

## Pengaruh Ketebalan Lapisan Film Tipis TiO<sub>2</sub> Nanopartikel terhadap Sifat Optik dan Listrik Sel Surya Perovskite CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>

Hasna Aisyah Rastiadi , Endi Suhendi, dan Eka Cahya Prima

Program Studi Fisika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia

### Info Artikel

Sejarah Artikel:

Diterima:  
07 Mei 2023

Disetujui:  
16 Agustus 2023

Dipublikasikan:  
31 Agustus 2023


*Keywords:*  
Perovskite solar cell,  
TiO<sub>2</sub> thin film, TiO<sub>2</sub>  
thickness

### ABSTRAK

Sel surya perovskite merupakan sel surya yang memanfaatkan proses fotoelektrokimia dalam mengubah energi foton menjadi energi listrik, yang ramah lingkungan, fabrikasi mudah, dan biaya penelitian rendah. Penelitian ini difokuskan pada penentuan variasi ketebalan dari lapisan film tipis TiO<sub>2</sub> sebagai ETL serta pengaruhnya terhadap sifat optik dan sifat listrik pada sel surya perovskite. Karakterisasi sifat optik diperoleh dari hasil absorbansi menggunakan UV-Vis Spectrophotometer, sedangkan karakterisasi sifat listrik meliputi nilai  $J_{sc}$ ,  $FF$ ,  $V_{oc}$ , dan  $\eta$  menggunakan Standard Solar Simulator 1.5 AM. Hasil variasi ketebalan lapisan TiO<sub>2</sub> sebesar 41,75  $\mu\text{m}$ , 28,50  $\mu\text{m}$ , 19,00  $\mu\text{m}$ , dan 10,00  $\mu\text{m}$  berdasarkan kecepatan spin coating 3000 rpm, 4000 rpm, 5000 rpm, dan 6000 rpm selama 20 detik yang menghasilkan formulasi setiap 1 rpm dari spin coating dihasilkan ketebalan sebesar  $-0,0105 + 71,95 \mu\text{m}$ . Nilai absorbansi tertinggi sebesar 2,83 a.u didapatkan pada sampel dengan ketebalan 41  $\mu\text{m}$ . Nilai efisiensi tertinggi sebesar  $2,50 \times 10^{-7}\%$  pada sampel dengan ketebalan 10  $\mu\text{m}$ , dengan nilai  $J_{sc}$   $0,3 \times 10^{-6} \text{ mA/cm}^2$ ,  $V_{oc}$  0,0656 V,  $FF$  23%. Sifat listrik dari sel surya perovskite dipengaruhi oleh ketebalan lapisan TiO<sub>2</sub>, semakin tipis lapisan TiO<sub>2</sub> semakin tinggi nilai efisiensi yang dihasilkan.

### ABSTRACT

*Perovskite solar cells utilize photoelectrochemical processes in converting photon energy into electrical energy, which are environmentally friendly, easy fabrication, and low costs. This research focuses on determining TiO<sub>2</sub> layer thickness as ETL and its effect on optical and electrical properties of perovskite solar cells. Characterization of optical properties is analyzed from UV-Vis absorbance, while electrical properties includes  $J_{sc}$ ,  $FF$ ,  $V_{oc}$ , and  $\eta$  from Standard Solar Simulator 1.5 AM. The results shows that TiO<sub>2</sub> layer thickness variation were 41.75  $\mu\text{m}$ , 28.50  $\mu\text{m}$ , 19.00  $\mu\text{m}$ , and 10.00  $\mu\text{m}$  based on the spin coating speed of 3000 rpm, 4000 rpm, 5000 rpm, and 6000 rpm for 20 seconds. Every 1 rpm of spin coating composes thickness of  $-0.0105 + 71.95 \mu\text{m}$ . The highest absorbance value of 2.83 a.u was obtained in the sample with a thickness of 41  $\mu\text{m}$ . The highest efficiency value was  $2.50 \times 10^{-7}\%$  in the sample with a thickness of 10  $\mu\text{m}$ , with  $J_{sc}$   $0.30 \times 10^{-6} \text{ mA/cm}^2$ ,  $V_{oc}$  0.0656 V,  $FF$  23%. The cell's electrical properties cells are influenced by the thickness of the TiO<sub>2</sub> layer, the thinner the TiO<sub>2</sub> layer, the higher the efficiency value.*

 Alamat korespondensi:  
Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Pendidikan Indonesia  
E-mail: [hasnarastiadi@gmail.com](mailto:hasnarastiadi@gmail.com)

## PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi energi terbarukan dengan total kapasitas sebesar 417,6 GW dari berbagai sumber seperti panas bumi, angin, air, dan energi matahari. Sayangnya, tingkat pemanfaatan dari energi terbarukan tersebut masih rendah, karena sektor energi di Indonesia masih didominasi oleh bahan bakar fosil (Suparwoko & Qamar, 2022). Penggunaan bahan bakar fosil ini akan menyebabkan tingginya emisi gas yang menyebabkan pemanasan global (Slameršak dkk., 2022). Maka dari itu dibutuhkan sebuah energi terbarukan yang dapat memberikan kebutuhan daya yang tinggi tetapi ramah lingkungan. Salah satunya adalah energi matahari yang merupakan energi terbarukan terbersih dan dapat mengurangi atau meminimalkan emisi karbon (Sharif dkk., 2021).

