

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metode FDTD

Metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD) merupakan metode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan Maxwell dalam geometri yang kompleks dalam elektromagnetik dan fotonik. Selain itu, FDTD juga dapat memperoleh solusi frekuensi dengan memanfaatkan Transformasi Fourier, sehingga besaran yang berguna dapat dihitung, seperti Vektor Poynting kompleks dan transmisi atau pantulan cahaya. Untuk menyelesaikan persamaan Maxwell dalam elektromagnetik dan fotonik digunakan persamaan:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0} \nabla \times H \quad (3.1a)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times E \quad (3.1b)$$

Untuk kasus satu dimensi maka digunakan persamaan:

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (3.2a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (3.2b)$$

Dengan H adalah medan magnet dalam fotonik, E adalah medan listrik dalam fotonik, ϵ adalah konstanta dielektrik pada media dielektrik, μ adalah permeabilitas magnetik pada media dielektrik.

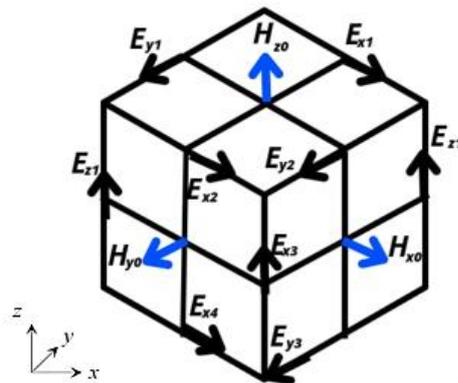
Dalam persamaan Maxwell dua dimensi terdapat enam komponen medan elektromagnetik yaitu E_x , E_y , E_z dan H_x , H_y , dan H_z . Kemudian, persamaan Maxwell dibagi menjadi dua persamaan yang disebut TE (*Transverse electric*) dan TM (*Transverse magnetic*) seperti berikut;

| | | |
|---|--|--------|
| <p><i>Transverse electric</i></p> $\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x}$ | <p><i>Transverse magnetic</i></p> $\epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{\partial H_z}{\partial x}$ | (3.3a) |
|---|--|--------|

| | | |
|---|--|--------|
| $\epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = -\frac{\partial H_z}{\partial x}$ | $\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{\partial E_z}{\partial x}$ | (3.3b) |
|---|--|--------|

$$\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} \qquad \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial y} \qquad (3.3c)$$

Metode FDTD memecahkan persamaan ini pada *grid* spasial dan temporal diskrit. Setiap komponen bidang diselesaikan di lokasi yang sedikit berbeda di dalam sel kisi (sel Yee), seperti yang ditunjukkan di bawah ini.



Gambar 3.1 Vektor komponen medan listrik dan medan magnet dalam sistem koordinat tiga dimensi (Loubani dkk., 2019)

Skema Yee terdiri dengan mempertimbangkan E_x dan H_y bergeser dalam ruang dengan setengah sel dan dalam waktu dengan setengah langkah waktu ketika mempertimbangkan pendekatan perbedaan pusat dari turunan dapat ditunjukkan dengan persamaan:

$$\frac{E_x^{n+\frac{1}{2}}(k) - E_x^{n-\frac{1}{2}}(k)}{\Delta t} = -\frac{1}{\varepsilon_0} \frac{H_y^n(k + \frac{1}{2}) - H_y^n(k - \frac{1}{2})}{\Delta t} \qquad (3.4a)$$

$$\frac{H_y^{n+1}(k + \frac{1}{2}) - H_y^n(k + \frac{1}{2})}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{E_x^{n+\frac{1}{2}}(k + 1) - E_x^{n+\frac{1}{2}}(k)}{\Delta z} \qquad (3.4b)$$

Dengan n adalah jumlah titik yang berada dalam mesh, ε_0 permitivitas dalam vakum, μ_0 adalah permeabilitas dalam vakum, Δt adalah perubahan step waktu, Δz perubahan ruang.

