UNIVERSITAS NASIONAL

DESAIN KOMPOSISI OPTIMAL MATERIAL SEMIKONDUKTOR ALUMINIUM GALIUM ARSENIDA ($Al_xGa_{1-x}As$) MENGGUNAKAN KECERDASAN BUATAN

SKRIPSI

ABDULLAH HASAN DAFA

207005516011

PROGRAM STUDI TEKNIK FISIKA

FAKULTAS TEKNIK DAN SAINS

UNIVERSITAS NASIONAL

FEBRUARI 2025

UNIVERSITAS NASIONAL

OPTIMAL COMPOSITION DESIGN OF ALUMINIUM GALLIUM ARSENIDE ($Al_xGa_{1-x}As$) USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

BACHELOR THESIS

ABDULLAH HASAN DAFA

207005516011

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS

FACULTY OF ENGINEERING AND SCIENCE

UNIVERSITAS NASIONAL

FEBRUARY 2025

UNIVERSITAS NASIONAL

DESAIN KOMPOSISI OPTIMAL MATERIAL SEMIKONDUKTOR ALUMINIUM GALIUM ARSENIDA ($Al_xGa_{1-x}As$) MENGGUNAKAN KECERDASAN BUATAN

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar

Sarjana Strata Satu

ABDULLAH HASAN DAFA

207005516011

FAKULTAS TEKNIK DAN SAINS

PROGRAM STUDI TEKNIK FISIKA

JAKARTA

FEBRUARI 2025

UNIVERSITAS NASIONAL

OPTIMAL COMPOSITION DESIGN OF ALUMINIUM GALLIUM ARSENIDE ($Al_xGa_{1-x}As$) SEMICONDUCTOR MATERIAL USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

BACHELOR THESIS

Submitted as one of the requirements to obtain

Bachelor's Degree

ABDULLAH HASAN DAFA

207005516011

FACULTY OF ENGINEERING AND SCIENCE

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS

JAKARTA

FEBRUARY 2025

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Abdullah Hasan Dafa

NPM : 207005516011

Tanda Tangan : .....

Tanggal : 15 Februari 2025

METERAI TEMPEL
D4AMX131135518
UNIVERSITAS NASIONAL

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama	:	Abdullah Hasan Dafa
NPM	:	207005516011
Program Studi	:	Teknik Fisika
Judul Skripsi	:	Desain Komposisi Optimal Material Semikonduktor Aluminium Galium Arsenida ($Al_xGa_{1-x}As$) Menggunakan Kecerdasan Buatan

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana. Pada Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Nasional

Dewan Penguji

Pembimbing I	: Dr. V. Vekky R. Repi, S.T., M.T.	( )
Pembimbing II	: Fitria Hidayanti, S.Si., M.Si.	( )
Penguji I	: Erna Kusuma Wati, S.Pd.Si., M.Sc.	( )
Penguji II	: Ir. Ajat Sudrajat, M.T., Ph.D.	( )
Penguji III	: Prof. Sunartoto Gunadi, M.Eng.	( )

Mengesahkan

Ketua Program Studi Teknik Fisika

Erna Kusuma Wati, S.Pd.Si., M.Sc

NID. 0108019011

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : 15 Februari 2025

KATA PENGANTAR / UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah puji Syukur kepada Tuhan Semesta Alam Allah Subhanahu Wa Ta'ala, atas segala rahmat-Nya, hidayah-Nya, karunia-Nya dan izin-Nya, penulis dapat melaksanakan dan menyelesaiakan Tugas Akhir yang berjudul **"Desain Komposisi Optimal Material Semikonduktor Aluminium Galium Arsenida ($Al_xGa_{1-x}As$) Menggunakan Kecerdasan Buatan"** sebagai syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik di Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Nasional.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis telah dibantu, dibimbing, dan didukung oleh banyak pihak. Oleh sebab itu, penulis ingin menyampaikan perasaan apresiasi dan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada pihak yang terlibat baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

