

Pengaruh Ketebalan Lapisan Tipis ZnO terhadap Kinerja Sel Surya Perovskit Fleksibel

Putri Ekarani, Eka Cahya Prima*, dan Dadi Rusdiana

Solar Energy Materials Laboratory, Faculty of Mathematics and Science Education, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung 40154, Indonesia

* E-mail: ekacahyaprima@upi.edu

Abstrak

Preparasi fotoelektroda yang membutuhkan suhu pemanasan tinggi akan menghambat pengembangan PSC dimasa depan pada substrat plastik fleksibel. Oleh karena itu, ZnO adalah alternatif yang layak untuk PSC fleksibel karena dapat diproses pada suhu rendah. Penelitian ini berfokus pada pengaruh ketebalan lapisan fotoelektroda ZnO terhadap sifat optik dan kinerja sel surya perovskit. Transmittansi film tipis ZnO didapatkan lebih dari 50% pada setiap sampel. Selain itu, *bandgap* yang diperoleh pada penelitian ini berkisar 3,12-3,20 eV. Hasil efisiensi 0,90×10⁻⁵% pada ketebalan 10 μm, 1,09×10⁻⁵% pada ketebalan 8 μm, 2,68×10⁻⁵% pada ketebalan 6 μm, dan efisiensi terbaik yaitu 4,31×10⁻⁵% pada ketebalan 4 μm. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dengan mengurangi ketebalan lapisan fotoelektroda ZnO dapat meningkatkan transmittansi dan efisiensi sel surya sehingga kinerja sel surya meningkat.

Kata kunci: Ketebalan fotoelektroda, Sel surya perovskit, ZnO

Abstract

Photoelectrode preparation that requires high heating temperatures will hinder the future development of PSCs on flexible plastic substrates. Therefore, ZnO is a viable alternative for flexible PSCs because it can be processed at low temperatures. This research focuses on the influence of ZnO photoelectrode layer thickness on the optical properties and performance of PSCs. The transmittance of ZnO thin films was found to be more than 50% in each sample. In addition, the bandgap obtained ranged from 3.12 to 3.20 eV. The efficiency results are 0.90×10⁻⁵% at a thickness of 10 μm, 1.09×10⁻⁵% at a thickness of 8 μm, 2.68×10⁻⁵% at a thickness of 6 μm, and the best efficiency is 4.31×10⁻⁵% at 4 μm thickness. Based on the results of research that has been carried out, reducing the thickness of the ZnO photoelectrode layer can increase the transmittance and efficiency of solar cells so that solar cell performance increases.

Keywords: Photoelectrode thickness, Perovskite solar cells, ZnO

PENDAHULUAN

Kemunculan baru-baru ini dari sel surya yang efisien menggunakan perovskit timbal halida telah diakui sebagai salah satu fotovoltai generasi ketiga yang prospektif karena koefisien absorpsi yang tinggi, sifat pembawa muatan yang sangat baik, dan panjang difusi eksiton yang baik (Snaith, 2013). Termotivasi oleh tujuan pembuatan sel surya perovskit yang stabil, berefisiensi tinggi, dan

hemat biaya, upaya luar biasa telah dicurahkan untuk meningkatkan kinerja sel surya perovskit. Sampai saat ini, berbagai strategi telah diadopsi untuk peningkatan kinerja, termasuk rekayasa komposisi bahan perovskit dan rekayasa konfigurasi.

CH₃NH₃PbI₃ merupakan salah satu struktur perovskit mewakili bahan penyerap cahaya untuk konfigurasi perangkat sel surya perovskit. CH₃NH₃PbI₃ memiliki mobilitas pembawa muatan yang tinggi dan waktu hidup pembawa muatan yang lama (Hodes, 2013).

Oleh karena itu, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ dipilih sebagai pemeka atau penyerap cahaya, yang dapat memberikan efisiensi konversi daya yang tinggi (Burschka dkk., 2013).

Diantara berbagai jenis sel surya berstruktur nano semikonduktor, seng oksida (ZnO) memiliki beberapa keunggulan dibanding bahan lainnya, yaitu sebagai berikut: (1) ramah lingkungan. Dibandingkan dengan bahan PV umum lainnya yang mengandung unsur logam berat, seperti CdS, CdSe, PbS, dll., ZnO tidak membahayakan manusia dan lingkungan, (2) memiliki mobilitas elektron yang tinggi (Consonni dkk., 2019), yang menguntungkan untuk transpor elektron yang efisien dan mengurangi rekombinasi, (3) dibuat melalui metode sintesis yang fleksibel dan beragam morfologi (Wibowo dkk., 2020).

Untuk aplikasi prospektif PSC, fleksibilitas itu penting karena memiliki kelebihan biaya rendah, ringan dan strukturnya tipis, mudah ditekuk, portabel, dan mudah diproses. Oleh karena itu, banyak peneliti berfokus pada pengembangan PSC yang fleksibel (Yang dkk., 2019). Sel surya fleksibel, bisa dipasang di atap dengan permukaan datar atau melengkung. Substrat polimer fleksibel konduktif (*indium tin oxide* (ITO)) dilapisi *polietilen naftalat* (PEN) atau *polietilen tereftalat* (PET) dapat berperan sebagai susunan perangkat sel surya perovskit fleksibel (Zeng dkk., 2020).