3.2 Metode CHARGE

CHARGE dapat menyelesaikan sistem persamaan yang menggambarkan potensi elektrostatik (persamaan Poisson) dan persamaan drift-difusi. Berikut ini

merupakan persamaan matematis yang digunakan dalam CHARGE, mulai dari persamaan Poisson dan persamaan drift-diffusion.

$$J_n = D_n \frac{dN}{dx} \quad (3.5a)$$

$$J_p = -D_p \frac{dN}{dx} \quad (3.5b)$$

Dengan $D_{p,n}$ atau difusitas didefinisikan dengan persamaan:

$$D_{p,n} = q\Delta x V_{th} \quad (3.6)$$

Dengan J_n dan J_p adalah rapat arus elektron dan hole, q adalah muatan elektron, n adalah rapat elektron, p adalah rapat hole, D_n dan D_p adalah difusivitas elektron dan hole, Δx adalah perubahan posisi muatan, N konsentrasi muatan, dan V_{th} adalah kecepatan termal muatan.

Untuk memperhitungkan konversi muatan, diperlukan persamaan kontinuitas tambahan seperti:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n - \frac{1}{q} \left(\frac{\partial J_n}{\partial x} \right) \quad (3.7a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p - \frac{1}{q} \left(\frac{\partial J_p}{\partial x} \right) \quad (3.7b)$$

Dengan R_n dan R_p adalah selisih dari laju rekombinasi elektron dan hole, kemudian G_n dan G_p adalah laju pembangkitan dari elektron dan hole. Proses rekombinasi bergantung pada suhu, konsentrasi, doping atau pengotor, konsentrasi pembawa, medan listrik dan kerapatan arus. Kemudian sistem persamaan dapat diselesaikan dengan CHARGE dengan kondisi dan waktu yang bervariasi.

3.3 Lumerical FDTD

Untuk simulasi optik sel surya digunakan lumerical FDTD. Hal ini dilakukan karena kinerja sel surya bergantung pada penyerapan cahaya yang tinggi. Dalam FDTD untuk mensimulasikan sel surya terdapat beberapa tahapan seperti, mengatur geometri dan bahan, menambahkan wilayah simulasi dan kondisi batas, serta meshing, setelah itu tambahkan monitor, dan grup analisis. Setelah selesai maka simulasi dapat dijalankan dan hasil analisisnya dapat

dioptimalkan dengan parameter yang digunakan. Input dalam numerical FDTD ini yaitu panjang gelombang elektromagnetik yang berasal dari sumber cahaya dan tidak perlu menggunakan spektrum matahari, material yang digunakan serta struktur sel surya. Kemudian, output dari simulasi FDTD ini yaitu kurva absorpsi dan juga J_{sc} .

Setelah melakukan simulasi optik, diperoleh beberapa parameter penting. Untuk mencapai parameter ini digunakan persamaan matematis. Daya total yang diserap oleh sel surya (P_{abs}) pada dasarnya mengevaluasi input yang diserap oleh sel surya pada setiap panjang gelombang. Secara matematis, yang pertama adalah menerapkan divergensi dari vector poynting yang ditunjukkan:

$$P_{abs} = -0.5 \text{ real } \vec{\nabla} \cdot \vec{S} \quad (3.8)$$

$$P_{abs} = -0.5 \text{ real } (i\omega \vec{E} \cdot \vec{D}) \quad (3.9)$$

Dengan \vec{S} adalah vector poynting dari sumber cahaya, dan \vec{D} adalah kerapatan fluks listrik. Perhitungan divergensi digunakan karena bentuknya cukup stabil sehingga persamaan (3.9) dimodifikasi menjadi:

$$P_{abs} = -0.5 \omega |E|^2 \text{ im}(\epsilon) \quad (3.10)$$

Dengan ω adalah frekuensi sudut sumber cahaya, $|E|^2$ intensitas medan listrik, dan $\text{im}(\epsilon)$ merupakan bagian imajiner dari konstanta dielektrik. Absorpsi dapat dihitung dengan intensitas medan listrik dan bagian imajiner dari permitivitas dapat dihitung dari simulasi FDTD. Dengan menggunakan CHARGE maka akan diperoleh nilai kerapatan arus hubungan singkat lebih akurat.

