

Peningkatan Efisiensi Solar Sel, Melalui Pelapisan Komposit Hydrogel-Nano Silika Amorph Pada Permukaan Solar Panel

Veriah Hadi¹, B, Soegijono², HA Notonegoro

^{1,2}Departemen Fisika, Fakultas Sains Terapan dan Teknologi, ISTN, Jakarta,

³H. A. Notonegoro

³Department of Mechanical Engineering - Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon, 42435, Indonesia
Jl. Moh. Kahfi II, Jagakarsa, Jakarta Selatan, Indonesia 12640

e-mail: *¹ veriahadi@gmail.com

Abstrak

Sel surya adalah perangkat yang digunakan untuk mengubah energi cahaya menjadi energi listrik. Cahaya yang diserap oleh sel surya tergantung pada sifat permukaan panel surya. Cahaya yang jatuh ke panel surya diserap dan diubah menjadi energi listrik oleh lapisan panel surya yang menutupi sel surya. Cahaya yang datang sebagian ditransmisikan, sebagian dipantulkan, dan sebagian diserap oleh kaca pelapis menjadi panas. Untuk alasan ini, permukaan panel surya dapat dibuat sedemikian rupa sehingga cahaya yang dipantulkan minimal. Masalah efisiensi ini menjadi salah satu isu yang terus diteliti di seluruh dunia. Efisiensi penyerapan cahaya oleh pelindung sel surya dapat ditingkatkan melalui rekayasa permukaan yang menyerupai struktur mata ngengat. Bahan komposit hidrogel-nano-silika digunakan untuk melapisi permukaan sel surya. Untuk melihat pengaruh lapisan komposit, tegangan yang dihasilkan oleh sel surya sebelum dan sesudah pelapisan, serta fungsi jarak dan sudut radiasi, diukur. Sampel yang diuji adalah 3 jenis komposisi komposit. Hasilnya menunjukkan efek lapisan komposit pada rentang sudut tertentu, untuk peningkatan efisiensi.

Kata kunci: Sel-surya, Hydrogel, nanosilika, pelapisan

Abstract

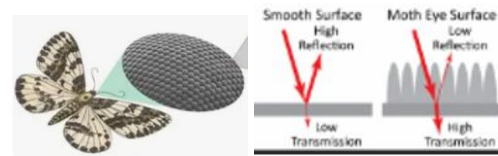
Solar cells are devices used to convert light energy into electrical energy. The light absorbed by the solar cell depends on the incidence of light on the surface of the solar panel. The light that falls onto the solar panel is absorbed and converted into electrical energy by the layer of the solar panel that covers the solar cell. The light that comes is partly transmitted, partly reflected, and partly absorbed by the coating glass into heat. For this reason, the surface of the solar panel can be made in such a way that the light reflected is minimal. This efficiency problem is one of the issues that continues to be researched worldwide. The efficiency of light absorption by solar cell shields can be improved through surface engineering that resembles the moth's eye structure. A composite material of hydrogel-nano-silica was used to coat the surface of the solar cell. To see the influence of the composite layer, the voltage generated by the solar cell before and after coating, as well as the distance and radiation angle function, were measured. The samples tested were 3 types of composite compositions. The results show the effect of the composite coating on a certain angle range, and the efficiency is increased

