

**OPTIMASI EFISIENSI SEL SURYA PEROVSKITE BEBAS TIMBAL BERBASIS
MaSnI₃ SEBAGAI LAPISAN AKTIF MELALUI SIMULASI STRUKTUR
PERANGKAT LUNAK SCAPS**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh Gelar Sarjana Sains
Program Studi Fisika Kelompok Bidang Kajian Fisika Material



Disusun Oleh
Bintang Cantika Ayuni
2005413

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS PENDIDIKAN MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA
BANDUNG
2024**

**OPTIMASI EFISIENSI SEL SURYA PEROVSKITE BEBAS TIMBAL BERBASIS
MaSnI₃ SEBAGAI LAPISAN AKTIF MELALUI SIMULASI STRUKTUR
PERANGKAT LUNAK SCAPS**

Oleh
Bintang Cantika Ayuni
NIM 2005413

Sebuah skripsi yang diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Fisika pada Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

© Bintang Cantika Ayuni
Universitas Pendidikan Indonesia
2004

Hak Cipta dilindungi undang-undang.
Skripsi ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya atau sebagian,
dengan dicetak ulang, difoto kopi, atau cara lainnya tanpa ijin dari penulis.

LEMBAR PENGESAHAN

**OPTIMASI EFISIENSI SEL SURYA PEROVSKITE BEBAS TIMBAL BERBASIS
MaSnI₃ SEBAGAI LAPISAN AKTIF MELALUI SIMULASI STRUKTUR
PERANGKAT LUNAK SCAPS**

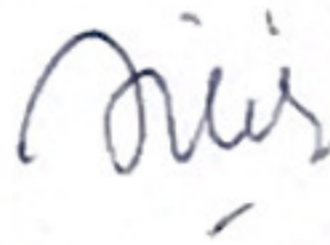
Disusun oleh:

Bintang Cantika Ayuni

NIM. 2005413

Disetujui dan disahkan oleh:

Pembimbing I



Prof. Dr. Lilik Hasanah, M.Si.
NIP. 197706162001122002

Pembimbing II



Roer Eka Pawinanto, S.Pd., M.Sc., Ph.D.
NIP. 920200419881019101

Mengetahui

Ketua Program Studi Fisika



Prof. Dr. Endi Suhendi, M.Si.
NIP. 197905012003121001

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa tugas akhir dengan judul “Optimasi Efisiensi Sel Surya Perovskite Bebas Timbal Berbasis MaSnI_3 Sebagai Lapisan Aktif Melalui Simulasi Struktur Perangkat Lunak SCAPS” beserta seluruh isinya merupakan benar karya saya sendiri. Saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara yang tidak sesuai etika dan aturan keilmuan. Atas pernyataan ini saya siap menanggung sanksi apabila dikemudian hari ditemukan adanya penjiplakan dan pengutipan yang tidak sesuai dengan etika dan aturan keilmuan.

Bandung, Februari 2024

Bintang Cantika Ayuni
NIM. 2005413

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil ‘alamin, segala puji bagi Allah SWT tuhan semesta alam dan kesempurnaan hanya milik Allah semata serta shalawat dan salam tercurah pada Nabi Muhammad SAW. Puji dan syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunianya kepada saya sehingga dapat menyelesaikan skripsi saya yang berjudul “Optimasi Efisiensi Sel Surya Perovskite Bebas Timbal Berbasis MaSnI_3 Sebagai Lapisan Aktif Melalui Simulasi Struktur Perangkat Lunak SCAPS” .

Selama penulisan skripsi ini, telah banyak dilalui tantangan dan rintangan namun semua itu berhasil dilewati karena rahmat Allah dan dukungan berbagai pihak. Skripsi ini penulis persembahkan kepada kedua orang tua penulis, (Alm) Deni Nugraha dan Yuni Rahmawaty yang telah mendukung dan selalu mendoakan kepada penulis. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Mamah Yuni sebagai orang tua penulis yang selalu memberikan doa dan dukungan kepada penulis.
2. Prof. Dr. Endi Suhendi, M.Si., selaku Ketua Program Studi Fisika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia.
3. Prof. Dr. Lilik Hasanah, M.Si., selaku pembimbing akademik dan Pembimbing I yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa dan telah meluangkan waktunya untuk membimbing dalam penyelesaian penulisan skripsi.
4. Roer Eka Pawinanto, M.Sc., Ph.D. selaku pembimbing penelitian dan pembimbing II atas waktu, tenaga, dan pikiran dalam membimbing penulis untuk penelitian dan skripsi.
5. Chandra Wulandari, M.T., yang telah menginisiasi untuk bergabung dalam tim penelitian hingga dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini.
6. Yuni Rahmawati selaku teman penelitian yang selalu memberikan semangat, dukungan dan bantuan selama penelitian dan penulisan skripsi ini.
7. *Estetpeez2000* selaku teman seperjuangan MSIB Batch 5 untuk *support system* tumbuh dan berkembang selama penulisan skripsi ini.