Efisiensi quantum sel surya $\eta_q(\lambda)$ merupakan keefektifan sel untuk mentransfer energi yang dimiliki foton pada elektron, secara matematis dapat didefinisikan sebagai:

$$\eta_q(\lambda) = \frac{P_{abs}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} \quad (3.11)$$

Dari persamaan tersebut dapat diperoleh perhitungan kemampuan absorpsi yang merupakan integral dari efisinsi quantum sel surya, seperti yang ditunjukkan pada persamaan:

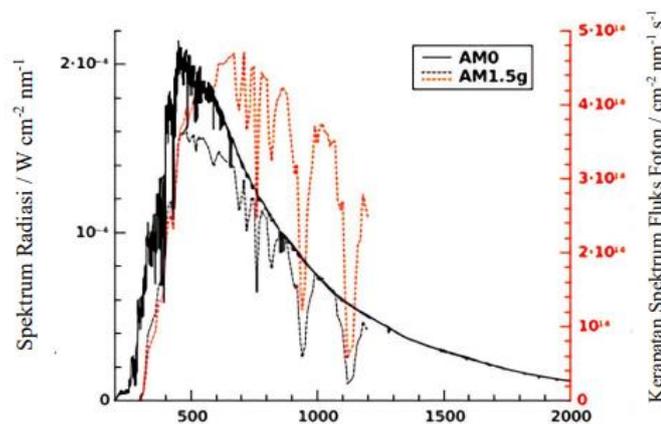
$$Abs(\lambda) = \int \eta_q(\lambda) d\lambda = \int \frac{-0.5 |E|^2 \text{ im}(\epsilon)}{P_{in}(\lambda)} = \int \frac{\pi |E|^2 \text{ im}(\epsilon)}{\lambda P_{in}(\lambda)} d\lambda \quad (3.12)$$

Setelah mendapatkan nilai absorpsi, selanjutnya dapat diketahui nilai J_{sc} yang ditunjukkan pada persamaan:

$$J_{sc} = \frac{e}{hc} \int_{\lambda_0}^{\lambda} \lambda Abs(\lambda) I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda \quad (3.13)$$

Dengan e adalah muatan elektron, h adalah konstanta planck, c adalah kecepatan cahaya dalam vakum, λ adalah panjang gelombang sebagai pengganti dari spektrum matahari dan $I_{AM1.5}$ adalah intensitas spektrum radiasi matahari.

Spektrum matahari standar telah ditentukan yaitu "AM1.5g". Spektrum ini digambarkan pada gambar 3.2. Hal tersebut mewakili kondisi standar di pertengahan garis lintang dengan faktor "massa udara" (AM) sebesar 1,5 yang sesuai dengan kejadian zenit pada 48,2°. Dan "g" untuk "global" yang menunjukkan bahwa baik sinar matahari langsung maupun tidak langsung telah diperhitungkan. Dalam teknologi sel surya konversi energi dalam bahan penyerap tunggal bergantung pada fluks foton spektral. Fluks foton di wilayah spektral untuk sel surya silikon digambarkan sebagai garis putus-putus pada gambar 3.2. Maksimum panjang gelombang terjadi sekitar 600 nm, oleh karena itu kontribusi tertinggi terhadap arus foto dapat berasal dari cahaya (Lockau, 2012).



Gambar 3.2 Spektrum sinar matahari (Lockau, 2012)

3.4 Lumerical CHARGE

Kinerja sel surya tidak hanya bergantung pada absorpsi saja tetapi juga transportasi muatan yang efektif. Sehingga diperlukan simulasi menggunakan lumerical CHARGE untuk mensimulasikan sifat listrik dari sel surya. Setelah

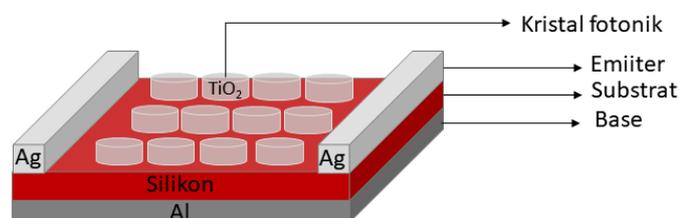
simulasi menggunakan lumerical FDTD selanjutnya untuk mencari efisiensi dari sel surya digunakan lumerical CHARGE. Proses pembuatan desain sel surya pada lumerical CHARGE sama seperti pada FDTD. Tetapi memiliki perbedaan yaitu ketika menambahkan material harus disertakan sifat listrik yang sesuai. Kemudian, untuk mendapatkan nilai dari PCE maka digunakan persamaan seperti:

$$\eta = \frac{FF V_{oc} J_{sc}}{S_{AM1.5G}} = \frac{P_m}{S_{AM1.5G}} \quad (3.14)$$

Dengan $S_{AM1.5G}$ adalah spektrum matahari 100 mW/cm^2 .