Keywords: Solar-cell, Hydrogel, nanosilica, coating

1. Pendahuluan

Solar sel merupakan peralatan yang di gunakan untuk menngkonversi energe matahari menjadi energi listrik. Sistim ini menjadi penting karena dapat mengurangi penggunaan minyak bumi sebagai bahan energi dan merupakan sumber energi baru yang bersih. Konversi energi matahari ke energi listrik belum bisa mencapai efesiensi 100%. Sejak solar sel , para peneliti berusaha untuk menaikan efesiensi. Faktor faktor yang mempengaruhi efesiensi antara lain, jenis bahan solar selnya, Proses manufaktur solar selnya, jenis jenis material pendukungnya, teknologi pelapis solar sel untuk mengurangi cahaya yang di refleksikan oleh permukaan sel surya. Pendekatan biomimetik untuk desain sel surya telah banyak mendapatkan perhatian yang cukup signifikan dalam beberapa tahun terakhir, dan dengan struktur nano mata ngengat, gambar 1, muncul sebagai salah satu teknologi antireflektif yang paling menjanjikan. Mata ngengat, yang memungkinkan mereka untuk melihat dengan baik di malam hari, juga dilengkapi dengan lapisan anti-air dan anti-reflektif yang membuat mata mereka menjadi salah satu permukaan yang paling tidak reflektif di alam (Ivan Navaro, et al 2018). Adaptasi alami ini telah menginspirasi para peneliti untuk mengembangkan lapisan antireflektif inovatif yang secara signifikan meningkatkan efisiensi sel surya dengan meminimalkan kerugian optic.

Struktur mata ngengat terdiri dari susunan yang teratur dari struktur nano yang berukuran sekitar Panjang gelombang sinar tampak, yang dapat menciptakan material dengan indeks bias yang gradasi antara udara dan bahan tersebut (Gambar 1). Mata ngengat terdiri dari bulatan tertentu seperti struktur nano yang memastikan bahwa indeks bias berubah secara bertahap dari udara ke bahan substrat, sehingga dapat mengurangi pantulan (K Uma, et al, 2017). Transisi bertahap ini secara efektif menghilangkan antarmuka secara tiba-tiba yang biasanya menyebabkan kehilangan refleksi yang cukup signifikan pada sel surya yang konvensional.



Gambar 1.

Struktur Mata ngengat (Ivan Navaro, et al 2018)

Kunci efektivitas mata ngengat terletak pada karakteristik dimensi struktur nano ini. Struktur harus lebih kecil dari panjang gelombang cahaya datang agar dapat berfungsi sebagai permukaan antireflektif yang efektif, biasanya menampilkan ketinggian dan periodisitas dalam kisaran 100-300 nanometer (Papatzacos, P et al, 2024).

Penelitian telah menunjukkan kinerja antireflektif yang luar biasa dari struktur yang terinspirasi oleh mata ngengat. Sifat antirefleksi yang sangat baik dari berbagai sudut datang cahaya ditunjukkan dengan pantulan rata-rata di bawah 4% pada sudut sekitar 50° (Sun, J et al, 1018). Hasil yang lebih mengesankan telah dicapai dalam implementasi tertentu, di mana reflektansi rata-rata sampel terstruktur sub-panjang gelombang AR ini cukup rendah hanya 1,21% dengan sudut jatuh tegak lurus permukaan solar sel (Xiaolei Luo et al, 2019).

Analisa komparatif mengungkapkan kinerja struktur mata ngengat unggul dibandingkan dengan pendekatan antireflektif yang konvensional. Dari panjang gelombang 400 hingga 1.000 nm, susunan yang terinspirasi mata ngengat ini hanya memantulkan 4,8% cahaya, dibandingkan dengan 8,7% yang dipantulkan oleh lensa mikro sederhana (Katherine-Bourzac, 2024). Ini sudah cukup mewakili pengurangan sekitar 45% dalam kehilangan refleksi di seluruh spektrum cahaya tampak.

Penerapan struktur nano mata ngengat pada sel surya telah menghasilkan peningkatan efisiensi yang signifikan. Bentuk Tekstur secara signifikan dapat meningkatkan penyerapan cahaya dan kinerja sel surya secara keseluruhan. (Science daily, 2016). Penelitian telah menunjukkan bahwa dengan mengets a tekstur skala nano yang menyerupai mata ngengat ke bahan silikon,

mereka dengan demikian dapat menciptakan permukaan anti-reflektif yang bekerja sebaik pelapis multi-layer film tipis yang canggih (Heroux, 2016).

