



UNIVERSITAS PERTAHANAN REPUBLIK INDONESIA

**Optimasi Sel Surya Perovskit Berstruktur Mesoskopik
melalui Variasi Lapisan Pemisah dan Elektroda
Karbon untuk Ketahanan Energi**

RAHMATSYAH HANDAYANI RAMADHAN NASUTION
320210304020

**Skripsi yang Ditulis untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan dalam
Mendapatkan Gelar Sarjana**

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM MILITER
PROGRAM STUDI FISIKA
BOGOR, 2025

LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI

Nama : Rahmatsyah Handayani Ramadhan Nasution
NIM : 320210304020
Program Studi : Fisika Militer
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer
Judul Proposal : Optimasi Sel Surya Perovskit Berstruktur Mesoskopik
Tugas Akhir : melalui Variasi Lapisan Pemisah dan Elektroda Karbon untuk Ketahanan Energi

Pembimbing I,



Dr. Riri Murniati, S.Si., M.Si.
NIP. 199001202022032002
Tanggal: 28 November 2024

Pembimbing II,



Prof. Natalita Maulani Nursam, Ph.D.
NIP. 198212272006042004
Tanggal: 28 November 2024

Mengetahui,

Kepala Program Studi Fisika,



M. Zuhnir P., S.Si., M.Eng.
Kolonel Tek. NRP. 522657
Tanggal: 08/08/2025

Dekan Fakultas MIPA Militer



Dr. Ir. Ence Darmo Jaya Supena, M.Si
Pembina Utama Muda IV/c
Tanggal: 11 Agustus 2025

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

Nama : Rahmatsyah Handayani Ramadhan Nasution
NIM : 320210304020
Program Studi : Fisika
Fakultas : MIPA Militer
Judul Proposal : Optimasi Sel Surya Perovskit Berstruktur Mesoskopik
Skrripsi melalui Variasi Lapisan Pemisah dan Elektroda Karbon
untuk Ketahanan Energi

No	Nama	Tanda Tangan	Tanggal
1	Dosen Pembimbing 1: Dr. Riri Murniati, S.Si., M.Si. NIP. 199001202022032002		17/07/2025
2	Dosen Pembimbing 2 : Prof. Natalita Maulani Nursam, Ph.D. NIP. 198212272006042004		17/07/2025
3	Dosen Penguji 1 : Diyana Parwatiningsih, S.Si, M.T., M.Sc. NIP. 197801222024212001		01 Agustus 2025
4	Dosen Penguji 2: Dr. Ir. Rudi Lazuardi, S.Si., M.Si. Kol Laut (KH). NRP. 12824		17/07/2025

PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini Saya menyatakan bahwa skripsi ini merupakan hasil karya ilmiah Saya sendiri, dan sejauh pengetahuan Saya, tidak terdapat bagian dari karya ini baik berupa gagasan, kalimat, paragraf, subbab, maupun bab yang merupakan hasil plagiarisme atau pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik pada jenjang apapun di perguruan tinggi manapun.

Segala kutipan atau referensi yang digunakan telah dicantumkan secara jelas dan bertanggung jawab dalam naskah ini serta tercantum dalam Daftar Pustaka, sesuai dengan kaidah penulisan ilmiah yang berlaku.

Apabila di kemudian hari terbukti bahwa skripsi ini mengandung unsur plagiarisme, baik sebagian maupun seluruhnya, Saya bersedia menerima segala bentuk sanksi akademik sesuai dengan peraturan dan perundang-undangan yang berlaku.

Bogor, 15 Juli 2025



Rahmatsyah Handayani
Ramadhan Nasution

**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Pertahanan Republik Indonesia,
Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rahmatsyah Handayani Ramadhan Nasution
NIM : 320210304020
Program Studi : Sarjana Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer
Jenis Karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Pertahanan Republik Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Optimasi Sel Surya Perovskit Berstruktur Mesoskopik melalui Variasi Lapisan Pemisah dan Elektroda Karbon untuk Ketahanan Energi

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Pertahanan Republik Indonesia berhak menyimpan, mengalih-media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya

Dibuat di : Bogor, 2025

Pada tanggal : 01 Agustus 2025

Yang menyatakan



Rahmatsyah Handayani R. N.

