

## BAB IV

### HASIL PEMBAHASAN

#### 4.1 Proses Sintesis *Perovskite* CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3-x</sub>Br<sub>x</sub>,

Proses sintesis bahan pada penelitian ini terdiri dari tiga tahapan yakni TiO<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3-x</sub>Br<sub>x</sub>, dan Spiro-OMeTAD. proses sintesis bahan-bahan tersebut menggunakan metode pengadukan magnet dan ultrasonikasi. Penggunaan bahan maksimal 24 jam setelah bahan di gunakan. Setelah proses sintesis larutan harus segera dideposisikan untuk menghindari degradasi bahan karena kelembaban. Pelarutan bahan PbI<sub>2</sub>, PbBr, MAI, dan FAI dengan bantuan ultrasonikasi dapat membuat warna kuning pada *perovskite* dan kekentalan larutan berubah. Perubahan warna dan kekentalan tersebut menunjukkan bahwa bahan-bahan tersebut dan pelarut DMF dan DMSO tercampur. Sebelum dilakukan pelarutan dengan ultrasonikasi terdapat endapan di bawah botol yang menunjukkan bahwa bahan-bahan tersebut belum terlarut.

#### 4.2 Proses Fabrikasi Sel Surya *Perovskite*

Proses fabrikasi sel surya *perovskite* dimulai dengan preparasi substrat ITO (*Indium Tin Oxide*). Substrat ITO dibersihkan dari kontaminasi yang dapat mengganggu kualitas lapisan yang akan dideposisikan. Pembersihan substrat dilakukan dengan menggunakan sabun, air deionisasi, aseton, dan isopropanol untuk memastikan tidak ada residu yang tersisa.

Setelah proses pencucian, substrat dikeringkan dengan sinar UV, yang juga berfungsi untuk mengaktifkan permukaan ITO, sehingga meningkatkan adhesi antara lapisan *perovskite* dan substrat. Setelah kering substrat harus dipastikan tidak dalam keadaan terbalik dengan menggunakan multimeter..

Setelah preparasi substrat, tahap berikutnya adalah deposisi *glove box*. Proses ini dilakukan dalam lingkungan yang terkontrol dalam *glove box*. Kadar oksigen dan kelembapan dalam *glove box* dijaga pada 3% oksigen dan kelembapan 30%. Kadar oksigen dan kelembapan yang rendah ini diperlukan agar *perovskite* tidak terdegradasi, hal ini disebabkan ketidakstabilannya *perovskite*, dan hal itu berdampak pada performa sel surya. Substrat beserta bahan-bahan yang akan dideposisikan dimasukkan ke dalam *glove box*. Kemudian dilakukan proses purging pada *glove box* untuk mengurangi kadar oksigen dan kelembapan udara dengan menyirkulasikan gas nitrogen.

Langkah pertama dalam deposisi adalah penambahan lapisan  $\text{TiO}_2$  (*titanium dioxide*) sebagai *electron transport layer* (ETL).  $\text{TiO}_2$  dipilih karena memiliki konduktivitas yang baik dan stabilitas yang tinggi, yang memungkinkan transfer elektron yang efisien dari lapisan aktif ke lapisan konduktor. Lapisan ini dideposisikan menggunakan metode *spin coating*, di mana kecepatan putaran dan waktu deposisi adalah 4000 rpm dan 20 detik. Setelah deposisi, lapisan  $\text{TiO}_2$  dipanaskan atau *annealing* untuk meningkatkan kualitas dan stabilitasnya.

Setelah lapisan  $\text{TiO}_2$  siap, lapisan aktif *perovskite*, seperti  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Br}_x$ , dideposisikan. Proses deposisi *perovskite* juga dilakukan dengan metode *spin coating* dengan variasi kecepatan putaran dan waktu deposisi. Variasi kecepatan rotasi bertujuan untuk menganalisis pengaruh kecepatan terhadap morfologi film

yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan efek dilusi larutan yang berbeda pada substrat, yang dipengaruhi oleh kecepatan rotasi; semakin tinggi kecepatan rotasi, semakin sedikit larutan yang tertinggal, yang dapat meningkatkan transmitansi lapisan. Saat melakukan waktu dan kecepatan rotasi yang tinggi, maka akan menghilangkan lebih banyak larutan dari substrat sehingga mengakibatkan penurunan ketebalan lapisan dan morfologi permukaan. Selain itu, variasi waktu deposisi dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh durasi terhadap karakteristik lapisan yang terbentuk. Kemudian Lapisan *perovskite* dilakukan pemanasan atau *annealing* dua tahap untuk meningkatkan kekristalan dan mengurangi cacat dalam film *perovskite* yakni pada 60 °c dan 100 °c. Proses *annealing* dua tahap memungkinkan kristalisasi film *perovskite* yang lebih terkontrol. Pada tahap awal, pemanasan dilakukan pada suhu yang lebih rendah, yang memungkinkan terbentuknya ikatan hidrogen antara ion metilamonium dan halida secara bertahap. Ini membantu mengontrol pertumbuhan kristal dengan lebih baik. Hasilnya adalah film yang lebih seragam dan perangkat yang lebih konsisten [19].