Analisis kuantitatif menunjukkan peningkatan kinerja yang cukup substansial. Efisiensi sel surya yang menggunakan permukaan licin padat dan biomimetik, lebih tinggi daripada kaca bening biasa, hal ini terjadi karena efek antireflektif (Gyuhyeon Han et al, 2020). Dalam aplikasi optoelektronik, struktur serupa telah menunjukkan peningkatan yang lebih dramatis, dengan perangkat dalam optoelektronik, menunjukkan peningkatan yang luar biasa, lebih dari 2 kali (Song, Y. M., et al, 2014).

Salah satu keuntungan paling signifikan dari struktur mata ngengat adalah sifat broadband dan sifat antireflektif yang omnidirectionalnya. Film anti-reflektif konvensional meningkatkan efisiensi konversi sel surya. Namun, film semacam itu seringkali berpitak spektrum yang sempit dan bahkan dapat meningkatkan pantulan untuk panjang gelombang di luar bandwidth operasinya (Ansys Optics, 2017).. Struktur mata ngengat mengatasi keterbatasan ini dengan memberikan kinerja yang konsisten di rentang spektral yang luas dan berbagai sudut datang.

Struktur mata ngengat sangat berguna untuk mengurangi pantulan dari dan meningkatkan transmisi antar bahan dengan beda indeks bias yang besar (Synopsys., 2022).. Karakteristik ini membuatnya sangat berguna untuk aplikasi fotovoltaik di mana mempertahankan transmisi cahaya yang tinggi melintasi spektrum matahari sangat penting untuk kinerja optimal

Beberapa metode manufaktur telah dikembangkan untuk membuat struktur nano mata ngengat pada permukaan sel surya. *Hot embossing* struktur nano seperti mata ngengat pada kaca permukaan transparan dengan peningkatan antirefleksi merupakan salah satu metode fabrikasi yang cukup menjanjikan (Ceramics International. 2021). Selain itu, struktur nano seperti mata ngengat dibuat dengan proses pencetakan ke substrat

fleksibel dengan film lapisan tipis yang keras (Chaya B et al, 2014).

Penelitian telah mengidentifikasi parameter pemrosesan yang optimal untuk mencapai kinerja yang unggul. Gaya pencetakan 350 N dan viskositas resin 100 cps ditemukan sebagai parameter yang terbaik (Katherine-Bourzac,, 2024), menyoroti pentingnya kontrol proses yang tepat dalam mencapai hasil yang optimal.

Kombinasi material yang tepat, telah dikembangkan untuk meningkatkan kinerja mata ngengat. Struktur Nano Antireflektif Broadband yang dikembangkan dengan Melapisi Film MgF2 yang mempunyai Indeks refraksi Rendah ke Pola Nano Mata Ngengat SiO₂ menunjukkan potensi pendekatan hibrida yang menggabungkan struktur biomimetik dengan film tipis (Gang Yeol Yoo et al, 2020).

Selain mempunyai sifat antireflektif, model struktur mata ngengat ini menawarkan keunggulan fungsional tambahan. Dibandingkan dengan lapisan resin tanpa pola yang dapat self recovery dengan ultraviolet, struktur mata ngengat dengan sub-panjang gelombang yang dihasilkan juga memperlihatkan peningkatan hidrofobisitas (Sun, J., et al, 2014).]. Karakteristik pembersihan sendiri ini sangat berharga untuk aplikasi panel surya, di mana debu dan kontaminasi dapat secara signifikan mengurangi kinerja dari waktu ke waktu.

