



ANALISIS NUMERIK PROSES DIFUSI-REAKSI PADA BIOFUEL CELL BERBASIS ENZIM TERMEDIASI

SALSABILA SHAFa' AZZASKIA



**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



@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 “**ANALISIS NUMERIK PROSES DIFUSI-REAKSI PADA *BIOFUEL CELL* BERBASIS ENZIM TERMEDIASI**” 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 karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Juni 2025

Salsabila Shafa' Azzaskia

G7401211030

@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.



@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.

ABSTRAK

SALSABILA SHAFa' AZZASKIA. Analisis Numerik Proses Difusi-Reaksi Pada *Biofuel Cell* Berbasis Enzim Termediasi. Dibimbing oleh AGUS KARTONO dan AKHIRUDDIN MADDU.

Model matematis untuk proses difusi-reaksi pada elektroda *biofuel cell* berbasis enzim dirancang dari persamaan difusi dengan suku nonlinear Michaelis-Menten yang menggambarkan kinetika reaksi enzimatik pada lapisan polimer redoks. Model ini diselesaikan secara numerik menggunakan metode beda hingga eksplisit dalam aplikasi pemrograman *Octave*. Solusi numerik menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan solusi analitik, baik dalam respon rapat arus dan rapat daya pada kondisi transien, maupun profil konsentrasi substrat dan mediator di sepanjang film polimer redoks. Pengaruh parameter yang dapat dikendalikan seperti koefisien difusi mediator, potensial Nernst, ketebalan lapisan film polimer redoks, dan konsentrasi substrat terhadap rapat arus juga disajikan secara grafis dan dibahas secara rinci. Hasil numerik menunjukkan bahwa perubahan parameter tersebut memberikan dampak signifikan pada respon arus *biofuel cell* berbasis enzim.

Kata kunci: *biofuel cell* berbasis enzim, film polimer redoks, kinetika Michaelis-Menten, metode beda hingga eksplisit, proses difusi-reaksi

ABSTRACT

SALSABILA SHAFa' AZZASKIA. Numerical Analysis of Reaction-Diffusion Process in Mediated-Enzyme based Biofuel Cells. Supervised by AGUS KARTONO and AKHIRUDDIN MADDU.

A mathematical model for the reaction-diffusion process occurring at the electrode of an enzymatic biofuel cell was formulated using the reaction-diffusion equation. This equation includes a nonlinear Michaelis-Menten term that characterizes the dynamics of enzymatic reactions within the redox polymer film. The model was numerically solved using the explicit finite difference method, which was developed within the Octave programming software. The numerical solutions show excellent agreement with the analytical results, both in terms of current and power density responses under transient conditions, as well as the concentration profiles of the substrate and mediator across the redox polymer film. The influence of controllable parameters such as diffusion coefficient of the mediator, Nernst potential, redox polymer film thickness, and bulk concentration of the substrate on the current density are also presented graphically and discussed in detail. Numerical results show that changes in these parameters have a significant impact on the current response of the enzyme-based biofuel cell.

Keywords: enzymatic biofuel cell, explicit finite difference method, Michaelis-Menten kinetics, reaction-diffusion process, redox polymer film.

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 2025

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



ANALISIS NUMERIK PROSES DIFUSI-REAKSI PADA BIOFUEL CELL BERBASIS ENZIM TERMEDIASI

SALSABILA SHAFa' AZZASKIA

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
2025**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

- Tim Penguji pada Ujian Skripsi:
1. Dr. Erus Rustami, S.Si, M.Si
 2. Abdul Djamil Husin, 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.

Perpustakaan IPB University



Judul Skripsi : Analisis Numerik Proses Difusi-Reaksi pada *Biofuel Cell*
berbasis Enzim Termediasi
Nama : Salsabila Shafa' Azzaskia
NIM : G7401211030

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

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



Pembimbing 2:

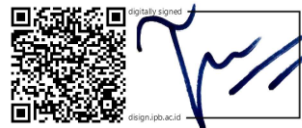
Prof. Dr. Akhiruddin Maddu, S.Si., M.Si.
NIP. 19660907 199802 1 006



Diketahui oleh

Ketua Departemen Fisika:

Prof. Dr. R. Tony Ibnu Sumaryada Wijaya P, S.Si, M.Si.
NIP. 19720519 199702 1 001



Tanggal Ujian: 17 Juli 2025

Tanggal Lulus: 17 Juli 2025

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini. Penelitian ini berjudul “Analisis Numerik Proses Difusi-Reaksi pada *Biofuel Cell* Berbasis Enzim Termediasi”. Adapun penelitian ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana di Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor. Terima kasih penulis ucapkan kepada:

1. Bapak Dr. Agus Kartono, S.Si., M.Si. dan Bapak Prof. Dr. Akhiruddin Maddu, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing skripsi, atas segala bimbingan, arahan, motivasi, serta saran yang diberikan kepada penulis sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
2. Seluruh staf pengajar Departemen Fisika IPB yang telah memberikan ilmu pengetahuan selama penulis menempuh pendidikan di Departemen Fisika.
3. Staf pelayanan mahasiswa Departemen Fisika IPB, atas bantuan mereka selama perjalanan akademik penulis di Departemen Fisika.
4. Orang tua tercinta, Bapak Mukhlis (Alm) dan Ibu Siti Nuryanah, adik-adik tercinta Muhammad Benazir Raja Khatami, Fauzul Kabir Al Kautsar, dan Afsheen Mukhlisina Mahmudah serta keluarga besar penulis yang telah memberikan dukungan, do'a, dan kasih sayang sepanjang hidup penulis.
5. Rekan-rekan seperbimbingan, Mohamad Ifdhal Hassan Noor, Pipit Suryani, Annisa Nur Azahra, Nadya Nurul Fatika, Nurdhuha Lil Firdausi Ismail, Bagus Sadewo Rizkar Khan Hidayat, dan Muhammad Rangga Wahyudi.
6. Rekan-rekan seperjuangan Fisika Angkatan 58 dan rekan-rekan penulis lainnya yang telah menemani penulis selama menempuh pendidikan di Departemen Fisika IPB.

Penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun agar skripsi ini lebih baik serta bermanfaat bagi penulis dan para pembaca.

Bogor, Juni 2025

Salsabila Shafa' Azzaskia

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
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	2
II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 <i>Biofuel Cell</i> berbasis Enzim (EBFC)	3
2.2 Mekanisme Bioelektrokatalisis pada EBFC	4
2.3 Kinetika Reaksi Enzimatik	5
2.4 Persamaan Reaksi-Difusi pada <i>Biofuel Cell</i> berbasis Enzim	5
2.5 Respons Arus pada Elektroda	6
2.6 Metode Beda Hingga (<i>Finite Difference Method</i>)	6
III METODE PENELITIAN	9
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	9
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	9
3.3 Prosedur Penelitian	9
3.3.1 Rumusan Model Matematika	9
3.3.2 Penentuan Kondisi Syarat Batas	11
3.3.3 Diskritisasi Persamaan Difusi-Reaksi pada EBFC	12
3.3.4 Pembuatan Program	13
3.3.5 Nilai Parameter dalam Model	14
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	15
4.1 Validasi Solusi Numerik Berdimensi dengan Solusi Analitik Non-dimensi	15
4.2 Pengaruh Koefisien Difusi Mediator terhadap Profil Konsentrasi dan Respons Rapat Arus pada Bioanoda	18
4.3 Pengaruh Konsentrasi Substrat terhadap Rapat Arus	20
4.4 Respons Arus pada Elektroda <i>EBFC</i> dengan Variasi Potensial Elektroda	21
4.5 Pengaruh Potensial dan Waktu pada Rapat Arus dengan Variasi Ketebalan Lapisan Polimer Redoks	22
4.6 Pengaruh Potensial, Konsentrasi Substrat dan Waktu pada Rapat Daya <i>Non-steady State</i>	23
V SIMPULAN DAN SARAN	26
5.1 Simpulan	26
5.2 Saran	26
DAFTAR PUSTAKA	27
LAMPIRAN	30
RIWAYAT HIDUP	31

DAFTAR GAMBAR

1	(a) Skema transfer elektron termediasi pada bioanode dan transfer elektron langsung pada biokatoda (Fredj <i>et al.</i> 2025); (b) skema elektroda enzim berbasis polimer redoks (Ruff 2017)	3
2	Skema reaksi bioelektrokatalisis yang dimediasi (dimodifikasi dari Kirthiga <i>et al.</i> (2018) Russ J Electrochem. 54(11):783-795)	4
3	Grid komputasional pendekatan beda hingga eksplisit (Quarteroni dan Saleri 2006)	8
4	Diagram alir algoritma pemrograman	13
5	Distribusi konsentrasi mediator tereduksi terhadap jarak dari elektroda dengan variasi potensial dan waktu, (a) dan (b) solusi numerik berdimensi, (c) solusi analitik non-dimensi dari Kirthiga <i>et al.</i> (2018)	15
6	Distribusi konsentrasi mediator teroksidasi terhadap jarak dari elektroda dengan variasi potensial dan waktu, (a) dan (b) solusi numerik berdimensi, (c) solusi analitik non-dimensi dari Kirthiga <i>et al.</i> (2018)	16
7	Distribusi konsentrasi substrat, mediator tereduksi dan mediator teroksidasi terhadap jarak dari elektroda dan rapat arus yang dihasilkan	18
8	Pengaruh konsentrasi bulk substrat terhadap rapat arus	20
9	Respons rapat arus seiring waktu dengan variasi potensial elektroda	21
10	Respons rapat arus transien a-b) terhadap potensial untuk berbagai ketebalan film (<i>l</i>) pada waktu yang berbeda, c-d) terhadap waktu untuk berbagai ketebalan film (<i>l</i>) pada potensial yang berbeda	22
11	Plot solusi numerik rapat daya terhadap waktu dengan variasi ketebalan film redoks	23
12	Plot solusi numerik rapat daya terhadap konsentrasi bulk substrat (a), dan potensial Nernst (b), dengan variasi ketebalan film redoks.	24
13	Plot rapat daya vs rapat arus	25

DAFTAR TABEL

1	Tabel 1 Nilai parameter dan konstanta yang digunakan pada model (Saravanakumar <i>et al.</i> 2015)	14
---	--	----

DAFTAR LAMPIRAN

1	Diagram alir penelitian	30
---	-------------------------	----