Energi matahari dapat diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan sel surya, yang memanfaatkan sifat listrik dari material *photovoltaic* yaitu semikonduktor (Patwardhan dkk., 2015), (El-Adawi & Al-Nuaim, 2014). Saat ini terdapat tiga generasi dalam pengembangan teknologi sel surya, yaitu sel surya dengan bahan silikon (sel konvensional), sel surya dengan teknologi film tipis, dan sel surya *photovoltaic* (Choudhary & Srivastava, 2019). Pembuatan sel surya silikon masih tergolong sangat mahal meskipun memiliki efisiensi yang tinggi sekitar 26.1%-26.7% (Liu dkk., 2020). Terdapat jenis sel surya *photovoltaic* yaitu jenis perovskite yang berperan sebagai lapisan absorber pada sel surya dan memiliki harga lebih murah dibandingkan dengan jenis silikon (Nair dkk., 2020; Cherrette dkk., 2018). Hanya dalam dua tahun sejak dikenalkannya, sudah memiliki progress efisiensi yang terbilang cepat bertambah dari 10% hingga 20% dan masih akan terus bertambah seiring berjalannya waktu (Patwardhan dkk., 2015).

Sel surya jenis perovskite ini merupakan sel film tipis yang terbuat dari proses pelapisan, sintering, kristalisasi dengan bahan larutan, lalu dikemas menjadi sel surya yang dapat menghasilkan listrik dengan biaya rendah dan dapat diakui sebagai sel surya generasi berikutnya yang menjanjikan (Huang dkk., 2020). Hasil efisiensi dari sel surya perovskite sangat dipengaruhi oleh beberapa hal seperti susunan fabrikasi, sifat kimia, juga berbagai jenis dan kombinasi dari *Electron Transport Layer* (ETL) dan *Hole Transport Layer* (HTL) yang digunakan pada pembuatan dari sel surya jenis ini (Nair dkk., 2020).

Penggunaan lapisan TiO<sub>2</sub> nanopartikel sebagai ETL pada sel surya perovskite akan sangat efisien karena memiliki stabilitas kimia yang tinggi, memiliki *band gap* optimum (3,2 eV) yang selaras dengan perovskite, dan berperan penting terhadap peningkatan kinerja sel surya perovskite (Afzali dkk., 2020; Arshad dkk., 2021; Shakir dkk., 2015; Noori dkk., 2022). TiO<sub>2</sub> merupakan bahan ETL yang dominan untuk mengangkut *photoelectron* dan bagus untuk mencegah kontak antara kaca substrat dengan lapisan HTL (Wang dkk., 2019).

Film tipis TiO<sub>2</sub> dapat dibuat dengan berbagai metode seperti *sol-gel*, *pulsed layer deposition*, *chemical vapor deposition*, *spray pyrolysis*, dan *sputtering* (Salman dkk., 2019). *Spin coating* dari *sol-gel* TiO<sub>2</sub> adalah metode deposisi yang baik untuk melapisi film tipis TiO<sub>2</sub> pada substrat kaca, karena prosesnya yang cukup sederhana dan biaya yang dikeluarkan rendah (Anderson & Binions, 2014). Salah satu bahan *precursor* pembentuk dari TiO<sub>2</sub> dengan metode *sol-gel* adalah *titanium tetraisopropoxide* (TTIP) yang menggunakan pelarut ethanol (Pala dkk., 2020). TTIP merupakan bahan *precursor* yang menjanjikan karena dapat menghasilkan larutan yang stabil pada rasio hidrolisis rendah (Yazid dkk., 2019).

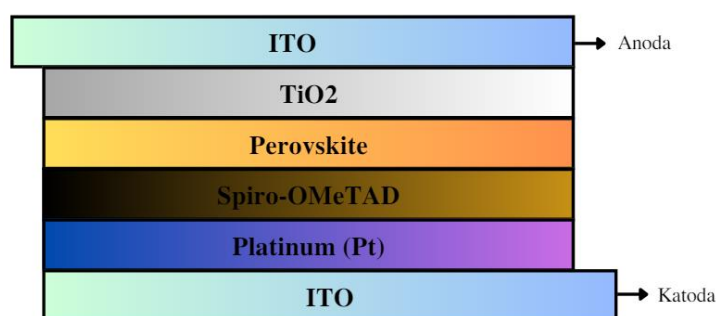
Ketebalan dari TiO<sub>2</sub> yang berperan sebagai ETL pada sel surya perovskite akan mempengaruhi efisiensi yang dihasilkan. Kim dan kawan-kawan membuktikan pada penelitiannya bahwa semakin tebal lapisan TiO<sub>2</sub> maka nilai dari *Power Conversion Efficiency* (PCE) yang dihasilkan pun akan semakin kecil, menggunakan pasta TiO<sub>2</sub> standar dengan variasi ketebalan 150 nm, 205 nm, dan 400 nm menghasilkan PCE masing-masing sebesar 18.03%, 16.52%, dan 14.43% (Lee dkk., 2019). Namun, masih jarang ditemukannya penelitian mengenai pengaruh ketebalan dari TiO<sub>2</sub> dengan menggunakan *precursor* TTIP terhadap kinerja sel surya perovskite. TTIP digunakan karena proses sintesis dapat dilakukan dengan metode sol gel melalui pengaturan pH pada kondisi pH optimum 1,0 yang dapat

memperoleh ukuran grain naopartikel pada rentang kurang dari 100 nm. Ukuran grain yang lebih kecil diharapkan akan menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi.