1. Bapak Dr. El Amry Bermawi Putera, M.A. selaku Rektor Universitas Nasional.
2. Bapak Ir. Ruliyanto, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Nasional.
3. Bapak Basori, S.T., M.T. selaku Wakil Dekan Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Nasional.
4. Ibu Erna Kusuma Wati, S.Pd.Si., M.Sc. selaku Ketua Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Nasional atas semua arahan dan nasihat yang diberikan kepada penulis selama menjadi mahasiswa.
5. Bapak Dr. Viktor Vekky Ronald Repi, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Pertama Tugas Akhir penulis, atas banyaknya bimbingan dan ilmu yang telah diberikan kepada penulis selama pengerjaan Tugas Akhir berlangsung, juga atas dukungan terhadap mimpi penulis.
6. Ibu Fitria Hidayanti, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing Kedua Tugas Akhir serta Dosen Pembimbing Akademik penulis, atas bimbingan dan ilmu yang diberikan kepada penulis serta telah mendengar banyak cerita penulis bahkan yang bersifat pribadi dan personal.
7. Ibu Fitri Rahma, S.T., M.T., selaku Dosen Teknik Fisika atas pengajaran, dukungan, dan kesempatan yang diberikan kepada penulis selama menjadi asisten

dosen dan asisten laboratorium sehingga penulis mendapatkan pengalaman berharga selama menjadi mahasiswa.

8. Bapak Ir. Ajat Sudrajat S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Prof. Sunartoto Gunadi M.Eng. selaku Dosen Teknik Fisika atas pengajaran dan dukungan terhadap penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir.
9. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Fisika yang telah memberikan ilmu berharga kepada penulis selama belajar di Universitas Nasional serta jajaran staff fakultas yang membantu penulis dalam berbagai urusan .
10. Kepada kedua orang tua penulis, Ahmad Rahim dan Hj, Ayu Dahlan yang selalu memberikan semangat dan segala bentuk dukungan kepada penulis. Tidak lupa untuk Mariam Ridwan, Akhmad Ridwan selaku kakak penulis atas dukungan dan doanya. Serta adik penulis, Wanda Sabrina dan Azzahra Nafeeza Fatarani yang selalu menghibur penulis dengan tingkah laku mereka yang lucu. Dan keluarga besar penulis yang tidak bisa disebutkan satu per satu.
11. Keluarga Besar di Lamongan, Romelah, Ratna Marhaeni Kartika Sari, Luky Metalia, Piyanto, Emmy Yuliati, Beni, Joko Eko Januadi, atas dukungan dan doa yang diberikan kepada penulis.
12. Almh. Nur Jannah, yang kebaikan dan doanya selalu mengiringi penulis semasa beliau masih hidup.
13. Ibu Nur Syamsiah, M.Pd. dan Ibu Amiratun Labibah, yang sangat baik kepada penulis seperti ibu kandung sendiri.
14. Naura Najhifa Farid, A.Md.Li., selaku pasangan penulis yang selalu ada di samping penulis apapun keadaan dan situasinya. Selalu memberikan segala bentuk dukungan kepada penulis dan sering memotivasi penulis dalam penyelesaian Tugas Akhir.
15. Raihan Dwi Nugroho, S.T., Aryo Laksono, S.T., Agis Pratiwi, S.T., Meby Sulaeman, Ghilar Arghi Pratama, Muhammad Dzakwan Hafizh, Muhammad Thohari Jatisidi, Razasyattar Mikail, Muhammad Tri Agus Budiman, selaku teman baik penulis yang sering menghabiskan waktu dengan bermain bersama dan juga ikut andil dalam membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir baik secara langsung maupun tidak langsung.
16. Seluruh rekan-rekan Teknik Fisika Universitas Nasional.