Penelitian mengenai PSC banyak dilakukan dengan ketebalan fotoelektroda yang berbeda-beda. Ku dkk melakukan penelitian PSC dengan lapisan fotoelektroda TiO_2 ketebalan 5 μm memperoleh efisiensi sebesar 12,8%. Pada tahun 2013, Ku dkk melakukan penelitian kembali menggunakan *methylammonium lead iodide* ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) perovskit/ TiO_2 *heterojunction solar cell* dengan ketebalan film 10 μm memperoleh efisiensi sel 6,64% (Ku dkk., 2013). Berdasarkan penelitian sebelumnya, perlu menganalisis pengaruh ketebalan lapisan fotoelektroda terhadap kinerja sel surya. Selain itu, masih sedikit studi yang mempelajari pengaruh ketebalan lapisan ZnO, maka dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh ketebalan lapisan tipis ZnO terhadap sifat optik dan kinerja PSC.

METODE/EKSPERIMEN

Penelitian ini dimulai pada bulan Agustus 2022 yang bertempat di Laboratorium IPA-1 (Lab Basah) Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia, Jl. Dr. Setiabudhi No. 229 Kota Bandung, Jawa Barat.

Pembuatan Fotoelektroda ZnO

Nanopartikel ZnO dibuat menggunakan prosedur umum yang digunakan untuk pembuatan nanopartikel, yaitu sebagai berikut: seng asetat dihidrat (1,475 g) dilarutkan dalam metanol (62,5 mL) pada suhu 60°C, larutan KOH (0,74 g) dalam metanol ditambahkan dalam 10 menit ke dalam larutan seng asetat dihidrat dengan *magnetic stirrer*. Setelah 1,5 jam, nanopartikel mulai mengendap dan larutan menjadi keruh. Setelah 2 jam dan 15 menit, partikel nano dibiarkan mengendap selama 2 jam tambahan (Lee dkk., 2020).

Deposisi Larutan ZnO pada ITO

Pembersihan substrat diperlukan untuk mendeposisi larutan ZnO di atasnya yang diawali dengan menempatkan plastik PET berukuran 25 x 25 mm pada *cleaning frame*, PET kemudian direndam di dalam gelas kimia yang berisi IPA, aseton, dan air dengan perbandingan 1:1:1. Gelas kimia tersebut diletakkan ke dalam *ultrasonic cleaner bath* untuk disonifikasi dengan suhu 60°C selama 20 menit agar substrat bersih.

Substrat diberi selotip anti panas yang digunakan untuk melapisi bagian substrat yang tidak ditambahkan larutan ZnO dengan lebar 1x1 cm di atasnya. Fotoelektroda ZnO dideposisi ke atas substrat PET menggunakan metode *spin-coating* dua tahap. Tahap pertama dilakukan dengan kecepatan yang berbeda, yaitu 1000 rpm, 2000 rpm, 3000 rpm, dan 4000 rpm dengan meneteskan larutan ZnO sebanyak 3 kali ke atas substrat. Kemudian untuk *spin-coating* tahap kedua dilakukan dengan kecepatan putaran yang sama yaitu 2000 rpm selama 30 detik sehingga menghasilkan ketebalan yang berbeda.

Pemanasan Film Tipis ZnO

Sebagian besar metode konvensional

melibatkan sintering suhu tinggi pada 450-500°C untuk pemanasan partikel nano ZnO, agar mendapatkan koneksi yang baik antar partikel, namun suhu tinggi ini tidak dapat digunakan untuk substrat plastik PET. Oleh karena itu, dalam kasus substrat plastik, metode fabrikasi dilakukan dengan suhu di bawah 150°C (Tan dkk., 2013). Sehingga ZnO yang telah dideposisi tersebut diletakkan di dalam cawan petri kemudian dipanaskan dengan suhu 120°C selama 1 jam menggunakan oven.

Karakterisasi Absorbansi dan Transmittansi Film Tipis ZnO

Spektrofotometri adalah pengukuran kuantitatif sifat pantulan atau transmisi suatu bahan sebagai fungsi panjang gelombang. Spektrofotometri serapan di daerah ultra-violet dan cahaya tampak dianggap sebagai salah satu teknik penting untuk analisis kuantitatif. Penerapan kuantitatif dari metode absorpsi didasarkan pada fakta bahwa jumlah foton yang diserap berbanding lurus dengan jumlah atau konsentrasi atom, ion, atau molekul (L.C. Passos & M.F.S. Saraiva, 2019). Urutan peristiwa dalam spektrofotometri Uv-Vis adalah sebagai berikut: (1) Sumber cahaya menyinari sampel, (2) Sampel menyerap cahaya, (3) Detektor mendeteksi berapa banyak cahaya yang diserap sampel, (4) Detektor kemudian mengubah seberapa banyak cahaya yang diserap sampel menjadi angka, (5) Angka-angka tersebut langsung diplot atau dikirim ke komputer untuk dianalisis lebih lanjut. Oleh karena itu, pemindaian dilakukan menunjukkan absorbansi pada panjang gelombang tertentu untuk film tipis ZnO (Mäntele & Deniz, 2017).

Nilai *band gap* dari lapisan tipis ZnO juga dapat diketahui dengan cara menganalisis data yang diperoleh dari alat karakterisasi spektrofotometri Uv-Vis menggunakan metode *Tauc plot* yang dapat dinyatakan dengan Persamaan 1.

$$(\alpha \cdot hv)^{1/2} = A(hv - E_g) \quad (1)$$

Preparasi Lapisan Sensitizer Perovskit CH₃NH₃PbI₃

Pembuatan sensitizer perovskit CH₃NH₃PbI₃ diawali dengan menyiapkan

Metilamonium Iodide (MAI) 190,9 mg, *Lead (II) Iodide* (PbI₂) 553,2 mg, menambahkan *Dimetil Formamide* (DMF) 100 µl, *Dimetil Sulfoksida* (DMSO) 900 µl ke dalam botol sampel yang telah terisi MAI dan PbI₂. Bahan diaduk dengan suhu 60°C dan kecepatan 500 rpm selama 2 jam. Perovskit ditambahkan dengan *spin-coater* ke atas lapisan ZnO yang selesai dipanaskan, melalui dua tahap dengan kecepatan putaran 4000 rpm selama 5 detik dan 1000 rpm selama 30 detik. Larutan CH₃NH₃PbI₃ sebanyak 8 µl dispin-coating, setelah selesai sampel dipanaskan kembali menggunakan oven dengan suhu 100°C dengan waktu 10 menit.

