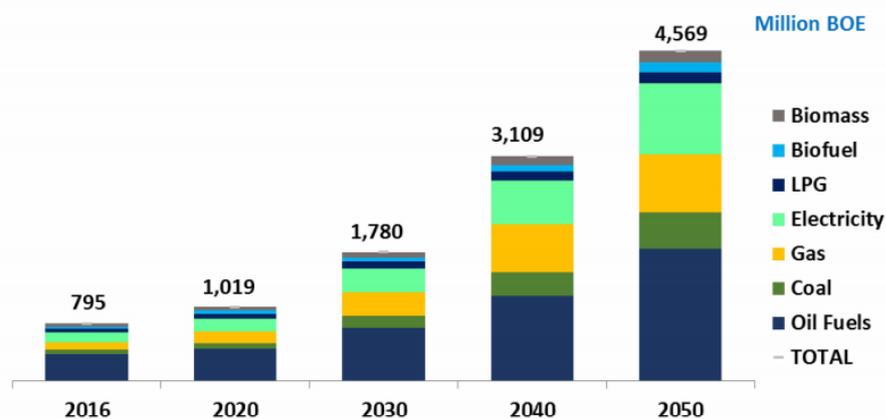


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Potensi Energi Matahari di Indonesia

Kebutuhan akan energi di Indonesia semakin meningkat seiring meningkatnya jumlah penduduk serta menguatnya sektor perekonomian. Untuk memenuhi kebutuhan energi tersebut, hingga saat ini Indonesia masih bergantung pada sumber energi fosil. Pertumbuhan penduduk rata-rata untuk tahun 2017-2050 mencapai 0.73% per tahun dengan pertumbuhan Pendapatan Domestik Bruto (PDB) sebesar 4,9% per tahun. Peningkatan tersebut diikuti oleh peningkatan kebutuhan energi setiap tahun hingga 4,4% pada berbagai jenis energi. Pada tahun 2050 diprediksi bahwa kebutuhan akan listrik di Indonesia menjadi pengguna energi terbesar setelah penggunaan energi Bahan Bakar Minyak (BBM).[2] Pada Gambar 2.1 menunjukkan grafik kebutuhan energi dalam hal ini energi listrik terus mengalami peningkatan hingga tahun 2050. Pemenuhan kebutuhan energi listrik tersebut tentu tidak akan berjalan dengan baik jika hanya memanfaatkan energi fosil seperti minyak bumi ataupun batubara. Untuk itu perlu adanya sumber energi lain yang lebih ramah lingkungan dan ketersediaan yang cukup untuk membantu pemenuhan kebutuhan akan energi terutama energi listrik.



Gambar 2.1 Kebutuhan energi final berdasarkan jenisnya[1]

Cadangan energi fosil yang terus berkurang serta aktivitasnya yang berakibat buruk pada lingkungan mendorong pemerintah untuk mengeluarkan peraturan untuk menggunakan energi baru dan terbarukan yang lebih ramah lingkungan. Pada tahun 2018, cadangan minyak Indonesia berkurang sebesar 0,27% dibandingkan pada tahun 2017. Selain itu, batubara yang hingga saat ini masih menjadi tumpuan utama energi listrik Indonesia diprediksi akan habis cadangannya pada 71 tahun yang akan datang.[2] Sehingga, pemanfaatan energi baru dan terbarukan dengan beberapa sumber energi alternatif yang dimiliki harus diusahakan untuk menjadi sumber utama pemenuhan energi. Dengan beberapa jenis sumber energi baru yang tersedia, pemerintah Indonesia menargetkan bauran energi terbarukan dapat mencapai 23% di tahun 2030.[11]

Energi matahari menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang potensinya sangat besar, mengingat bahwa Indonesia merupakan negara tropis dengan matahari yang bersinar sepanjang tahun. Diprediksi potensi energi cahaya matahari di Indonesia mencapai 4,80 KWh/m² setiap harinya. Akan tetapi, potensi tersebut belum dimanfaatkan secara optimal sehingga belum bisa memenuhi kebutuhan energi nasional. Saat ini, energi terbarukan masih didominasi oleh energi yang berasal dari air, panas bumi, serta biomassa. Meski demikian, saat ini pemerintah terus berupaya meningkatkan pemasangan panel surya sebagai salah satu sumber energi terbarukan. Selain jumlahnya yang melimpah, energi listrik berbasis panel surya juga lebih ramah lingkungan dibanding dengan pembangkit batubara. Hal itu disebabkan oleh proses produksi listrik yang hanya memanfaatkan energi cahaya matahari tanpa ada proses pembakaran yang menghasilkan gas CO₂.

Kelebihan lain dari pembangkit listrik tenaga cahaya matahari adalah dapat dipasang di tempat yang jauh dari sumber pembangkit. Saat ini, mayoritas daerah yang belum teraliri listrik di Indonesia adalah daerah pedesaan dengan akses yang sulit serta letaknya yang jauh dari sumber energi listrik konvensional ataupun tidak terdapat sumber energi alternatif lainnya. Oleh karena itu, pemasangan panel surya dapat menjadi solusi permasalahan

tersebut karena sifatnya yang fleksibel serta cahaya matahari yang menjadi sumber energi dapat mencapai daerah yang jauh dari sumber energi lainnya. Sehingga panel surya dapat dipasang di daerah pedalaman tanpa harus membangun pembangkit sumber energi lainnya.