3.5 Desain dan Simulasi

Dalam penelitian ini struktur sel surya silikon yang digunakan yaitu Al/Silikon/TiO₂ nanodisk. Seperti yang ditunjukkan dalam gambar 3.3, silikon berperan sebagai lapisan penyerap cahaya dan TiO₂ digunakan sebagai material kristal fotonik. Pada penelitian ini, ketebalan silikon yang digunakan adalah $2,5 \mu\text{m}$ base $1 \mu\text{m}$, emiter $0,5 \mu\text{m}$, dan kristal fotonik yang dioptimasi. Untuk mendapatkan performa sel surya yang terbaik, dilakukan variasi parameter seperti rasio kristal fotonik, diameter, konstanta kisi, dan ketebalan dari kristal fotonik. Untuk mendapatkan rasio yang optimal maka rasio yang divariasikan yaitu 1:2, 1:3, 1:4, 2:5. Kemudian, diameter kristal fotonik bervariasi antara $100 - 380 \text{ nm}$ dengan konstanta kisi kristal fotonik bervariasi antara $200 - 760 \text{ nm}$ dan ketebalan kristal fotonik bervariasi pada $110 - 220 \text{ nm}$. Pada penelitian ini juga digunakan panjang gelombang $300 - 1000 \text{ nm}$ karena rentang tersebut merupakan rentang respon sel surya terhadap cahaya matahari.



Gambar 3.3 Struktur sel surya silikon dengan kristal fotonik

Selain variasi diameter dan periode kristal fotonik yang dapat meningkatkan absorpsi, pemilihan material juga dilakukan agar mendapatkan

Yuni Rahmawati, 2023

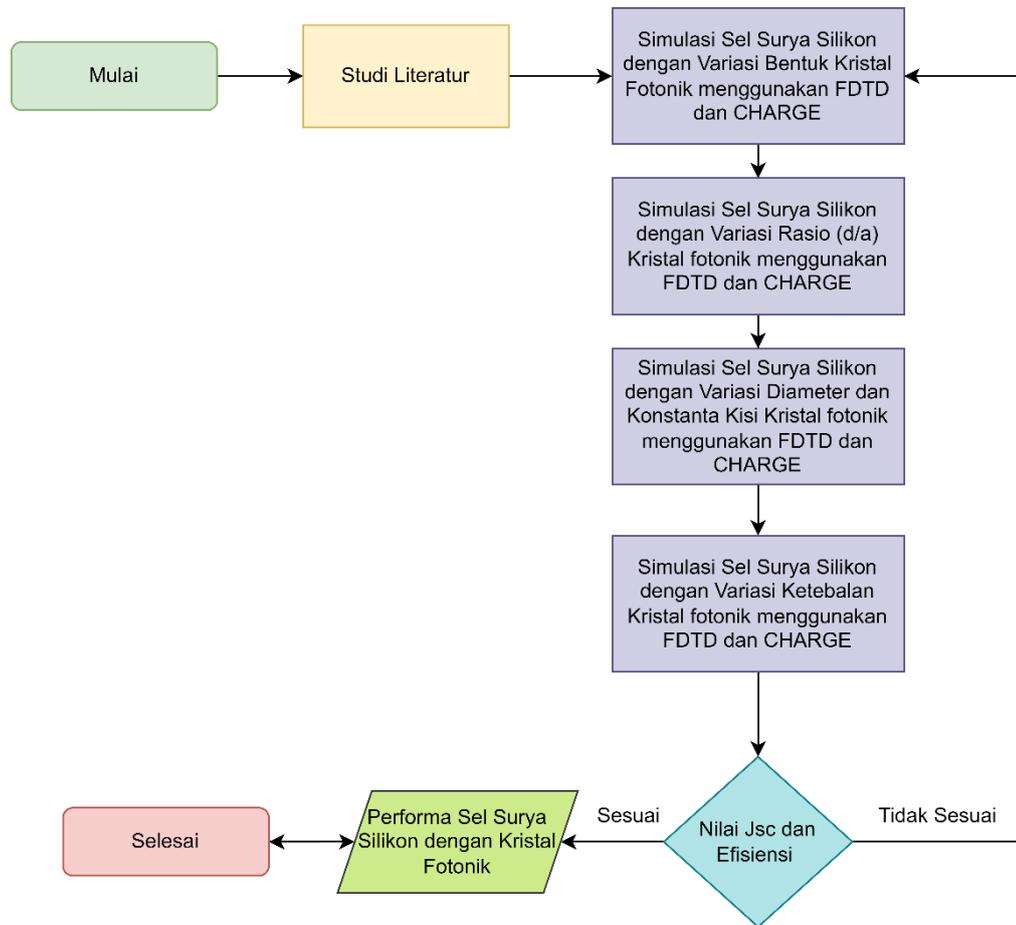
KRISTAL FOTONIK 2-DIMENSI SEBAGAI LAPISAN ANTI REFLEKSI UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI SEL SURYA SILIKON DENGAN SIMULASI FDTD