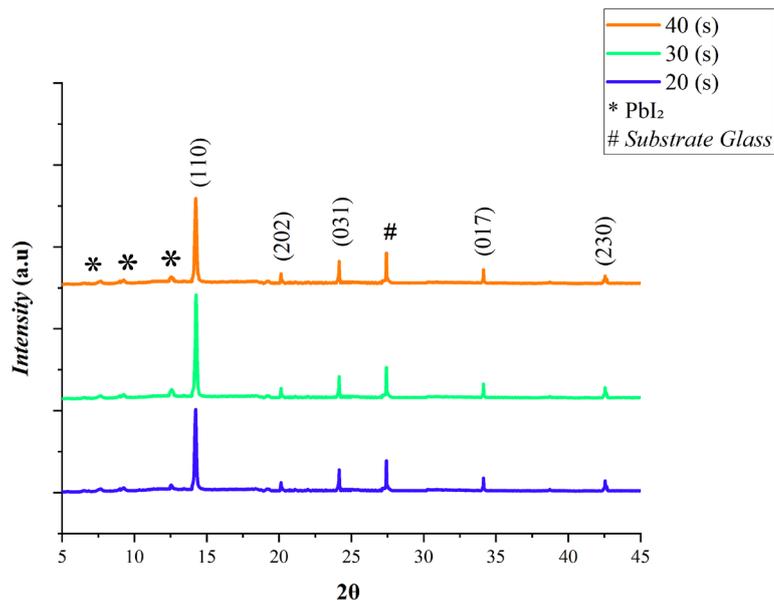
Setelah lapisan *perovskite*, lapisan HTL dideposisikan menggunakan Spiro-OMeTAD. Proses deposisi dilakukan dengan *spin coating*, dan lapisan HTL ini juga melalui proses *annealing* untuk meningkatkan kinerja dan stabilitas lapisan. Tahap akhir dalam fabrikasi sel surya *perovskite* adalah deposisi lapisan konduktor dengan menggunakan *silver paste*. Metode digunakan adalah *screen printing*. Metode *screen printing* adalah metode yang sederhana dan biaya pembuatannya murah. Namun karena metode ini dilakukan dengan manual tanpa bantuan mesin, metode ini memiliki tantangan tersendiri, seperti tidak konsisten dalam ketebalan lapisan yang dapat menyebabkan masalah dalam konduktivitas

dan performa sel secara keseluruhan. Ketidakrataan lapisan *silver paste* dapat mengakibatkan resistansi yang tinggi, sehingga mempengaruhi efisiensi sel surya.

### 4.3 Pengaruh Durasi *Spin Coating* saat Deposisi *Perovskite* terhadap Performa Sel Surya

#### 4.3.1 Hasil analisa XRD

Hasil analisa XRD digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristalografi, identifikasi fase, dan sifat mikro struktur bahan *perovskite*. pada analisa XRD ini dilakukan pada variasi durasi *spin coating* 20, 30, dan 40 detik kecepatan 4000 rpm terhadap pola XRD yang terbentuk dan ukuran kristal. Hasil pola XRD dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut



**Gambar 4.1** Pola XRD Lapisan *Perovskite* dengan Variasi Durasi putar

Gambar 4.1 menunjukan beberapa puncak difraksi pada  $2\theta$  yang terdeteksi yakni pada  $12,57^\circ$ ,  $14,23^\circ$ ,  $20,13^\circ$ ,  $24,15^\circ$ ,  $27,42^\circ$ ,  $34,13^\circ$ ,  $42,53^\circ$ , dan  $47,62^\circ$ . Dari puncak difraksi tersebut didapatkan bidang hkl yakni (100),

(110), (111), (200), (210), (220), dan (230). Pada Gambar 4.1 tiap variasi waktu menunjukkan puncak difraksi karakteristik *perovskite* yang kuat, terutama puncak tajam pada (100) di sekitar  $14^\circ$ . Hasil puncak difraksi  $14^\circ$  memiliki intensitas tertinggi di waktu putar 40 detik yakni 11308, sedangkan untuk waktu putar 20 detik dan 30 detik secara berturut turut adalah 10180 dan 10569. Data ini telah sesuai dengan penelitian yang dilakukan Mohammed, et.al (2020). Semua film yang disintesis menunjukkan fase polikristalin dan terlihat jelas bahwa intensitas puncak meningkat seiring dengan bertambahnya waktu rotasi, yang disebabkan oleh peningkatan kristalinitas dan susunan yang teratur [14].

Selain itu, pola XRD menunjukkan terdapat puncak lain yang berasal dari  $\text{PbI}_2$ . Seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4.1. Puncak  $\text{PbI}_2$  terdapat pada  $12,567^\circ$ . Intensitas puncak  $\text{PbI}_2$  paling rendah terdapat pada waktu putar 40 detik yakni 869 sedangkan intensitas tertinggi ada pada waktu putar 20 detik yakni 1213. Penurunan intensitas  $\text{PbI}_2$  seiring dengan peningkatan waktu putar ini dapat meningkatkan efisiensi sel surya *perovskite* (PSC) karena mendorong transport elektron dari film *perovskite* [14]. Selain itu dengan pengurangan intensitas  $\text{PbI}_2$  menunjukkan bahwa *perovskite* seragam. Pengaruh durasi putar juga dapat dilihat pada ukuran kristal. Untuk melihat pengaruh variasi *spin coating* pada ukuran Kristal dapat dilihat pada Tabel 4.1

**Tabel 4.1** Ukuran Kristal *Perovskite* dengan Variasi Durasi Putar

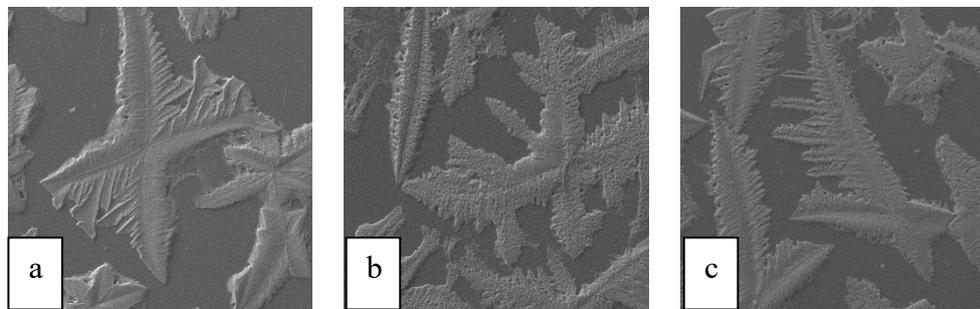
Durasi	Phase	Peak		Ukuran Kristal (nm)
		2 $\theta$ (degree)	FWHM (degree)	
20	CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3x-Brx</sub>	14,23689	0,14781	53,33235
30	CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3x-Brx</sub>	14,25952	0,14144	55,73289
40	CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3x-Brx</sub>	14,225	0,13564	58,11823