NIM. 320210304020

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala, Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat, karunia, serta inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi dengan judul: "Optimasi Sel Surya Perovskit Berstruktur Mesoskopik melalui Variasi Lapisan Pemisah dan Elektroda Karbon untuk Ketahanan Energi" sebagai bagian dari pemenuhan syarat akademik untuk meraih gelar Sarjana di Universitas Pertahanan Republik Indonesia. Penyusunan karya ilmiah ini tidak terlepas dari dukungan, bimbingan, dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan ketulusan hati, penulis ingin menyampaikan apresiasi dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT, yang telah memberikan kekuatan lahir dan batin, serta kelapangan pikiran dan hati selama proses penelitian hingga penyusunan skripsi ini.
2. Keluarga tercinta, yang merupakan fondasi utama perjuangan ini:

Ayahanda: *Haminuddin Nasution, S.P.*, Ibunda: *Dr. Asnawati, S.Ag., M.Pd.I.*, Adik tercinta: *SK (Bio) Salsabila Fauziah Dhuha Nasution*, atas cinta, doa, dan dukungan tiada henti dalam setiap langkah yang Saya tempuh.

3. Presiden Republik Indonesia ke-8, *Jenderal TNI (Purn.) H. Prabowo Subianto*, yang telah menginisiasi lahirnya Kadet Mahasiswa Universitas Pertahanan Republik Indonesia sebagai pilar masa depan bangsa yang tangguh dan berdaya saing.
4. Letnan Jenderal Letjen TNI (Purn.) *Dr. Anton Nugroho, M.M.D.S., M.A., M.Sc.*, selaku Rektor Universitas Pertahanan Republik Indonesia, atas kepemimpinan visioner dan dedikasinya dalam membentuk lingkungan akademik yang unggul dan patriotik.

5. Dr. Ir. Ence Darmo Jaya Supena, M.Si., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer.
6. Kolonel (Tek.) M. Zuhnir Piliang, S.Si., M.Eng., selaku Kepala Program Studi Fisika, atas arahan, motivasi, dan perhatian yang telah banyak diberikan kepada penulis.
7. Dr. Riri Murniati, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing pertama sekaligus Dosen Pembimbing Akademik, atas bimbingan ilmiah yang teliti dan ketulusan dalam membina penulis secara akademik maupun karakter.
8. Prof. Natalita Maulani Nursam, Ph.D., selaku dosen pembimbing kedua, atas arahan ilmiah, ketegasan metodologis, dan wawasan yang sangat berharga dalam memperkaya kualitas skripsi ini.
9. Seluruh dosen Program Studi Fisika Universitas Pertahanan Republik Indonesia yang telah membekali penulis dengan ilmu pengetahuan, keteladanan, dan nilai-nilai luhur kebangsaan.
10. Kakak-kakak staf Program Studi Fisika yang telah membantu dengan sepenuh hati dalam setiap proses administrasi dan teknis perkuliahan.
11. Para peneliti, kakak-kakak, serta rekan-rekan mahasiswa di BRIN yang telah memberikan ruang diskusi, kolaborasi, dan pengalaman laboratorium yang sangat berharga.
12. Keluarga asuh *Kirchoff* dan *Satyaki*, terkhusus keluarga asuh *Segaris*:

Letda (Sus) Jofim Yordaniel Napitupulu, S.Si., Letda (Lek) Putra Ramanda, S.T., SMDK (FIS) Novia Ramadhani, SMDK (IF) Rizqullah Arya Piliang, SK (FIS) Adzka Kamilah Tauhidah, SK (TSM) Fairuz Akbar Budiman, KK (FIS) Luthfiah Maharani, KK (FIS) Rivandio Sitanggang.

atas bimbingan, persaudaraan, dan semangat kekeluargaan yang menguatkan di setiap langkah.

13. Saudara-saudariku di *Physics Fam* (CO_2), sebanyak 24 orang yang menjadi bagian dari perjalanan intelektual dan spiritual selama masa studi ini.

14. Rekan-rekan seperjuangan dalam *Kapak Suci*:

Gustav, Anselmo, Mada, Ihsan, Ridho, Rivilyo, Putu, Habais, Hero, Farel, Reinhard, Abdu dan Dustin, Daniel, Bima, Rosihan.