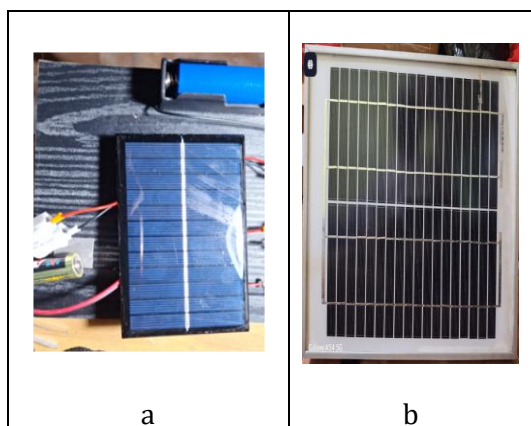
Ketahanan struktur mata ngengat berkontribusi besar pada penerapan praktisnya dalam instalasi sel surya. Tekstur berbentuk parabola ini menunjukkan pantulan 1,21% dalam kisaran cahaya tampak serta hidrofobisitas (Alejandra Jacobo-Martín et al, 2022). menunjukkan bahwa struktur tersebut dapat mempertahankan karakteristik kinerjanya dan sekaligus memberikan peningkatan ketahanan terhadap lingkungan.

Pada penelitian ini dilakukan pembuatan komposit film hydrogel yang diperkuat dengan nanosilika amorf yang berukuran 7 dan 14 nanometer diatas gelas panel surya.

2. Metode Penelitian

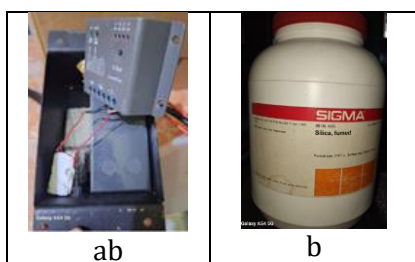
Material

Material yang digunakan adalah, lapisan hydrogel dan bubuk nano silika amorf dengan ukuran 7 nm dan 14 nm yang dibeli dari Aldrich. Solar panel yang digunakan, solar panel ukuran 5 cm x 10 cm dan solar panel ukuran 40 cm x 50 cm. Pada tahap awal penelitian ini digunakan solar panel yang 5 cm x 10 cm (gambar 2).



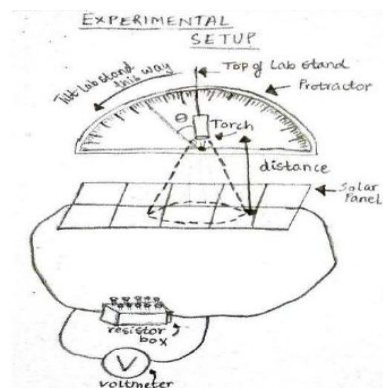
Gambar 2. Panel Solar sel (a dan b)

Pada paper ini, digunakan data data hasil pengukuran solar sel yang jenis 1, gambar 2 a Gambar 3 memperlihatkan Bateray management system yang digunakan dan nanosilika amorp dengan ukuran 7 nanometer



Gambar 3. Baterray Management System (BMS)
 (A) Dan Nano-Silika (B)

Deposisi silika amorp pada substrat dilakukan dengan menggunakan ultrasonic. Dimana bubuk diletakan di permukaan ultrasonic dan di deposisikan ke lapisan tipis hydrogel. Hydrogel merupakan material berbasis polimer 3 dimensi yang tersusun oleh senyawa hydrophilic



Gambar 4. Skematik Setup Percobaan Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan seperti diagram gambar 5. Diukur tegangan dan intensitas cahaya sebagai fungsi jarak dan sudut jatuh.

Lapisan termasuk film tebal (Thick Film), dengan ukuran diatas 20 mikron. Ketebalan lapisan diukur dengan menggunakan mikrometer digital.

3. Hasil dan Pembahasan

Morfologi dan Ketebalan

Hasil pelapisan permukaan panel surya menggunakan material komposit dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Morfologi permukaan panel surya sebelum (a) dan sesudah (b) dilapisi komposit hydrogel nanosilika

Ketebalan lapisan diperoleh dengan menghitung perbedaan tebal solar sel sebelum dan sesudah dilapisi dengan menggunakan mikrometer digital di titik tengah dan 3 titik di setiap tepinya, sehingga diperoleh 9 titik (Tabel 1).