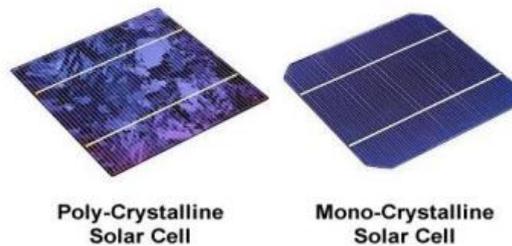
2.2 Perkembangan Panel Surya

Energi cahaya matahari atau energi surya merupakan energi yang berasal dari matahari yang dapat diubah menjadi sumber daya energi lain dengan menggunakan peralatan tertentu. Umumnya energi surya saat ini di konversi menjadi energi listrik menggunakan panel surya dengan memanfaatkan efek fotovoltaik sebagai salah satu sumber energi terbarukan. Teknik konversi energi cahaya matahari ini berawal pada tahun 1839 oleh A.C Becquerel dengan menggunakan kristal silikon. Akan tetapi, hingga tahun 1955 metode ini tidak banyak digunakan karena dihasilkannya energi fosil seperti minyak, gas serta batubara yang digunakan sebagai sumber energi pembangkit listrik. Sampai pada tahun 1958 material silikon kembali dikembangkan sebagai alat konversi energi terutama untuk penggunaan teknologi luar angkasa.[12] Hingga saat ini perkembangan panel surya telah sampai generasi ketiga dan terus berkembang seiring kebutuhan energi yang meningkat dan ketertarikan peneliti untuk mengeksplor lebih jauh untuk menciptakan energi yang ramah lingkungan, memiliki biaya yang rendah serta meningkatkan efisiensi yang hingga saat ini menjadi keterbatasan dari teknologi panel surya. Berikut merupakan perkembangan teknologi panel surya hingga saat ini:

a. Sel surya generasi pertama

Teknologi sel surya generasi pertama diperoleh dari struktur silikon tunggal atau monokristal. Sebagai generasi pertama, efisiensi yang dihasilkan sudah cukup tinggi. Akan tetapi pada proses produksinya mengalami keterbatasan karena biaya yang dikeluarkan sangat tinggi. Sel generasi pertama juga dikenal memiliki lapisan yang cukup tebal dengan menggunakan material silikon. Pada generasi pertama juga berkembang panel surya berbasis silikon polikristal yang memiliki keunggulan yaitu biaya pembuatan yang

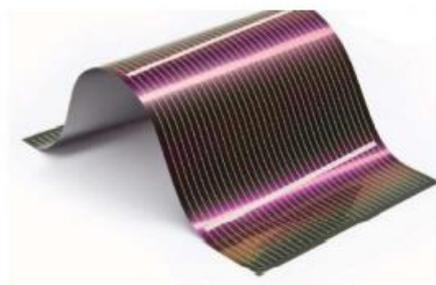
lebih rendah dari silikon monokristal, akan tetapi memiliki efisiensi yang lebih rendah juga. [13]



Gambar 2.2 Sel surya generasi pertama[14]

b. Sel surya generasi kedua

Sel surya generasi ini dikenal juga sebagai sel surya lapisan film tipis (*Thin-film solar cell*) karena lapisannya lebih tipis dibandingkan sel surya pada umumnya. Oleh karena itu, sel surya ini dinilai lebih ekonomis karena memiliki lapisan material yang lebih tipis. Sel surya jenis ini memiliki struktur yang lebih fleksibel sehingga lebih mudah diaplikasikan pada bangunan. Perbedaan sel surya generasi kedua dengan generasi pertama selain pada ketebalan panel juga pada jenis material semikonduktor yang digunakan. Sel surya generasi ini menggunakan material *Amorphous Silicon*, *Cadmium Telluride*, *Copper-Indium-Selenide* (CIS) dan *Copper-Indium-Gallium-Diselenide* (CIGS). Masing-masing memiliki efisiensi 11,8% , 21,4%, dan 21,6%. Kekurangan dari generasi kedua ini adalah material semikonduktor yang jarang ditemukan serta memiliki sifat beracun seperti pada *cadmium*. [13]



Gambar 2.3 *Thin film solar cell*[14]

c. Sel surya generasi ketiga

Generasi pertama yang berbiaya tinggi dalam produksinya serta sel surya generasi kedua yang memiliki keterbatasan pada material semikonduktor menyebabkan munculnya sel surya generasi ketiga. Generasi ini sedikit berbeda dengan generasi sbelumnya, beberapa material digunakan selain material silikon, seperti nanomaterial, *silicon wire*, tinta solar yang memproduksi dengan cara di print hingga plastik konduktif. Berbagai penelitian dilakukan untuk menciptakan panel surya yang siap diproduksi secara komersial dengan biaya yang murah, proses produksi yang mudah serta material yang tidak beracun. [13]



Gambar 2.4 *Dye sensitized solar cell*[14]

Hingga saat ini sel surya terus dikembangkan diberbagai aspek yang mempengaruhi efisiensi, kemudahan produksi, ketersediaan bahan baku hingga pengurangan harga untuk menyediakan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan ramah konsumen. Dari berbagai jenis sel surya yang ada, sel surya dengan material semikonduktor silikon merupakan jenis yang saat ini paling banyak digunakan sebagai panel surya. Ketersediaan material bahan baku serta teknologi untuk memproduksi panel surya yang juga semakin berkembang, sehingga menjadikannya banyak digunakan. Meskipun, jenis ini masih memiliki keterbatasan dalam hal efisiensi menghasilkan energi listrik.