Oleh sebab itu, pada penelitian ini, TTIP akan digunakan sebagai *precursor* pembentuk  $\text{TiO}_2$  sebagai ETL untuk sel surya perovskite. Penelitian akan dilakukan terhadap 4 sampel dengan rasio ketebalan  $\text{TiO}_2$  berbeda, dan rasio penyusun sel surya perovskite lainnya dibuat tetap. Hal tersebut diharapkan akan berpengaruh pada peningkatan efisiensi sel surya film tipis berbasis perovskite.

## METODE

Penelitian ini dimulai dengan pembuatan sampel yang terdiri dari sintesis  $\text{TiO}_2$  (TTIP) sebagai ETL, TTIP ke atas kaca ITO dengan menggunakan metode spin coating, pembuatan perovskite sebagai lapisan absorber, pembuatan Spiro-OMeTAD sebagai HTL, penyusunan sel surya perovskite, dan karakterisasi. Lapisan sel surya yang dibentuk dari prosedur ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Struktur sel surya perovskite

### Sintesis $\text{TiO}_2$ (TTIP)

Pembuatan  $\text{TiO}_2$  ini dibuat menggunakan *precursor titanium tetraisopropoxide* (TTIP), propanol, asam asetat ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), dan Triton X-100. Tahapan dalam proses ini dibagi menjadi 2. Tahap satu dimulai dengan pencampuran *titanium tetraisopropoxide* (TTIP) sebanyak 10 ml dengan propanol sebanyak 40 ml yang diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan putaran sebesar 5000 rpm selama 30 menit. Tahap dua dimulai dengan pencampuran asam asetat ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) sebanyak 5 ml dengan propanol sebanyak 10 ml yang selanjutnya diteteskan oleh Triton x-100 sebanyak 15 tetes dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan putaran sebesar 5000 rpm selama 30 menit. Selanjutnya menggabungkan hasil dari tahap 1 ke tahap 2 sebanyak 1 ml tiap menit lalu diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan putaran sebesar 5000 rpm selama 120 menit dengan suhu  $60^\circ\text{C}$  sampai berbentuk pasta.

### Deposisi Lapisan Film Tipis $\text{TiO}_2$

Pasta  $\text{TiO}_2$  yang telah disiapkan kemudian dioleskan pada bagian atas substrat ITO menggunakan batang pengaduk kaca, agar pasta  $\text{TiO}_2$  tersebut tersebar merata pada permukaan substrat, digunakan metode *spin coating*. Ketebalan divariasikan menggunakan metode ini dengan memvariasikan banyaknya nilai putaran rpm yang digunakan pada setiap sampel. Sampel 1 dengan putaran 3000 rpm selama 20 detik, sampel 2 dengan putaran 4000 rpm selama 20 detik, sampel 3 dengan putaran 5000 rpm selama 20 detik, sampel 4 dengan putaran 6000 rpm selama 20 detik dan setiap sampel film tipis  $\text{TiO}_2$  tersebut dibiarkan mengering. Setelahnya, dilakukan tahap sintering menggunakan *furnace* yang dipanaskan pada suhu  $400^\circ\text{C}$  selama 30 menit. Film tipis  $\text{TiO}_2$  yang sudah selesai di sintering kemudian diukur menggunakan mikrometer sekrup digital untuk diukur ketebalannya.

### Sintesis Perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

Pembuatan perovskite ini dibuat menggunakan bahan *Methylammonium Iodide* (MAI), *lead (II) Iodide* ( $\text{PbI}_2$ ), *Dimetil Formide* (DMF), dan *Dimetil Sulfoksida* (DMSO). Tahapan yang dilakukan adalah

dengan menimbang bahan kering *Methylammonium Iodide* (MAI) sebanyak 190,7 mg dan *lead (II) Iodide* ( $\text{PbI}_2$ ) sebanyak 553,2 mg menggunakan timbangan analitik, lalu dimasukkan ke dalam botol sampel ukuran 3 ml. Kemudian tambahkan bahan pelarut yaitu *Dimetil Formide* (DMF) sebanyak 100  $\mu\text{l}$  dan *Dimetil Sulfoksida* (DMSO) sebanyak 900  $\mu\text{l}$  ke dalam botol sampel. Lalu aduk menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu 60<sup>o</sup> C dengan kecepatan putaran sebesar 5000 rpm selama 2 jam sampai terlarut.

#### *Preparasi Pembuatan Sel Surya Perovskite*

Film tipis  $\text{TiO}_2$  yang sudah selesai di sintering kemudian ditempelkan selotip *heat resistant tape* dengan ukuran 1x1  $\text{cm}^2$  di atas substrat ITO untuk melakukan deposisi perovskite. Meneteskan 1 tetes (8  $\mu\text{l}$ ) perovskite ke atas film tipis  $\text{TiO}_2$  menggunakan metode *spin coating* dua langkah, dengan langkah pertama adalah 40 detik dengan putaran 2000 rpm dan tahap *spin coating* kedua selama 20 detik dengan putaran 6000 rpm, lalu di sintering menggunakan oven pada suhu 100<sup>o</sup> C selama 10 menit lalu di amkan. Setelah itu melakukan deposisi untuk lapisan Spiro-OMeTAD dengan meneteskan 1 tetes (8  $\mu\text{l}$ ) Spiro-OMeTAD ke atas film tipis ITO- $\text{TiO}_2$ -perovskite, menggunakan metode *spin coating* dua langkah, lalu di sintering menggunakan oven pada suhu 100 °C selama 10 menit dan di amkan. Selanjutnya menempelkan kaca Pt pada film tipis ITO/ $\text{TiO}_2$ /perovskite/Spiro-OMeTAD dengan direkatkan menggunakan polimer resin dan disimpan dibawah sinar UV selama 2 menit untuk menghilangkan celah yang akan menurunkan kualitas kinerja sel surya perovskite. Kemudian menempelkan tembaga pada permukaan yang digunakan dan pada bagian sisi kosong sel film tipis yang sebelumnya selotip *heat resistant tape* sudah dilepaskan pada sisi kosong tersebut untuk memudahkan dalam proses karakterisasi.