Tabel 1. Tebal lapisan

Titik	1	2	3
Sisi Panjang	150µm	145µm	148µm
Tengah	150µm	155µm	150µm
Sisi lebar	145µm	145µm	145µm

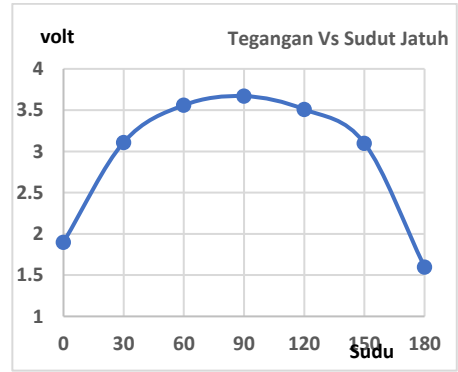
Ketebalan yang dihasilkan relative baik.

Pola tegangan terhadap sudut jatuh

Cahaya yang jatuh pada suatu permukaan solar sel akan menghasilkan beda potensial di panel solar sel tersebut, Nilai beda potensial tersebut bergantung pada jumlah dan pola penyusunan semikonduktor sebagai penyusun panel solar sel tersebut. Pada penelitian ini, akan dilihat atau diukur tegangan (volt) yang dihasilkan dan juga intensitas cahaya persatuan luas (lux).

Rekayasa dilakukan melalui pemberian lapisan komposit hydrogel dengan nanosilika amorf yang berukuran 7 nanometer dan menggunakan 2 macam komposisi nanosilika. Pengukuran tegangan dan lux cahaya di lakukan dengan fungsi jarak dan sudut jatuh.

Gambar 6 memperlihatkan pola tegangan panel solar sel sebagai fungsi sudut jatuh. Secara teori seharusnya pola nya harus simetri. Pola tidak simetri bisa diakibatkan ketidak pastian dalam pengukuran atau ketidak homogenan material permukaan panel solar sel.

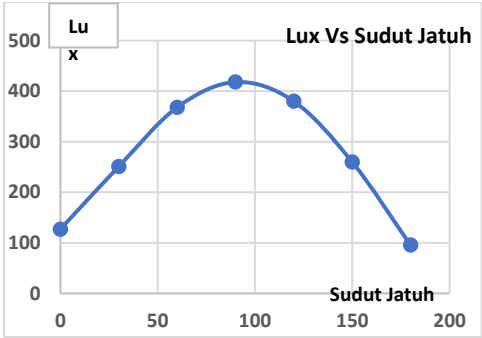


Gambar 6. Pola Tegangan Terhadap Sudut Jatuh

Ketergantungan tegangan terhadap sudut jatuh tidak linier. Ini menunjukkan pola absorpsi foton oleh solar sel yang dikonversi menjadi tegangan, memperlihatkan mekanisme yang bergantung pada morfologi permukaan panel sel surya atau jenis semikonduktor yang dipakai untuk panel Sel surya tersebut

Pola Lux terhadap sudut jatuh.

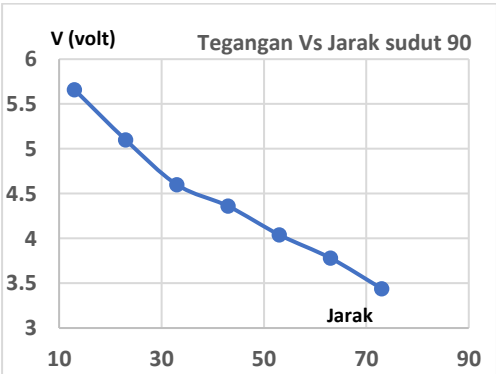
Pengukuran cahaya dengan luxmeter dilakukan diatas panel sel surya. Oleh karenanya pola lux terhadap sudut jatuh berbeda dengan pola tegangan terhadap sudut jatuh, Ini dapat di lihat pada gambar 5 dan gambar 7. Pola lux, tidak bergantung pada material panel sel surya maupun material permukaan sel surya. Tampak pola simetri yang eksponensial



