

INTEGRASI MODEL WINDKESSEL 0D DENGAN EFEK POROSITAS JARINGAN OTAK UNTUK SIMULASI DINAMIKA CAIRAN SEREBROSPINAL (CSF)

MUHAMMAD NICO AFRIZA



**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “Integrasi Model Windkessel 0D dengan Efek Porositas Jaringan Otak untuk Simulasi Dinamika Cairan Serebrospinal (CSF)” adalah benar karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir skripsi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari skripsi saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Mei 2026

Muhammad Nico Afriza

G7401221080



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



ABSTRAK

MUHAMMAD NICO AFRIZA. Integrasi Model Windkessel 0D dengan Efek Porositas Jaringan Otak untuk Simulasi Dinamika Cairan Serebrospinal (CSF). Dibimbing oleh AGUS KARTONO dan SETYANTO TRI WAHYUDI.

Cairan serebrospinal (CSF) memiliki peran vital dalam melindungi dan menjaga jaringan sistem saraf pusat. Ketidakseimbangan produksi, sirkulasi, atau absorpsi CSF dapat memicu kelainan neurologis yang fatal seperti hidrosefalus dan hipotensi intrakranial. Penelitian ini bertujuan memodelkan dinamika aliran CSF menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD) pendekatan 0D berbasis metode Windkessel *2-element* dan mengintegrasikannya dengan Hukum Darcy untuk merepresentasikan efek porositas pada jaringan otak (Q_{poros}). Persamaan model diselesaikan secara numerik menggunakan metode Euler. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model berhasil memvalidasi kondisi fisiologis normal dengan mempertahankan tekanan intrakranial (ICP) stabil pada rata-rata 10 mmHg dan amplitudo 5 mmHg. Integrasi parameter porositas terbukti efektif sebagai variabel pengganggu dalam menyimulasikan kondisi patologis. Pada skenario Hidrosefalus, simulasi penambahan massa cairan ($Q_{poros} > 0$) mereproduksi tren kenaikan tekanan yang mencapai ekuilibrium 19 – 24 mmHg. Sebaliknya, pada skenario Hipotensi intrakranial, simulasi kebocoran cairan ($Q_{poros} < 0$) dapat menyebabkan penurunan tekanan drastis hingga 0 mmHg, yang merepresentasikan fenomena klinis *dry tap*. Analisis sensitivitas membuktikan bahwa permeabilitas jaringan (k) berfungsi sebagai pengendali laju (*rate controller*) yang membedakan karakteristik progresi penyakit akut dan kronis tanpa mengubah titik ekuilibrium akhir. Selain itu, variasi nilai kepatuhan menunjukkan peran signifikansi elastisitas jaringan dalam meredam amplitudo pulsasi hidrodinamik. Model 0D yang dikembangkan terbukti fleksibel dan akurat dalam mereplikasi patofisiologis sirkulasi CSF.

Kata Kunci : computational fluid dynamics, hidrosefalus, hipotensi intrakranial, hukum darcy, windkessel *2-element*.



ABSTRACT

MUHAMMAD NICO AFRIZA. Integration of the 0D Windkessel Model with Brain Tissue Porosity Effects for Cerebrospinal Fluid (CSF) Dynamics Simulation. Supervised by AGUS KARTONO and SETYANTO TRI WAHYUDI.

Cerebrospinal fluid (CSF) plays a vital role in protecting and maintaining the central nervous system tissues. Imbalances in the production, circulation, or absorption of CSF can trigger severe neurological disorders such as hydrocephalus and intracranial hypotension. This study aims to model the dynamics of CSF flow using a 0D Computational Fluid Dynamics (CFD) approach based on the 2-element Windkessel method, integrating it with Darcy's Law to represent the effect of brain tissue porosity (Q_{poros}). The model equations were solved numerically using the Euler method. The simulation results indicated that the model successfully validated normal physiological conditions by maintaining a stable intracranial pressure (ICP) at an average of 10 mmHg with an amplitude of 5 mmHg. The integration of the porosity parameter proved effective as a disturbance variable in simulating pathological conditions. In the Hydrocephalus scenario, the simulation of fluid mass addition ($Q_{poros} > 0$) reproduced a pressure increase trend that reached a pathological equilibrium of 19 – 24 mmHg. Conversely, in the Intracranial hypotension scenario, the simulation of fluid leakage ($Q_{poros} < 0$) caused a drastic pressure drop to 0 mmHg, representing the clinical phenomenon of a dry tap. Sensitivity analysis demonstrated that tissue permeability (k) functions crucially as a rate controller, distinguishing the characteristics of acute and chronic disease progression without altering the final equilibrium point. Furthermore, variations in compliance values demonstrated the significant role of tissue elasticity in dampening hydrodynamic pulsation amplitudes. The developed 0D model proved to be flexible and accurate in replicating the pathophysiology of CSF circulation.

Keywords: computational fluid dynamics, darcy's law, hydrocephalus, intracranial hypotension, windkessel 2-element.

@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
Bogor Indonesia

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

**INTEGRASI MODEL WINDKESSEL 0D DENGAN EFEK
POROSITAS JARINGAN OTAK UNTUK SIMULASI DINAMIKA
CAIRAN SEREBROSPINAL (CSF)**

MUHAMMAD NICO AFRIZA

Skripsi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana pada
Program Studi Fisika

**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

@Hak cipta milik IPB University

IPB University





@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Tim Penguji pada Ujian Skripsi:
1. Dr. Mersi Kurniati, S.Si, M.Si.
2. Dr. Hendradi Hardienata, S.Si, M.Si.