#### *Karakterisasi*

Karakterisasi untuk menentukan sifat optik dari sel surya menggunakan alat spektrofotometer UV-Vis jenis UV 1240 yang dapat menentukan nilai absorbansi, nilai transmitansi, panjang gelombang cahaya tampak dan nilai energi gap. Sedangkan untuk menentukan sifat listrik dari sel surya menggunakan alat simulator solar standar AM 1.5 100mW/cm<sup>2</sup> yang dapat menentukan nilai densitas arus pendek ( $J_{sc}$ ), rapat arus ( $J$ ), *Fill Factor* (FF), tegangan sirkuit terbuka ( $V_{oc}$ ), tegangan ( $V$ ), dan efisiensi ( $\eta$ ) yang ditunjukkan pada Persamaan (1).

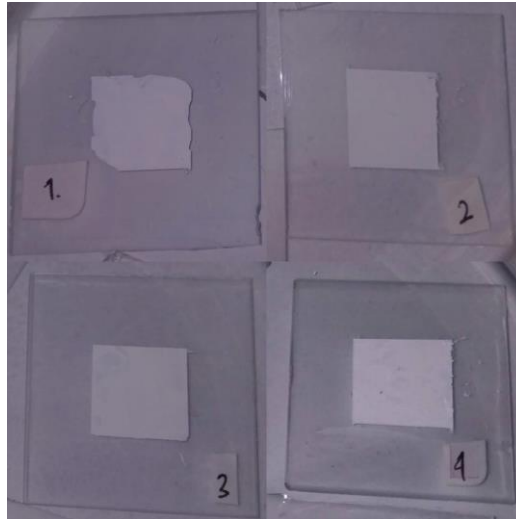
$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot J_{sc}}{P_{in}} \times FF \quad (1)$$

Efisiensi keseluruhan atau kinerja dari sel surya akan dapat ditentukan dengan Persamaan 1, dimana nilai  $P_{in}$  merupakan *power incident* atau kekuatan insiden, nilainya ditentukan oleh sifat insiden spektrum yang dikeluarkan oleh sel surya.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### *Identifikasi Ketebalan Lapisan Tipis $\text{TiO}_2$*

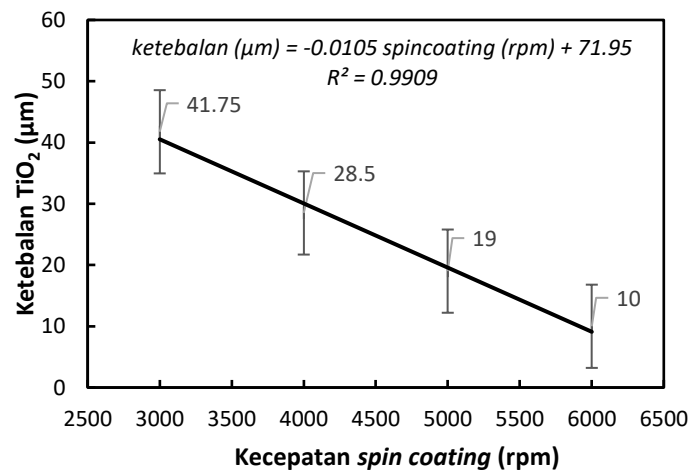
Pengukuran ketebalan menggunakan mikrometer sekrup digital untuk setiap sampel pada Gambar 2, dengan cara mengukur terlebih dahulu ketebalan kaca substrat yang digunakan, kemudian mengukur lapisan  $\text{TiO}_2$  yang telah dideposisikan pada kaca substrat dan ketebalan lapisan tipis akan dihasilkan dari perhitungan selisih kedua hasil tersebut. Hasil pengukuran ketebalan rata-rata lapisan  $\text{TiO}_2$  ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 2. Lapisan tipis TiO<sub>2</sub> dengan variasi ketebalan berbeda (1) 10,00 μm, (2) 19,00 μm, (3) 28,50 μm, (4) 41,75 μm

Tabel 1. Ketebalan lapisan TiO<sub>2</sub>

| Kecepatan <i>spin coating</i> (rpm) | Ketebalan rata-rata (μm) | Standar deviasi (μm) | Standar eror (μm) |
|-------------------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------|
| 3000                                | 41,75                    | 6,94                 | 3,47              |
| 4000                                | 28,50                    | 1,91                 | 0,95              |
| 5000                                | 19,00                    | 1,50                 | 0,75              |
| 6000                                | 10,00                    | 1,41                 | 0,70              |



