki morfologi yang kompleks dimana dendrit sel purkinje menyebar luas kedalam lapisan molekuler *cerebellum*. Dendrit sel purkinje membentuk percabangan yang sangat banyak sehingga memungkinkannya menerima input dalam jumlah besar. Morfologi realistik lebih kompleks jika dibandingkan dengan model reduksi. Secara keseluruhan luas morfologi realistik lebih besar. Hal tersebut dikarenakan model realistik dibuat dengan mendekati aslinya. Pada model reduksi morfologi yang dihasilkan lebih sederhana. Model reduksi meskipun lebih sederhana akan tetapi tetap dapat menghasilkan sifat listrik yang serupa dengan model realistik.
2. Sel Purkinje mampu menghasilkan aktivitas spontan. Sel Purkinje menghasilkan dua potensial aksi yaitu *simple spike* dan *complex spike*. Distribusi lonjakan bervariasi dalam setiap bagian bergantung pada jarak perekaman dengan soma dan distribusi kanal ion pada sel. Soma didominasi dengan *simple spike* tinggi akibat distribusi Na^+ dan dendrit didominasi kanal Ca^{2+} . Model sel Purkinje reduksi menunjukkan potensial membran yang sama dengan model realistik, sehingga dapat digunakan sebagai representasi model realistik.

5.2 Saran

Berdasarkan kajian teori dan keterbatasan pada penelitian ini maka penulis memberikan saran untuk pengembangan penelitian di masa mendatang. Adapun saran tersebut sebagai berikut.

1. Pemodelan dan pengembangan penelitian ini dilakukan dengan mengkombinasikan simulator NEURON dengan pemrograman lain, agar penelitian yang diperoleh lebih kompleks dan interaktif.
2. Pengkajian potensial membran dan karakteristiknya hendaknya dapat dikaitkan dengan kondisi fisiologi tertentu, sehingga penelitian yang dilakukan dapat mendekati aplikasinya di bidang medis atau sains.

DAFTAR PUSTAKA

- An, L., Tang, Y., Wang, Q., Pei, Q., Wei, R., Duan, H., & Liu, J. K. (2019). Coding Capacity of Purkinje Cells With Different Schemes of Morphological Reduction. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 13. <https://doi.org/10.3389/fncom.2019.00029>
- Ángeles Fernández-Gil, M., Palacios-Bote, R., Leo-Barahona, M., & Mora-Encinas, J. P. (2010). Anatomy of the Brainstem: A Gaze Into the Stem of Life. *Seminars in Ultrasound, CT and MRI*, 31(3), 196–219. <https://doi.org/10.1053/j.sult.2010.03.006>
- Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradison, M. A. (2016). NEUROSCIENCE Exploring the Brain. In *Anesthesia & Analgesia* (Vol. 122, Issue 6). Wolters Kluwer. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000001303>
- Brown, A. M., White, J. J., & Heijden, M. E. Van Der. (2020). *Purkinje cell misfiring generates high- amplitude action tremors that are corrected by cerebellar deep brain stimulation*. *Vim*, 1–33.
- Brown, S.-A., Moraru, I. I., Schaff, J. C., & Loew, L. M. (2011). Virtual NEURON: a strategy for merged biochemical and electrophysiological modeling. *Journal of Computational Neuroscience*, 31(2), 385–400. <https://doi.org/10.1007/s10827-011-0317-0>
- Buckner, R. L., Krienen, F. M., Castellanos, A., Diaz, J. C., & Yeo, B. T. T. (2011). The organization of the human cerebellum estimated by intrinsic functional connectivity. *Journal of Neurophysiology*, 106(5), 2322–2345. <https://doi.org/10.1152/jn.00339.2011>
- Bui, T., & Das, J. M. (2024). Neuroanatomy, Cerebral Hemisphere. In *StatPearls*. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/0>
- Burroughs, A., Cerminara, N. L., Apps, R., & Houghton, C. (2020). A Purkinje cell model that simulates complex spikes. *BioRxiv*, 2020.05.18.102236. <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.05.18.102236v1%0Ahttps://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.05.18.102236v1.abstract>
- Carnevale, N. T., & M.L. Hines. (1997). The NEURON Simulation Environment. *Neural Computation*, 1209, 1–9.
- Diva, S. A., & Yuniati, A. (2019). *Simulator NEURON Panduan Praktis Pemrograman dalam Bidang Neurosains*. Cahaya Kata.
- Fernández Santoro, E. M., Karim, A., Warnaar, P., De Zeeuw, C. I., Badura, A., & Negrello, M. (2024). Purkinje cell models: past, present and future. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 18. <https://doi.org/10.3389/fncom.2024.1426653>
- Fletcher, A. (2024). Action potential : generation and propagation. *Anaesthesia and*