17. Seluruh kerabat yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Penulisan Tugas Akhir penulis pun pastinya tidak lepas dari segala bentuk kesalahan dan kekurangan, oleh karena itu penulis juga tidak menutup diri dari kritik dan saran pembaca. Sebagai penulis akan dengan tangan terbuka dan senang hati berdiskusi berkaitan dengan Tugas Akhir penulis atau keilmuan serumpun Teknik Fisika. Akhir kata, penulis berharap apa yang sudah dituliskan melalui laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis pribadi, terkhusus para pembaca agar dapat dijadikan sebagai referensi pada penelitian mendatang.

Jakarta, 15 Februari 2025

Abdullah Hasan Dafa

UNIVERSITAS NASIONAL

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR DAN ARTIKEL/KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai civitas akademika Universitas Nasional saya bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Abdullah Hasan Dafa

NPM : 207005516011

Program Studi : Teknik Fisika

Fakultas : Fakultas Teknik dan Sains

Demi pengembanan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Nasional Hak Bebas Royalti Noneksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul:

"DESAIN KOMPOSISI OPTIMAL MATERIAL SEMIKONDUKTOR ALUMINIUM GALIUM ARSENIDA ($Al_xGa_{1-x}As$) MENGGUNAKAN KECERDASAN BUATAN"

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Nasional berhak menyimpan, mengalismedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data, merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya dalam bentuk artikel/karya ilmiah selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada Tanggal : 15 Februari 2025

Yang Menyatakan

METERAI TEMPEL

TBEC8AMX198531207

(Abdullah Hasan Dafa)

UNIVERSITAS NASIONAL

ABSTRAK

Nama	:	Abdullah Hasan Dafa
Program Studi	:	Teknik Fisika
Judul	:	Desain Komposisi Optimal Material Semikonduktor Aluminium Galium Arsenida ($Al_xGa_{1-x}As$) Menggunakan Kecerdasan Buatan

Penelitian ini mengembangkan model kecerdasan buatan dengan model *Graph Neural Network* (GNN) untuk mendesain material semikonduktor $Al_xGa_{1-x}As$ dengan karakteristik yang optimal. Model ini dilatih menggunakan dataset komprehensif yang mencakup variasi komposisi untuk mempelajari hubungan kompleks antara struktur kristal dan sifat-sifat material. Model mencapai performa yang baik dengan nilai R^2 sebesar 0.8134 dan RMSE 0.5080, menunjukkan kemampuan prediksi yang handal. Sistem rekomendasi yang dikembangkan berhasil mengidentifikasi komposisi optimal $Al_xGa_{1-x}As$ untuk aplikasi mikroprosesor, dengan mempertimbangkan parameter kunci seperti densitas, celah pita, mobilitas elektron, konduktivitas termal, dan konstanta dielektrik. Hasil menunjukkan bahwa komposisi dengan x berkisar 0.3-0.7 memenuhi persyaratan untuk aplikasi mikroelektronika modern, dengan variasi spesifik tergantung pada prioritas parameter kinerja yang diinginkan. Analisis mengenai sensitivitas parameter terhadap komposisi Al mengungkapkan bahwa mobilitas elektron dan celah pita sangat dipengaruhi bahkan oleh perubahan kecil. Pendekatan ini berhasil menawarkan metode yang efisien untuk merancang material semikonduktor dengan karakteristik yang dapat disesuaikan untuk aplikasi teknologi tinggi, sekaligus mengurangi waktu dan biaya eksperimen laboratorium secara signifikan.