Preparasi Lapisan Elektrolit Spiro-OMeTAD

Proses pembuatan elektrolit dengan menyiapkan spiro-OMeTAD powder 72 mg dan LiTFSI 18,2 mg. Kemudian ditambahkan TBP sebanyak 28,6 µl dan *chlorobenzene* 1000 µl, aduk dengan kecepatan putaran 500 rpm bersuhu 60°C selama 3 jam. Spiro-OMeTAD sebanyak 8 µl ditambahkan ke atas film tipis menggunakan *spin-coater* dengan kecepatan putaran 3000 rpm selama 30 detik, selanjutnya dipanaskan di dalam oven dengan suhu 100°C selama 20 menit.

Preparasi Lapisan Elektroda Balik rGO

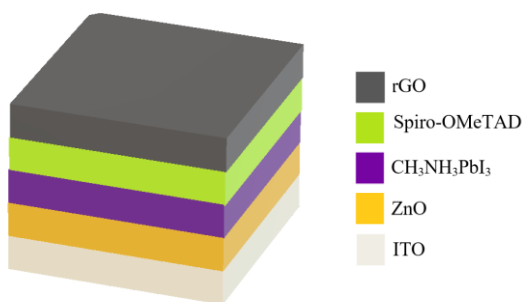
Pembuatan rGO atau *reduced Graphene Oxide*, dibuat dengan menambahkan rGO powder 150 mg yang dilarutkan ke dalam 50 mL air. Larutan tersebut disonifikasi dalam *ultrasonic cleaner bath* selama 2 jam hingga powder rGO terdispersi.

Elektroda balik ditambahkan pada sel dengan menempelkan rGO yang telah dipanaskan pada substrat PET hingga menutupi permukaan substrat yang tidak diberi selotip. Film tipis tersebut ditempel menggunakan resin kemudian sel surya diletakkan dalam UV LED hingga kering dan siap untuk dikarakterisasi.

Perakitan Sel Surya Perovskit Fleksibel

Substrat, fotoelektroda, sensitizer, elektrolit dan elektroda balik merupakan berbagai parameter struktur yang mempengaruhi kinerja sel surya (Sengupta dkk., 2016). Struktur PSC pada penelitian ini

terlihat seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur Diagram PSC

Lapisan substrat ITO pada Gambar 1 memungkinkan sinar matahari melewati bahan aktif tanpa penyerapan spektrum matahari yang tidak diinginkan, dan resistivitas listriknya rendah sehingga mendukung proses transfer elektron dan mengurangi kehilangan energi. Selain itu, substrat mengumpulkan muatan sebagai pendukung fotoelektroda pada PSC (Jie Zhang, 2016).

ZnO pertama kali digunakan sebagai ETL (*Electron Transport Layer*) untuk PSC fleksibel karena mobilitas elektron yang tinggi, *band gap* yang luas, dan kemampuan proses pada suhu rendah. ZnO memiliki energi pengikat eksiton yang besar yaitu 60 meV, juga memiliki fabrikasi yang jauh lebih sederhana, menghasilkan biaya yang berpotensi lebih rendah untuk perangkat berbasis ZnO.

CH₃NH₃PbI₃ berperan sebagai bahan penyerap (sensitizer) dalam perangkat fotovoltaik. Perovskit memiliki banyak sifat yang diinginkan dalam sel surya (Li dkk., 2015). Lapisan perovskit dapat diendapkan dengan biaya rendah, menyiratkan bahwa kemajuan yang dibuat untuk sel surya akan dapat diperoleh pada sistem material baru ini (Ball dkk., 2013).

Dalam HTL (*Hole Transport Layer*), ekstraksi *hole* yang cepat dan efisien dapat memberikan transfer *hole* yang baik dan mengurangi kemungkinan rekombinasi muatan. Penggunaan spiro-OMeTAD sebagai HTM telah banyak dilaporkan untuk pembuatan PSC efisiensi tinggi 6 (Mahmood dkk., 2014).

Graphene memiliki konduktivitas listrik yang sangat baik (mobilitas pembawa muatan >15.000 cm²V⁻¹s⁻¹ pada suhu kamar), dan selain itu, ia memiliki luas permukaan yang

tinggi (Campbell & Manning, 2018).

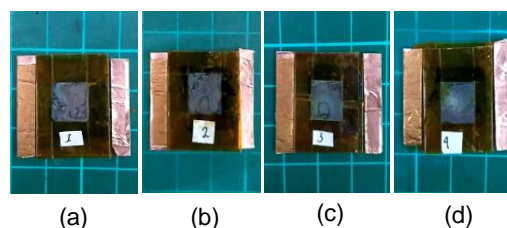
Karakterisasi efisiensi sel surya perovskit

Efisiensi dari PSC diuji dengan alat penyinaran intensitas standar matahari sebesar 100 mWcm⁻² dengan spektrum AM1.5G. Diperoleh sifat listrik sel diantaranya tegangan *open-circuit* (Voc), kerapatan arus *short-circuit* (Jsc), *Fill factor* (FF), sehingga dapat dihitung nilai efisiensi dari sel menggunakan Persamaan 2.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = FF \frac{V_{oc} J_{sc}}{P_{in}} \quad (2)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, dihasilkan 4 sampel dengan ketebalan lapisan film tipis ZnO yang berbeda seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Sel surya dengan ketebalan (a) 10 μm (b) 8 μm (c) 6 μm (d) 4 μm

