BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Satuan (*Unit* cell)

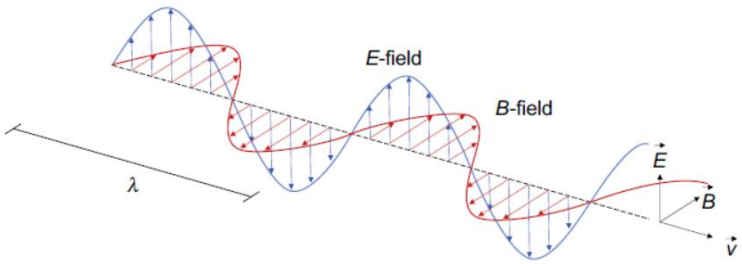
Sel satuan (*unit cell*) adalah struktur dasar blok penyusun dari struktur kristal dan mendefinisikan struktur kristalnya berdasarkan bentuk geometri dan posisi atomnya [8]. Bentuk-bentuk sel satuan pada umumnya adalah *Face-Centered Cubic* (FCC), *Body-Centered Cubic* (BCC), dan *Hexagonal Close-Packed* (HCP) [8]. Setiap material memiliki bentuk sel satuan yang berbeda-beda. Bentuk sel satuan dari setiap material akan memengaruhi sifat dari material tersebut. Karenanya, perbedaan bentuk sel satuan akan menghasilkan sifat (*properties*) yang berbeda [9].

Untuk mendapatkan sifat material yang diinginkan, terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan. Callister dalam bukunya mengungkapkan ada empat komponen yang saling berkaitan untuk mengetahui sifat dari suatu material [8]. Empat komponen tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.1.

Gambar 2.1 Empat komponen dari sifat material beserta hubungannya [8]

2.2 Gelombang Elektromagnetik

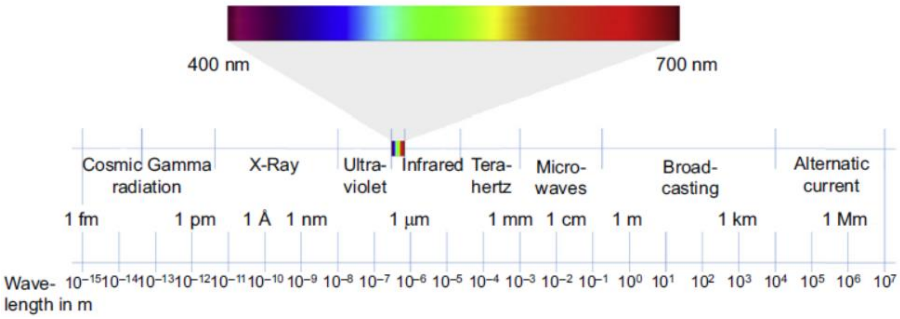
Gelombang elektromagnetik adalah sepasang komponen medan listik dan magnetik yang merambat dimana medan listrik dan magnetik tersebut saling tegak lurus perambatannya dalam suatu media [10]. Gelombang elektromagnetik berbeda dari gelombang mekanik (seperti gelombang air laut, gelombang suara, gelombang gempa, dll) dimana gelombang mekanik membutuhkan medium untuk merambat. Ini berarti gelombang elektromagnetik dapat merambat tidak hanya di udara dan benda padat, melainkan dapat juga di ruang hampa udara (vakum) [11]. Ilustrasi dari perambatan gelombang elektromagnetik ditunjukkan oleh Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Skema dari sebuah gelombang elektromagnetik [10]

Radiasi gelombang elektromagnetik dapat diekspresikan dalam bentuk energi, panjang gelombang, dan frekuensi [12]. Frekuensi diukur dalam satuan siklus per detik atau Hertz (Hz). Panjang gelombang diukur dalam satuan meter (m). Dan energi diukur dalam satuan elektron volt (eV). Para ilmuwan biasa meneliti tentang gelombang elektromagnetik dalam bentuk panjang gelombang atau frekuensi.