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

performa sel surya yang terbaik. Seperti silikon yang memiliki celah pita energi 1,12 eV sehingga sesuai dengan panjang gelombang penyerapan cahaya. Celah pita ini sangat cocok dengan spektrum matahari, sangat dekat dengan nilai optimal untuk konversi energi surya ke listrik menggunakan penyerap optik semikonduktor tunggal (Battaglia dkk., 2016). Kemudian TiO_2 digunakan sebagai bahan dari kristal fotonik nanodisk karena TiO_2 merupakan nanomaterial yang stabilitas kimia dan optiknya yang tinggi, biaya rendah dan tahan terhadap korosi (Bai dkk., 2014). Selain itu, TiO_2 terbukti menjadi salah satu bahan pilihan terbaik dalam sel surya silikon film tipis (Enhancement dkk., 2018).

3.6 Alur Penelitian

Pada penelitian ini terdapat alur penelitian yang ditunjukkan pada gambar 3.4 dimulai dengan tahapan studi literatur untuk mengetahui sel surya silikon dengan menggunakan kristal fotonik dan tanpa kristal fotonik. Setelah itu, mencari parameter yang dapat dioptimasi pada kristal fotonik untuk meningkatkan performa dari sel surya. Kemudian melakukan desain dan mensimulasikan dengan menggunakan FDTD untuk mendapatkan nilai absorpsi dan J_{sc} . Ketika nilai absorpsi dan J_{sc} sudah sesuai maka dilanjutkan dengan mensimulasikannya dengan menggunakan lumerical CHARGE untuk mendapatkan PCE. Semua data yang sudah didapatkan dapat diolah dengan perangkat lunak origin. Setelah semua selesai sehingga didapatkan desain sel surya silikon yang optimal.



Gambar 3.4 Diagram alir penelitian

3.7 Teknik Analisis

Untuk mengetahui nilai performa optik dan listrik sel surya maka diperlukan data yang direkam oleh monitor. Monitor tersebut diletakan di antara sel surya silikon untuk melihat penyerapan pada silikon dan menghasilkan *output* yaitu nilai frekuensi (f) dan absorpsi pada monitor. Setelah mendapatkan nilai tersebut kemudian digunakan persamaan 3.15 untuk mengubah frekuensi menjadi panjang gelombang.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad 3.15$$

Setelah terdapat data panjang gelombang dan absorpsi selanjutnya data diolah menggunakan origin untuk mendapatkan grafik hubungan antara panjang gelombang terhadap absorpsi. Kemudian, grafik tersebut dianalisis dengan menghitung luas dibawah kurva untuk mendapatkan nilai absorpsi secara

Yuni Rahmawati, 2023

KRSTAL FOTONIK 2-DIMENSI SEBAGAI LAPISAN ANTI REFLEKSI UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI SEL SURYA SILIKON DENGAN SIMULASI FDTD

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

keseluruhan. Setelah mendapatkan nilai absorpsi selanjutnya adalah menganalisis performa listrik sel surya. Dari monitor didapatkan *output* berupa data daya maksimum dan beda potensial dari sel surya. Untuk mendapatkan nilai efisiensi maka digunakan persamaan 3.14 dan di plot menggunakan origin sehingga menghasilkan grafik hubungan antara beda potensial dengan efisiensi. Nilai efisiensi maksimum pada sel surya didapatkan saat beda potensial 0,5 volt.