Ketebalan Fotoelektroda

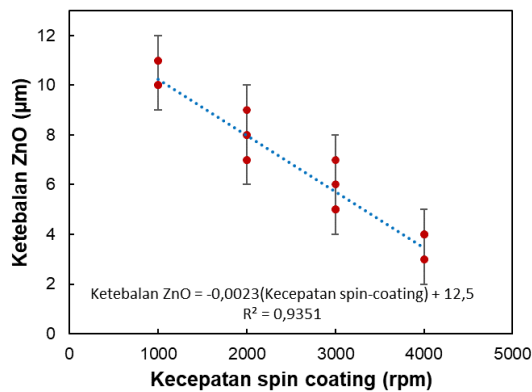
Larutan ZnO dideposisi ke substrat PET dengan perbedaan kecepatan *spin-coating*. Ketebalan film yang diendapkan diukur menggunakan mikrometer memperoleh hasil seperti yang tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Ketebalan lapisan ZnO

Kecepatan putar (rpm)	Tebal ZnO (μm)	Standar deviasi (μm)	Standar error (μm)
1000	10,4	0,002	9,81
2000	7,8	0,001	15,59
3000	5,6	0,005	10,86
4000	3,6	0,004	24,16

Teknik *spin-coating* dilakukan dengan *dripping* larutan ZnO ke atas substrat sehingga ada genangan kecil larutan ZnO di tengah substrat yang kemudian diputar dengan kecepatan yang berbeda. Sel surya perovskit dengan hasil yang baik didapatkan dengan

ketebalan film tidak lebih dari 10 μm (Zhang dkk., 2016). Hasil pengukuran ketebalan rata-rata yang diperoleh dengan kecepatan *spin coating* 1000 rpm yaitu $10,4 \pm 0,2 \mu\text{m}$ sedangkan untuk deposisi dengan kecepatan *spin coating* 2000 rpm, 3000 rpm, dan 4000 rpm secara berurutan diperoleh ketebalan rata-rata $7,8 \pm 0,4 \mu\text{m}$, $5,6 \pm 0,4 \mu\text{m}$, dan $3,6 \pm 0,4 \mu\text{m}$. *Spin-coating* dengan kecepatan putaran yang sama menghasilkan ketebalan yang tidak sama persis saat deposisi larutan, hal ini disebabkan oleh larutan ZnO yang dideposisi pada substrat tidak homogen sehingga ada sedikit perbedaan ketebalan film meskipun menggunakan kecepatan putaran yang sama (Wu dkk., 2013).



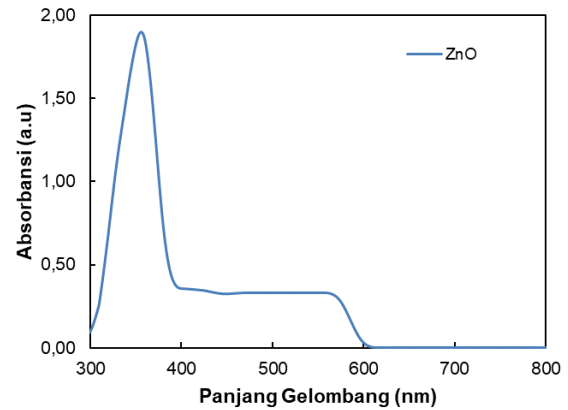
Gambar 3. Grafik hubungan antara kecepatan *spin-coating* dan ketebalan lapisan ZnO

Gambar 3 menunjukkan bahwa ketebalan film dipengaruhi oleh kecepatan *spin-coating* dengan persamaan $y = -0,0023x + 12,5$. Seperti yang dinyatakan pada penelitian sebelumnya, untuk memproduksi film dengan ketebalan berbeda perlu memvariasikan kecepatan *spin-coating* sehingga film akan semakin tipis dengan bertambahnya kecepatan *spin-coating* (Rahman dkk., 2019). Hal ini disebabkan oleh penyebaran larutan yang semakin cepat ketika kecepatan putaran bertambah. Penyebaran tersebut disebabkan oleh gaya sentrifugal sehingga larutan ZnO keluar dan akhirnya lepas, menghasilkan lapisan tipis di permukaan substrat (Hosseini dkk., 2014). Selain itu, laju pengeringan juga mempengaruhi viskositas larutan ZnO yang mengakibatkan gaya sentrifugal tidak mampu menggerakkan larutan tersebut hingga

menghasilkan film yang lebih tebal (Butt, 2022).

Spektrum Absorbansi dan Transmittansi

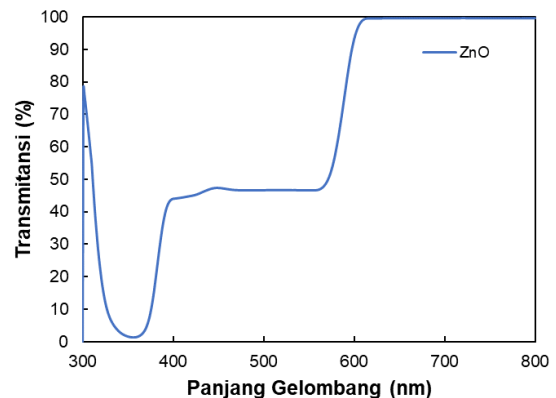
Gambar 4 menunjukkan absorbansi optik larutan ZnO. Spektrum ini disebabkan oleh



interferensi cahaya pada permukaan antara film dan bahan substrat (Cho, 2009).