Gelombang elektromagnetik memiliki panjang gelombang dari 10^{-15} m (1 fm) hingga 10^{7} m (10.000 km) [10]. Dari rentang tersebut, gelombang elektromagnetik dapat dibagi menjadi beberapa spektrum seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.3. Pada setiap spektrumnya, tiap gelombang memiliki ciri khas yang dapat kita manfaatkan keberadaannya. Seperti pada spektrum *x-ray* dengan frekuensi $2{,}5\times10^{17}$ hingga 6×10^{19} Hz, dapat dimanfaatkan dalam bidang medis [10]. Lalu pada spektrum gelombang mikro (*microwaves*) dengan frekuensi 1 hingga 300 GHz, dapat dimanfaatkan dalam bidang komunikasi, satelit, radar, navigasi, industrial, peralatan rumah tangga (*microwaves* oven), medis, dll [5].



Gambar 2.3 Spektrum frekuensi dari gelombang elektromagnetik [10]

2.2.1 Persamaan Maxwell

Persamaan Maxwell merupakan empat persamaan dasar yang mendeskripsikan segala kondisi dari medan elektromagnetik. Keempat persamaan tersebut dituliskan sebagai berikut [13]:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad \text{(Hukum Gauss)} \tag{2.1}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{(Hukum Gauss untuk medan magnet)} \tag{2.2}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{(Hukum Faraday)} \tag{2.3}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{(Hukumm Ampere-Maxwell)} \tag{2.4}$$

dimana D adalah nilai kerapatan fluks medan listrik (*electric flux density*), B adalah nilai kerapatan fluks medan magnet (*magnetic flux density*), E adalah nilai medan listrik, H adalah nilai medan magnet, J adalah nilai rapat arus (*current density*), ρ_v adalah nilai rapat muatan per satuan volum (*volume charge density*), dan t adalah waktu. Persamaan Maxwell ini menjadi persamaan dasar yang akan digunakan dalam simulasi menggunakan perangkat lunak CST *Studio Suite*.

2.3 Metamaterial

Metamaterial dapat diartikan sebagai material buatan yang disusun untuk mengontrol dan mengatur gelombang elektromagnetik atau gelombang fisik yang lain [14]. Metamaterial memiliki sifat unik yang tidak tersedia secara alami di alam bebas [3]. Metamaterial juga menunjukkan respons yang kuat dalam memanipulasi gelombang elektomagnetik, fenomena polarisasi, amplituda, serta arah rambat gelombang [15]. Karena karakteristiknya yang unik, menjadikan metamaterial dapat diaplikasikan ke beberapa sektor seperti satelit, *optical cloaking* (lensa tembus pandang), *microwave antenna*, dan sensor [15].

Metamaterial dapat memanipulasi gelombang elektromagnetik dengan cara mengatur sel satuannya (*unit cell*). Cara memanipulasinya dengan mendesain sel satuan yang dapat bekerja pada frekuensi tertentu. Kita dapat merekayasa

gelombang elektromagnetik dengan menyusun material dengan permitivitas dan permeabilitas yang berbeda hingga mendapatkan kondisi yang kita inginkan. Permitivitas dan permeabilitas didapatkan dari sel satuan. Permitivitas menggambarkan kemampuan material beradaptasi terhadap medan listrik. Sementara permeabilitas mengatur kemampuan material dari medan magnet.

2.3.1 Permitivitas

Permitivitas atau konstanta dielektrik (ε) merupakan kemampuan material dalam menyimpan energi potensial listrik pada sebuah medan listrik [16]. Biasanya nilai permitivitas dari suatu material tertentu ditandai dengan simbol ε_r atau *relative permittivity*. Sementara terdapat nilai permitivitas absolut, yaitu permitivitas pada ruang vakum yang ditandai dengan simbol ε_0. Persamaan dari permitivitas adalah sebagai berikut [17]:

$$D = \varepsilon E \tag{2.5}$$

dimana D adalah nilai kerapatan fluks medan listrik, ε adalah permitivitas, dan E adalah nilai medan listrik. Persamaan 2.1 juga dapat dibuat dalam bentuk lain, yaitu:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_0} \tag{2.6}$$

dimana ε_r adalah permitivitas relatif, ε_s adalah nilai permitivitas dari suatu zat (Farad/meter), dan ε_0 adalah nilai permitivitas dari vakum (Farad/meter).