2.3 Gelombang Elektromagnetik

James Clark Maxwell (1831-1879) mengemukakan hipotesisnya mengenai tiga aturan dasar mengenai hubungan listrik dengan magnet. Maxwell mengatakan bahwa medan listrik dapat dihasilkan dari muatan medan listrik itu sendiri yang

dapat dinyatakan dengan hukum Coloumb. Selain itu beliau mengemukakan bahwa arus yang mengalir dapat menghasilkan medan magnet disekitar arus tersebut yang dinyatakan dengan hukum Ampere. GGL induksi akibat perubahan medan magnet dapat menghasilkan medan listrik yang dinyatakan dengan hukum induksi Faraday. Dari ketiga aturan tersebut Maxwell mengemukakan bahwa medan magnet dapat menimbulkan medan listrik begitupun sebaliknya. Dari hipotesisnya tersebutlah beliau menjelaskan mengenai fenomena gelombang elektromagnetik.

Beberapa jenis gelombang elektromagnetik divisualisasikan dalam bentuk spektrum gelombang elektromagnetik yang dibedakan berdasarkan frekuensi dan panjang gelombangnya. Hubungan antara kecepatan perambatan gelombang, Panjang gelombang dan frekuensi dinyatakan sebagai berikut.[15]

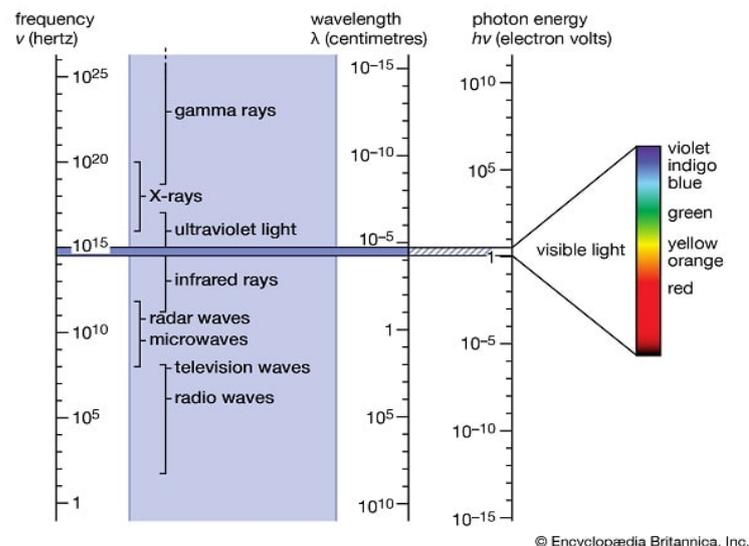
$$c = f \times \lambda \tag{2.1}$$

Keterangan:

c = Kecepatan perambatan gelombang (m/s)

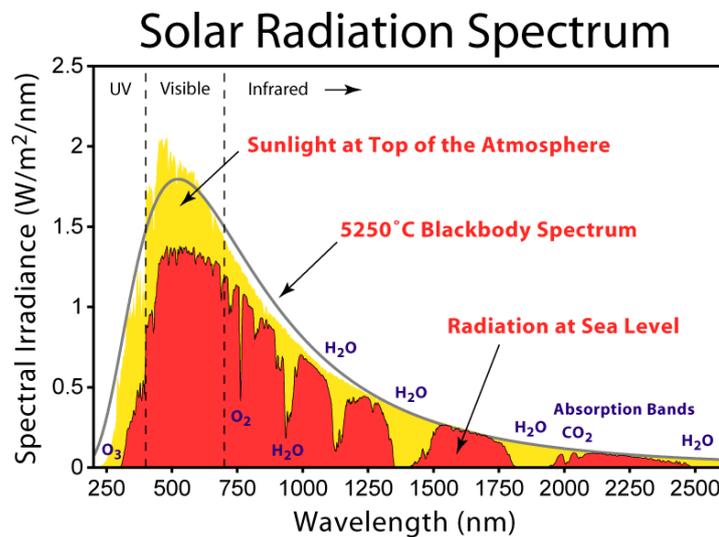
f = Frekuensi Gelombang (Hz)

λ = Panjang Gelombang (m)



Gambar 2.5 Spektrum gelombang elektromagnetik[16]

Salah satu jenis gelombang elektromagnetik yang paling umum adalah cahaya matahari. Berdasarkan pada gambar 2.2 spektrum radiasi dari cahaya matahari berada pada rentang panjang gelombang 250-2500 nm atau rentang frekuensi antara 120-1200 THz. Selain dimanfaatkan untuk kebutuhan sehari-hari dan sebagai sumber energi utama di tata surya, saat ini energi cahaya matahari terus dikembangkan sebagai sumber energi alternatif dengan memanfaatkan panel surya. Dimana energi foton yang berasal dari matahari akan diserap oleh material semikonduktor seperti silikon. Silikon merupakan material semikonduktor yang saat ini umum digunakan sebagai bahan utama pembuatan panel surya dengan energi mencapai 1.12 eV. Berdasarkan pada Gambar 2.1 silikon menjadi pilihan tepat untuk material panel surya karena berada di rentang frekuensi cahaya tampak yang memiliki radiasi cahaya paling tinggi dalam rentang radiasi matahari.[17]



Gambar 2.6 Spektrum radiasi cahaya matahari[17]