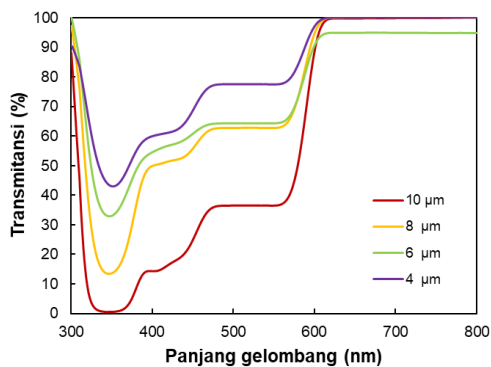
Gambar 4. Spektrum absorbansi larutan ZnO

Berdasarkan Gambar 4 penyerapan larutan ZnO yang diplot dengan panjang gelombang 300-800 nm, diperoleh absorbansi maksimum sebesar 1,9 a.u dengan puncak panjang gelombang 356 nm sesuai dengan literatur (Haque dkk., 2020).



Gambar 5. Spektrum transmittansi larutan ZnO

Spektrum transmittansi larutan ZnO yang ditunjukkan pada Gambar 5 mengindikasikan cahaya mengalami transmittansi yang baik pada daerah panjang gelombang cahaya tampak yaitu dalam rentang panjang gelombang 400-800 nm, sementara absorbansinya tinggi pada daerah cahaya UV dalam rentang panjang gelombang 300-400 nm.



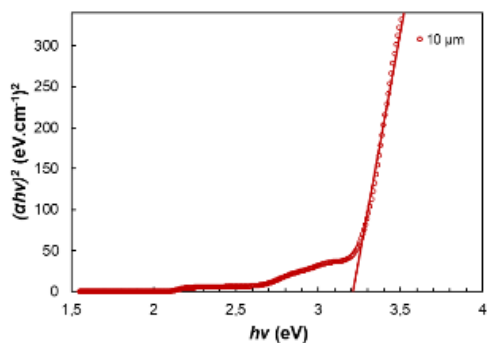
Gambar 6. Spektrum transmitansi film ZnO

Gambar 6 menunjukkan grafik hubungan transmitansi dengan variasi ketebalan. Spektrum disebabkan oleh interferensi cahaya pada permukaan antara film dan substrat (Minkov dkk., 2021). Transmitansi tinggi berada pada daerah cahaya tampak 400-800 nm dan rendah pada daerah cahaya ultraviolet. Hal ini bersesuaian dengan spektrum transmitansi larutan ZnO.

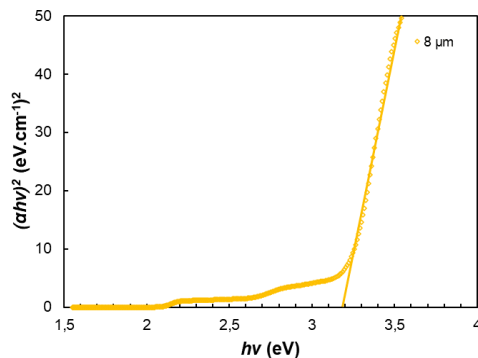
Tabel 2. Transmitansi rata-rata lapisan ZnO

No	Ketebalan lapisan ZnO (μm)	\bar{T} (%)
1	10	56,38
2	8	72,07
3	6	73,84
4	4	81,43

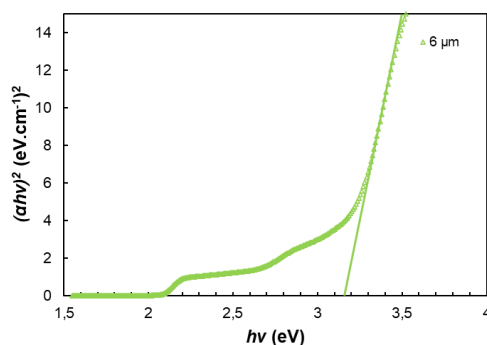
Transmittansi rata-rata sampel pada Tabel 2 menunjukkan transmittansi meningkat dengan berkurangnya ketebalan lapisan ZnO. Hal ini disebabkan oleh semakin tebal lapisan ZnO maka semakin sedikit cahaya yang melewati lapisan tersebut karena banyaknya susunan molekul ZnO yang mengakibatkan seringnya partikel cahaya bertumbukan dengan atom-atom penyusun lapisan sehingga cahaya sulit menembus lapisan (Klubnuan dkk., 2016).



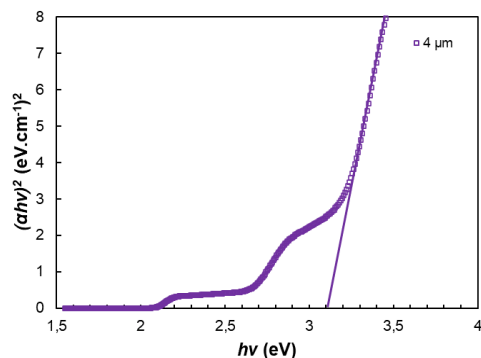
(a)



(b)



(c)



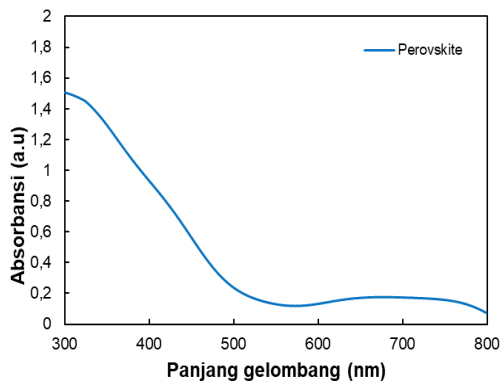
(d)

Gambar 7. Tauc plot film tipis ZnO dengan ketebalan berbeda (a) 10 μm (b) 8 μm (c) 6 μm (d) 4 μm

Analisis *bandgap* menggunakan metode *tauc plot* dilakukan pada ketebalan lapisan ZnO yang berbeda, memperoleh hasil seperti pada Gambar 7. *Bandgap* diperoleh dengan mengekstrapolasi garis tangensial sumbu energi foton pada plot $(\alpha hv)^2$ versus $h\nu$, linearitas plot menunjukkan sebuah transisi langsung (Pruna dkk., 2016).

