

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Metode Transfer Matrix Method (TMM)

Metode *Transfer Matrix Method* (TMM) merupakan teknik matematis yang digunakan dalam optik dan akustik untuk menganalisis perambatan gelombang elektromagnetik atau akustik melalui medium bertingkat, tumpukan film tipis. Hal ini khususnya berguna dalam desain lapisan anti-reflektif dan cermin dielektrik. Metode ini didasarkan pada fakta bahwa, menurut persamaan Maxwell, ada kondisi kontinuitas sederhana untuk medan listrik melintasi batas dari satu medium ke medium berikutnya. Jika medan diketahui pada awal lapisan, medan pada akhir lapisan dapat diturunkan dari operasi matriks sederhana. Tumpukan lapisan kemudian dapat direpresentasikan sebagai matriks sistem, yang merupakan hasil kali dari matriks lapisan individu (Peymaneh dkk., 2021). Langkah terakhir dari metode ini melibatkan pengubahan matriks sistem kembali menjadi koefisien refleksi dan transmisi. Persamaan 3.1 menyatakan  $I_0(\lambda)$  adalah spektrum AM 1.5G,  $\lambda$  yang menunjukkan panjang gelombang,  $\alpha_j(\lambda) = 4\pi\kappa_j/\lambda$  menunjukkan absorber koefisien absorber dari setiap lapisan dalam sub-sel atas perovskite,  $\kappa_j$  adalah koefisien ekstingsi dan  $d_j$  adalah lapisan ketebalan. Sebaliknya, dalam metode TM, total TM diberikan pada struktur banyak yang menghubungkan amplitudo medan listrik di kedua sisinya.

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left(\sum_{j=1}^m -\alpha_j(\lambda)d_j\right) \quad (3.1)$$

Dengan persamaan 3.2 dimana  $E^+$  dan  $E^-$  merujuk pada amplitudo medan listrik yang merambat ke arah cahaya datang dan melawan arah cahaya, masing-masing. Indeks 0 dan  $m+1$  digunakan untuk menunjukkan insiden dan keluar media, masing-masing. Untuk tumpukan media linier, homogen, dan isotropik, total TM adalah matriks  $2 \times 2$  yang dihitung dengan mengalikan matriks transfer setiap lapisan.

$$[E_0^+ \ E_0^-] = [E_{m+1}^+ \ E_{m+1}^-] \quad (3.2)$$

Persamaan 3.3 merupakan matriks transfer individu dari lapisan yang diperoleh dengan mengalikan dua matriks lain yang dinamai sebagai matriks fase I dan matriks refraksi L yang menggambarkan karakteristik optik dari lapisan.

$$S = [S_{11} \ S_{12} \ S_{21} \ S_{22}] = \left( \prod_{j=1}^m I_{(j-1)j} L_j \right) \cdot I_{(m+1)m} \quad (3.3)$$

Ketika cahaya bergerak melalui struktur *multilayer*, cahaya akan mengalami pembiasan berturut-turut pada antarmuka dan perambatan di dalam lapisan. Matriks pembiasan menjelaskan pantulan dan transmisi cahaya pada antarmuka antara dua lapisan yang berdekatan dinyatakan dengan persamaan 3.4. Mempertimbangkan pembiasan cahaya pada antarmuka antara lapisan ke- $j$  dan lapisan ke  $(j+1)$ , matriks pembiasan didefinisikan sebagai:

$$I_{(j+1)j} = \frac{1}{t_{j(j+1)}} [1 \ r_{j(j+1)} \ r_{j(j+1)} \ 1] \quad (3.4)$$

di mana  $r_{jk}$  adalah koefisien refleksi Fresnel kompleks dan  $t_{jk}$  adalah transmisi Fresnel kompleks pada antarmuka antara lapisan ke- $j$  dan lapisan ke  $(j+1)$ . Pada kejadian normal, Persamaan 3.5 menyatakan koefisien refleksi dan Persamaan 3.6 menyatakan transmisi Fresnel yaitu

$$r_{(j+1)j} = \frac{N_j - N_{j(j+1)}}{N_j + N_{j(j+1)}} \quad (3.5)$$

$$t_{(j+1)j} = \frac{2N_j}{N_j + N_{j(j+1)}} \quad (3.6)$$

Matriks fase ditunjukkan persamaan 3.7 yang menggambarkan perambatan medan listrik di dalam medium dan didefinisikan sebagai:

$$L_j = [e^{i\delta_j d_j} \ 0 \ 0 \ e^{i\delta_j d_j}] \quad (3.7)$$

dimana  $d_j$  adalah ketebalan lapisan ke- $j$ , dan  $\delta_j = 2\pi N_j / \lambda$  adalah perubahan fase dari gelombang elektromagnetik ketika bergerak di dalam lapisan

ke-j.  $N_j$  adalah indeks bias kompleks dari lapisan ke-j dan diberikan oleh  $N_j = n_j + i\kappa_j$

dengan  $n_j$  dan  $\kappa_j$  adalah indeks refraksi dan koefisien ekstingsi lapisan ke-j. Persamaan 3.8 dan 3.9 merupakan total koefisien refleksi dan transmisi kompleks dari struktur multilayer kemudian dapat dihitung dari total matriks S.