2.3.2 Permeabilitas

Permeabilitas adalah kemampuan material dalam menerima medan magnet yang merambat melalui material tersebut. Permeabilitas memiliki hubungan dengan fluks medan magnet dan intensitas medan magnet. Hubungan tersebut tertulis dalam persamaan sebagai berikut [18]:

$$B = \mu H \tag{2.7}$$

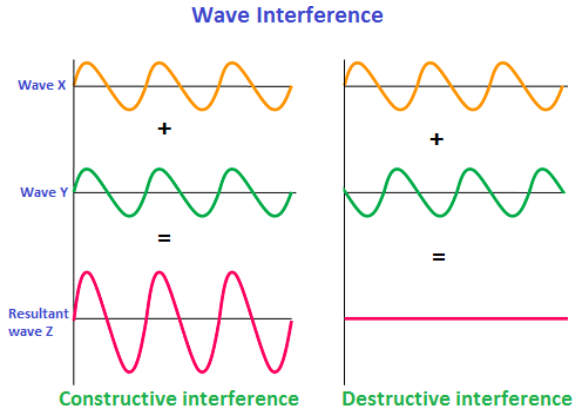
dimana B adalah intensitas medan magnet (Tesla), μ adalah permeabilitas (Henries/m), dan H adalah fluks medan magnet (Ampere/m). Sedangkan permeabilitas relatif merupakan perbandingan antara permeabilitas suatu material dengan permeabilitas vakum (μ_0). Persamaan permeabilitas relatif dapat dituliskan dengan rumus [18]:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{2.8}$$

dimana μ_r adalah nilai permeabilitas relatif, μ adalah permeabilitas dari material tertentu (H/m), dan μ_0 adalah permeabilitas dari ruang vakum ($\mu_0 = 4\pi \times 10^7$ H/m).

2.4 Interferensi

Interferensi merupakan fenomena bergabungnya dua atau lebih gelombang yang merambat pada medium yang sama. Terdapat dua jenis interferensi, yaitu interferensi yang sifatnya membangun (*constructive interference*) dan interferensi yang sifatnya merusak (*destructive interference*). *Constructive interference* terjadi ketika dua gelombang yang merambat memiliki amplituda yang sama. Ketika dua gelombang tersebut bertemu, maka akan menghasilkan gelombang baru yang amplitudanya lebih besar dan besarnya adalah gabungan dari besar amplituda kedua gelombang tersebut. Sedangkan *destructive interference* terjadi ketika dua gelombang yang merambat memiliki amplituda yang berlawanan. Ketika dua gelombang tersebut bertemu, maka akan menghasilkan gelombang baru yang besarnya lebih kecil dari kedua gelombang tersebut, bahkan tidak ada. Ilustrasi dari fenomena kedua interferensi tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Fenomena interferensi

Sumber: http://www.physics-and-radio-electronics.com/physics/waveinterference.html

Pada kasus menciptakan *metamaterial absorber*, fenomena *destructive interference* diterapkan [19][20]. Dengan menggunakan metal sebagai *ground plane* pada metamaterial yang diciptakan, kita dapat menciptakan fenomena *multiple reflection* [19]. *Multiple reflection* yang terjadi di metamaterial tersebut akan menimbulkan fenomena *destructive interference* dengan gelombang yang datang ke metamaterial.