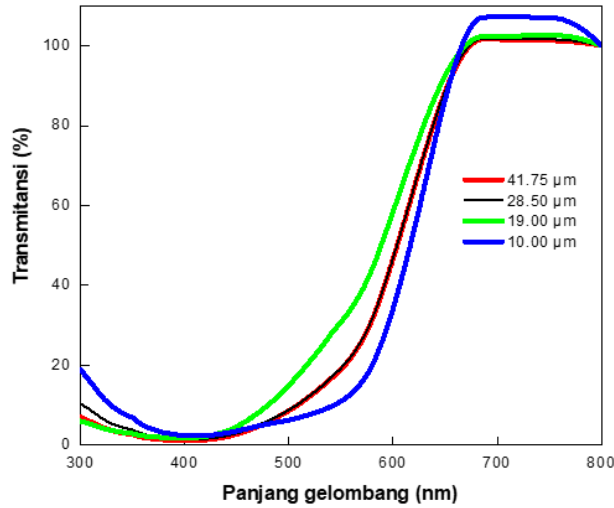
Gambar 2. Hubungan ketebalan TiO<sub>2</sub> terhadap kecepatan *spin coating*

Penurunan dari tingkat ketebalan menunjukkan bahwa semakin besar tingkat kecepatan putaran pada *spin coating*, maka ketebalan pada lapisan tipis TiO<sub>2</sub> yang telah dideposisikan akan semakin tipis, ditunjukkan pada Gambar 3. *Trendline* grafik yang diperoleh yaitu linear negatif dengan koefisien korelasi yang menyatakan keterkaitan antara dua variabel (ketebalan TiO<sub>2</sub> dan kecepatan *spin coating*) sebesar 0,9909 yang menunjukkan bahwa setiap 1 rpm dari *spin coating* dihasilkan ketebalan sebesar -

0,0105 + 71,95  $\mu\text{m}$ . Formula ini dapat digunakan kedepannya untuk dengan mudah mencari ketebalan yang diinginkan sesuai dari kecepatan *spin coating* yang akan digunakan dengan lamanya putaran adalah 20 detik.

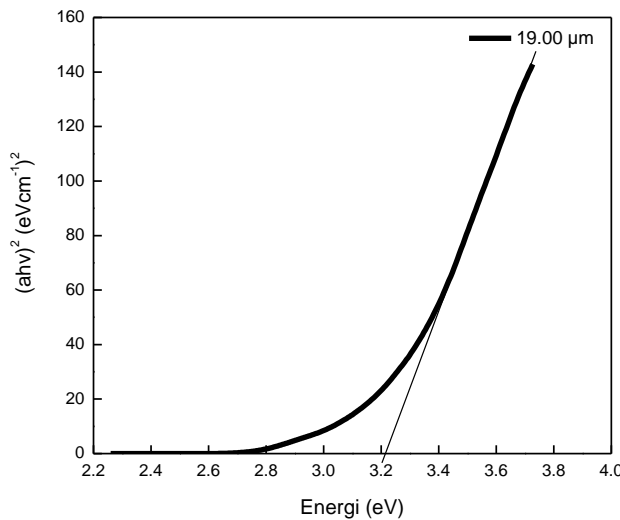
*Sifat Optik Lapisan TiO<sub>2</sub>*

Pola transmisi yang dihasilkan pada penelitian ini berada direntang panjang gelombang 300-800 nm, dengan puncak transmisi terjadi pada rentang panjang gelombang 680-760 nm, ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Spektrum transmisi variasi ketebalan lapisan TiO<sub>2</sub>

Gambar 4 menunjukkan nilai transmisi dari sampel TiO<sub>2</sub> dengan ketebalan 10  $\mu\text{m}$  adalah yang paling tinggi dan akan meneruskan cahaya dengan baik yaitu sebesar 107,14% dibandingkan dengan nilai transmisi sampel variasi lapisan TiO<sub>2</sub> yang lainnya. Sampel TiO<sub>2</sub> dengan ketebalan 41,75  $\mu\text{m}$ , 38,50  $\mu\text{m}$ , dan 19,00  $\mu\text{m}$  memiliki nilai transmisi yang akan meneruskan cahaya masing-masing sebesar 101,65 %, 101,82 %, dan 102,64%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai transmisi dari variasi lapisan TiO<sub>2</sub> meningkat bersamaan dengan berkurangnya ketebalan lapisan. Hal tersebut terjadi karena lapisan variasi ketebalan yang lebih tipis akan lebih transparan dan dapat melewatkan cahaya tampak dengan intensitas yang lebih tinggi, sesuai dengan literatur (Amananti & Sutanto, 2015).



Gambar 4. *Tauc Plot* untuk energi gap lapisan TiO<sub>2</sub>

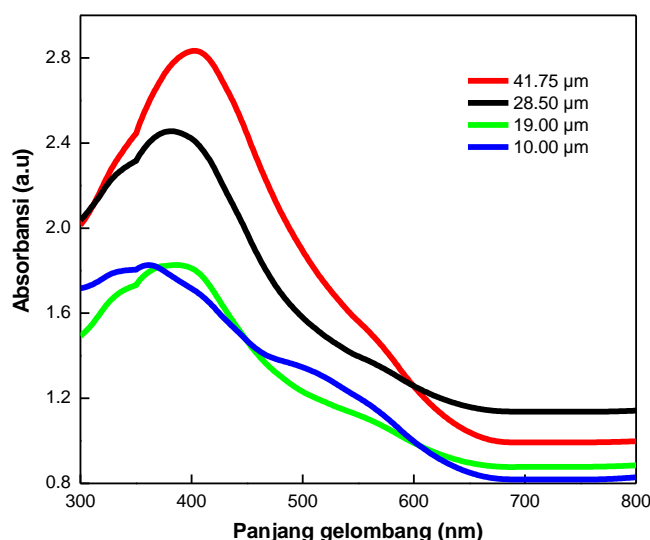
Nilai energi gap  $\text{TiO}_2$  dihitung menggunakan metode *Tauc Plot* yang ditunjukkan pada Gambar 5 dari perolehan data hasil spektrofotometer Uv-Vis menghasilkan nilai energi gap dari  $\text{TiO}_2$  yang tidak berbeda jauh dari variasinya ketebalan lapisan ditunjukkan pada Tabel 3. Menunjukkan bahwa ketebalan lapisan tidak mempengaruhi nilai energi gap yang dimiliki oleh  $\text{TiO}_2$ . Hal tersebut terjadi karena menggunakan jenis pelarut dan konsentrasi yang sama pada setiap variasi ketebalan yang berbeda. Hasil *bandgap* yang diperoleh pun sesuai dengan literatur sebesar 3,2 eV yang merupakan hasil *bandgap* optimum untuk  $\text{TiO}_2$  (Arshad dkk., 2021).