Gambar 7. Pola Lux Terhadap Sudut Jatuh Pada Jarak 100 Cm

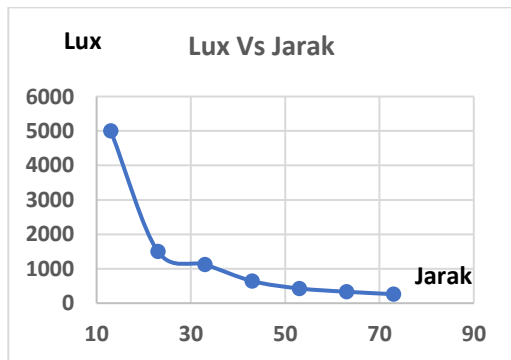
Pola tegangan terhadap jarak pada sudut tetap.

Gambar 7 memperlihatkan pola tegangan terhaap jarak pada sudut 90^o .



Gambar 8. Pola Tegangan Terhadap Jarak Pada Sudut Jatuh 90°

Gambar 8 memperlihatkan pola Lux terhadap jarak pada sudut jatuh 90°. Penurunan Lux .



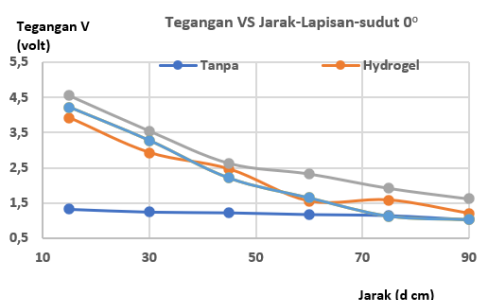
Gambar 9. Pola Lux Terhadap Jarak Pada Sudut Jatuh 90°

Penurunan flux cahaya yang menurun secara eksponensial dapat dimengerti karena penurunan fluks cahaya berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya.

Pola tegangan terhadap jarak dan sudut jatuh fungsi lapisan

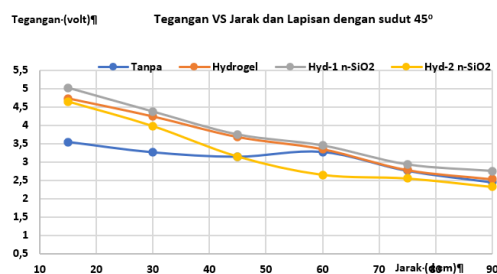
5 kurva Pola tegangan dan jarak sebagai fungsi lapisan untuk berbagai sudut jatuh. Gambar 10 menunjukkan pola tegangan terhadap jarak untuk sudut jatuh 0° dengan berbagai lapisan.

Pola menunjukkan untuk jarak yang dekat, tegangan berada di atas tegangan tanpa lapisan. Ini menunjukkan bahwa pelapisan menghasilkan perbaikan atau kenaikan efektifitas penyerapan foton. Perilaku ini dapat dimengerti karena jumlah foton yang diterima luasan panel surya akan meningkat dengan turunnya jarak sumber sinar terhadap panel surya.



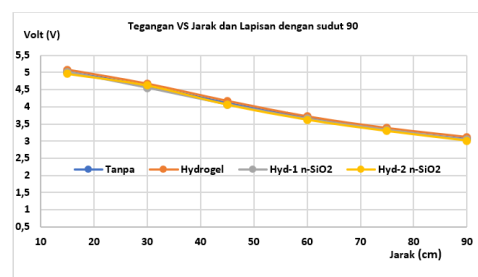
Gambar 10. Pola Tegangan Terhadap Jarak Dengan Sudut Jatuh 0°

Gambar 11 memperlihatkan pola tegangan sebagai fungsi jarak dengan sudut jatuh 45°



Gambar 11. Pola Tegangan Terhadap Jarak Dengan Sudut Jatuh 45°

Pada jarak yang sama dan dengan kenaikan sudut jatuh, tegangan meningkat. Penambahan lapisan material hydrogel-nanosilika, dapat meningkatkan jumlah foton yang diabsorpsi.