Menurut tabel 4.1 terdapat pengaruh durasi putar *spin coating* terhadap ukuran kristal. Dapat dilihat ukuran kristal terbesar adalah durasi 40 detik dengan ukuran kristal 58,11823 nm sedangkan pada durasi 30 detik dan 20 detik berturut-turut adalah 55,73289 nm dan 53,33235 nm dari data tersebut dapat diketahui semakin lama durasi putar maka ukuran kristal semakin besar. Data ini telah sesuai dengan penelitian sebelumnya. Pada penelitian sebelumnya, Pengukuran ukuran kristalit yang dihitung menggunakan rumus Debye-Scherrer menunjukkan bahwa ukuran kristalit untuk sampel pada 60 detik lebih besar dibandingkan dengan 30 detik dan 45 detik. Kristal *perovskite* yang lebih besar cenderung memiliki batas butir yang lebih sedikit yang mengurangi kepadatan cacat dan meningkatkan transportasi muatan [15].

#### 4.3.2 Hasil Karakterisasi SEM

SEM digunakan untuk menganalisis morfologi permukaan dan penampang PSC, memberikan gambar resolusi tinggi terkait struktur dan

distribusi lapisan sel surya *perovskite*. Cara kerja SEM sama seperti mikroskop hanya saja jenis mikroskopnya elektron sehingga menghasilkan gambar sampel dengan cara memindai permukaan menggunakan sinar elektron yang terfokus dengan pembesaran hingga skala tertentu. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan penampakan *perovskite* dengan bentuk seperti jarum-jarum. Sampel yang akan dianalisis adalah lapisan *perovskite* dengan kecepatan putar 4500 rpm dan variasi durasi putar 20, 30, dan 40 detik.



**Gambar 4.2** Morfologi *Perovskite* Perbesaran 1000x dengan Kecepatan 4500 rpm Durasi (a) 20 Detik, (b) 30 Detik, (c) 40 Detik

Pada hasil karakterisasi SEM ditunjukkan bahwa *perovskite* berbentuk seperti jarum dan terang sedangkan untuk lapisan gelap dan kosong tidak ada bentuk merupakan lapisan dari substrat kaca. Terlihat dari hasil karakterisasi SEM ada pengaruh durasi putar terhadap struktur dan morfologi film *perovskite*. Secara visual ukuran kristal pada durasi 40 detik adalah ukuran terbesar dibandingkan dengan durasi 20 detik dan 30 detik. Data ini sesuai dengan hasil XRD yang menyatakan ukuran kristal *perovskite* waktu 40 detik lebih besar dibandingkan waktu putar 20 detik dan 30 detik. Selanjutnya gambar morfologi digunakan untuk analisis menggunakan *software* ImageJ untuk mengetahui persen *coverage perovskite*.

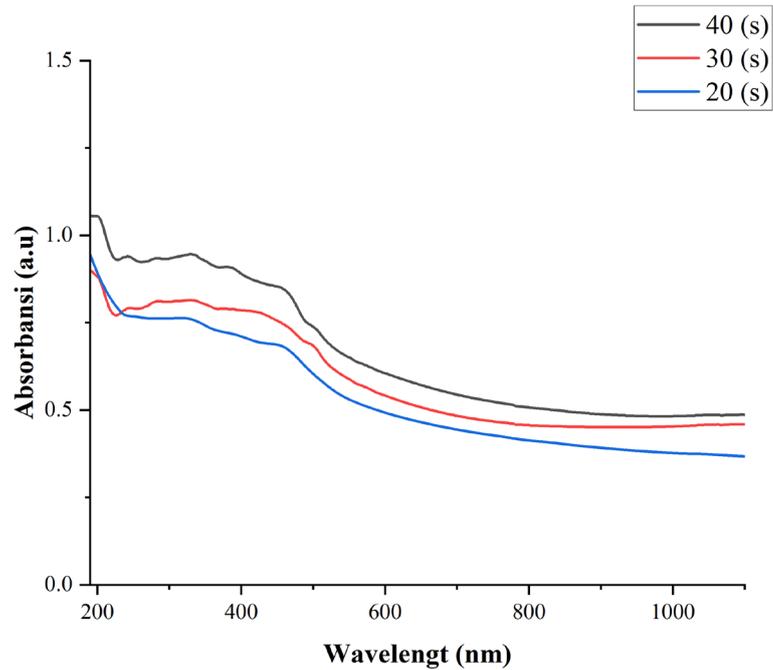
**Tabel 4.2** Persentase *Coverage* Lapisan *Perovskite* dengan Durasi

<b>Durasi (detik)</b>	<b>Persentase <i>Coverage</i> (%)</b>
20	51,996
30	58,538
40	61,5076

Menurut Tabel 4.2 durasi putar mempengaruhi persen *coverage*, semakin lama durasi putar maka semakin besar persen *coverage*. Pada penelitian yang dilakukan oleh [14]. Waktu pemutaran yang optimal misalnya, 60 detik cenderung meningkatkan *coverage*, karena butir yang lebih besar dan lapisan lebih merata dapat terbentuk, yang mengurangi cacat dan meningkatkan area yang tertutup dibandingkan dengan waktu putar 30 detik dan 45 detik [14]. Persen *coverage* yang tinggi menunjukkan bahwa film *perovskite* menutupi substrat dengan baik untuk memaksimalkan penyerapan cahaya dan efisiensi konversi daya. Maka dari itu, *spin coating* dengan durasi 40 detik yang memiliki persentase *coverage* (%) terbaik.