15. Adik-adik asuh yang menjadi penerus perjuangan dan semangat keilmuan:

Danton SMDK (FIS) Farhan Syaifullah Sinaga, Danton SMDK (FIS) Nabilah Annisa Syabani, Danton SMDK (FIS) Aqeel Kayana Wiendra, SMDK (FIS) Annisa Salsabila, SMDK (KED) Ingwer, Kamal, Umar, SK (FIS) Nabila Zahira Nasution. SK (FIS) Rivaldo Bintang Sitorus, SK (IF) Rizky Ramadhan Nasution, KK (MAT) Shafara Kaylila Nareswari, KK (FIS) Ridha Putri Anandari Nur, dan KK (MAT) Gladies Nataly Simatupang.

16. Seluruh keluarga besar resimen kadet mahasiswa, rekan mahasiswa dan civitas akademika Universitas Pertahanan Republik Indonesia yang telah menjadi bagian dari perjalanan hidup dan akademik penulis.

Semoga karya ini dapat memberikan kontribusi ilmiah dan menjadi salah satu wujud nyata pengabdian kepada bangsa dan negara.

Bogor, 20 April 2024



Rahmatsyah Handayani Ramadhan Nasution

ABSTRAK

OPTIMASI SEL SURYA PEROVSKIT BERSTRUKTUR MESOSKOPIK MELALUI VARIASI LAPISAN PEMISAH DAN ELEKTRODA KARBON UNTUK KETAHANAN ENERGI

Indonesia memiliki posisi geografis yang strategis sebagai negara kepulauan, sehingga ketahanan energi menjadi aspek penting dalam mendukung pembangunan nasional. Pemanfaatan energi terbarukan, seperti sel surya, menjadi salah satu solusi yang potensial. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja sel surya perovskit berstruktur mesoskopik (mesoscopic perovskite solar cells/MPSCs) melalui variasi material pada lapisan pemisah dan elektroda karbon. Metode yang digunakan adalah Research and Development (R&D) dengan pendekatan eksperimental. Variasi yang diuji meliputi dua jenis lapisan pemisah, yaitu Zr-Nanoxide Z/SP dan Zr-Nanoxide ZT/SP, serta komposisi elektroda karbon dengan rasio carbon black (CB) dan grafit (GP) sebesar 1:1, 1:3, dan 1:6. Karakterisasi dilakukan melalui uji SEM, pengukuran ketebalan, dan four-point probe, sedangkan performa diuji menggunakan pengukuran arus-tegangan (J-V) dan efisiensi foton terhadap arus (IPCE). Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi ZT/SP menghasilkan nilai V_{oc} tertinggi sebesar 579,7 mV dan J_{sc} sebesar 9,55 mA/cm². Selain itu, rasio elektroda karbon CB:GP sebesar 1:3 memberikan efisiensi konversi daya (PCE) tertinggi sebesar 1,42%. Dengan demikian, kombinasi ZT/SP dan CB:GP (1:3) dinyatakan sebagai konfigurasi paling optimal untuk meningkatkan performa MPSCs dalam mendukung ketahanan energi.

Kata kunci: *Sel Surya Perovskit, Lapisan Separator, Elektroda Karbon, Efisiensi Konversi Daya (PCE), dan Struktur Mesoskopik*

ABSTRACT

OPTIMIZING MESOSCOPIC PEROVSKITE SOLAR CELLS VIA SEPARATOR AND CARBON ELECTRODE VARIATIONS FOR ENERGY SECURITY

Indonesia's strategic geographical position as an archipelagic nation highlights the urgency of strengthening national energy resilience to support sustainable development. Renewable energy sources, particularly solar cells, are considered promising alternatives to ensure energy sustainability. This research aims to optimize the performance of mesoscopic perovskite solar cells (MPSCs) by varying the materials used in the spacer layer and carbon electrode. The study was conducted using the Research and Development (R&D) method with an experimental approach. Two types of spacer layers, Zr-Nanoxide Z/SP and Zr-Nanoxide ZT/SP, were tested, along with carbon electrode compositions using carbon black (CB) and graphite (GP) in ratios of 1:1, 1:3, and 1:6. Characterization was carried out using Scanning Electron Microscopy (SEM), thickness measurements, and four-point probe testing, while device performance was evaluated through current-voltage (J–V) measurements and incident photon-to-current efficiency (IPCE) analysis. The results showed that the ZT/SP spacer layer yielded superior performance, with the highest open-circuit voltage (Voc) of 579.7 mV and short-circuit current density (Jsc) of 9.55 mA/cm². Moreover, the carbon electrode with a CB:GP ratio of 1:3 achieved the highest power conversion efficiency (PCE) of 1.42%. Therefore, the combination of the ZT/SP spacer layer and a 1:3 CB:GP carbon electrode is identified as the optimal configuration for enhancing MPSC performance and contributing to national energy resilience.