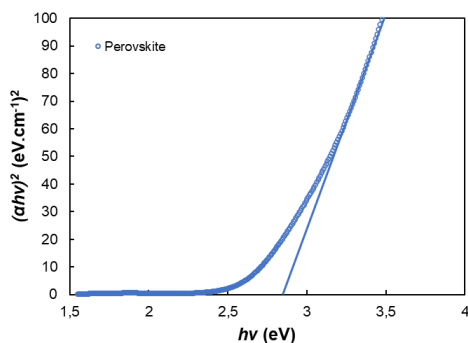
Nilai *bandgap* yang diperoleh dari ketebalan lapisan ZnO yang berbeda yaitu 3,12-3,20 eV, nilai ini mirip dengan yang dilaporkan dalam literatur (Debanath &

Karmakar, 2013). Hanya terdapat sedikit perubahan pada sifat optik celah pita film ZnO dengan memvariasikan ketebalan film hingga 10 μm . Penurunan celah pita optik dengan peningkatan ketebalan film dapat disebabkan oleh penurunan cacat kisi (Chaves & Jiménez, 2018). Hasil ini menunjukkan celah pita film ZnO tidak bergantung secara signifikan pada ketebalan.



Gambar 8. Spektrum absorbansi larutan $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

Pada Gambar 8 ditunjukkan bahwa spektrum absorbansi perovskit $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ juga dianalisis dalam penelitian ini dengan rentang panjang gelombang 300-800 nm. Foton yang ditransmisikan oleh film tipis ZnO, diserap oleh perovskit kemudian menghasilkan elektron dan *hole* untuk diangkut ke ETL dan HTL. Sedangkan, foton yang ditransmisikan akan diterima oleh elektroda balik untuk dimanfaatkan kembali oleh sel.



Gambar 9. *Bandgap* larutan perovskit $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

Gambar 9 merupakan *bandgap* $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ yang diplot menggunakan metode *tauc plot* yaitu sebesar 2,77 eV. Hasil ini jauh berbeda dengan literatur yaitu 1,6 eV (Ashrafi dkk., 2020). Hal ini dikarenakan adanya

kesalahan fabrikasi perovskit, salah satunya adalah pembuatan perovskit tidak dalam kondisi vakum sehingga mudah terjadi oksidasi.

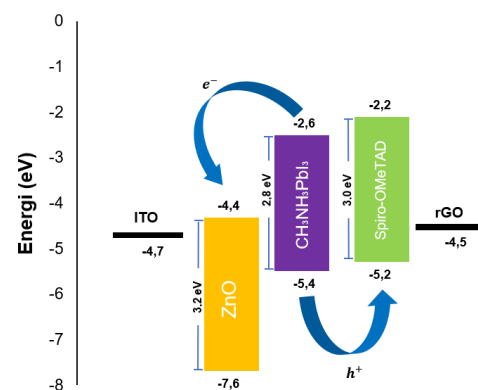
Efisiensi Sel Surya Perovskit

Kinerja sel surya dinyatakan dengan nilai efisiensi sel tersebut, pengujian kinerja sel surya dilakukan dengan variasi ketebalan lapisan ZnO menggunakan *Standard Solar Simulator 1,5 AM filter 100 mWcm⁻²*.

Tabel 3. Kinerja PSC

Tebal ZnO (μm)	Voc (V)	Jsc (mA/cm^2)	FF (%)	Eff ($\times 10^{-5}$ %)
10	0,066	0,002	9,81	0,90
8	0,066	0,001	15,59	1,09
6	0,066	0,005	10,86	2,68
4	0,066	0,004	24,16	4,31

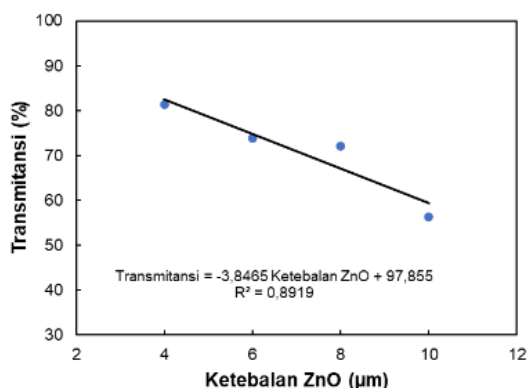
Tabel 3 menunjukkan hasil pengolahan data dari karakteristik J-V sel yang memiliki area aktif sebesar $1 \times 1 \text{ cm}^2$ dan tidak ada lapisan antireflektif. Sel surya perovskit dengan lapisan ZnO setebal 4 μm menunjukkan efisiensi konversi daya tertinggi daripada sampel yang lain, sesuai dengan sifat optiknya yang juga memperoleh transmitansi paling baik pada sampel dengan ketebalan 4 μm . Efisiensi sel meningkat ketika ketebalan lapisan ZnO berkurang. Pada penelitian sebelumnya dengan struktur perangkat sel surya ITO/ZnO/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /spiro-OMeTAD/Ag memperoleh efisiensi sebesar 10% (Liu & Kelly, 2014). Hasil efisiensi Meskipun hasil belum ideal, namun menunjukkan bahwa ketebalan lapisan fotoelektroda menggunakan ZnO berpengaruh terhadap efisiensi sel.



