

MODEL DINAMIKA DARI INTERAKSI ANTARA SEL MAKROFAG DAN CTLs TERHADAP PERTUMBUHAN TUMOR

MOHAMAD IFDHAL HASSAN NOOR



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

@Hak cipta milik IPB University

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.



PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “Model Dinamika dari Interaksi antara Sel Makrofag dan CTLs terhadap Pertumbuhan Tumor” 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

Mohamad Ifdhal Hassan Noor
G7401211080

- 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.

Perpustakaan IPB University



ABSTRAK

MOHAMAD IFDHAL HASSAN NOOR. Model Dinamika dari Interaksi antara Sel Makrofag dan Sel CTLs terhadap Pertumbuhan Tumor. Dibimbing oleh AGUS KARTONO dan SETYANTO TRI WAHYUDI.

Non-small cell lung cancer merupakan salah satu penyebab utama kematian akibat kanker. Keberagaman sub tipe dan kompleksitas mekanisme menjadi tantangan utama dalam pengobatan *non-small cell lung cancer*. Penelitian ini bertujuan membangun dan menganalisis model matematika dinamika interaksi antara sel makrofag dan *Cytotoxic T Lymphocytes* (CTLs) terhadap pertumbuhan sel tumor. Sehingga diperlukan model dinamika untuk memahami interaksi antara sel tumor dan sel imun. Model ini dikembangkan menggunakan persamaan diferensial biasa yang diselesaikan dengan metode numerik Euler. Terdapat dua sistem utama, yaitu interaksi sel makrofag dengan tumor dan sistem kompetitif antara CTLs dengan tumor, termasuk modifikasi berupa penambahan fungsi saturasi pada eliminasi tumor oleh CTLs agar mencerminkan kondisi biologis yang lebih realistis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sel makrofag dan CTLs efektif dalam menekan pertumbuhan tumor, dengan CTLs yang dimodifikasi penambahan fungsi saturasi mampu mempertahankan populasi tumor pada kondisi stabil tanpa dieliminasi secara total. Adapun untuk melihat kontribusi parameter pada sistem kompetitif yang dimodifikasi terhadap pertumbuhan sel tumor, maka dilakukan analisis sensitivitas variasi parameter. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan strategi imunoterapi yang lebih efisien dalam penanganan kanker paru-paru.

Kata kunci: CTLs, kanker paru-paru, metode Euler, sel makrofag

ABSTRACT

MOHAMAD IFDHAL HASSAN NOOR. Dynamic Model of the Interaction between Macrophage Cells and CTLs on Tumor Growth. Supervised by AGUS KARTONO and SETYANTO TRI WAHYUDI.

Non-small cell lung cancer is a major cause of cancer-related deaths due to its diverse subtypes and complex mechanisms. This study develops and analyzes a mathematical model to understand how macrophage cells and Cytotoxic T Lymphocytes (CTLs) interact with tumor cells. The model uses ordinary differential equations and is solved numerically using the Euler method. It consists of two main systems, the interaction between macrophages and tumor cells, and the competition between CTLs and tumor cells. A saturation function is added to the CTL system to more realistically reflect tumor elimination. Simulation results show that both macrophages and CTLs can suppress tumor growth. CTLs with the saturation function help stabilize the tumor population without fully eliminating it. Sensitivity analysis is also performed to evaluate the influence of key parameters on tumor growth. These findings can support the development of more effective immunotherapy strategies for lung cancer.

Keywords: CTLs, Euler method, lung cancer, macrophage cells



@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 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.



@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.



MODEL DINAMIKA DARI INTERAKSI ANTARA SEL MAKROFAG DAN CTLs TERHADAP PERTUMBUHAN TUMOR

MOHAMAD IFDHAL HASSAN NOOR

Skripsi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana pada
Departemen Fisika

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



@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.

Tim Penguji pada Ujian Skripsi:

1. Nur Aisyah Nuzulia, S.Si., M.Si.
2. Drs. Mahfuddin Zuhri, S.Si., M.Si.



Judul Skripsi : Model Dinamika dari Interaksi antara Sel Makrofag dan CTLs terhadap Pertumbuhan Tumor.
Nama : Mohamad Ifdhal Hassan Noor
NIM : G7401201080

Disetujui oleh

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

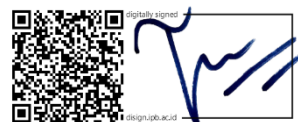


Pembimbing 2:
Dr. Setyanto Tri Wahyudi, S.Si., M.Si.
NIP. 19760731 200501 1 003



Diketahui oleh

Kepala Departemen Fisika:
Prof. Dr. R. Tony Ibnu Sumaryada Wijaya P, M.Si.
NIP. 19720519 199702 1 001



Tanggal Ujian: 21 Juli 2025

Tanggal Lulus:



@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.

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *subhanaahu wa ta'ala* atas segala karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini. Penelitian ini berjudul “Model Dinamika dari Interaksi antara Sel Makrofag dan CTLs terhadap Pertumbuhan Tumor”. Adapun penelitian ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana di Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor.