Kata kunci: Semikonduktor $Al_xGa_{1-x}As$, desain material, Graph Neural Network, hubungan struktur-sifat

ABSTRACT

Name	:	Abdullah Hasan Dafa
Department	:	Engineering Physics
Title	:	Optimal Composition Design of Semiconductor Material Aluminum Gallium Arsenide (AlxGa1-xAs) Using Artificial Intelligence

This research develops an artificial intelligence model using Graph Neural Network (GNN) to design $Al_xGa_{1-x}As$ semiconductor materials with optimal characteristics. The model was trained using a comprehensive dataset encompassing compositional variations to learn complex relationships between crystal structure and material properties. The model achieved good performance with an R^2 value of 0.8134 and RMSE of 0.5080, demonstrating reliable predictive capabilities. The developed recommendation system successfully identified optimal $Al_xGa_{1-x}As$ compositions for microprocessor applications, considering key parameters such as density, band gap, electron mobility, thermal conductivity, and dielectric constants. Results indicate that compositions with x ranging from 0.3-0.7 meet the requirements for modern microelectronic applications, with specific variations depending on desired performance parameter priorities. Analysis of parameter sensitivity to Al composition revealed that electron mobility and band gap are highly influenced even by small changes. This approach successfully offers an efficient method for designing semiconductor materials with tailored characteristics for high-technology applications while significantly reducing laboratory experimentation time and costs.

Keywords: $Al_xGa_{1-x}As$ Semiconductor, Material Design, Graph Neural Network, Structure-property Relationship

UNIVERSITAS NASIONAL

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS i

HALAMAN PENGESAHAN ii

KATA PENGANTAR / UCAPAN TERIMA KASIH iii

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR DAN ARTIKEL/KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS vi

ABSTRAK vii

ABSTRACT viii

DAFTAR ISI ix

DAFTAR TABEL xi

DAFTAR GAMBAR xiii

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 6

1.3 Tujuan Penelitian 6

1.4 Manfaat Penelitian 7

1.5 Batasan Masalah 7

1.6 Sistematika Penulisan 7

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 10

2.1 Tinjauan Literatur 10

2.2 $Al_xGa_{1-x}As$ 13

2.2.1. Parameter Struktur dan Sifat Fisis AlAs dan GaAs 13

2.2.2. Subtitusi Al pada GaAs 14

2.3 CPU/Mikroprosesor 15

2.4 Interpolasi Struktur 16

2.4.1 Hukum Vegard 17

2.5 Machine Learning/Deep Learning 18

2.6 Penemuan Material Berbasis Data dan Hubungan Struktur-Properti Material 20

BAB III METODOLOGI PENELITIAN 21

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian 21

3.2 Detail Spesifikasi Komputasi 21

3.3 Prosedur Penelitian 22
3.3.1. Diagram Alir Penelitian 22
3.3.2. Akuisisi Data.....24
3.3.3. Parameter Struktur 25
3.3.4. Visualisasi Struktur Kristal 28
3.3.5. Pemodelan *Graph Neural Network*.....30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....32
4.1 Analisis Parameter Struktur $Al_xGa_{1-x}As$ 32
4.2.1. Analisis Konstanta Kisi.....32
4.2.2. Analisis Volume Kristal 34
4.2.3. Visualisasi Struktur $Al_xGa_{1-x}As$ 36
4.2 Analisis Parameter Fisis.....57
4.2.1. Konversi Data Struktur menjadi Data Graf.....57
4.2.2. Analisis Perbandingan Hasil Prediksi Parameter dengan Studi Teoritis 58
4.3 Performa Model *Graph Neural Network* 70
4.4 Sistem Rekomendasi $Al_xGa_{1-x}As$ 72
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 78
5.1 Kesimpulan 78
5.2 Saran.....78
DAFTAR PUSTAKA 79
LAMPIRAN 83

UNIVERSITAS NASIONAL

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Hasil kalkulasi metode WC-GGA untuk konstanta kisi dan energi celah pita berdasarkan komposisi elemen Al [13] 10

Tabel 3.1 Parameter fisis material AlAs dan GaAs dari Materials Project 25

Tabel 4.1 Analisis perbandingan nilai konstanta kisi $Al_xGa_{1-x}As$ 33

Tabel 4.2 Analisis perbandingan nilai volume $Al_xGa_{1-x}As$ 35

Tabel 4.3 Parameter Struktur $Al_{0.00}Ga_{1.00}As$ 36

Tabel 4.4 Parameter Struktur $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ 37