#### 4.3.3 Hasil Karakterisasi Spektrofotometri UV-Vis

Karakterisasi menggunakan spektrofotometri UV-Vis telah dilakukan dengan variasi waktu 20 detik, 30 detik, dan 40 detik pada kecepatan 4500 rpm. Tujuan dilakukannya karakterisasi ini adalah mengevaluasi sifat optik film *perovskite* seperti absorbansi, transmitansi, ketebalan, dan *energy band gap*. Spektrofotometri UV-Vis dilakukan pada rentang panjang gelombang (*wavelength*) 400-900 nm. Dapat dilihat pada Gambar 4.3



**Gambar 4.3** Grafik Absorbansi dengan Variasi Durasi Putar

Gambar 4.3 adalah absorbansi *perovskite* di atas substrat kaca dengan variasi waktu putar yang berbeda. Terlihat pada Gambar 4.3 *perovskite* dengan waktu putar 40 detik memiliki absorbansi yang tertinggi sedangkan *perovskite* dengan waktu putar 20 detik memiliki absorbansi terendah. Grafik ini sesuai dengan penelitian dari mohammad el al, pada penelitian tersebut absorbansi tertinggi dimiliki oleh durasi putar yang lama yakni pada 60 detik menghasilkan grafik absorbansi sedangkan grafik terendah terjadi pada waktu putar 30 detik [14]. Data ini juga selaras data XRD. Pada data XRD waktu putar 40 detik memiliki ukuran kristal terbesar sehingga *charge trapping* dalam sel surya *perovskite* berkurang.

**Tabel 4.3** Tabel Ketebalan Pada 20 Detik, 30 Detik, dan 40 Detik

<b>Durasi (detik)</b>	<b>Ketebalan (nm)</b>
20	66,56806
30	73.83063
40	76,71953

Pada Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa durasi 40 detik memiliki ketebalan yang paling besar. Dari nilai ketebalan tersebut dijelaskan bahwa durasi *spin coating* berpengaruh terhadap ketebalan yang diperoleh. Durasi 40 detik memiliki ketebalan terbesar dibanding yang lainnya. Kemudian dari data ini dapat digunakan untuk menentukan energi *band gap*.

**Tabel 4.4** Pengaruh Variasi Durasi Putar terhadap *Band gap*

<b>Durasi (detik)</b>	<b>Energi <i>Band gap</i> (eV)</b>
20	1,65
30	1,54
40	1,35

Energi *band gap* film *perovskite* dihitung menggunakan plot Tauc, yang merupakan metode umum untuk memperkirakan energi gap optik dari data absorbansi. Dari Tabel 4.4 Hasil pengukuran energi *band gap* lapisan *perovskite* tiap durasi waktu memiliki nilai lebih dari 3 eV menunjukkan ketidaksesuaian, umumnya energi band gap untuk material *perovskite* berkisar antara 1,5 hingga 2,3 eV. Hal ini di sebabkan karena substrat tidak sepenuhnya menutupi area yang terpapar cahaya, sehingga sebagian cahaya

tidak terabsorpsi oleh material yang sedang diuji. Nilai absorbansi yang terdeteksi akan lebih rendah dari yang seharusnya dan memberikan gambaran yang tidak akurat tentang sifat optik material tersebut. Hasil band gap yang terdeteksi juga tidak akan sesuai.

#### 4.3.4 Hasil pengukuran IV Test

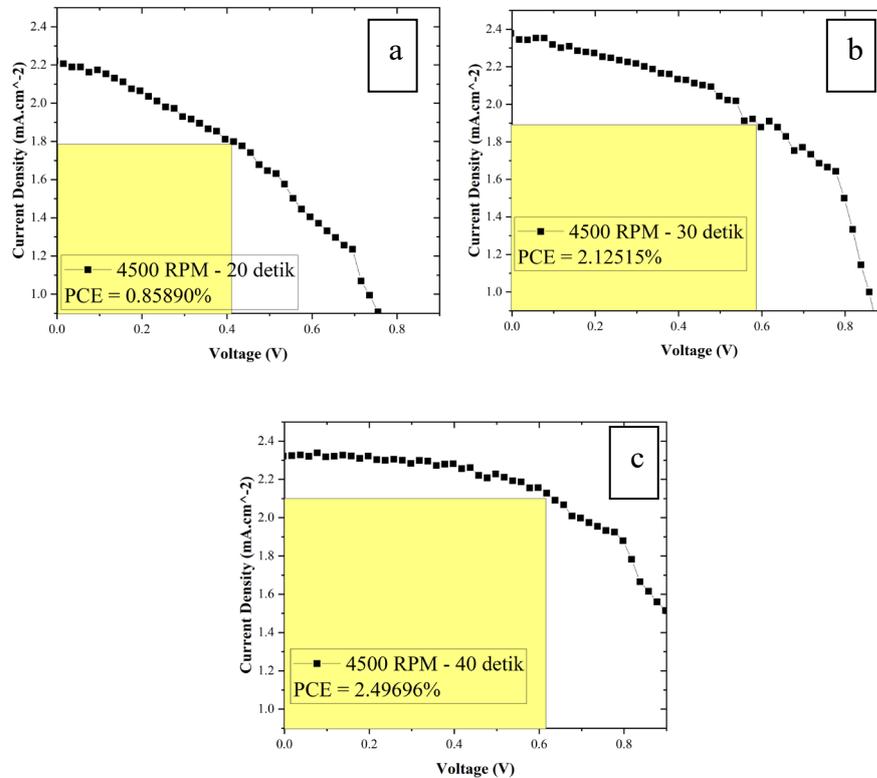
*Solar I-V Test* atau Sistem Pengukur I-V merupakan metode penting untuk mengevaluasi kinerja perangkat listrik dengan mengukur hubungan antara arus (I) dan tegangan (V) yang mengalir melaluinya. Pengukuran IV *Test* telah dilakukan pada sel surya dengan konfigurasi ITO/TiO<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3-x</sub>Br<sub>x</sub>/Spiro-OMeTAD/Ag dengan variasi durasi *spin coating* 20, 30, dan 40 detik pada kecepatan 4500 rpm. adapun datanya sebagai berikut.