$$r = \frac{E_0^-}{E_0^+} = \frac{S_{21}}{S_{11}} \quad (3.8)$$

$$r = \frac{E_{m+1}^-}{E_0^+} = \frac{1}{S_{11}} \quad (3.9)$$

Intensitas yang ditransmisikan dan dipantulkan dari struktur multilayer kemudian dihitung dengan dua kuantitas fisik, transmitansi total (T) dan reflektansi total (R), yang didefinisikan oleh persamaan 3.10 dan 3.11.

$$T = \frac{I_{tra}}{I_0} = \frac{n_{m+1}}{n_0} |t|^2 \quad (3.10)$$

$$R = \frac{I_{ref}}{I_0} = |r|^2 \quad (3.11)$$

Dengan setiap indeks bias dari insiden dan media luar maka persamaan 3.10 menunjukkan  $n_0$  dan  $n_{m+1}$  merupakan masing-masing indeks yang terjadi karena Konservasi energi, absorbansi total didefinisikan dengan persamaan 3.12 sebagai:

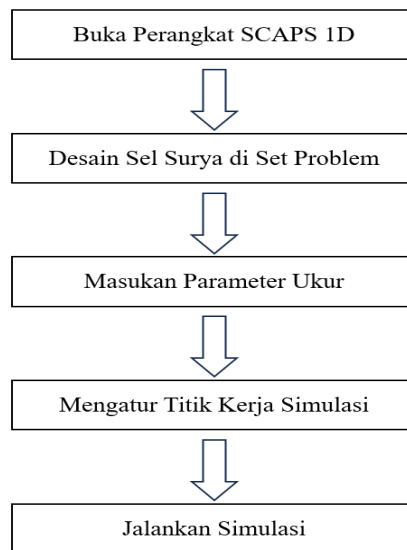
$$A = 1 - T - R \quad (3.12)$$

### 3.2 Persamaan Kontinuitas dan Diferensial Poisson

SCAPS 1D terdiri dari berbagai panel dimana pengguna dapat mengoptimalkan parameter dan menentukan hasil. Gambar 3.1 menunjukkan prosedur simulasi langkah demi langkah untuk program SCAPS. Hal ini didasarkan pada persamaan diferensial kontinuitas berpasangan dan persamaan differensial Poisson untuk elektron dan *hole* yang ditunjukkan persamaan 4.2. Teori dasar dari program ini adalah menyelesaikan persamaan diferensial kontinuitas dan diferensial Poisson persamaan dengan diferensiasi numerik dan tipe Gummel.

$$\begin{aligned}
 \frac{dp_n}{dt} &= G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_n} - p_n u_p \frac{dE}{dx} - u_p E \frac{dp_n}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} \\
 \frac{dn_p}{dt} &= G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} - n_p u_n \frac{dE}{dx} - u_n E \frac{dn_p}{dx} + D_p \frac{d^2 n_p}{dx^2} \\
 \frac{d}{dx} \left( \varepsilon(x) \frac{d\phi}{dx} \right) &= q [p(x) - n(x) + N_{d^+}(x) - N_{a^-}(x) + p_t(x) - n_t(x)]
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

dimana  $\varepsilon$  mewakili permitivitas dielektrik,  $q$  mewakili muatan elektron,  $G$  mewakili laju pembangkitan,  $D$  mewakili koefisien difusi,  $\phi$  mewakili potensial elektrostatik,  $E$  mewakili medan listrik,  $p(x)$  melambangkan lubang bebas,  $n(x)$  melambangkan lubang bebas elektron,  $p_t(x)$  mewakili lubang yang terperangkap,  $n_t(x)$  mewakili elektron yang terperangkap,  $N_{d^+}$  mewakili donor konsentrasi doping terionisasi,  $N_{a^-}$  mewakili konsentrasi doping terionisasi reseptor, dan  $x$  mewakili ketebalan lapisan.

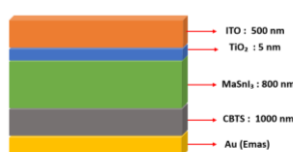


Gambar 3. 1 Prosedur simulasi langkah demi langkah untuk program SCAPS

### 3.3 Desain dan Simulasi

Struktur simulasi sel surya yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 terdiri dari Back Contact/ETL/Perovskite/HTL/Glass, di mana material Perovskite  $\text{MaSnI}_3$  digunakan sebagai lapisan aktif. Semua pengaturan simulasi untuk setiap lapisan dalam struktur diperoleh dari literatur. Pada struktur ini, parameter optimasi untuk struktur Back Contact/ETL/Perovskite/HTL/Glass disajikan pada Lampiran 1 sebagai Parameter Set untuk Simulasi Sel Surya berbasis  $\text{MaSnI}_3$ . Mekanisme penyerapan dalam sel surya dimulai dari lapisan ITO (Indium Tin Oxide) yang berfungsi sebagai tempat electron pada sel surya. Energi diserap oleh ITO saat sinar matahari mengenai sel surya. Elektron dilapisan ITO akan bergerak ke lapisan transportasi electron pada  $\text{TiO}_2$  dan terjadi penyerapan dilapisan absorbs. Setelah elektron-elektron di lapisan penyerap terangkat, hole (lubang) terbentuk. HTL memfasilitasi pergerakan hole dari lapisan penyerap ke elektroda positif. Lapisan Elektroda Positif (Au) berfungsi sebagai elektroda positif. Di sini, energi listrik yang dihasilkan dapat digunakan untuk berbagai keperluan.