2.4 Metamaterial

Material yang sering dilihat dan digunakan saat ini merupakan material yang berasal dari alam yang tersusun dari partikel kecil yang disebut atom dan juga molekul. Beberapa diantaranya memiliki susunan tersendiri sejak terbentuknya material tersebut. Sedangkan pada metamaterial struktur tersebut dapat diatur baik berdasarkan ukuran, geometri maupun jenis material yang digunakan. Pengembangan mengenai material yang dapat mengatur gelombang

elektromagnetik terus digalakkan oleh peneliti. Hal ini mulai berkembang pada akhir abad ke 19 dengan struktur pertama yang di golongkan sebagai metamaterial dipelajari oleh Jagadish Chandra Bose pada tahun 1989 dengan risetnya berupa substansi kiral. Hingga pada tahun 1967 material dengan indeks bias negatif dapat dijelaskan secara teori oleh Victor Veselago. Jhon Pendry pada tahun 1999 mengidentifikasi dengan cara yang lebih praktis untuk menghasilkan *left handed material* atau material yang memiliki karakteristik yang berlawanan dengan material pada umumnya (*Right handed material*).[18]

Gelombang elektromagnetik yang mengenai metamaterial akan direkayasa untuk menghasilkan sifat tertentu dari metamaterial. Untuk menjelaskan fenomena ini maupun fenomena gelombang elektromagnetik lainnya digunakan persamaan Maxwell. Persamaan ini pertama kali dirumuskan oleh James Clerk Maxwell pada tahun 1860 an. Berikut merupakan persamaan yang digunakan untuk menggambarkan fenomena gelombang elektromagnetik.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + j\omega\mathbf{D} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mathbf{B} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (2.5)$$

Pada persamaan tersebut, simbol yang ditebalkan merupakan satuan vector dengan masing-masing H adalah medan magnet, B kerapatan fluks magnet, D kerapatan fluks elektrik, J kerapatan arus, E medan listrik dan ∇ persamaan diferensial.[8] dari persamaan ini akan diperoleh dua metode untuk mengetahui sifat dari metamaterial yang dirancang, yaitu berdasarkan domain waktu (*time domain*) dan domain frekuensi (*Frequency domain*).

Secara bahasa metamaterial berasal dari Bahasa Yunani yaitu “*meta*” yang berarti melampaui. Dalam hal ini metamaterial dimaksudkan sebagai material yang memiliki kemampuan tertentu yang diperoleh dengan merekayasa struktur material yang belum dapat ditemukan di alam. Dalam referensi lain

menyebutkan, metamaterial memiliki dua definisi yang berbeda. Pertama metamaterial adalah komposit yang direkayasa yang dapat menghasilkan sifat material unggul yang tidak dapat ditemukan di alam serta tidak dapat diamati pada unsur material biasa. Kedua, metamaterial adalah material buatan untuk memanipulasi gelombang elektromagnetik dengan nilai permitivitas dan permeabilitas yang dapat diatur. Susunan material dibuat secara periodik dengan ukuran elemen dan sel satuan yang lebih kecil dari gelombang yang akan dimanipulasi. [8] Hingga saat ini metamaterial terus dikembangkan untuk aplikasi teknologi informasi dan komunikasi, pertahanan dan keamanan [19], bidang kesehatan hingga energi [9][20].

Keberadaan metamaterial erat kaitannya dengan permitivitas dan permeabilitas suatu material. Karena dengan mengatur parameter tersebut dapat diperoleh metamaterial dengan sifat tertentu karena indeks bias yang dihasilkan dari permitivitas dan permeabilitas. Indeks bias yang dihasilkan bisa bernilai negatif (*Negative refractive index*) ataupun indeks bias yang tinggi (*High refractive index*). Permitivitas sendiri diartikan sebagai ukuran resistansi atau tahanan terhadap suatu material dalam pembentukan medan listrik. Selain itu, permitivitas juga merupakan sifat dari material untuk menggambarkan sifat medan listriknya. Hal ini terjadi karena adanya polarisasi dari dua muatan yang berbeda yaitu muatan positif dan negative. Aplikasi dari sifat ini biasanya digunakan dalam pemilihan material untuk kapasitor. Permitivitas merupakan rasio dari kekuatan perpindahan medan (D) dengan kekuatan medan elektrik (E) saat dikenai gelombang, atau dirumuskan sebagai berikut,

$$\varepsilon = \frac{D}{E} \quad (2.6)$$

Parameter lainnya yaitu permeabilitas, merupakan ukuran kemampuan suatu material saat dilewati garis gaya magnetik. Selain itu permeabilitas juga digambarkan sebagai kemampuan material dalam melewati medan magnet. Hal ini terjadi keran adanya proses magnetisasi yaitu saat terbentuknya putaran

arus (*current loop*) yang membentuk lingkaran pada satuan unit terkecil. Permeabilitas (μ) digunakan sebagai indikator untuk material induktor dan juga inti transformator. Permeabilitas adalah rasio dari kerapatan fluks magnet (B) dibandingkan dengan medan magnet (H), atau dituliskan sebagai berikut.[21]

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.7)$$

Berdasarkan parameter permitivitas (ϵ) dan permeabilitas (μ), material diklasifikasikan menjadi empat kuadran sebagai berikut:

a. Kuadran pertama

Pada kuadran ini material memiliki nilai $\epsilon > 0, \mu > 0$, kondisi ini dimiliki oleh material pada umumnya. Dimana gelombang akan dipropagasikan dengan arah yang dapat ditunjukkan dengan kaidah jempol tangan kanan. Kuadran ini disebut juga dengan *Right Hand Material* (RHM).