8. Keluarga besar Fisika C 2020 selaku teman seperjuangan masa perkuliahan penulis.

Serta semua pihak yang tidak dapat dituliskan satu persatu yang telah membantu dan memberikan dukungannya pada penulis dalam penyelesaian skripsi ini. penulis mengetahui dan menyadari bahwa skripsi ini masih terdapat kesalahan dan jauh dari kata sempurna. Dengan demikian, kritik dan saran yang membangun senantiasa dinantikan untuk pertanggungjawaban laporan yang baik dan benar.

Bandung, 2024

Penulis

ABSTRAK

Material perovskite terus menarik minat yang signifikan dalam bidang aplikasi sel surya karena kinerjanya yang mengesankan dan menjanjikan. Namun sayangnya, penggunaan timbal (Pb) pada bahan dasar sel surya perovskite menimbulkan masalah lingkungan dan kesehatan manusia. Sehingga diperlukan bahan pengganti timbal (Pb) dalam pengembangan sel surya yang ramah lingkungan dengan mempertimbangkan keefektifannya. Pengembangan sel surya bebas timbal masih dipandang sebelah mata karena nilai efisiensi yang ditunjukkan masih rendah. Oleh karena itu, diperlukan optimasi mengenai sel surya bebas timbal untuk meningkatkan efisiensi kinerja sel surya. Perovskite bebas timbal yang dikenal sebagai metilamonium timah iodida (MaSnI_3) dianggap sebagai sel surya berbasis timbal halida alternatif, terutama karena sifatnya tidak beracun, stabil, dan menunjukkan efisiensi yang menjanjikan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan alat *Solar Cell Capacitance Simulator* (SCAPS-1D), dengan menggunakan spektrum AM 1,5 G. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengoptimalkan struktur semua parameter perangkat untuk mencapai efisiensi konversi daya (PCE) yang tinggi. Ketebalan lapisan absorber, ketebalan lapisan transportasi elektron, ketebalan lapisan transportasi lubang, energi afinitas elektron ETL, energi afinitas elektron HTL, temperatur kerja operasi telah di variasikan. Hasil penelitian menunjukkan superioritas kinerja terdapat pada struktur Glass/ TiO_2 (5 nm) / MaSnI_3 (800 nm) / CBTS (1000 nm) / Au dengan nilai PCE 27,70%, J_{sc} 34,11 mA/cm², V_{oc} 0,97 V, dan FF 83,09% pada temperatur kerja 280 K. Selain itu, penelitian ini dapat menjadi referensi fabrikasi model sel surya perovskite bebas timbal.

Kata kunci - Perovskite Bebas Timbal, MaSnI_3 , CBTS, SCAPS 1D

ABSTRACT

Perovskite materials continue to attract significant interest in the field of solar cell applications due to their impressive and promising performance. Unfortunately, the use of lead (Pb) in Perovskite solar cell base material raises environmental and human health concerns. Thus, lead (Pb) replacement materials are needed in the development of environmentally friendly solar cells by considering their effectiveness. The development of lead-free solar cells is still underestimated because the efficiency value shown is still low. Therefore, optimization regarding lead-free solar cells is needed to increase the efficiency of solar cell performance. Lead-free perovskite known as methylammonium tin iodide (MaSnI_3) is considered as an alternative lead halide-based solar cell, mainly because it is non-toxic, stable, and shows promising efficiency. Simulations were performed using the Solar Cell Capacitance Simulator (SCAPS-1D) tool, using a 1.5 G AM spectrum. The main objective of this study was to optimize the structure of all device parameters to achieve high power conversion efficiency (PCE). The absorber layer thickness, electron transport layer thickness, hole transport layer thickness, ETL electron affinity energy, HTL electron affinity energy, operating working temperature have been varied. The results show that superior performance is found in the Glass/ TiO_2 (5 nm)/ MaSnI_3 (800 nm)/CBTS (1000 nm)/Au structure with PCE values of 27.70%, J_{sc} of 34.11 mA/cm², V_{oc} of 0.97 V, and FF of 83.09% at a working temperature of 280 K. In addition, this research can be a reference for the fabrication of lead-free perovskite solar cell models.