Tabel 3. Nilai energi gap (*bandgap*) yang didapatkan dari Kurva Tauc Plot

| Ketebalan $\text{TiO}_2$ ( $\mu\text{m}$ ) | <i>Bandgap</i> (eV) |
|--|---------------------|
| 41,75                                      | 3,21                |
| 28,50                                      | 3,22                |
| 19,00                                      | 3,21                |
| 10,00                                      | 3,22                |

*Sifat Optik Lapisan Perovskite yang dideposisi dengan  $\text{TiO}_2$*

Pola absorbansi yang dihasilkan pada penelitian ini berada direntang panjang gelombang 300-800 nm, dengan puncak absorbansi terjadi pada rentang panjang gelombang 360-480 nm.



Gambar 5. Spektrum absorbansi variasi ketebalan lapisan perovskite yang dideposisi pada lapisan  $\text{TiO}_2$

Gambar 6 menunjukkan nilai absorbansi oleh sampel perovskite yang dideposisikan pada  $\text{TiO}_2$  dengan ketebalan 10  $\mu\text{m}$  adalah yang paling rendah yaitu sebesar 1,81 a.u dibandingkan dengan nilai absorbansi sampel variasi lapisan Perovskite yang sudah dideposisikan pada  $\text{TiO}_2$  yang lainnya. Sampel dengan ketebalan 19  $\mu\text{m}$ , 28,50  $\mu\text{m}$ , dan 41,75  $\mu\text{m}$  memiliki nilai absorbansi masing-masing sebesar 1,82 a.u, 2,45 a.u, dan 2,83 a.u. Nilai absorbansi yang dihasilkan bersesuaian dengan spektrum absorbansi pada penelitian yang dilakukan oleh Zhao J dan kawan-kawan (Zhao dkk., 2017). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai absorbansi dari sampel perovskite yang dideposisikan pada variasi lapisan  $\text{TiO}_2$  meningkat bersamaan dengan bertambahnya ketebalan lapisan. Hal tersebut terjadi karena lapisan variasi ketebalan yang lebih tebal akan lebih tidak transparan dan dapat menyerap cahaya tampak dengan intensitas yang lebih tinggi karena terdapat banyaknya atom-atom bahan yang terlibat dalam proses penyerapan berkas cahaya.

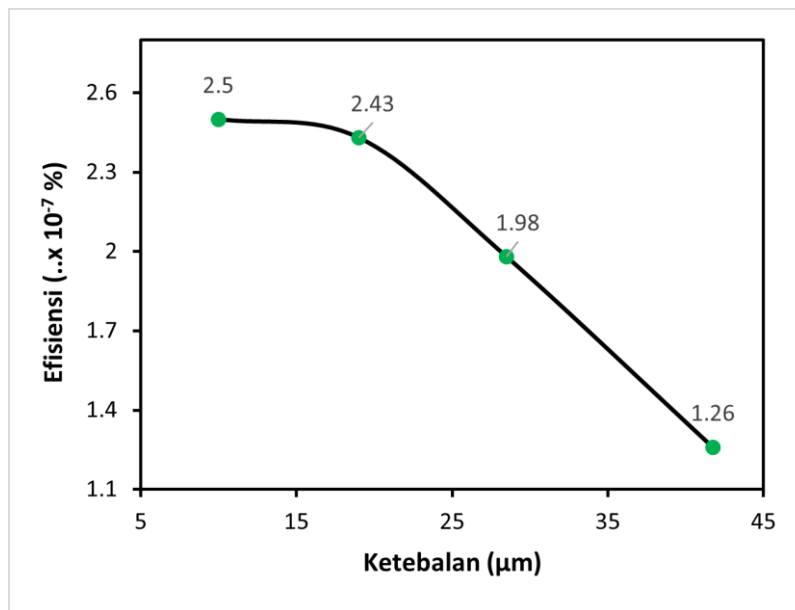
*Sifat Listrik Sel Surya Perovskite*

Nilai karakteristik sifat listrik sel surya perovskite ditunjukkan pada Tabel 4. Nilai efisiensi dari sel surya yang dihasilkan berbeda-beda bergantung pada ketebalan setiap lapisan TiO<sub>2</sub>. Sampel sel surya dengan ketebalan 10,00 μm menghasilkan nilai efisiensi terbesar dibandingkan dengan sampel lainnya, yaitu sebesar 2,50 x 10<sup>-7</sup>%.