Tabel 4.5 Parameter Struktur $Al_{0.10}Ga_{0.90}As$ 38

Tabel 4.6 Parameter Struktur $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ 39

Tabel 4.7 Parameter Struktur $Al_{0.20}Ga_{0.80}As$ 40

Tabel 4.8 Parameter Struktur $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$ 41

Tabel 4.9 Parameter Struktur $Al_{0.30}Ga_{0.70}As$ 42

Tabel 4.10 Parameter Struktur $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ 43

Tabel 4.11 Parameter Struktur $Al_{0.40}Ga_{0.60}As$ 44

Tabel 4.12 Parameter Struktur $Al_{0.45}Ga_{0.55}As$ 45

Tabel 4.13 Parameter Struktur $Al_{0.50}Ga_{0.50}As$ 46

Tabel 4.14 Parameter Struktur $Al_{0.55}Ga_{0.45}As$ 47

Tabel 4.15 Parameter Struktur $Al_{0.60}Ga_{0.20}As$ 48

Tabel 4.16 Parameter Struktur $Al_{0.65}Ga_{0.35}As$ 49

Tabel 4.17 Parameter Struktur $Al_{0.70}Ga_{0.30}As$ 50

Tabel 4.18 Parameter Struktur $Al_{0.75}Ga_{0.25}As$ 51

Tabel 4.19 Parameter Struktur $Al_{0.80}Ga_{0.20}As$ 52

Tabel 4.20 Parameter Struktur $Al_{0.85}Ga_{0.15}As$ 53

Tabel 4.21 Parameter Struktur $Al_{0.90}Ga_{0.10}As$ 54

Tabel 4.22 Parameter Struktur $Al_{0.95}Ga_{0.05}As$ 55

Tabel 4.23 Parameter Struktur $Al_{1.00}Ga_{0.00}As$ 56

Tabel 4.24. Analisis perbandingan nilai densitas $Al_xGa_{1-x}As$ 59

Tabel 4.25. Analisis perbandingan nilai mobilitas elektron $Al_xGa_{1-x}As$ 61

Tabel 4.26. Analisis perbandingan nilai konduktifitas termal $Al_xGa_{1-x}As$ 62

Tabel 4.27. Analisis perbandingan nilai konstanta dielektrik statis $Al_xGa_{1-x}As$ 65

Tabel 4.28. Analisis perbandingan nilai konstanta dielektrik HF $Al_xGa_{1-x}As$ 67

Tabel 4.29. Analisis perbandingan nilai celah pita $Al_xGa_{1-x}As$.....69

Tabel 4.30 Performa model *Graph Neural Network* (GNN) dengan metrik evaluasi statistika 72

Tabel 4.31 Variasi masukkan sistem rekomendasi pertama.....73

Tabel 4.32 Hasil sistem rekomendasi dari variasi masukkan pertama 75

Tabel 4.33 Variasi masukkan sistem rekomendasi kedua 75

Tabel 4.34 Hasil sistem rekomendasi dari variasi masukkan kedua.....76

UNIVERSITAS NASIONAL

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1: Intel 4004 merupakan mikroprosesor awal yang dikomersilkan, dirilis pertama kali tahun 1971 [1] 1

Gambar 1.2 Aplikasi pembelajaran mesin dalam sintesis material [8]. 4

Gambar 1.3 Memetakan kristal ke representasi graf melalui pengkodean, digunakan untuk melatih jaringan saraf graf untuk memprediksi properti yang diinginkan [12]. . 5

Gambar 2.1 *International Technology Roadmap for Semiconductors* (a) total transistor per chip, (b) *local clock* dalam chip [24]. 16