Keywords — Lead-Free Perovskite, MaSnI_3 , SCAPS 1D

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	v
DAFTAR ISI	6
DAFTAR GAMBAR	8
DAFTAR TABEL	9
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Manfaat Penelitian.....	6
1.5 Sistematika Penulisan.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Sel Surya.....	7
2.1.1 Prinsip Kerja Sel Surya	8
2.1.2 Parameter Pengukuran Sel Surya	9
2.1.3 Perkembangan Sel Surya.....	11
2.1.4 Sel Surya Perovskite.....	11
2.2 Sel Surya Perovskite Bebas Timbal	12
2.3 <i>Solar Cell Capacitance Simulator</i>	14
BAB III	16
METODOLOGI PENELITIAN	16
3.1 Metode Transfer Matrix Method (TMM).....	16
3.2 Persamaan Kontinuitas dan Diferensial Poisson	18
3.3 Desain dan Simulasi	20
3.4 Alur Penelitian.....	21
BAB IV	22
4.1 Efek Ketebalan Lapisan Absorber pada Sel Surya Bebas Timbal berbasis MaSnI_3 Terhadap Efisiensi Kinerja Sel Surya.....	22
4.2 Efek Ketebalan Lapisan Transportasi Muatan pada Sel Surya Bebas Timbal berbasis MaSnI_3 Terhadap Efisiensi Kinerja Sel Surya.....	25
4.2.1 Ketebalan Lapisan Transportasi Elektron.....	25
4.2.2 Ketebalan Lapisan Transportasi <i>Hole</i>	27
(a)	28
4.3 Efek Afinitas Elektron pada Lapisan Transportasi Muatan pada Sel Surya Bebas Timbal berbasis MaSnI_3 Terhadap Efisiensi Kinerja Sel Surya.....	30
4.3.1 Afinitas Elektron pada Lapisan Transportasi Elektron.....	31

4.3.2 Afinitas Elektron Lapisan Transportasi <i>Hole</i>	32
4.4 Efek Operasi Temperatur pada Sel Surya Bebas Timbal berbasis MaSnI_3 Terhadap Efisiensi Kinerja Sel Surya.....	33
BAB V	36
PENUTUP	36
5.1 Kesimpulan.....	36
5.2 Saran.....	37
DAFTAR PUSTAKA	39
LAMPIRAN	43

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Prinsip Kerja Sel Surya (Dye dkk., 2016)	9
Gambar 2. 2 Struktur Kristal Material Perovskite (Green dkk., 2014)	12
Gambar 2. 3 Tampilan SCAPS 1D	15
Gambar 3. 1 Prosedur simulasi langkah demi langkah untuk program SCAPS.....	19
Gambar 3. 2 Struktur sel surya Perovskite bebas timbal berbasis MaSnI_3	20
Gambar 3. 3 Diagram Alir Penelitian sel surya Perovskite bebas timbal berbasis MaSnI_3 ..	21
Gambar 4. 1 (a) Desain Struktur Sel Surya dengan memvariasikan ketebalan absorber dan menjaga konstan nilai ketebalan ETL, HTL, dan ITO, Efek variasi ketebalan absorber dan menjaga konstan ketebalan ETL, HTL, dan ITO pada (b) V_{oc} & J_{sc} ; (c) PCE & FF	22
Gambar 4.2 1 (a). Desain Struktur Sel Surya dengan Variasi Ketebalan ETL dan menjaga konstan nilai ketebalan absorber, HTL, dan ITO ; Efek Variasi Ketebalan ETL dan menjaga konstan nilai ketebalan absorber, HTL, dan ITO (b) V_{oc} & J_{sc} ; (c) PCE & FF	26
Gambar 4.2 2 (a). Desain Struktur Sel Surya dengan Variasi Ketebalan HTL dan menjaga konstan nilai ketebalan absorber, ETL, dan ITO ; Efek Variasi Ketebalan HTL dan menjaga konstan nilai ketebalan absorber, ETL, dan ITO (b) V_{oc} & J_{sc} ; (c) PCE & FF	28
Gambar 4.3 1 Efek variasi Afinitas Elektron pada Lapisan Transportasi Elektron (a) V_{oc} & J_{sc} ; (b) PCE & FF	31
Gambar 4.3 2 Efek variasi Afinitas Elektron pada Lapisan Transportasi Hole (a) V_{oc} & J_{sc} ; (b) PCE & FF	32
Gambar 4. 4 (a).Efek Variasi Temperature; (b) V_{oc} & J_{sc} ; (c) PCE & FF	34