Gambar 12. Pola Tegangan Terhadap Jarak Dengan Sudut Jatuh 90°

Gambar 12 memperlihatkan pola tegangan terhadap jarak dengan sudut datang 90°. Tampak jelas bahwa, apabila sinar jatuh tegak lurus bidang solar panel, perbedaan tegangan yang terjadi antara tanpa hydrogel dengan hydrogel yang diisi dengan nano silika amorf, bedanya sangat sedikit. Hal ini bisa difahami bahwa sinar yang di hamburkan oleh permukaan solar panel berbeda jika sudut jatuhnya berbeda dan mencapai optimum jika sudut jatuh tegak lurus panel surya.

Diskusi

Struktur mata ngengat dapat dianggap mewakili kemajuan yang signifikan, dalam mengatasi keterbatasan efisiensi fotovoltaiik. Dalam upaya berkelanjutan untuk membuat

tenaga surya lebih produktif dan terjangkau, salah satu rintangan terbesar meningkatkan batas efisiensi. Biasanya, sel surya tunggal dibatasi pada efisiensi, 3,7%, atau yang dikenal sebagai batas Shockley-Queisser (HeroX, 2020).

Kegunaan struktur mata ngengat meluas ke teknologi fotovoltaik yang sedang berkembang saat ini. Struktur nano seperti mata ngengat yang terinspirasi secara bio, bisa sebagai solusi untuk mengatasi keterbatasan penyerapan energi matahari yang rendah oleh film tipis sel surya (Xiangqian Shen et al, 2021)..

Beberapa peneliti juga sudah membuktikan bahwa Penggunaan Hydrogel dapat meningkatkan efisiensi panel surya (Xueqing Yang et al, 2025). Hydrogel natural juga membuktikan peningkatan efisiensi panel sel surya (Yang Ding et al, 2026).

Gambar 10, Gambar 11, dan Gambar 12, menunjukkan bahwa untuk solar panel sebelum dan sesudah dilapisi, pada sudut jatuh yang kecil, yaitu dibawah 40°, tegangan yang di peroleh meningkat secara signifikan. Ini menunjukkan peningkat efisiensi sekitar 40%, yang merupakan peningkatan yang cukup signifikan.

4. Kesimpulan

Struktur nano mata ngengat mewakili pergeseran paradigma dalam teknologi pelapisan antireflektif untuk sel surya. Melalui prinsip desain biomimetik, struktur ini mencapai kinerja antireflektif yang unggul dibandingkan dengan pelapis konvensional sekaligus menawarkan manfaat tambahan seperti sifat pembersihan sendiri dan fungsionalitas omnidirectional. Kemampuan yang ditunjukkan untuk mengurangi kehilangan pantulan serendah 1,21% di seluruh spektrum yang terlihat, dikombinasikan dengan skalabilitas manufaktur, memposisikan teknologi moth-eye sebagai kemajuan penting untuk sistem fotovoltaik generasi berikutnya. Penelitian dan pengembangan berkelanjutan dalam teknik fabrikasi dan pengoptimalan material kemungkinan akan lebih meningkatkan

kelayakan komersial dan kinerja pendekatan biomimetik ini untuk peningkatan efisiensi sel surya.