**Tabel 4.5** Parameter I-V Sel Surya *Perovskite* dengan Variasi Waktu

<b>Durasi (detik)</b>	<b>Rata-rata PCE (%)</b>	<b>Rata-rata FF (%)</b>	<b>Rata-rata Jsc (A.cm<sup>-2</sup>)</b>	<b>Rata-rata Voc (V)</b>	<b>PCE Terbaik (%)</b>
40	0,601	41,068	-2,297	0,303	2,49696
30	0,498	39,273	-2,149	0,330	2,12516
20	0,303	25,678	-2,175	0,423	0,85890

Dari data yang diperoleh, rata-rata Voc tertinggi diperoleh pada durasi 40 detik dengan nilai 0,22704 V. Hal ini menunjukkan bahwa waktu pemrosesan yang lebih lama dapat meningkatkan potensi tegangan yang dihasilkan oleh sel surya. Selain itu, faktor pengisian (FF) juga mencapai nilai

terbaik pada durasi ini, yaitu 30,80113%, yang menunjukkan efisiensi dalam konversi energi dari arus listrik yang dihasilkan.



**Gambar 4.4** Kurva I-V Variasi Durasi *Spin coating* (a) 20 Detik, (b) 30 Detik, dan (c) 40 Detik

Kurva IV pada Gambar 4.5 (a)(b)(c) didapatkan ketika pengukuran menggunakan I-V Test, Pada kurva ini menunjukkan banyaknya *current density* yang didapat apabila sel surya diberikan tegangan. Pada dengan kecepatan 4500 rpm dan variasi waktu 20, 30, dan 40 detik menunjukkan kurva *non-ohmic*. Kurva *non-ohmic* mengindikasikan hubungan antara tegangan dan arus tidak linier, sehingga terjadi perubahan resistansi dengan meningkatnya arus. Berdasarkan kurva tersebut nilai PCE mengalami penurunan seiring dengan naiknya kecepatan *spin coating* Hal tersebut dibuktikan kembali dengan perolehan nilai PCE sel surya yang tertinggi

dimiliki oleh durasi 40 detik. selain nilai PCE tinggi, nilai parameter I-V yang lain seperti FF dan P pun tertinggi dimiliki oleh 40 detik, kedua dimiliki oleh 30 detik dan terakhir 40 detik.

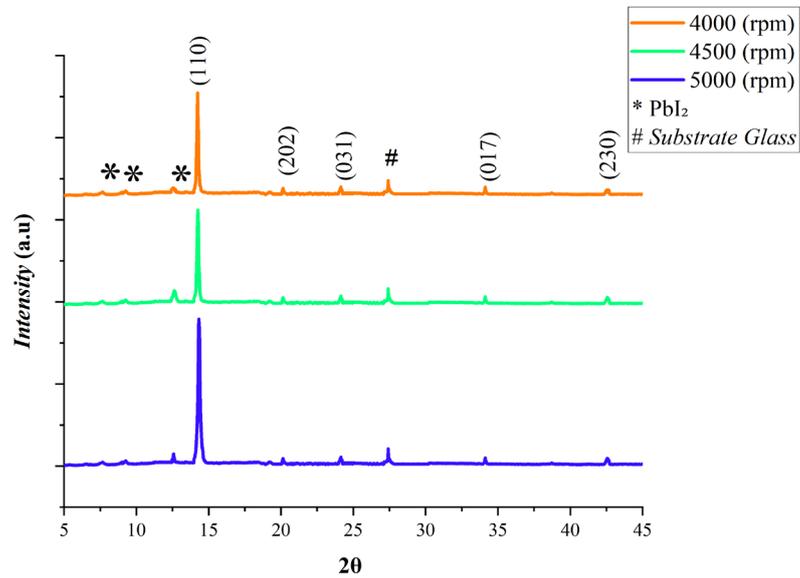
Selanjutnya, PCE tertinggi dicapai pada durasi 40 detik dengan nilai 2,49696%. Ini menunjukkan bahwa waktu yang cukup dalam proses pengendapan dapat berkontribusi pada peningkatan efisiensi sel surya *perovskite*. Sebaliknya, pengukuran pada durasi yang lebih pendek, seperti 20 detik dan 30 detik, menunjukkan penurunan nilai PCE, yang mengindikasikan bahwa waktu pemrosesan yang tidak cukup dapat menghambat pembentukan lapisan aktif yang optimal. Data ini telah sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh [14]. Peningkatan waktu putar dalam pembuatan sel surya *perovskite* meningkatkan efisiensi konversi daya (PCE) dari 3,506% pada 30 detik menjadi 5,742% pada 60 detik. Selain itu, arus singkat ( $J_{sc}$ ) meningkat dari 9,586 mA/cm<sup>2</sup> menjadi 12,092 mA/cm<sup>2</sup>, dan tegangan sirkuit terbuka ( $V_{oc}$ ) meningkat dari 0,756 V menjadi 0,8845 V. Peningkatan ini menunjukkan bahwa waktu putar yang lebih lama meningkatkan film *perovskite* yang lebih baik [14].

#### 4.4 Pengaruh Kecepatan putar *Spin coating* saat Deposisi *Perovskite* terhadap Performa Sel Surya

##### 4.4.1 Hasil Analisa XRD

Hasil analisa XRD digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristalografi, identifikasi fase, dan sifat mikro struktur bahan *perovskite*. pada analisa XRD ini dilakukan pada variasi kecepatan *spin coating* 4000 rpm,

4500 rpm, dan 5000 rpm dengan durasi putar tetap pada 30 detik terhadap pola XRD yang terbentuk dan ukuran kristal. Hasil pola XRD dapat dilihat pada Gambar 4.6.