Tabel 4. Nilai karakteristik I-V sel surya perovskite

| Ketebalan (μm) | Jsc<br>(x10 <sup>-6</sup> mA/cm <sup>2</sup> ) | FF (%) | Voc (V) | Eff<br>(x10 <sup>-7</sup> %) |
|----------------|--|--------|---------|------------------------------|
| 10,00          | 0,30   | 23,00  | 0,0656  | 2,50                         |
| 19,00          | 4,30   | 4,04   | 0,0656  | 2,43                         |
| 28,50          | 5,10   | 2,17   | 0,0656  | 1,98                         |
| 41,75          | 5,20   | 1,00   | 0,0656  | 1,26                         |

Semakin tebalnya lapisan TiO<sub>2</sub> sebagai ETL yang berfungsi untuk mengangkut electron menuju elektroda (ITO), dari lapisan absorber, maka cahaya yang masuk akan terblokk saat menuju partikel TiO<sub>2</sub> terluar (Lee dkk., 2019). Perilaku tersebut yang menyebabkan semakin tebalnya lapisan TiO<sub>2</sub> maka efisiensi yang dihasilkan pun semakin rendah, ditunjukkan pada Gambar 7, membuktikan bahwa ketebalan dari lapisan TiO<sub>2</sub> akan mempengaruhi sifat listrik dan efisiensi dari sel surya perovskite. Nilai efisiensi sel surya yang dihasilkan rendah, dapat dipengaruhi oleh nilai FF, karena nilai FF yang dihasilkan sedikit berbeda dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Zhao dan kawan-kawan yang memiliki nilai efisiensi lebih dari 5% (Zhao dkk., 2017).

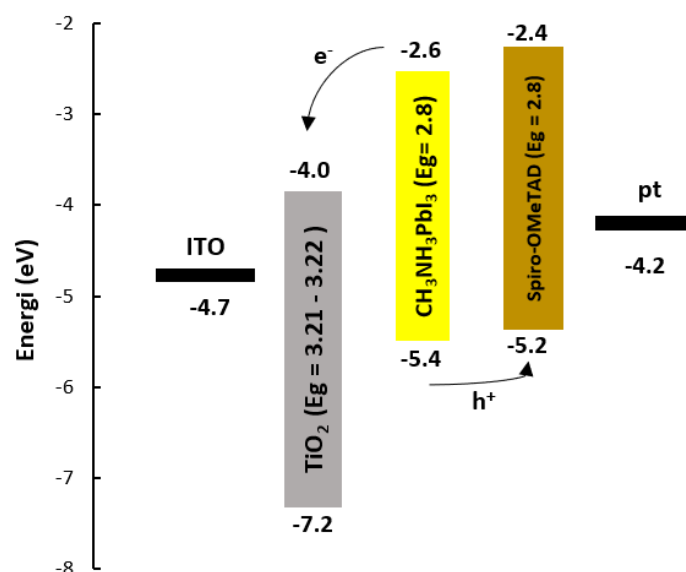


Gambar 6. Hubungan efisiensi sel surya terhadap ketebalan TiO<sub>2</sub>.

*Tingkat Energi Sel Surya Perovskite*

Mekanisme pergeseran tingkat pita energi konduksi pada sel surya perovskite ditunjukkan pada Gambar 8 yaitu skema diagram tingkat energi.





Gambar 7. Diagram tingkat energi sel surya perovskite

Saat sel terkena paparan cahaya matahari, akan tercipta eksiton (pasangan *electron-hole*) karena lapisan perovskite ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ) akan menyerap foton dan elektron akan tereksitasi. Bahan perovskite ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ) yang memiliki perbedaan energi ikat eksiton akan menyebabkan peristiwa rekombinasi atau saat suatu *electron* mendekati *hole* dan tertarik kedalamnya, jika dari perbedaan energi ikat eksiton tersebut membentuk muatan bebas (*electron* dan *hole*) yang menghasilkan arus.

Tingkat energi yang lebih tinggi akan selalu ditempati *hole* saat berpindah, sedangkan tingkat energi yang lebih rendah akan selalu ditempati *electron* saat berpindah (Danilchuk & Dahal, n.d.). *Electron* bebas tersebut akan terdifusi menuju pita konduksi  $\text{TiO}_2$  yang memiliki tingkat energi lebih rendah, yaitu dari pita konduksi perovskite dengan energi ikatnya sebesar -2,6 eV ke pita konduksi  $\text{TiO}_2$  dengan energi ikatnya sebesar -4,0 eV. *Hole* akan berdifusi menuju pita valensi dari Spiro-OMeTAD yang memiliki tingkat energi lebih tinggi, yaitu dari pita valensi perovskite dengan energi ikatnya sebesar -5,4 eV ke pita valensi Spiro-OMeTAD dengan energi ikatnya sebesar -5,2 eV. Selanjutnya arus pada rangkaian luar akan mengalir dari sambungan ITO dan Pt saat *electron* dan *hole* dibawa dan dikumpulkan ke ITO dan Pt.

## SIMPULAN

Ketebalan lapisan  $\text{TiO}_2$  sebagai ETL mempengaruhi sifat optik dan sifat listrik dari sel surya perovskite. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sifat optik pada nilai absorbansi dari sampel perovskite yang dideposisikan pada variasi lapisan  $\text{TiO}_2$  meningkat bersamaan dengan bertambahnya ketebalan lapisan. Sifat listrik dari sel surya perovskite pada setiap sampel variasi ketebalan, nilai efisiensi yang dihasilkan akan semakin meningkat bersamaan dengan berkurangnya ketebalan lapisan.