- Intensive Care Medicine*, 23(3), 183–187.
<https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2021.11.014>
- Han, V. Z., Zhang, Y., Bell, C. C., & Hansel, C. (2007). Synaptic Plasticity and Calcium Signaling in Purkinje Cells of the Central Cerebellar Lobes of Mormyrid Fish. *The Journal of Neuroscience*, 27(49), 13499–13512.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2613-07.2007>
- Hines, M. L., & Carnevale, N. T. (1997). The NEURON Simulation Environment. *Neural Computation*, 9(6), 1179–1209.
<https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.6.1179>
- Hirano, T. (2018). Purkinje Neurons: Development, Morphology, and Function. *The Cerebellum*, 17(6), 699–700. <https://doi.org/10.1007/s12311-018-0985-7>
- Iskusnykh, I. Y., Zakharova, A. A., & Kryl, E. D. (2024). *Aging , Neurodegenerative Disorders , and Cerebellum*. 1–18.
- Jhonson. (2002). *Biology*. 1. www.mhhe.com/raven6/vlab1.mhtml
- Joyce, M. K. P., Uchendu, S., & Arnsten, A. F. T. (2025). Stress and Inflammation Target Dorsolateral Prefrontal Cortex Function: Neural Mechanisms Underlying Weakened Cognitive Control. *Biological Psychiatry*, 97(4), 359–371. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2024.06.016>
- Kato, M., & De Schutter, E. (2023). Models of Purkinje cell dendritic tree selection during early cerebellar development. *PLOS Computational Biology*, 19(7), e1011320. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1011320>
- Kitamura, K., & Häusser, M. (2011). Dendritic Calcium Signaling Triggered by Spontaneous and Sensory-Evoked Climbing Fiber Input to Cerebellar Purkinje Cells In Vivo. *Journal of Neuroscience*, 31(30), 10847–10858.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2525-10.2011>
- Ma, Q., Baetens, K., Crunelle, C. L., & Heleven, E. (2023). Editorial: A multi-talented butterfly: the role of the cerebellum in social cognition, emotion, and language. *Frontiers in Human Neuroscience*, 17.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1322977>
- Masoli, S., Sanchez-Ponce, D., Vrieler, N., Abu-Haya, K., Lerner, V., Shahar, T., Nedelescu, H., Rizza, M. F., Benavides-Piccione, R., DeFelipe, J., Yarom, Y., Munoz, A., & D’Angelo, E. (2024). Human Purkinje cells outperform mouse Purkinje cells in dendritic complexity and computational capacity. *Communications Biology*, 7(1), 5. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-05689-y>
- Migliore, M., Cannia, C., Lytton, W. W., Markram, H., & Hines, M. L. (2006). Parallel network simulations with NEURON. *Journal of Computational Neuroscience*, 21(2), 119–129. <https://doi.org/10.1007/s10827-006-7949-5>
- Miyasho, T., Takagi, H., Suzuki, H., Watanabe, S., Inoue, M., Kudo, Y., &

- Miyakawa, H. (2001). Low-threshold potassium channels and a low-threshold calcium channel regulate Ca^{2+} spike firing in the dendrites of cerebellar Purkinje neurons: A modeling study. *Brain Research*, 891(1–2), 106–115. [https://doi.org/10.1016/S0006-8993\(00\)03206-6](https://doi.org/10.1016/S0006-8993(00)03206-6)
- Palmer, L. M., Clark, B. A., Gr, J., Roth, A., Stuart, G. J., & Michael, H. (2010). *Initiation of simple and complex spikes in cerebellar Purkinje cells*. 10, 1709–1717. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.188300>
- Saladin. (n.d.). *Anatomy and Physiology: The Unity of Form and Function* (5th Edition). McGraw–Hill Primis.
- Salazar Leon, L. E., Brown, A. M., Kaku, H., & Sillitoe, R. V. (2024). Purkinje cell dysfunction causes disrupted sleep in ataxic mice. *Disease Models & Mechanisms*, 17(6). <https://doi.org/10.1242/dmm.050379>
- Schutter, E. de. (1994). Modelling the cerebellar Purkinje cell: Experiments in computo. *Progress in Brain Research*, 102(C), 427–441. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(08\)60557-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(08)60557-9)
- TORTORA, G. J., & DERRICKSON, B. (2016). *Principles of ANATOMY & PHYSIOLOGY*.
- Uysal, S. (2023). The Brainstem. In *Functional Neuroanatomy and Clinical Neuroscience* (pp. 84–93). Oxford University Press New York. <https://doi.org/10.1093/oso/9780190943608.003.0008>
- van der Heijden, M. E., & Sillitoe, R. V. (2021). Interactions Between Purkinje Cells and Granule Cells Coordinate the Development of Functional Cerebellar Circuits. In *Neuroscience* (Vol. 462). IBRO. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2020.06.010>
- Van Overwalle, F., Ma, Q., & Heleven, E. (2020). The posterior crus II cerebellum is specialized for social mentalizing and emotional self-experiences: a meta-analysis. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 15(9), 905–928. <https://doi.org/10.1093/scan/nsaa124>