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Kinerja sel surya dengan variasi ketebalan lapisan absorber MaSnI_3	24
Tabel 4.2 1 Kinerja sel surya dengan variasi ketebalan lapisan transportasi elektron	27
Tabel 4.2 2 Kinerja sel surya dengan variasi ketebalan lapisan transportasi hole (lubang) ..	29
Tabel 4.3 1 Kinerja Sel Surya Efek variasi Afinitas Elektron pada lapisan transportasi elektron.....	31
Tabel 4.3 2 Kinerja Sel Surya Efek variasi Afinitas Elektron pada lapisan transportasi hole (lubang).....	32
Tabel 4. 4 Kinerja sel surya dengan variasi temperatur.....	34

DAFTAR PUSTAKA

Abuhelaiqa, M., Paek, S., Lee, Y., Cho, K. T., Heo, S., Oveisi, E., & Nazeeruddin, M. K. (2019). Stable perovskite solar cells using tin acetylacetonate based electron transporting layers. *Energy & Environmental Science*, *12*(6), 1910-1917. <https://doi.org/10.1039/c9ee00453j>.

Basyoni, M. S. S., Salah, M. M., Mousa, M., Shaker, A., Zekry, A., Abouelatta, M., & Gontrand, C. (2021). On the investigation of interface defects of solar cells: lead-based vs lead-free perovskite. *IEEE Access*, *9*, 130221-130232.. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3114383>.

Cao, J., & Yan, F. (2021). Recent progress in tin-based perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*, *14*(3), 1286-1325. <https://doi.org/10.1039/d0ee04007j>.

Devi, C., & Mehra, R. (2019). Device simulation of lead-free MASnI₃ solar cell with CuSbS₂ (copper antimony sulfide). *Journal of materials science*, *54*, 5615-5624. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-03265-y>.

Garain, R., Basak, A., & Singh, U. P. (2021). Study of thickness and temperature dependence on the performance of SnS based solar cell by SCAPS-1D. *Materials Today: Proceedings*, *39*, 1833-1837. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.185>.

Haidari, G. (2019). Comparative 1D optoelectrical simulation of the perovskite solar cell. *AIP Advances*, *9*(8), 085028. <https://doi.org/10.1063/1.5110495>.

Hasanah, L., Ashidiq, A., Pawinanto, R. E., Mulyanti, B., Wulandari, C., Wiendartun, & Md. Zain, A. R. (2021). Dimensional optimization of TiO₂ nanodisk photonic crystals on lead iodide (MAPbI₃) perovskite solar cells by using FDTD simulations. *Applied Sciences*, *12*(1), 351. <https://doi.org/10.3390/app12010351>.

Heriche, H., Rouabah, Z., & Bouarissa, N. (2017). New ultra thin CIGS structure solar cells using SCAPS simulation program. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*(15), 9524-9532. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.099>.

Hossain, M. K., Toki, G. I., Kuddus, A., Rubel, M. H. K., Hossain, M. M., Bencherif, H., & Mushtaq, M. (2023). An extensive study on multiple ETL and HTL layers to design and simulation of high-performance lead-free CsSnCl₃-based perovskite solar cells. *Scientific Reports*, *13*(1), 2521. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28506-2>.

Jacobs, R., Luo, G., & Morgan, D. (2019). Materials discovery of stable and nontoxic halide perovskite materials for high-efficiency solar cells. *Advanced Functional Materials*, *29*(23), 1804354. <https://doi.org/10.1002/adfm.201804354>.

Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the american chemical society*, *131*(17), 6050-6051. <https://doi.org/10.1021/ja809598r>.

Kumar, M., Raj, A., Kumar, A., & Anshul, A. (2020). An optimized lead-free formamidinium Sn-based perovskite solar cell design for high power conversion efficiency by SCAPS simulation. *Optical Materials*, *108*, 110213. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110213>.

Lazemi, M., Asgharizadeh, S., & Bellucci, S. (2018). A computational approach to interface engineering of lead-free CH₃NH₃SnI₃ highly-efficient perovskite solar cells. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *20*(40), 25683-25692. <https://doi.org/10.1039/c8cp03660h>.

Lee, S., & Kang, D. (2017). Highly efficient and stable SN-Rich Perovskite solar cells by introducing bromine. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *9*(27), 22432–22439. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b04011>.

Liu, C., Tu, J., Hu, X., Huang, Z., Meng, X., Yang, J., ... & Chen, Y. (2019). Enhanced hole transportation for inverted tin-based perovskite solar cells with high performance and stability. *Advanced Functional Materials*, *29*(18), 1808059. <https://doi.org/10.1002/adfm.201808059>.