Keywords: Perovskite Solar Cells, Separator Layer, Carbon Electrode, Power Conversion Efficiency, and Mesoscale Structure.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	iv
LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI	ii
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iv
LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	iv
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	x
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian.....	6
1.4 Manfaat Penelitian.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Landasan Teori	8
2.1.1 Perovskit Solar Cell (PSC)	8
2.1.2 Mesoscopic Perovskit Solar Cells (MPSCs).....	10
2.1.3 Material Lapisan Pemisah	12
2.1.4 Material Karbon sebagai Elektroda Lawan	14

2.1.5	Karakterisasi Arus dan Tegangan (J-V)	15
2.1.6	Karakterisasi IPCE	18
2.1.7	Karakterisasi Four Point Probe (FPP)	19
2.1.8	Karakterisasi SEM (Scanning Electron Microscopy)	20
2.1.9	Karakterisasi XRD	22
2.2	Hasil Penelitian Terdahulu	24
2.3	Kerangka Berpikir	29
2.4	Hipotesis	32
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		35
3.1	Metode dan Desain Penelitian	33
3.2	Tempat dan Waktu Penelitian	34
3.3	Alat dan Bahan	36
3.4	Variabel Penelitian	37
3.5	Prosedur Penelitian	37
3.6	Metode Analisis	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		42
4.1	Hasil	43
4.1.1	Karakterisasi Ketebalan Lapisan Pemisah	43
4.1.2	Karakterisasi SEM Lapisan Pemisah	44
4.1.3	Karakterisasi XRD MSPSC variasi Lapisan Pemisah	47
4.1.4	Karakterisasi IPCE MSPSC variasi Lapisan Pemisah	50
4.1.5	Karakterisasi J-V MSPSC variasi Lapisan Pemisah	51
4.1.6	Karakterisasi Ketebalan Elektroda Karbon	55
4.1.7	Karakterisasi SEM Elektroda Karbon	57
4.1.8	Karakterisasi Four Point Probe	58

4.1.9	Karakterisasi IPCE MPSCs Variasi Karbon.....	60
4.1.10	Karakterisasi J-V MPSCs Variasi Karbon.....	62
4.2	Pembahasan	63
4.2.1	Analisis Karakterisasi Ketebalan Lapisan Pemisah	63
4.2.2	Analisis Karakterisasi SEM Lapisan Spacer	65
4.2.3	Analisis Karakterisasi XRD MSPSC variasi Lapisan Pemisah...	66
4.2.	Analisis Karakterisasi IPCE MSPSC variasi Lapisan Pemisah .	66
4.2.5	Analisis Karakterisasi Ketebalan Elektroda Karbon	70
4.2.6	Analisis Karakterisasi Ketebalan Elektroda Karbon	72
4.2.7	Analisis SEM Elektroda Karbon	74
4.2.8	Analisis Karakterisasi Four Point Probe pada Karbon.....	75
4.2.9	Analisis Karakterisasi IPCE MPSCs Variasi Karbon	77
4.2.10	Analisis Karakterisasi J-V MPSCs Variasi Karbon	78
BAB V KESIMPULAN		82
5.1	Kesimpulan.....	82
5.2	Saran	83
DAFTAR PUSTAKA.....		84
LAMPIRAN.....		93