Gambar 2.2 Deviasi volume kristal enam paduan terner acak [26]. 18

Gambar 2.3 Representasi struktur atomic ke dalam bentuk graf untuk diproses dalam algoritma syaraf tiruan, (a) CGCNN, (b) ALIGNN, (c) MEGNet, (d) iCGCNN [31]. 19

Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian 23

Gambar 3.2 File CIF AlAs 26

Gambar 3.3 File CIF GaAs 26

Gambar 3.4 File POSCAR AlAs 27

Gambar 3.5 File POSCAR GaAs 27

Gambar 3.6 Visualisasi interaktif 3D struktur kristal AlAs 28

Gambar 3.7 Visualisasi interaktif 3D struktur kristal GaAs 29

Gambar 3.8 Visualisasi tampak atas struktur kristal GaAs 29

Gambar 3.9 Visualisasi tampak atas struktur kristal GaAs 29

Gambar 3.10 Arsitektur *Graph Neural Network* yang digunakan. 30

Gambar 4.1 Perbandingan konstanta kisi hasil interpolasi dengan hasil kalkulasi Hukum Vegard 32

Gambar 4.2 Perbandingan volume dengan konstanta kisi hasil interpolasi dengan volume hasil kalkulasi Hukum Vegard 34

Gambar 4.3 Visualisasi tampak atas dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.00}Ga_{1.00}As$ 37

Gambar 4.4 Visualisasi tampak atas dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ 38

Gambar 4.5 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.10}Ga_{0.90}As$ 39

Gambar 4.6 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ 40

Gambar 4.7 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.20}Ga_{0.80}As$ 41
Gambar 4.8 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$ 42
Gambar 4.9 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.30}Ga_{0.70}As$ 43
Gambar 4.10 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ 44
Gambar 4.11 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.40}Ga_{0.60}As$ 45
Gambar 4.12 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.45}Ga_{0.55}As$ 46
Gambar 4.13 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.50}Ga_{0.50}As$ 47
Gambar 4.14 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.55}Ga_{0.45}As$ 48
Gambar 4.15 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.60}Ga_{0.40}As$ 49
Gambar 4.16 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.65}Ga_{0.35}As$ 50
Gambar 4.17 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.70}Ga_{0.30}As$ 51
Gambar 4.18 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.75}Ga_{0.25}As$ 52
Gambar 4.19 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.80}Ga_{0.20}As$ 53
Gambar 4.20 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.85}Ga_{0.15}As$ 54
Gambar 4.21 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.90}Ga_{0.10}As$ 55
Gambar 4.22 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{0.95}Ga_{0.05}As$ 56
Gambar 4.23 Visualisasi tampak atas, dan visualisasi 3D struktur kristal $Al_{1.00}Ga_{0.00}As$ 57
Gambar 4.24 Perbandingan densitas hasil prediksi dengan hasil kalkulasi studi literatur 60

Gambar 4.25 Perbandingan mobilitas elektron hasil prediksi dengan hasil kalkulasi studi literatur 62

Gambar 4.26 Perbandingan konduktifitas termal hasil prediksi dengan hasil kalkulasi studi literatur 64

Gambar 4.27 Perbandingan konstanta dielektrik statis hasil prediksi dengan hasil kalkulasi studi literatur.....66

Gambar 4.28 Perbandingan konstanta dielektrik HF hasil prediksi dengan hasil kalkulasi studi literatur.....68

Gambar 4.29 Perbandingan celah pita hasil prediksi dengan hasil kalkulasi studi literatur.....70

Gambar 4.30 Evaluasi model Graph Neural Network (GNN) dengan dua metrik evaluasi, *loss value* dan *Mean Absolute Error* (MAE) tiap epoch.....71

Gambar 4.31 Hasil rekomendasi untuk variasi masukkan pertama.....74

Gambar 4.32 Hasil rekomendasi untuk variasi masukkan kedua 76

UNIVERSITAS NASIONAL