b. Kuadran kedua

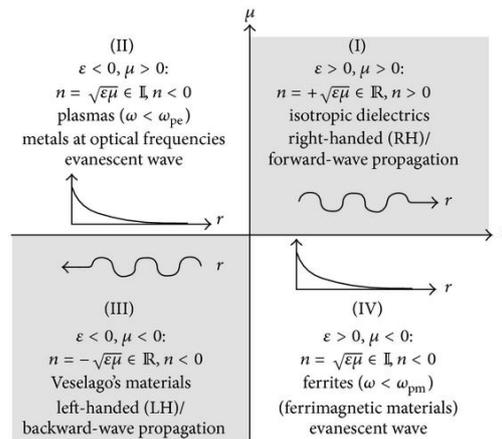
Dengan kondisi $\epsilon < 0, \mu > 0$ material ini mendukung penurunan besar gelombang (*decay*) dan menggambarkan kondisi material plasma elektrik yang juga disebut sebagai *Epsilon negative*.

c. Kuadran ketiga

Material pada kuadran ini memiliki kondisi $\epsilon < 0, \mu < 0$ dimana kondisi ini lah yang dijelaskan secara teoritis oleh Veselago dan menjadi tonggak awal berkembangnya metamaterial hingga saat ini. Kuadran ini disebut sebagai *Left Handed Material* (LHM) dimana gelombang dipropagasikan berlawanan arah dengan arah datangnya dan merupakan kebalikan dari kuadran pertama. Karena permitivitas dan permeabilitas yang dihasilkan dibawah angka nol, sehingga indeks bias yang dihasilkanpun bernilai negative (*Negative Refractive Index*).

d. Kuadran empat

Pada kuadran keempat material memiliki kondisi $\epsilon > 0, \mu < 0$, disebut juga kuadran plasma magnetic dan mendukung terjadinya *evanescent*. Berikut merupakan gambaran dari empat kuadran tersebut.[22]



Gambar 2.7 Kuadran material berdasarkan nilai permitivitas dan permeabilitas[23]

2.5 Metamaterial Absorber

Salah satu jenis metamaterial yang menarik perhatian peneliti adalah metamaterial *absorber*. Metamaterial *absorber* merupakan jenis metamaterial yang dibuat dengan tujuan menyerap sebanyak-banyaknya gelombang elektromagnetik untuk aplikasi tertentu seperti pada alat pemanen energi (*energy harvesting*), pengurangan efek hamburan gelombang, maupun digunakan untuk sensor berbasis termal atau panas. Berdasarkan teori penyerapan gelombang elektromagnetik, setiap gelombang yang mengenai batas atau permukaan suatu medium akan dipantulkan, diserap, dilanjutkan atau ditransmisikan, dihamburkan atau mungkin dapat mengaktifkan elektron dipermukaan medium. Fenomena *absorbansi*, berdasarkan pada metamaterial yang memiliki impedansi permukaan yang tinggi, telah dikemukakan dan terdiri dari susunan struktur *Split Ring Resonator* (SRR) yang dipisahkan oleh material dielektrik dan memiliki lapisan dasar. Saat gelombang dilewatkan akan memiliki nilai reflektivitas 1 dan menghasilkan medan listrik yang besar di permukaan. Lapisan yang memiliki tahanan dipasang dibagian luar metamaterial akan menyerap energi sebelum direfleksikan Kembali. Prediksi teori ini menunjukkan bahwa dibutuhkan lapisan material dielektrik yang lebih tipis dari gelombang yang akan dikenakan.[24] secara umum persamaan terjadinya absorbansi pada metamaterial adalah sebagai berikut.

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (2.8)$$

$$A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{12}|^2 \quad (2.9)$$

Dimana :

$$A(\omega) = \text{Absorbansi}$$

$$R(\omega) = \text{Koefisien Reflektansi}$$

$$T(\omega) = \text{Koefisien Transmittansi}$$

$$|S_{11}| = \text{Magnitudo dari reflektansi}$$

$$|S_{12}| = \text{Magnitudo dari transmittansi}$$

Dalam fenomena absorbansi yang dialami oleh metamaterial, terdapat dua teori yang dapat digunakan untuk mendeskripsikan mengenai hal tersebut. Kedua teori tersebut adalah sebagai berikut.

a. *Air Impedance Matching Theory*

Metamaterial *absorber* biasanya memiliki struktur berlapis yang disebut sebagai struktur “*sandwich*”, memiliki susunan tertentu yang terdiri dari pola yang terbuat dari logam di satu sisi, substrat dan material dengan konduktivitas tinggi dibagian dasar (*ground plane*). Permittivitas elektrik dan permeabilitas magnetik dari material tersebut masing-masing berupa $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r(\omega)$ dan $\mu = \mu_0 \mu_r(\omega)$. Dimana ε_0 dan μ_0 adalah permitivitas dan permeabilitas dari udara bebas. Sedangkan $\varepsilon_r(\omega)$ dan $\mu_r(\omega)$ merupakan permitivitas dan permeabilitas relatif bergantung pada frekuensi dalam suatu medium yang tidak memiliki satuan. Adanya lapisan dasar atau *ground plane* menyebabkan tidak adanya transmisi gelombang yang terjadi. Sehingga memungkinkan untuk berfokus pada refleksi yang terjadi pada metamaterial saja. Berdasarkan pada rumus Fresnel untuk kasus refleksi menyatakan bahwa.