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 1.1 (a) Konsumsi Energi Dunia berdasarkan Jenis Energinya dan (b) Persentase Kapasitas Listrik Terpasang Nasional per Jenis Pembangkitnya	3
Gambar 2.1 Teknologi Sel Surya (a) Generasi Pertama : Silicon Solar Cell, (b) Generasi Kedua : Cadmium Telluride Solar Cell, (c) Generasi Ketiga : DSSC, dan (d) Generasi Ketiga : PSC.....	9
Gambar 2.2 Struktur Perovskit (a) Tampak Samping, (b) Tampak Atas, (c) Tampak Miring dan Detail Struktur.....	10
Gambar 2.3 Struktur Sel Surya Perovskit (a) Mesoporus n-i-p, (b) <i>Planar</i> n-i-p, dan (c) <i>Planar</i> p-i-n.....	11
Gambar 2.4 (a) Struktur MPSCs Sebelum Dropcasting Perovskit dan (b) Struktur MPSCs Saat Cahaya Masuk, (c) Band Allignment dari MPSCs.....	12
Gambar 2.5 (a) Grafik J-V dan (b) Struktur MPSCs penelitian yng dilakukan Kaji.....	15
Gambar 2.6 Karakterisasi J-V.....	18
Gambar 2.7 Prinsip Kerja SEM.....	21
Gambar 2.8 Kerangka Berfikir.....	32
Gambar 3.1 Diagram Alir	41
Gambar 4.1 Sampel Spacer (a) Zr-Nanooxide Z/SP diatas FTO (b) Zr-Nanooxide ZT/SP diatas FTO	44
Gambar 4.2 Grafik Hasil Uji ketebalan menggunakan DektakXT pada sampel Zr-Nanooxide ZT/SP dan Zr-Nanooxide Z/SP.....	45
Gambar 4.3 Gambar SEM sampel (a) ZT/SP dan (b) Z/SP, serta persebaran ukuran partikel rata-rata (c) ZT/SP dan (d) Z/SP.....	48
Gambar 4.4 Karakterisasi XRD (a) MPSCs Variasi Zr-Nanooxide ZT/SP dan (b) MPSCs Variasi Zr-Nanooxide Z/SP	51
Gambar 4.5 Karakterisasi XRD (a) MPSCs Variasi Zr-Nanooxide ZT/SP dan (b) MPSCs Variasi Zr-Nanooxide Z/SP	52

Gambar 4.6 Grafik Karakteristik J-V MPSCs Variasi Lapisan Pemisah ZT/SP dan Z/SP	54
Gambar 4.7 Grafik Stabilitas Pengulangan Karakterisasi J-V MPSCs Variasi Lapisan Pemisah Variasi Zr-Nanooxide ZT/SP	55
Gambar 4.8 Sampel Elektroda Karbon (a) variasi CB : GP (1:1) (b) variasi CB : GP (1:3) (c) variasi CB : GP (1:6).....	56
Gambar 4.9 Grafik ketebalan lapisan karbon hasil pengukuran menggunakan thickness gauge pada sampel dengan variasi rasio CB : GP (1:1), variasi CB : GP (1:3), dan variasi CB : GP (1:6).....	58
Gambar 4.10 Hasil SEM 10.000x Perbesaran dengan (a) variasi CB : GP (1:1) (b) variasi CB : GP (1:3) (c) variasi CB : GP (1:6)	59
Gambar 4.11 Grafik resistivitas lapisan karbon dengan variasi CB : GP (1:1), variasi CB : GP (1:3), dan variasi CB : GP (1:6).....	61
Gambar 4.12 Grafik IPCE MPSCs dengan variasi rasio komposisi karbon (1:1, 1:3, dan 1:6)	62
Gambar 4.13 Grafik J-V MPSCs Variasi Karbon (1:1, 1:3, dan 1:6)	54

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu	24
Tabel 3.1 Perincian Waktu Penelitian	36
Tabel 4.1 Data Persebaran Distribusi Partikel MPSCs	47
Tabel 4.2 Data XRD MPSCs Variasi Lapisan Pemisah	50
Tabel 4.3 Hasil Nilai Karakterisasi J-V MPSCs Variasi Lapisan Pemisah..	54
Tabel 4.4 Data Stabilitas Pengulangan Karakterisasi J-V MPSCs Variasi Lapisan Pemisah Variasi Zr-Nanooxide ZT/SP	55
Tabel 4.5 Data Ketebalan Variasi Karbon	57
Tabel 4.6 Data Ketebalan Variasi Karbon	60
Tabel 4.7 Grafik J-V MPSCs Variasi Karbon (1:1, 1:3, dan 1:6)	64