**Gambar 4.5** Pola XRD Lapisan *Perovskite* Variasi Kecepatan *Spin coating*

Gambar 4.6 menunjukkan beberapa puncak difraksi pada  $2\theta$  yang terdeteksi yakni pada  $12,57^\circ$ ,  $14,23^\circ$ ,  $20,13^\circ$ ,  $24,15^\circ$ ,  $27,42^\circ$ ,  $34,13^\circ$ ,  $42,53^\circ$ , dan  $47,62^\circ$ . Dari puncak difraksi tersebut didapatkan bidang hkl yakni (100), (110), (111), (200), (210), (220), dan (230). Pada Gambar 4.6 tiap variasi kecepatan menunjukkan puncak difraksi karakteristik *perovskite* yang kuat, terutama puncak tajam pada (100) di sekitar  $14^\circ$ . Hasil puncak difraksi  $14^\circ$  memiliki intensitas tertinggi di kecepatan putar 5000 rpm yakni 17906, sedangkan untuk kecepatan putar 4000 rpm dan 4500 rpm secara berturut turut adalah 10569 dan 11589. Selain itu, pola XRD menunjukkan terdapat puncak lain yang berasal dari  $\text{PbI}_2$ . Seperti yang ditunjukkan dalam Gambar

4.6. Puncak  $\text{PbI}_2$  terdapat pada  $12,567^\circ$ . Untuk melihat pengaruh variasi kecepatan *spin coating* pada ukuran kristal dapat dilihat pada Tabel 4.6.

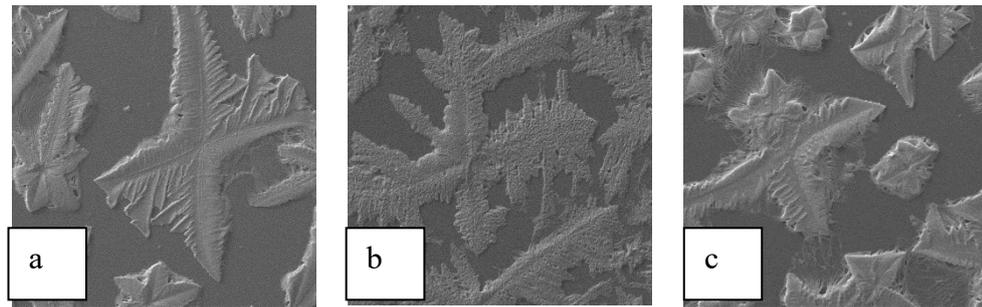
**Tabel 4.6** Ukuran Kristal *Perovskite* dengan Variasi Kecepatan Putar

Kecepatan (rpm)	Phase	Peak		Ukuran Kristal (nm)
		$2\theta$ (degree)	FWHM (degree)	
4000	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Br}_x$	14,25952	0,14143	55,73824
4500	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Br}_x$	14,25391	0,16192	44,89685
5000	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Br}_x$	14,1318	0,19326	40,78559

Menurut Tabel 4.5 terdapat pengaruh kecepatan putar *spin coating* terhadap ukuran kristal. Dapat dilihat ukuran kristal terbesar adalah kecepatan 4000 rpm dengan ukuran kristal 55,73824 nm sedangkan pada kecepatan 4500 dan 5000 rpm berturut-turut adalah 44,89685 nm dan 40,78559 nm dari data tersebut dapat diketahui semakin cepat kecepatan putar maka ukuran kristal semakin kecil. Data ini telah sesuai dengan penelitian sebelumnya. Hal ini sudah dibuktikan dalam penelitian yang dilakukan Mehde (2020) dijelaskan bahwa kecepatan *spin coating* akan mempengaruhi sifat-sifat dari *film* yang dibentuk karena penghilangan lebih banyak larutan dari substrat yang mengakibatkan penurunan ketebalan *film*, morfologi permukaan, dan derajat kristalisasi. Pada tabel 4.5 hasil kristalisasi terbaik terdapat pada kecepatan putar 4000 rpm. Kristal *perovskite* yang lebih besar cenderung memiliki batas butir yang lebih sedikit, yang mengurangi kepadatan cacat dan meningkatkan transportasi muatan [15].

#### 4.4.2 Hasil Karakterisasi SEM

SEM digunakan untuk menganalisis morfologi permukaan dan penampang lapisan *perovskite*, memberikan gambar resolusi tinggi terkait struktur dan distribusi lapisan sel surya *perovskite*. Cara kerja SEM sama seperti mikroskop hanya saja jenis mikroskopnya elektron sehingga menghasilkan gambar sampel dengan cara memindai permukaan menggunakan sinar elektron yang terfokus dengan pembesaran hingga skala tertentu. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan penampakan *perovskite* dengan bentuk seperti jarum-jarum. Sampel yang akan dianalisis adalah lapisan *perovskite* dengan durasi putar 30 detik dan variasi kecepatan putar 4000, 4500, dan 5000 rpm.



**Gambar 4.6** Morfologi *Perovskite* Perbesaran 1000x dengan Kecepatan (a) 4000 rpm, (b) 4500 rpm, dan (c) 5000 rpm

Pada hasil karakterisasi SEM ditunjukkan bahwa *perovskite* berbentuk seperti jarum dan terang sedangkan untuk lapisan gelap dan kosong tidak ada bentuk merupakan lapisan dari substrat kaca. Terlihat dari hasil karakterisasi SEM ada pengaruh kecepatan putar terhadap struktur dan morfologi film *perovskite*. Hasilnya menunjukkan bahwa ukuran butir (*grain size*) menjadi lebih kecil ketika kecepatan putar meningkat. Kemudian dilakukan analisis menggunakan software ImageJ untuk mengetahui persen *coverage perovskite*

dengan varias kecepatan putar. Berikut adalah Tabel 4.7 Persentase *Coverage* dengan variasi kecepatan putar.