$$R_{TE} = |r_{TE}|^2 = \left| \frac{\mu_r \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\mu_r \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right|^2, \quad (2.10)$$

$$R_{TM} = |r_{TM}|^2 = \left| \frac{\varepsilon_r \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\varepsilon_r \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right|^2 \quad (2.11)$$

Dimana TE dan TM masing-masing adalah *Transverse Electric* dan *Transverse Magnetic* dari gelombang yang terpolarisasi. θ merupakan sudut datang arah gelombang elektromagnetik dan n adalah indeks bias dari metamaterial. Dalam kasus ini, sudut datang berarah normal terhadap permukaan metamaterial sehingga nilai $\theta = 0^\circ$. Untuk itu persamaannya menjadi,

$$R = \left| \frac{Z-Z_0}{Z+Z_0} \right|^2 = \left| \frac{\sqrt{\pi_r}-\sqrt{\epsilon_r}}{\sqrt{\pi_r}+\sqrt{\epsilon_r}} \right|^2 \quad (2.12)$$

Dimana $Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ merupakan impedansi dari metamaterial dan $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ merupakan impedansi dari udara bebas. Karena lapisan dasar mengalami nol transmisi, maka absorbansi yang diperoleh adalah:

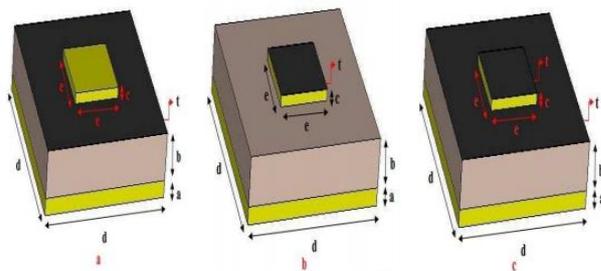
$$A = 1 - R = 1 - \left| \frac{Z-Z_0}{Z+Z_0} \right|^2 = 1 - \left| \frac{\sqrt{\pi_r}-\sqrt{\epsilon_r}}{\sqrt{\pi_r}+\sqrt{\epsilon_r}} \right|^2 \quad (2.13)$$

Untuk mendapatkan kesesuaian tahanan (*impedance matching*) dalam metamaterial dibutuhkan resonansi elektrik dan magnetik yang berekesinambungan. Jika hanya terdapat resonansi tunggal elektrik atau magnetik saja maka akan mengalami ketidakcocokan dimana tidak akan terjadi penyerapan oleh metamaterial secara sempurna. Teori ini juga akan menggambarkan fenomena refleksi yang terjadi pada suatu metamaterial dimana semakin kecil impedansi yang dihasilkan semakin kecil juga refleksi gelombangnya.

b. Teori Interferensi (*Destructive Interference Theory*)

Metamaterial dapat dianggap sebagai sistem yang berpasangan, khususnya, resonansi magnetiknya dipaksakan menjadi arus anti parallel diantara lapisan logam bagian depan dan belakang. Lapisan bagian depan yang terdiri dari pola logam berfungsi sebagai permukaan yang merefleksikan Sebagian gelombang, yang bisa dimodifikasi menjadi refleksi kompleks dan koefisien transmisi. Disisi lain, lapisan dasar dengan konduktifitas yang tinggi digunakan sebagai perefleksi yang sempurna, dengan 180° fasa tertinggal dari gelombang elektromagnetik yang mengalami refleksi. Teori ini menjelaskan absorbansi sebagai fenomena akibat refleksi berkali-kali (*multiple reflections*) dengan basis sudut datang

yang bervariasi.[25] Teori ini dapat digunakan untuk melihat fenomena absorptansi dengan mengetahui indeks bias sebagai penggambaran dari transmisi gelombang elektromagnetik. Gambar 2.8 merupakan salah satu contoh rancangan metamaterial penelitian terdahulu untuk aplikasi pada panel surya. Dalam penelitian tersebut digunakan lapisan *graphene* serta lapisan material konduktor aluminium di bagian bawah. Dari hasil penelitian tersebut dihasilkan dua buah puncak dengan nilai absorptansi tertinggi.



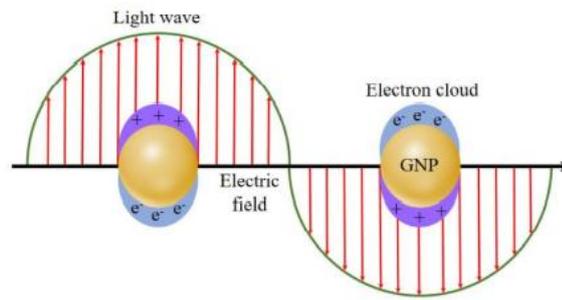
Gambar 2.8 Contoh metamaterial *absorber* untuk aplikasi panel surya dengan penambahan lapisan *graphene*[26]