3.7.1 Teknik Analisis Pengaruh Bentuk Kristal Fotonik Terhadap Performa Sel Surya

Untuk mengetahui pengaruh bentuk kristal fotonik terhadap terhadap performa sel surya silikon maka diperlukan data di setiap bentuk kristal fotonik yang diterapkan pada sel surya silikon tersebut. Kemudian data diolah seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bagaimana mendapatkan nilai absorpsi dan efisiensi dari setiap bentuk kristal fotonik yang diterapkan pada sel surya silikon. Setelah mendapatkan nilai tersebut selanjutnya adalah membandingkan nilai absorpsi dan efisiensi dalam bentuk grafik untuk mengetahui tren absorpsi dan efisiensi yang lebih baik agar terlihat secara jelas.

3.7.2 Teknik Analisis Pengaruh Rasio Kristal Fotonik Terhadap Performa Sel Surya

Untuk menganalisis pengaruh rasio kristal fotonik terhadap performa sel surya adalah dengan menggunakan bentuk kristal fotonik yang sudah optimal kemudian divariasikan rasio antara kristal fotonik. Sama seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya proses cara untuk mendapatkan nilai absorpsi dan juga efisiensi dari setiap rasio kristal fotonik kemudian dibandingkan dengan menggunakan origin dalam grafik. Sehingga mendapatkan nilai rasio yang optimal untuk divariasikan lebih lanjut.

3.7.3 Teknik Analisis Pengaruh Diameter Kristal Fotonik Terhadap Performa Sel Surya

Dalam menganalisis pengaruh diameter dan konstanta kisi kristal fotonik terhadap performa optik dan listrik sel surya silikon yaitu dengan memvariasikan beberapa diameter dengan menggunakan bentuk dan rasio kristal fotonik yang sudah dioptimalkan sebelumnya. Setelah mensimulasikannya kemudian didapatkan data untuk diolah seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya sehingga

mendapatkan nilai absorpsi dan efisiensi yang dapat dibandingkan untuk mengetahui nilai diameter dan konstanta kisi yang optimal

3.7.4 Teknik Analisis Pengaruh Ketebalan Kristal Fotonik Terhadap Performa Sel Surya

Ketebalan kristal fotonik merupakan salah satu parameter yang dianalisis untuk mengetahui bagaimana pengaruhnya terhadap performa optik dan listrik sel surya silikon. Ketebalan kristal fotonik divariasikan dengan menggunakan diameter dan konstanta kisi yang optimal pada simulasi sebelumnya dan mendapatkan data untuk setiap ketebalan yang berbeda. Data tersebut kemudian diolah dan dianalisis seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya sehingga didapatkan nilai absorpsi dan efisiensi yang optimal pada salah satu ketebalan kristal fotonik

3.7.5 Teknik Analisis Pengaruh Kristal Fotonik Terhadap Performa Sel Surya

Setelah mendapatkan bentuk, rasio, dan ukuran kristal fotonik seperti diameter, konstanta kisi dan ketebalan yang optimal selanjutnya adalah menganalisis bagaimana pengaruh kristal fotonik terhadap sel surya silikon tersebut jika dibandingkan dengan sel surya tanpa kristal fotonik. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bagaimana cara mendapatkan nilai absorpsi dan efisiensi. Dari nilai tersebut sehingga diperoleh nilai perbandingan absorpsi dan efisiensi untuk sel surya dengan kristal fotonik dan tanpa kristal fotonik dalam bentuk grafik sehingga terlihat pengaruhnya. Selanjutnya dianalisis medan elektromagnetik pada sel surya dengan kristal fotonik dan tanpa kristal fotonik untuk mengetahui performa penyerapan dari sel surya tersebut.