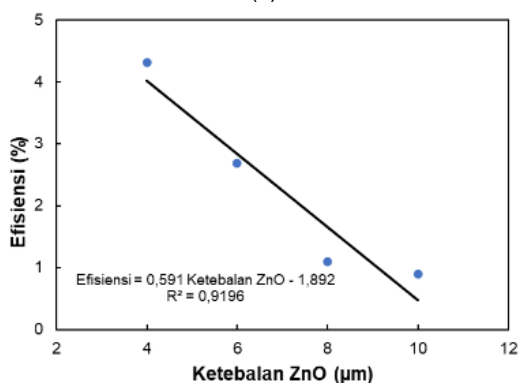
Gambar 10. *Bandgap diagram* ITO/ZnO/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /spiro-OMeTAD/rGO

Gambar 10 menunjukkan pembawa muatan yang dihasilkan dalam lapisan penyerap perovskit di bawah iluminasi cahaya dapat diekstraksi oleh kontak selektif elektron dan bahan pengangkut *hole*, berdasarkan level energi dari setiap komponen perangkat. Pada penelitian ini, ZnO memiliki *bandgap* sebesar 3,2 eV, perovskit CH₃NH₃PbI₃ memiliki celah pita 2,8 eV yang menyebabkan jarak pita dari perovskit menuju ZnO terlalu jauh sehingga rekombinasi muatan yang terjadi lambat, merugikan kinerja sel surya.

Salah satu faktor yang berkontribusi terhadap rendahnya kinerja PSC adalah kristalinitas perovskit. Kristalinitas yang buruk dapat disebabkan oleh keberadaan oksigen dalam lingkungan deposisi dan pemanasan yang memengaruhi reaktivitas ion Pb²⁺ karena tidak dalam ruang vakum. Masuknya oksigen dapat menyebabkan terbentuknya fasa oksida yang tidak diinginkan atau mengganggu tumbuhnya kristal perovskit yang baik.



(a)



(b)

Gambar 11. *Trendline* grafik korelasi ketebalan lapisan ZnO dengan (a) Transmittansi dan (b) Efisiensi

Pada penelitian ini diperoleh adanya hubungan linear positif antara ketebalan ZnO dengan sifat optik sel surya berupa transmitansi cahaya yang ditunjukkan pada Gambar 11 (a) dengan persamaan grafik $y = -3,8465x + 97,855$ kontribusi ketebalan ZnO terhadap variasi transmitansi sebesar 89,19%. Gambar 11 (b) dengan persamaan grafik $y = 0,591x - 1,892$ menunjukkan hubungan sangat kuat antara peningkatan kinerja sel surya perovskit dengan menipisnya ketebalan lapisan ZnO memperoleh koefisien korelasi sebesar 91,96%. Maka, sifat optik berupa transmitansi dan efisiensi sel surya dipengaruhi oleh ketebalan lapisan fotoelektroda ZnO.

PENUTUP

Sel surya perovskit adalah sumber energi terbarukan yang cocok untuk dikembangkan. Pada penelitian ini disajikan sintesis dan karakterisasi sel surya perovskit fleksibel dengan lapisan fotoelektroda ZnO. Ketebalan film ZnO divariasikan untuk menyelidiki apakah perbedaan ini dapat meningkatkan kinerja sel. Berdasarkan hasil penelitian, ketebalan lapisan fotoelektroda menunjukkan bahwa semakin berkurang ketebalan lapisan fotoelektroda memengaruhi kinerja sel surya menjadi lebih baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Sebagian penelitian ini didukung oleh Hibah Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi, Kementerian Pendidikan Republik Indonesia dengan Nomor Kontrak 1229/11N40.LP/PT.01.03/2023.

REFERENSI

- Ashrafi, S. S., Hossain, M. K., Islam, M. M., Hossain, M. U., Fahad, S. M., Kamrujjaman, M., Masum, M. M. I., Ahmed, F., Hossain, M. A., & Rahman, M. O. (2020). Characterization and Fabrication of Pb-Based Perovskites Solar Cells under Atmospheric Condition and Stability Enhancement. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 10(11), 282–296. <https://doi.org/10.4236/ampc.2020.10110>