**Tabel 4.7** Persentase *Coverage* Lapisan *Perovskite* dengan Variasi Kecepatan

<b>Kecepatan Putar (RPM)</b>	<b>Persentase <i>Coverage</i> (%)</b>
4000	62,6986
4500	58,538
5000	70,4433

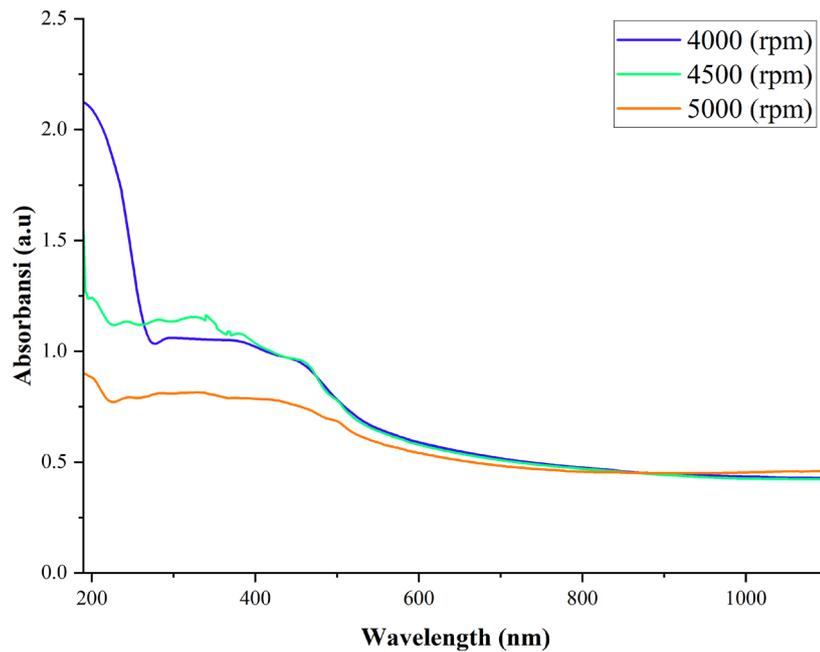
Menurut Tabel 4.6 kecepatan mempengaruhi persen *coverage*, semakin cepat kecepatan putar maka semakin kecil persen *coverage*. Data ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan. Kecepatan putar 2000 rpm yang memiliki persentase *coverage* (%) terbaik yakni 82,82% dibandingkan dengan kecepatan putar 3000 rpm dan 4000 rpm [2]. Pada data pada kecepatan 4500 RPM memiliki persen *coverage* terkecil, hal tersebut dikarenakan bentuk *perovskite* cenderung tidak seragam dibandingkan dengan kecepatan 4000 dan 5000 rpm hal tersebut tidak sesuai dengan teori, bahwa kecepatan pelapisan putaran yang lebih tinggi umumnya menghasilkan film yang lebih tipis karena peningkatan gaya sentrifugal, yang menyebarkan larutan prekursor lebih tipis di seluruh substrat. Hal ini dapat menyebabkan film yang lebih seragam. Sebaliknya, kecepatan putaran yang lebih rendah dapat menghasilkan film yang lebih tebal, yang dapat bermanfaat untuk penyerapan cahaya tetapi juga dapat menimbulkan masalah seperti peningkatan kekasaran permukaan dan ketidakseragaman, yang berpotensi menyebabkan cacat seperti lubang jarum [20]. ketidaksesuaian tersebut

dikarenakan substrat tidak sepenuhnya tertutupi *perovskite* yang menyebabkan ketidakseragaman dalam distribusi material. Saat larutan prekursor tidak ditetaskan tepat di tengah substrat, distribusi awal cairan menjadi tidak merata. Hal ini menyebabkan beberapa area substrat tidak terlapisi dengan baik, yang mengakibatkan terbentuknya bolong atau cacat pada film yang dihasilkan.

Ketidakakuratan dalam penempatan larutan juga dapat mengganggu proses pelapisan, terutama pada kecepatan tinggi, di mana gaya sentrifugal bekerja lebih kuat. Jika cairan tidak terdistribusi dengan baik, maka lapisan yang terbentuk bisa menjadi tipis di beberapa area dan lebih tebal di area lain, yang berpotensi menyebabkan masalah seperti nilai *coverage* yang rendah.

#### 4.4.3 Hasil Karakterisasi Spektrofotometri UV-Vis

Karakterisasi menggunakan spektrofotometri UV-Vis telah dilakukan dengan variasi kecepatan 4000, 4500, dan 5000 rpm. Tujuan dilakukannya karakterisasi ini adalah mengevaluasi sifat optik film *perovskite* seperti absorbansi dan transmitansi. selain itu karakterisasi ini juga dapat mengevaluasi ketebalan dan *energy band gap* atau energi celah pita. Spektrofotometri UV-Vis dilakukan pada rentang panjang gelombang (*wavelength*) 400-900 nm. Dapat dilihat pada Gambar 4.8



**Gambar 4.7** Grafik Absorbansi dengan Variasi Kecepatan Putar

Gambar 4.8 adalah absorbansi *perovskite* di atas substrat kaca dengan variasi kecepatan putar yang berbeda. Terlihat pada Gambar 4.8 *perovskite* dengan kecepatan putar 4000 rpm memiliki absorbansi yang tertinggi sedangkan *perovskite* dengan kecepatan putar 5000 rpm memiliki absorbansi terendah. Grafik ini sesuai dengan penelitian dari Meilani, 2023. Intensitas absorbansi kecepatan 2000 rpm tertinggi, diikuti oleh kecepatan 3000 rpm dan terakhir kecepatan 4000 rpm [1]. Hal ini selaras dengan pembahasan sebelumnya yang menyatakan bahwa kecepatan 4000 rpm yang memiliki morfologi terbaik karena nilai Persentase *Coverage* (%) yang terbesar. Terdapat korelasi antara persentase *coverage* lapisan *perovskite* dan absorbansi sel surya. Cakupan yang lebih tinggi biasanya menyebabkan peningkatan absorbansi, karena lebih banyak cahaya ditangkap oleh lapisan aktif [21].

**Tabel 4.8** Grafik Ketebalan dengan Variasi Kecepatan Putar

<b>Kecepatan (rpm)</b>	<b>Ketebalan (nm)</b>
4000	77,50174
4500	73,83062
5000	64,55111

Tabel 4.8 adalah pengaruh kecepatan terhadap ketebalan yang dihitung menggunakan metode Swanepoel. Dari nilai ketebalan tersebut menjelaskan bahwa kecepatan *spin coating* berpengaruh terhadap ketebalan yang diperoleh. Kecepatan 4000 rpm yakni 105.71596 nm memiliki ketebalan terbesar dibanding kecepatan 4500 dan 5000 rpm. Data ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Semakin besar kecepatan putar maka akan menghasilkan ketebalan yang semakin tipis, kecepatan 2000 rpm memiliki ketebalan yang besar yakni 1.908,5 nm, diikuti oleh 3000 rpm dan terakhir 4000 rpm [2]. Kemudian dari data ini dapat digunakan untuk menentukan *band gap*.