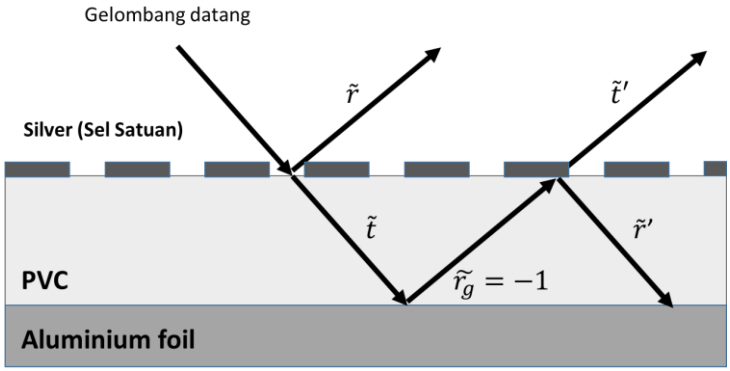
Persamaan total refleksi yang dihasilkan pada fenomena ini dijelaskan oleh Yudistira sebagai berikut [19]:

$$\tilde{r}_{total} = \tilde{r} + \frac{\tilde{t}\tilde{t}'\tilde{r}_g exp^{i2\tilde{\beta}}}{1 - \tilde{r}'\tilde{r}_g exp^{i2\tilde{\beta}}} \qquad \textbf{(2.9)}$$

dimana $\tilde{r}_{total}$ adalah nilai total refleksi gelombang, $\tilde{r}$ adalah koefisien refleksi, $\tilde{t}$ adalah koefisien transmisi, $\tilde{r}_g$ adalah koefisien refleksi yang direfleksikan ke bahan dielektrik, $\tilde{t}'$ adalah koefisien transmisi gelombang yang ditransmisikan kembali ke udara, $\tilde{r}'$ adalah koefisien refleksi gelombang yang direfleksikan kembali, dan $\tilde{\beta}$ adalah nilai gelombang transmisi yang merambat pada metamaterial. Nilai $\tilde{r}_g$ pada penelitian ini adalah -1, karena refleksi yang dihasilkan oleh *ground plane* (aluminium foil) sempurna. Maka, Persamaan 2.9 akan menjadi:

$$\tilde{r}_{total} = \frac{\tilde{r} - \alpha exp^{i2\tilde{\beta}}}{1 + \tilde{r}' exp^{i2\tilde{\beta}}} \quad \textbf{(2.10)}$$

dimana $\alpha = \tilde{t}\tilde{t}' - \tilde{r}\tilde{r}'$. Fenomena *destructive interference* pada penelitian kali ini diilustrasikan seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Ilustrasi *destructive interference* pada penelitian ini

2.5 *Impedance Matching*

Impedance matching merupakan salah satu fenomena fisika yang dapat diimplementasikan untuk penerapan teknologi siluman. Caranya adalah mengatur impedansi dari metamaterial sama dengan impedansi dari udara serta mengatur nilai *refractive index*-nya tinggi [19]. Yudistira [4] menyebutkan penyerapan gelombang pada metamaterial yang menggunakan *ground plane* akan maksimum dengan menciptakan reflektansi yang kecil. Fenomena *impedance matching* ini adalah cara yang digunakan untuk memperoleh nilai reflektansi yang kecil [4]. Dengan mendapatkan reflektansi yang kecil, maka gelombang yang datang tidak akan terpantulkan ke *reciever* gelombang.

Hubungan antara S-parameter, indeks bias (n), dan impedansi dimodelkan oleh Yudistira sebagai berikut [4]:

$$S_{11} = \frac{R_1(1 - e^{i2nk_0l})}{1 - (R_1)^2 e^{i2nk_0l}} \quad \textbf{(2.11)}$$

$$S_{12} = \frac{\{1 - (R_1)^2\} e^{i2nk_0l}}{1 - (R_1)^2 e^{i2nk_0l}} \quad \textbf{(2.12)}$$

dimana S_{11} dan S_{12} adalah hasil S-parameter dari simulasi yang dilakukan, $R_1 = \frac{z_r - 1}{z_r + 1}$, k_0 adalah nilai *wavenumber* di ruang bebas, dan *l* adalah tebal dari sampel.