22

- Burschka, J., Pellet, N., Moon, S. J., Humphry-Baker, R., Gao, P., Nazeeruddin, M. K., & Grätzel, M. (2013). Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells. *Nature*, *499*(7458), 316–319. <https://doi.org/10.1038/nature12340>
- Butt, M. A. (2022). Thin-Film Coating Methods: A Successful Marriage of High-Quality and Cost-Effectiveness—A Brief Exploration. *Coatings*, *12*(8). <https://doi.org/10.3390/coatings12081115>
- Chaves, F. A., & Jiménez, D. (2018). Thickness dependence of structural, optical and morphological properties of sol-gel derived TiO₂ thin film. *Nanotechnology*, *29*(27).
- Cho, S.-H. (2009). Effects of Growth Temperature on the Properties of ZnO Thin Films Grown by Radio-frequency Magnetron Sputtering. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, *10*(6), 185–188. <https://doi.org/10.4313/teem.2009.10.6.185>
- Consonni, V., Briscoe, J., Kärber, E., Li, X., & Cossuet, T. (2019). ZnO nanowires for solar cells: A comprehensive review. *Nanotechnology*, *30*(36). <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab1f2e>
- Debanath, M. K., & Karmakar, S. (2013). Study of blueshift of optical band gap in zinc oxide (ZnO) nanoparticles prepared by low-temperature wet chemical method. *Materials Letters*, *111*, 116–119. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.08.069>
- Haque, M. J., Bellah, M. M., Hassan, M. R., & Rahman, S. (2020). Synthesis of ZnO nanoparticles by two different methods & comparison of their structural, antibacterial, photocatalytic and optical properties. *Nano Express*, *1*(1). <https://doi.org/10.1088/2632-959X/ab7a43>
- Hodes, G. (2013). Perovskite-based solar cells. *Science*, *342*(6156), 317–318. <https://doi.org/10.1126/science.1245473>
- Hosseini, A., Içli, K., Özenbaş, M., & Erçelebi. (2014). Fabrication and characterization of spin-coated TiO₂ films. *Energy Procedia*, *60*(C), 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.332>
- Jie Zhang. (2016). *Roles of the n-type oxide layer in hybrid perovskite solar cells*.
- Klubnuan, S., Suwanboon, S., & Amornpitoksuk, P. (2016). Effects of optical band gap energy, band tail energy and particle shape on photocatalytic activities of different ZnO nanostructures prepared by a hydrothermal method. *Optical Materials*, *53*, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.01.045>
- Ku, Z., Rong, Y., Xu, M., Liu, T., & Han, H. (2013). Full printable processed mesoscopic CH₃ NH₃ Pbl₃ /TiO₂ heterojunction solar cells with carbon counter electrode. *Scientific Reports*, *3*. <https://doi.org/10.1038/srep03132>
- L.C. Passos, M., & M.F.S. Saraiva, M. L. (2019). Detection in UV-visible spectrophotometry: Detectors, detection systems, and detection strategies. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *135*, 896–904. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.045>
- Lee, W., Yeop, J., Heo, J., Yoon, Y. J., Park, S. Y., Jeong, J., Shin, Y. S., Kim, J. W., An, N. G., Kim, D. S., Park, J., & Kim, J. Y. (2020). High colloidal stability ZnO nanoparticles independent on solvent polarity and their application in polymer solar cells. *Scientific Reports*, *10*(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75070-0>
- Liu, D., & Kelly, T. L. (2014). Perovskite solar cells with a planar heterojunction structure prepared using room-temperature solution processing techniques. *Nature Photonics*, *8*(2), 133–138. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.342>
- Mäntele, W., & Deniz, E. (2017). UV–VIS absorption spectroscopy: Lambert-Beer reloaded. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *173*, 965–968. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.09.037>
- Minkov, D., Marquez, E., Angelov, G., Gavrillov, G., Ruano, S., & Saugar, E. (2021). Further increasing the accuracy of characterization of a thin dielectric or semiconductor film on a substrate from its interference transmittance spectrum. *Materials*, *14*(16). <https://doi.org/10.3390/ma14164681>
- Pruna, R., Palacio, F., López, M., Pérez, J., Mir, M., Blázquez, O., Hernández, S., & Garrido, B. (2016). Electrochemical characterization of organosilane-functionalized nanostructured ITO surfaces. *Applied Physics Letters*, *109*(6). <https://doi.org/10.1063/1.4960734>
- Rahman, A., Novyanto, O., Alfiyati, N., Sidik, A., Idris, I., & Nugraha, A. R. (2019). Design

- and Characterization of Spin Coater To Support National Semiconductor Industry. *Jurnal Standardisasi*, 21(3), 183. <https://doi.org/10.31153/js.v21i3.761>
- Sengupta, D., Das, P., Mondal, B., & Mukherjee, K. (2016). Effects of doping, morphology and film-thickness of photoanode materials for dye sensitized solar cell application - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 356–376. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.104>
- Snaith, H. J. (2013). *2013_Physical Chemistry Letter_Perovskites The Emergence of a New Era for Low-Cost, HighEfficiency Solar Cells.pdf*.
- Tan, W. K., Lockman, Z., Abdul Razak, K., Kawamura, G., Muto, H., & Matsuda, A. (2013). Enhanced dye-sensitized solar cells performance of ZnO nanorod arrays grown by low-temperature hydrothermal reaction. *International Journal of Energy Research*, 33(4), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/er.3026>
- Wibowo, A., Marsudi, M. A., Amal, M. I., Ananda, M. B., Stephanie, R., Ardy, H., & Diguna, L. J. (2020). ZnO nanostructured materials for emerging solar cell applications. *RSC Advances*, 10(70), 42838–42859. <https://doi.org/10.1039/d0ra07689a>
- Wu, C. Y., Lee, Y. L., Lo, Y. S., Lin, C. J., & Wu, C. H. (2013). Thickness-dependent photocatalytic performance of nanocrystalline TiO₂ thin films prepared by sol-gel spin coating. *Applied Surface Science*, 280, 737–744. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.05.053>
- Yang, D., Yang, R., Priya, S., & Liu, S. (Frank). (2019). Recent Advances in Flexible Perovskite Solar Cells: Fabrication and Applications. *Angewandte Chemie - International Edition*, 58(14), 4466–4483. <https://doi.org/10.1002/anie.201809781>
- Zeng, P., Deng, W., & Liu, M. (2020). Recent Advances of Device Components toward Efficient Flexible Perovskite Solar Cells. *Solar RRL*, 4(3). <https://doi.org/10.1002/solr.201900485>
- Zhang, X. H., Ye, J. J., Zhu, L. Z., Zheng, H. Y., Liu, X. P., Pan, X., & Dai, S. Y. (2016). High Consistency Perovskite Solar Cell with a Consecutive Compact and Mesoporous TiO₂ Film by One-Step Spin-Coating. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 8(51), 35440–35446. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b11860>