## REFERENSI

- Afzali, M., Mostafavi, A., & Shamspur, T. (2020). Performance enhancement of perovskite solar cells by rhenium doping in nano- $\text{TiO}_2$  compact layer. *Organic Electronics*, 86, 105907.
- Amananti, W., & Sutanto, H. (2015). Analisis sifat optis lapisan tipis  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2:\text{ZnO}$ , dengan dan tanpa lapisan penyangga yang dideposisikan menggunakan metode sol-gel spray coating. *Jurnal Fisika Indonesia*, 19(55), 41-44.
- Anderson, A. L., & Binions, R. (2014). The effect of tween® surfactants in sol-gel processing for the production of  $\text{TiO}_2$  thin films. *Coatings*, 4(4), 796-809.

- Arshad, Z., Khoja, A. H., Shakir, S., Afzal, A., Mujtaba, M. A., Soudagar, M. E. M., Fayaz, H., Saleel C, A., Farukh, S., & Saeed, M. (2021). Magnesium doped TiO<sub>2</sub> as an efficient electron transport layer in perovskite solar cells. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101101.
- Cherrette, V. L., Hutcherson, C. J., Barnett, J. L., & So, M. C. (2018). Fabrication and characterization of perovskite solar cells: an integrated laboratory experience. *Journal of Chemical Education*, 95(4), 631–635.
- Choudhary, P., & Srivastava, R. K. (2019). Sustainability perspectives- a review for solar photovoltaic trends and growth opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 227, 589–612.
- Danilchuk, D., & Dahal, L. Development of low-cost hybrid perovskite solar cells. *Proceedings of The National Conference on Undergraduate Research (NCUR)*, University of North Carolina Asheville Asheville, North Carolina.
- El-Adawi, M. A. K., & Al-Nuaim, I. A. (2014). New approach to modeling a solar cell in relation to its efficiency-laplace transform technique. *Optics and Photonics Journal*, 4(8), 219–227.
- Huang, B. J., Guan, C. K., Huang, S. H., & Su, W. F. (2020). Development of once-through manufacturing machine for large-area Perovskite solar cell production. *Solar Energy*, 205, 192–201.
- Lee, D. G., Kim, M. cheol, Kim, B. J., Kim, D. H., Lee, S. M., Choi, M., Lee, S., & Jung, H. S. (2019). Effect of TiO<sub>2</sub> particle size and layer thickness on mesoscopic perovskite solar cells. *Applied Surface Science*, 477, 131–136.
- Liu, Y., Li, Y., Wu, Y., Yang, G., Mazzarella, L., Procel-Moya, P., Tamboli, A. C., Weber, K., Boccard, M., Isabella, O., Yang, X., & Sun, B. (2020). High-efficiency silicon heterojunction solar cells: materials, devices and applications. *Materials Science and Engineering*, 142, 100579.
- Nair, S., Patel, S. B., & Gohel, J. V. (2020). Recent trends in efficiency-stability improvement in perovskite solar cells. *Materials Today Energy*, 17, 100449.
- Noori, L., Hoseinpour, V., & Shariatinia, Z. (2022). Optimization of TiO<sub>2</sub> paste concentration employed as electron transport layers in fully ambient air processed perovskite solar cells with a low-cost architecture. *Ceramics International*, 48(1), 320–336.
- Pala, L. P. R., Uday, V., Gogoi, D., & Peela, N. R. (2020). Surface and photocatalytic properties of TiO<sub>2</sub> thin films prepared by non-aqueous surfactant assisted sol-gel method. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104267.
- Patwardhan, S., Cao, D. H., Hatch, S., Farha, O. K., Hupp, J. T., Kanatzidis, M. G., & Schatz, G. C. (2015). Introducing perovskite solar cells to undergraduates. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 6(2), 251–255.
- Salman, S. H., Shihab, A. A., & Elttayef, A. H. K. (2019). Studying the effect of the type of substrate on the structural, morphology and optical properties of TiO<sub>2</sub> thin films prepared by RF magnetron sputtering. *Energy Procedia*, 157, 199–207.
- Shakir, S., Khan, Z. S., Ali, A., Akbar, N., & Musthaq, W. (2015). Development of copper doped titania based photoanode and its performance for dye sensitized solar cell applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 652, 331–340.
- Sharif, A., Meo, M. S., Chowdhury, M. A. F., & Sohag, K. (2021). Role of solar energy in reducing ecological footprints: An empirical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126028.
- Slameršak, A., Kallis, G., & Neill, D. W. O. (2022). Energy requirements and carbon emissions for a low-carbon energy transition. *Nature Communications*, 13(1), 6932.
- Suparwoko, & Qamar, F. A. (2022). Techno-economic analysis of rooftop solar power plant implementation and policy on mosques: an Indonesian case study. *Scientific Reports*, 12(1).
- Wang, S., Zhu, Y., Liu, B., Wang, C., & Ma, R. (2019). Enhanced performance of mesostructured perovskite solar cells with a composite Sn<sup>4+</sup>-doped TiO<sub>2</sub> electron transport layer. *Ionics*, 25(9), 4509–4516.

- Yazid, S. A., Rosli, Z. M., & Juoi, J. M. (2019). Effect of titanium (IV) isopropoxide molarity on the crystallinity and photocatalytic activity of titanium dioxide thin film deposited via green sol-gel route. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 1434–1439.
- Zhao, J., Wei, L., Liu, J., Wang, P., Liu, Z., Jia, C., & Li, J. (2017). A sintering-free, nanocrystalline tin oxide electron selective layer for organometal perovskite solar cells. *Science China Materials*, 60(3), 208–216.