2.6 Nanopartikel Emas

Nanoteknologi kini semakin berkembang dan menarik untuk dikembangkan karena sifat yang ditimbulkan sangat berbeda dengan sifat material asalnya. Ukuran material yang diperkecil hingga ukuran nanometer menjadikannya memiliki sifat yang berbeda. Ukuran nanoteknologi yang dimaksud adalah materi yang memiliki ukuran 1-100 nm. Salah satu fenomena yang terjadi pada nanoteknologi khususnya nanomaterial adalah *Surface Plasmon Polariton*. Fenomena ini merupakan akibat dari osilasi elektron yang timbul pada permukaan nanomaterial saat dilewatkan gelombang elektromagnetik. Nanostruktur logam mendukung terjadinya resonansi permukaan plasmon secara lokal pada frekuensi optik (THz/PHz) dengan mengatur ukuran, bentuk, maupun permitivitas dielektriknya. Kondisi tersebut dapat meningkatkan kemampuan material dalam menyerap dan menyebarkan cahaya serta menghasilkan medan listrik di permukaan yang tinggi.[27]

Salah satu aplikasi dari penggunaan nanopartikel emas yaitu untuk memanen energi (*energy harvesting*). Mekanisme penangkapan cahaya yang efektif sangatlah diperlukan untuk meningkatkan kemampuan solar sel, khususnya pada jenis solar sel yang tipis (*thin solar cell*). Untuk itu, beberapa pendekatan yang berbeda telah dicoba seperti pemberian tekstur pada permukaan solar sel maupun pemberian material yang dapat mencegah terjadinya transmisi. Beberapa penelitian telah dilakukan dengan memanfaatkan teknologi nano yang digunakan untuk menangkap cahaya plasmon dengan nanopartikel emas (Au) maupun perak (Ag). Penggunaan nanopartikel emas untuk meningkatkan kemampuan solar sel dalam hal ini sel surya jenis DSSC (*dye-sensitized solar cells*)[10] dan mampu meningkatkan penyerapan energi. Dengan mengatur ukuran dan bentuk dari nanopartikel, sifat *plasmon* permukaan juga akan berubah dan akan mempengaruhi hamburan cahaya yang dikenakan. Dimana terdapat dua mekanisme yang dapat menjelaskan kontribusi nanopartikel emas yaitu berdasarkan pada mekanisme penghamburan cahaya dan efek dari medan lokal yang berdekatan.

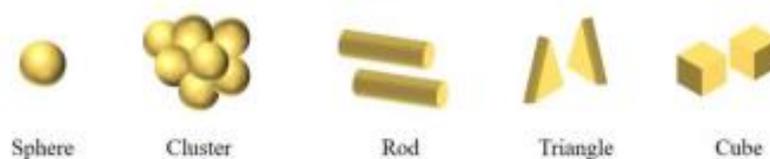
Sifat yang ditimbulkan oleh nanopartikel emas berbeda dengan material emas pada bentuk utuh (*bulk*). Seperti diketahui pada umumnya pada ukuran normal material emas memiliki warna kuning mengkilat, bersifat non reaktif dan tidak bisa dijadikan katalis. Akan tetapi pada ukuran nano, sifat yang dihasilkan beragam berdasarkan pada bentuk dan ukurannya. Pada kasus ini material tidak lagi menjadi warna kuning mengkilap, warna nanopartikel emas mulai dari biru hingga kemerahan karena ukuran yang berbeda, warna biru dihasilkan oleh ukuran yang lebih besar. Selain itu material tersebut sangat stabil untuk mencegah terjadinya oksidasi, membuatnya baik digunakan untuk aplikasi fotokatalis maupun bidang biomedik. Selain itu, sifat permukaan resonansi plasmonnya juga berbeda, pada nanopartikel plasmon permukaan terjadi saat resonansi sama dengan frekuensi cahaya. Berikut gambar yang memvisualisasikan terjadinya fenomena tersebut.



Gambar 2.9 Interaksi nanopartikel emas saat dikenai gelombang elektromagnetik[28]

Interaksi yang kuat antara elektron bebas dan gelombang elektromagnetik terjadi saat nanopartikel logam dikenai gelombang yang ukurannya sama atau lebih kecil dari gelombang yang dilewatkan. Gelombang elektromagnetik menyebabkan elektron bebas berosilasi pada permukaan. Ketika frekuensi cahaya yang dikenakan sesuai dan beresonansi dengan pergerakan elektron, penyerapan yang kuat akan terjadi pada koloid emas dalam rentang frekuensi cahaya tampak (*visible frequency regime*). Semakin besar ukuran nanopartikel emas, puncak absorbansi akan berpindah ke gelombang yang lebih panjang.

Selain mengendalikan ukuran nanopartikel, yang tak kalah penting adalah menentukan bentuk dari nanopartikel. Hal itu karena sifat kimia fisik dari nanopartikel yang sangat bergantung pada ukuran dan bentuk untuk dapat digunakan sesuai fungsinya. Beberapa bentuk nanostruktur yang dilaporkan antara lain bentuk *nanorod*, *nanosphere*, *nanocluster*, *nanostar*, *nanocube*, *triangles* dan *nanoshell*. Berikut merupakan beberapa bentuk dari nanopartikel.



Gambar 2.10 Bentuk yang berbeda pada nanopartikel emas[28]

Sifat fisik dan optik nanopartikel emas sangat bergantung pada aspek rasio (panjang dan lebar ukuran) dan morfologi (bentuk). Sebagai contoh sebuah

nanopartikel emas ukuran 5 nm berwarna orange kemerahan akan berubah menjadi warna biru saat ukurannya dibesarkan. Berbagai bentuk tersebut dihasilkan dari metode sintesis nanopartikel yang berbeda.[28]

2.7 Pemodelan material

Struktur unik yang dimiliki oleh panel surya yang tipis atau *Thin film solar cell* untuk meningkatkan efisiensinya membutuhkan metode komputasi yang lebih maju sehingga dapat mensimulasikan propagasi gelombang pada ketebalan dari masing-masing material pada panel surya. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk memodelkan simulasi pada panel surya yang tipis yaitu Drude-lorentz model. Model ini dapat digunakan untuk rentang gelombang cahaya yang merupakan gelombang yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik pada panel surya.