IPB University
Bogor Indonesia

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

Judul Skripsi

Integrasi Model Windkessel 0D dengan Efek
: Porositas Jaringan Otak untuk Simulasi Dinamika
Cairan Serebrospinal (CSF)
: Muhammad Nico Afriza
: G7401221080

Nama
NIM

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Agus Kartono, S.Si., M.Si.
NIP. 19700421 199903 1 002

Pembimbing 2:

Dr. Setyanto Tri Wahyudi, S.Si., M.Si.
NIP. 19760731 200501 1 003

Diketahui oleh

Ketua Departemen Fisika:
Dr. Ir. Irmansyah, S.Si., M.Si.
NIP. 19680916 199403 1 001



Tanggal Ujian : 3 Juni 2026

Tanggal Lulus :

1. Cipta Dilindungi Undang-undang
 2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

@Hak cipta milik IPB University



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *subhanaahu wa ta'ala* atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini dengan judul “Integrasi Model Windkessel 0D dengan Efek Porositas Jaringan Otak untuk Simulasi Dinamika Cairan Serebrospinal (CSF)” sebagai salah satu syarat kelulusan di Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, IPB University.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing yaitu Bapak Prof. Dr. Agus Kartono, S.Si., M.Si sebagai pembimbing 1 dan Bapak Dr. Setyanto Tri Wahyudi, M.Si. sebagai Pembimbing 2 yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada ayah, ibu, serta seluruh keluarga yang telah memberi dukungan, doa, dan semangat sehingga penulis dapat menyelesaikan karya ilmiah ini. Selain itu, terima kasih kepada teman-teman Fisika IPB angkatan 59 yang penulis cintai serta seluruh civitas akademika Fisika IPB yang selalu memberikan perhatian, dorongan dan motivasi yang menjadi salah satu sumber semangat bagi penulis.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Mei 2026

Muhammad Nico Afriza



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	IV
DAFTAR GAMBAR	IV
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	2
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Computational Fluid Dynamics (CFD) pada Cerebrospinal fluid (CSF)	4
2.2 Kondisi Batasan	5
2.3 Patofisiologi Dinamika CSF	10
2.4 Metode Euler	11
III. METODELOGI	12
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	12
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	12
3.3 Prosedur Penelitian	12
3.4 Studi Kasus	16
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	19
4.1 Pengaruh Distribusi Kepatuhan Terhadap Aliran CSF di Berbagai Outlet	19
4.2 Prediksi Stabilitas Tekanan Intrakranial Jangka Panjang dan Respon Transien	21
4.3 Simulasi Gangguan Keseimbangan CSF Akibat Efek Porositas Jaringan Otak	22
4.4 Analisis Sensitivitas Permeabilitas Jaringan (k)	23
V. SIMPULAN DAN SARAN	24
5.1 Simpulan	24
5.1 Saran	24
DAFTAR PUSTAKA	25

DAFTAR TABEL

1.	Ikhtisar nilai rata-rata (avg.) dan amplitudo (amp.) pada semua batasan <i>inlet</i> (Vandenbulcke <i>et al.</i> 2022).	5
2.	Ikhtisar nilai resistansi pada tiap <i>outlet</i> (Vandenbulcke <i>et al.</i> 2022).	9
3.	Ikhtisar nilai kepatuhan pada tiap <i>outlet</i> (Vandenbulcke <i>et al.</i> 2022).	9
4.	Nilai parameter yang digunakan pada model CFD Vandenbulcke <i>et al.</i> (2022) dan Linninger <i>et al.</i> (2007)	15
5.	Ringkasan kondisi batas <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> pada setiap kasus (Vandenbulcke <i>et al.</i> 2022).	16

DAFTAR GAMBAR

1.	Visualisasi kondisi batas dalam 3D model (Vandenbulcke <i>et al.</i> 2022).	4
2.	Penggambaran efek Windkessel di pembuluh darah.	7
3.	Analogi sirkuit Windkessel 2-element	8
4.	Perbandingan solusi numerik dengan nilai Δt yang berbeda menggunakan metode Euler.	11
5.	Diagram alir algoritma pemrograman bentuk diskrit persamaan Windkessel 2- <i>element</i> .	14
6.	Debit aliran (mL/s) yang dipengaruhi batasan fisiologis ($f_{cardiac} = 1Hz$ dan $f_{venous1} = 0,2Hz$) pada masing-masing <i>outlet</i> untuk kasus B, C, D, dan E.	19
7.	(A) Prediksi tekanan sampai 3000 siklus detak jantung ($f_{cardiac} = 1Hz$) untuk kasus A dan B, detail tekanan pada rentang (B) 0 – 5 detik serta (C) 2000 – 2005 detik.	21
8.	(A) Prediksi tekanan sampai 3000 siklus detak jantung ($f_{cardiac} = 1Hz$) untuk kasus Hidrocefalus , detail tekanan pada rentang (B) 0 – 50 detik serta (C) Prediksi tekanan 3000 siklus detak jantung untuk kasus Hipotensi Intrakranial , detail tekanan pada rentang (D) 0 – 50 detik.	22
9.	Analisis sensitivitas permeabilitas jaringan otak (k) terhadap dinamika tekanan intrakranial. (A) Prediksi tekanan sampai 3000 siklus detak jantung ($f_{cardiac} = 1Hz$) untuk kasus Hidrocefalus , detail tekanan pada rentang (B) 0 – 50 detik serta; (C) Prediksi penurunan tekanan jangka panjang dan (D) detail tekanan pada rentang 0 – 50 detik untuk Hipotensi Intrakranial .	23