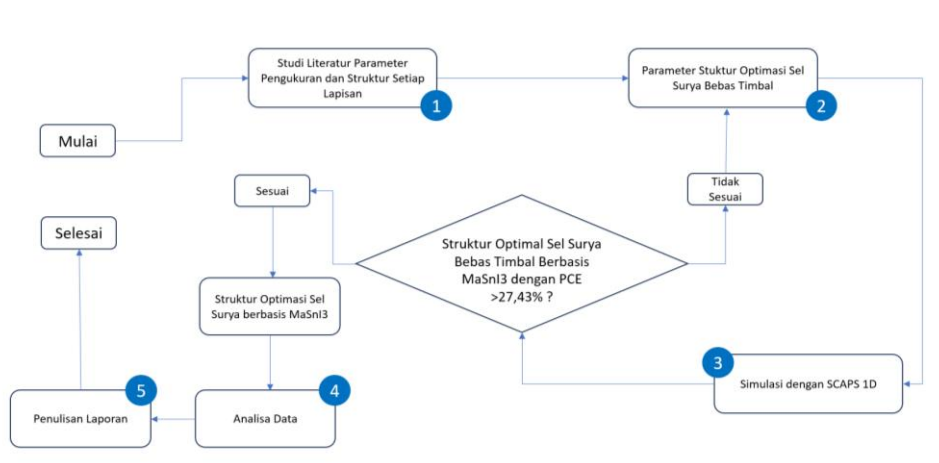
Variasi ketebalan lapisan aktif dilakukan pada parameter optimasi pertama untuk mengamati pergerakan elektron sehingga memiliki waktu yang cukup untuk melakukan perjalanan sebelum terjadi rekombinasi pada skala 200 nm hingga 2000 nm. Sedangkan untuk mengetahui kemungkinan elektron dan lubang bertemu sehingga menghilangkan energi satu sama lain sebelum mencapai elektroda dilakukan ketebalan lapisan transportasi. Optimasi ketebalan transportasi elektron divariasikan pada skala 5 nm - 50 nm manakala lapisan transportasi lubang divariasikan pada skala 100 nm - 1000 nm. Variasi afinitas energi elektron dilakukan untuk mengetahui energi yang dibutuhkan elektron untuk bergerak dari pita valensi ke pita konduksi pada lapisan ETL di variasikan dari 3,7 eV - 4,2 eV. Variasi afinitas energi lubang dari 3,5 eV - 4,0 eV dan variasi temperatur dengan skala 280 K – 1000 K Analisis variasi terdiri dari evaluasi data Voc, rapat arus ( $J_{sc}$ ), fill factor (FF), dan efisiensi (PCE) untuk mengidentifikasi struktur sel surya yang paling efektif.



Gambar 3. 2 Struktur sel surya Perovskite bebas timbal berbasis  $\text{MaSnI}_3$

### 3.4 Alur Penelitian

Alur penelitian ditunjukkan oleh Gambar 3.3 yang dimulai dengan tahapan (1) studi literatur untuk mengetahui material PSC bebas timbal dan desain pada beberapa sumber artikel pada kurun waktu lima hingga sepuluh tahun terakhir. Setelah itu mencari parameter pengukuran optimalisasi kinerja sel surya. Kemudian tahapan (2) diketahui beberapa parameter yang mempengaruhi performa sel surya seperti ketebalan lapisan absorber, lapisan transport electron, lapisan transportasi *hole* (lubang), energi afinitas elektron pada lapisan transportasi muatan, dan operasi temperatur sel surya. Tahapan (3) modeling dan mensimulasikan menggunakan perangkat lunak SCAPS 1D. Simulasi dilakukan dengan variasi parameter pengukuran untuk mendapatkan nilai Voc, Jsc, FF, dan PCE yang optimum. Pada beberapa artikel terkini menunjukkan efisiensi yang dihasilkan dari sel surya tanpa timbal adalah 27,43%. Oleh karena itu, dengan bantuan optimalisasi parameter pengukuran, penelitian ini menargetkan nilai efisiensi yang dihasilkan lebih dari 27,43%. Tahapan (4) melakukan analisis data dari hasil simulasi yang diekstrak dari SCAPS 1D dan diolah melalui *Microsoft Excel 2019*, dan divisualisasikan dengan *Origin 2021*. Tahapan (5) merupakan akhir dari alur penelitian setelah semua parameter pengukuran sesuai target desain sel surya perovskite yang optimal dituangkan dalam bentuk laporan.



Gambar 3. 3 Diagram Alir Penelitian sel surya Perovskite bebas timbal berbasis  $\text{MaSnI}_3$