Mulyanti, B., Wulandari, C., Hasanah, L., Pawinanto, R. E., & Hamidah, I. (2022). Absorption Performance of Doped TiO₂-Based Perovskite Solar Cell using FDTD Simulation. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2022, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2022/9299279>.

Qiu, T., Akinoglu, E. M., Luo, B., Konarova, M., Yun, J. H., Gentle, I. R., & Wang, L. (2022). Nanosphere lithography: A versatile approach to develop transparent conductive films for optoelectronic applications. *Advanced Materials*, 34(19), 2103842. <https://doi.org/10.1002/adma.202103842>.

Rafieipour, P., Mohandes, A., Moaddeli, M., & Kanani, M. (2023). Integrating transfer matrix method into SCAPS-1D for addressing optical losses and per-layer optical properties in perovskite/Silicon tandem solar cells. *arXiv preprint arXiv:2308.01132*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2308.01132>.

Sabbah, H., Arayro, J., & Mezher, R. (2022). Numerical simulation and optimization of highly stable and efficient Lead-Free Perovskite FA1–XCSXSNI₃-Based solar cells using SCAPS. *Materials*, 15(14), 4761. <https://doi.org/10.3390/ma15144761>.

Sarkar, D., Arslanoğlu, H., Mottakin, M., Selvanathan, V., Sobayel, K., Islam, M. A., Muhammad, G., Aminuzzaman, M., Shahiduzzaman, M., Sopian, K., & Akhtaruzzaman, M. (2022). Lead free efficient Perovskite solar cell device Optimization and defect study using Mg doped CuCrO₂ as HTL and WO₃ as ETL. *Solar Energy*, 243, 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.07.013>.

Sel surya Perovskite (PSC) : sel surya organik masa depan. (2018, May 5). Diction Community. <https://www.diction.id/t/sel-surya-Perovskite-psc-sel-surya-organik-masa-depan/85535>.

Singh, A. K., Srivastava, S., Mahapatra, A., Baral, J. K., & Pradhan, B. (2021). Performance optimization of lead free-MASnI₃ based solar cell with 27% efficiency by numerical simulation. *Optical Materials*, 117, 111193. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111193>.

Soesanti, I., & Syahputra, R. (2021). Analisis Kinerja Metode Fuzzy Teroptimasi PSO untuk Strategi Kendali MPPT pada Sistem Solar Photovoltaic. *Jurnal Teknik Elektro*, 13(2), 98–108. <https://doi.org/10.15294/jte.v13i2.33477>.

Srivastava, S., Singh, A. K., Kumar, P., & Pradhan, B. (2022). Comparative performance analysis of lead-free perovskites solar cells by numerical simulation. *Journal of Applied Physics*, 131(17). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-583148/v1>.

Sustainable Energy dan Upaya Ketahanan Energi Nasional | Portal Kementerian Luar Negeri Republik Indonesia. (n.d.). https://kemlu.go.id/portal/id/read/171/halaman_list_lainnya/sustainable-energy-dan-upaya-ketahanan-energi-nasional.

Waleed, A., Tavakoli, M. M., Gu, L., Wang, Z., Zhang, D., Manikandan, A., Zhang, Q., Zhang, R., Chueh, Y., & Fan, Z. (2016). Lead-Free Perovskite Nanowire Array Photodetectors with Drastically Improved Stability in Nanoengineering Templates. *Nano Letters*, 17(1), 523–530. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b04587>.

Xu, K. (2020). Development of tin-based Perovskite materials for solar cell applications: A minireview. *Instrumentation Science & Technology*, 49(1), 91–105. <https://doi.org/10.1080/10739149.2020.1785891>.

Zekry, A., Shaker, A., & Salem, M. (2018). Solar cells and arrays: principles, analysis, and design. In *Advances in renewable energies and power technologies* (pp. 3-56). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812959-3.00001-0>.

Zhang, L., Sun, C., He, T., Jiang, Y., Wei, J., Huang, Y., & Yuan, M. (2021). High-performance quasi-2D perovskite light-emitting diodes: from materials to devices. *Light: Science & Applications*, 10(1), 61. <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00501-0>.

Zhang, Q., Hao, F., Li, J., Zhou, Y., Wei, Y., & Lin, H. (2018). Perovskite solar cells: must lead be replaced – and can it be done? *Science and Technology of Advanced Materials*, 19(1), 425–442. <https://doi.org/10.1080/14686996.2018.146017>