Dalam memodelkan penyebaran serta penyerapan gelombang oleh suatu material, koefisien dispersinya harus diperhitungkan. Beberapa metode telah diteliti berdasarkan studi literatur yang ada, salah satunya *Herzinger model* yang sukses digunakan untuk data optik dari rentang ultraviolet sampai infra merah tetapi gagal untuk rentang gelombang yang lebih tinggi. Oleh karena itu digunakan pemodelan Drude-Lorentz dengan kemampuan yang dapat diimplementasikan pada material semikonduktor maupun logam, fleksibel dan cocok dengan algoritma metode *Finite Difference Time Domain (FDTD)* yang digunakan dalam aplikasi simulasi gelombang elektromagnetik. Rentang frekuensi yang cukup tinggi yaitu frekuensi cahaya tampak dalam hal ini cahaya matahari mengharuskan dilakukannya pemodelan pada material semikonduktor untuk mendapatkan hasil simulasi yang akurat.[29]

Metode FDTD luas digunakan untuk melakukan simulasi komputasi elektrodinamik untuk penghamburan cahaya dari berbagai bentuk. Tidak seperti metode frekuensi domain, permitivitas dielektrik dari suatu material tidak bisa langsung diganti dalam skema FDTD. Akan tetapi, hal itu bisa

dilakukan dengan melakukan beberapa pendekatan seperti Deby, Lorentz dan Drude yang dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \sum_{p=1}^p \varepsilon_p(\omega) \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_p(\omega) = \frac{a_{p,0} + a_{p,1}(-i\omega)}{b_{p,0} + b_{p,1}(-i\omega) - b_{p,2}\omega^2} \quad (2.15)$$

Dimana ε_{∞} merupakan frekuensi infinit dan $a_{p,j}$ dan $b_{p,j}$ merupakan koefisien kesesuaian riil yang tidak memerlukan arti secara fisik. Kesesuaian yang lebih fleksibel dapat dicapai dengan menambahkan $(-i\omega)^n$ baik pada pembilang maupun pada penyebutnya. Pada bagian pembilang hal itu menggambarkan fenomena polarisasi secara langsung dalam medium dibagi waktu saat dilewatkan medan listrik. Pada pembagi hal itu bertanggungjawab pada tingkat penurunan elektrik yang lebih tinggi (n ganjil) atau hubungan dispersi elektrik pada medium (n genap). Berdasarkan penelitian yang dilakukan sebelumnya dengan nilai P = 2 sudah dapat memodelkan tanggapan dari silikon kristalin dalam bentuk utuh dengan Panjang gelombang 300-1000 nm. Meski nilai yang lebih besar dari Deybe, Lorentz dan Drude belum bisa digunakan untuk keseluruhan spektrum matahari, permitivitas silikon coba disesuaikan dengan dua keadaan. Hasil dari penelitian menunjukkan pemodelan tersebut bisa digunakan untuk melakukan simulasi dengan rentang cahaya tampak.[30]

$$\varepsilon_p(\omega) = \frac{\Delta\varepsilon(\omega_p^2 - i\gamma'_p\omega)}{\omega_p^2 - 2i\omega\gamma_p - \omega^2} \quad (2.16)$$

Adapun nilai-nilai parameter yang digunakan dalam penelitian terdahulu untuk pemodelan Drude Lorentz pada aplikasi material silikon disesuaikan dengan persamaan 2.16. besaran parameternya adalah $\varepsilon_{\infty} = 1$, $\Delta\varepsilon_1 = 8.93$, $\Delta\varepsilon_2 = 1.855$, $\omega_1 = 3.42$ (berhubungan dengan $\lambda_1 \approx 0.292 \mu m$) $\omega_2 = 2.72$ ($\lambda_2 \approx 0.368 \mu m$), $\gamma_{p1} = 0.425$, $\gamma_{p2} = 0.123$, $\gamma'_{p1} = 0.087$, $\gamma'_{p1} = 2.678$.

Untuk material nanopartikel emas digunakan pemodelan Drude, yang merupakan kasus khusus dari pemodelan Lorentz. Pemodelan drude sering digunakan untuk menggambarkan sifat optik dari logam mulia. Seperti diketahui logam mulia umum digunakan sebagai bahan pembuat metamaterial. Dalam hal ini permitivitas nanopartikel emas menggunakan Drude model yang dirumuskan sebagai berikut.

$$\varepsilon_{Au}(\omega) = 1 - \frac{\omega_{p,Au}}{\omega^2 + i\omega\Gamma_{Au}} \quad (2.17)$$

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh $\omega_{p,Au} = 1.38 \times 10^{16} \text{ rad/sec}$ dan $\Gamma_{Au} = 0.11 \times \frac{10^{15}}{\text{sec}}$. Dimana ω , $\omega_{p,Au}$, dan Γ_{Au} merupakan frekuensi angular, frekuensi angular plasma dari emas, dan konstanta damping dari emas secara berturut-turut.[31]