Daftar Pustaka

- Alejandra Jacobo-Martín, et al., 2022, Resilient moth-eye nanoimprinted antireflective and self-cleaning TiO₂ sputter-coated PMMA films, *Applied Surface Science*, Volume 585,
- Ansys Optics. "Silicon solar cell with moth-eye anti-reflection coatings." Retrieved from <https://optics.ansys.com/hc/en-us/articles/360042646833-Silicon-solar-cell-with-moth-eye-anti-reflection-coatings>
- Ceramics International. (2021). "Hot embossing of moth eye-like nanostructure array on transparent glass with enhanced antireflection for solar cells." *Ceramics International*, 47(12), 17380-17387.
- Chaya B. Muniraju Venkatesha Muniswamy K. Yellareswara Rao Narayan Krishnaswamy . (2018). "Modeling of enhancement effect of moth-eye antireflective coating on organic light-emitting diode." *Journal of Nanophotonics*, Vol. 12(4),
- Gyuhyeon Han, et al, . (2020). "Moth-Eye Mimicking Solid Slippery Glass Surface with Icephobicity, Transparency, and Self-Healing." *ACS Applied Materials & Interfaces*, 32(35), 39501-39511.
- Gang Yeol Yoo, et al,, (2020). "Newly Developed Broadband Antireflective Nanostructures by Coating a Low-Index MgF₂ Film onto a SiO₂ Moth-Eye Nanopattern." *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(7), 8356-8364.
- HeroX. "Moth Eyes Inspire New Means of Boosting Solar Efficiency." Retrieved from <https://www.herox.com/blog/178-moth-eyes-inspire-new-means-of-boosting-solar-effi>

- Iván Navarro-Baena, et al., (2018).** Single-imprint moth-eye anti-reflective and self-cleaning film with enhanced resistance, Nanoscale, Royal Society of Chemistry, DOI: 10.1039/c8nr02386g
- K. Uma Rao et al, (2017).** "Efficiency Enhancement of the Solar Cells through Subwavelength Scaled Biomimiced Moth Eye Patterning using Lumerical Solutions." Materials today, *Proceding*. Vol 4, Issue 9, Pages 10407-10411
- Katherine-Bourzac (2024).** "Moths Inspire Antireflective Coating that Could Help Devices Capture Light." <https://www.scientificamerican.com/article/moths-inspire-antireflective-coating-that-could-help-devices-capture-light/>
- Papatzacos, P et al, . (2024).** Moth-eye anti-reflection structures in silicon for Long Wave IR applications. *Journal of Modern Optics*, 71(7-8), 205-212. <https://doi.org/10.1080/09500340.2024.2400197>
- Sun, J., Wang, X., Wu, J. et al., (2018).** Biomimetic Moth-eye Nanofabrication: Enhanced Antireflection with Superior Self-cleaning Characteristic. *Sci Rep* 8, 5438 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23771-y>
- ScienceDaily. Department of Energy, (2016).** "Artificial moth eyes enhance silicon solar cells." <https://www.sciencedaily.com/releases/2016/04/160415092550.htm>
- Song, Y. M., et al. (2014).** "Light Manipulation for Organic Optoelectronics Using Bio-inspired Moth's Eye Nanostructures." *Scientific Reports*, 4, 4040.
- Synopsys. (2022).** "Nanostructured Moth-Eye Anti-Reflective Coating." Retrieved from <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/product-applications/nanophotonics-nanostructures/rsoft-optimization-nanostructured-moth-eye.html>
- Xiaolei Luo, et al, 2019,** Antireflective and self-cleaning glass with robust moth-eye surface nanostructures for photovoltaic utilization, *Materials Research Bulletin*, Volume 109, Pages 183-189,
- Xiangqian Shen, et al, ,2021,** Improving thin film solar cells performance via designing moth-eye-like nanostructure arrays, *Results in Physics*, Volume 20, 103713, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103713>.
- Xueqing Yang, et al, , 2025** Enhancing year-round photovoltaic performance using the dual cooling and warming functions of hydrogels, *Volume 3, Issue 10*, 100843, October 17,
- Yang Ding, et al, , 2026.** Boosting photovoltaic efficiency via efficient passive cooling from all-natural hydrogels with robust interfacial adhesion, *Journal of Energy Chemistry*, Volume 114, , Pages 206-216, ISSN 2095-4956, <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2025.09.089>