**Tabel 4.9** Pengaruh Kecepatan Putar terhadap Energi *Band gap*

<b>Kecepatan (rpm)</b>	<b>Energi <i>Band gap</i> (eV)</b>
4000	1,36
4500	1,54
5000	1,68

Dari Tabel 4.9 Hasil pengukuran energi band gap lapisan *perovskite* tiap durasi waktu memiliki nilai lebih dari 3 eV menunjukkan

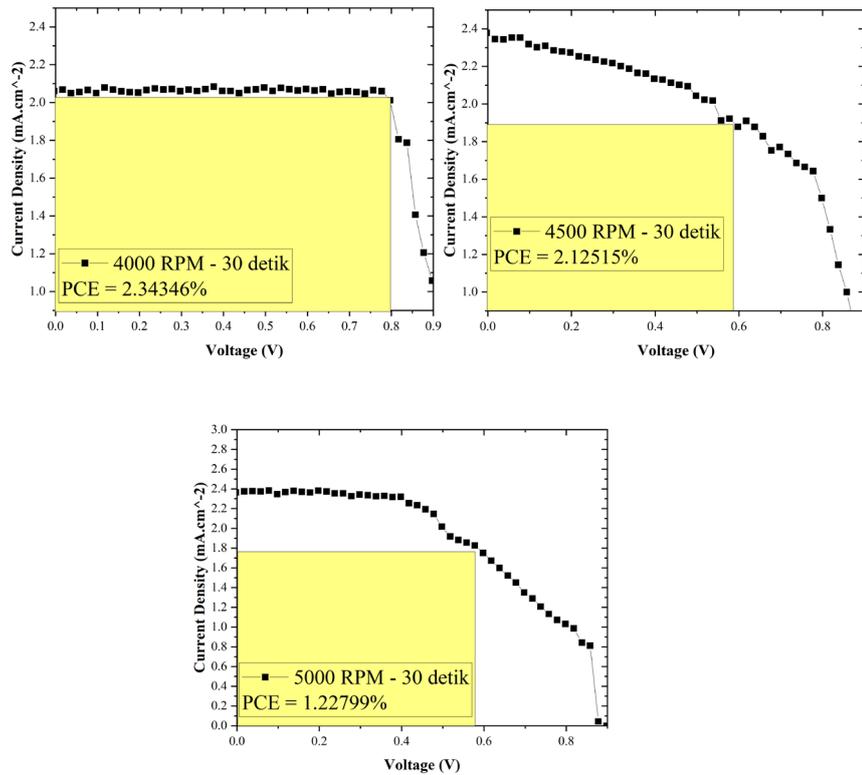
ketidaksesuaian, umumnya energi band gap untuk material *perovskite* berkisar antara 1,5 hingga 2,3 eV. Hal ini di sebabkan karena substrat tidak sepenuhnya menutupi area yang terpapar cahaya, sehingga sebagian cahaya tidak terabsorpsi oleh material yang sedang diuji. Hal ini akan menyebabkan nilai absorbansi yang lebih rendah dari yang seharusnya, memberikan gambaran yang tidak akurat tentang sifat optik material tersebut.

#### 4.4.4 Hasil pengukuran IV *Test*

Pengukuran IV *Test* telah dilakukan pada sel surya dengan konfigurasi ITO/TiO<sub>2</sub>/*Perovskite*/Spiro-OMeTAD/Ag dengan variasi kecepatan *spin coating* 4000 rpm, 4500 rpm, dan 5000 rpm detik pada durasi 30 detik. Berdasarkan Tabel 4.10 tersebut nilai PCE mengalami penurunan seiring dengan naiknya kecepatan *spin coating* Hal tersebut dibuktikan kembali dengan perolehan nilai PCE sel surya yang tertinggi dimiliki oleh kecepatan 4000 rpm. selain nilai PCE yang tinggi, nilai parameter I-V yang lain seperti FF dan P pun tertinggi dimiliki oleh 4000 rpm, kedua dimiliki oleh 4500 rpm dan terakhir 5000 rpm.

**Tabel 4.10** Parameter I-V Sel Surya *Perovskite* Variasi Kecepatan Putar

Kecepatan (rpm)	Rata-rata PCE (%)	Rata-rata FF (%)	Rata-rata J <sub>sc</sub> (A.cm <sup>-2</sup> )	Rata-rata V <sub>oc</sub> (V)	PCE Terbaik (%)
4000	0,534	47,428	-2,045	0,336	2,343
4500	0,498	39,273	-2,149	0,330	2,125
5000	0,469	36,409	-2,360	0,401	1,228



**Gambar 4.8** Kurva I-V Variasi Kecepatan *Spin Coating*

Grafik I-V pada Gambar 4.8 didapatkan ketika pengukuran menggunakan I-V Test, Pada grafik ini menunjukkan banyaknya *current density* yang didapat apabila sel surya diberikan tegangan. Pada grafik IV dengan durasi 30 detik dan variasi kecepatan 4000, 4500 dan 5000 rpm menunjukkan grafik *non-ohmic*. Grafik *non-ohmic* mengindikasikan hubungan antara tegangan dan arus tidak linier, sehingga terjadi perubahan resistansi dengan meningkatnya arus.

Selanjutnya, PCE tertinggi dicapai pada kecepatan 4000 RPM dengan nilai 2,34346%. Data ini telah sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh [2]. Dari penelitian sebelumnya perolehan nilai PCE yang terbesar yaitu 1,15% dimiliki oleh kecepatan 2000 rpm sedangkan perolehan

nilai PCE yang terkecil yaitu 0,002% dimiliki oleh kecepatan 4000 rpm, hal tersebut disebabkan penurunan ketebalan lapisan *perovskite* akibat kecepatan *spin coating* yang besar [2].