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Agus Kartono dan Bapak Dr. Setyanto Tri Wahyudi selaku dosen pembimbing skripsi, atas segala bimbingan, arahan, motivasi, serta saran yang diberikan kepada penulis sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
2. Orang tua tercinta, Bapak Mochammad Nur dan Ibu Aryati Rahastuti, Kak Lolyta Tamara, Kak Mohamad Fachry Hussein Noor, serta keluarga besar penulis atas doa, dukungan dan kasih sayang sepanjang hidup penulis.
3. Seluruh staf pengajar Departemen Fisika IPB yang telah memberikan ilmu pengetahuan selama penulis menempung pendidikan di Departemen Fisika.
4. Staf pelayanan mahasiswa fisika, atas bantuan mereka selama perjalanan akademik penulis di Departemen Fisika.
5. Kak Ine Dwi Lestari, atas setiap nasihat, motivasi, dan saran-saran yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lancar.
6. Rekan satu bimbingan, Salsabila Shafa' Azzaskia, Nurdhuha Lil Firdausi Ismail, Muhammad Rangga Syahputra Wahyudi, Nadya Nurul Fatika, Annisa Nur Azzahra, Pipit Suryani, dan Bagus Sadewo Rizkhar Khan Hidayat yang selalu mendampingi dan memberikan semangat, doa, serta dorongannya kepada penulis selama ini.
7. Fikri Sabilal Huda, Annisa Octaviana, Dio Danvin, Annisa Azzahra Kurniasari, Dwi Putri Andini yang selalu memberikan semangat, dukungan, serta motivasi tiada henti.
8. Rekan-rekan seperjuangan Fisika Angkatan 58 yang telah mendampingi penulis selama menempuh pendidikan di Departemen Fisika IPB.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis berharap adanya kritik dan saran yang membangun. agar skripsi ini lebih baik serta bermanfaat bagi penulis, bagi pihak yang membutuhkan, dan bagi kemandirian ilmu pengetahuan.

Bogor, Juni 2025

Mohamad Ifdhal Hassan Noor



@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.

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	16
DAFTAR GAMBAR	16
DAFTAR LAMPIRAN	16
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>Non-Small Cell Lung Cancer</i> (NSCLC)	3
2.2 Sel Makrofag	3
2.3 CTLs	4
2.4 Persamaan Diferensial Biasa	5
2.5 Metode Euler	5
III METODE PENELITIAN	7
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	7
3.2 Alat dan Bahan	7
3.3 Prosedur Penelitian	7
3.3.1 Rumusan Model Matematika	7
3.3.2 Estimasi Interaksi Kurva Parameter	10
3.3.3 Modifikasi Pemodelan Matematis Sistem Kompetitif Tumor-Imun	11
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	13
4.1 Respons pertumbuhan sel tumor pada pemodelan interaksi sel tumor dengan sel makrofag	13
4.2 Respons pertumbuhan sel tumor pada pemodelan sistem kompetitif tumor-imun tanpa penambahan fungsi saturasi	15
4.3 Respons pertumbuhan sel tumor pada pemodelan sistem kompetitif tumor-imun dengan penambahan fungsi saturasi	17
4.4 Analisis sensitivitas parameter pada sistem kompetitif tumor-imun yang dimodifikasi	19
V SIMPULAN DAN SARAN	23
5.1 Simpulan	23
5.2 Saran	23
DAFTAR PUSTAKA	24
LAMPIRAN	26
RIWAYAT HIDUP	27



DAFTAR TABEL

- | | |
|--|----|
| 1. Parameter-parameter yang digunakan pada model Özköse <i>et al.</i> 2021 | 7 |
| 2. Rincian variasi nilai parameter CTLs pada model Özköse <i>et al.</i> 2021 | 19 |

DAFTAR GAMBAR

- | | |
|--|----|
| 1. Mekanisme aktivasi makrofag beserta peran TAM dalam kanker paru-paru (Xu <i>et al.</i> 2020) | 4 |
| 2. Kurva data nyata pasien kanker paru-paru dari Erciye University Hospital, Turki dari 15 September hingga 28 September, 2021, dan kurva terbaik yang sesuai untuk model yang diusulkan | 11 |
| 3. Hasil model interaksi sel tumor dan sel makrofag terhadap waktu yang dipengaruhi oleh makrofag, makrofag aktif | 14 |
| 4. Hasil model sistem kompetitif tumor-imun tanpa penambahan fungsi saturasi terhadap waktu yang dipengaruhi oleh CTLs, <i>T-helper cells</i> , dan sel tumor | 16 |
| 5. Hasil model sistem kompetitif tumor-imun dengan penambahan fungsi saturasi yang dipengaruhi oleh CTLs, <i>T-helper cells</i> , dan sel tumor | 18 |
| 6. Hasil analisis sensitivitas parameter sistem kompetitif tumor-imun yang dimodifikasi terhadap pertumbuhan sel tumor | 20 |
| 7. Hasil model analisis sensitivitas parameter sistem kompetitif tumor-imun yang dimodifikasi terhadap pertumbuhan sel tumor dengan variasi parameter s | 21 |
| 8. Hasil model analisis sensitivitas parameter sistem kompetitif tumor-imun yang dimodifikasi terhadap pertumbuhan sel tumor dengan variasi r | 22 |
| 9. Hasil model analisis sensitivitas parameter CTLs sistem kompetitif tumor-imun yang dimodifikasi terhadap pertumbuhan sel tumor dengan variasi k_3 | 22 |

DAFTAR LAMPIRAN

- | | |
|--|----|
| 1. Diagram alir pelaksanaan penelitian | 26 |
|--|----|