Persamaan dalam mencari impedansi metamaterial dijelaskan oleh Yudistira sebagai berikut [4]:

$$z_r = \pm\sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - {S_{12}}^2}{(1 - S_{11})^2 - {S_{12}}^2}} \qquad \textbf{(2.13)}$$

dimana z_r adalah impedansi relatif dari material, S_{11} dan S_{12} adalah hasil S-parameter dari simulasi yang dilakukan. Nilai S_{12} adalah nol karena efek dari *ground plane* yang digunakan (aluminium foil). Karenanya, persamaan 2.13 akan disederhanakan menjadi:

$$z_r = \pm\sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2}{(1 - S_{11})^2}} \qquad \textbf{(2.14)}$$

Untuk menciptakan nilai refleksi yang kecil, maka nilai impedansi metamaterial harus mendekati dengan nilai impedansi udara. Melalui formula $|(z_r \text{ (real)}-1) + iz_r \text{ (imaginary)}|$, Yudistira menjelaskan hubungan antara impedansi metamaterial dengan impedansi udara [4]. Semakin nilai impedansi metamaterial mendekati dengan impedansi udara, maka penyerapan metamaterial terhadap gelombang elektromagnetik akan semakin maksimum [4].

Pada penelitian kali ini, peristiwa *absorbing* metamaterial berdasarkan oleh fenomena *destructive interference* dan *impedance matching*. Kedua fenomena saling berkaitan dalam menciptakan peristiwa *absorbance*.

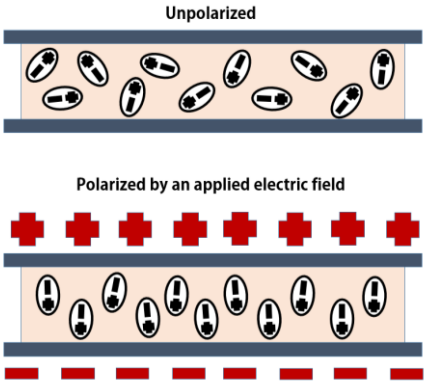
2.6 Metal

Menurut KBBI, logam atau metal adalah suatu mineral tidak tembus pandang yang dapat menghantarkan panas dan arus listrik yang baik. Metal merupakan material yang dapat dijadikan sebagai konduktor. Beberapa contoh metal yang sering dijadikan konduktor antara lain tembaga, perak, dan aluminium.

Masing-masing dari metal tersebut memiliki *properties*-nya masing-masing yang membedakan antara satu metal dengan yang lainnya. Adapun nilai *conductivity* beberapa metal dalam satuan siemens per meter (S/m) adalah $5{,}8\times10^{7}$ untuk tembaga, $6{,}17\times10^{7}$ untuk perak, dan $3{,}82\times10^{7}$ untuk aluminium [13].

2.7 Dielektrik

Dielektrik merupakan bahan isolator listrik yang kerap digunakan dalam alat-alat semi konduktor [21]. Tidak seperti metal yang dapat menghantarkan arus listrik, ketika dielektrik diletakkan di dalam medan listrik, tidak ada aliran listrik yang merambat di dalam dielektrik tersebut. Dielektrik yang diberi arus listrik akan menimbulkan efek polarisasi.



Gambar 2.6 Ilustrasi polarisasi pada bahan dielektrik

2.8 PVC

Polivinil Klorida (PVC) adalah jenis polimer termoplastik yang populer digunakan di seluruh dunia. PVC merupakan salah satu plastik yang memiliki peran vital di dunia karena harganya yang ekonomis, memiliki ketahanan yang cukup baik, serta mudah untuk dalam manufakturnya [22]. PVC memiliki ciri-ciri bahan berwarna putih, bersifat amorf (memiliki struktur kristal yang tidak dikenal), serta stabil pada suhu temperatur normal dan tekanan hingga 70 – 80°C [22]. Terdapat dua tipe resin PVC yang diproduksi dan diproses, yaitu resin dalam bentuk *rigid* (kaku) dan fleksibel [22]. Resin PVC dalam bentuk *rigid* diproses melalui ekstrusi atau dengan cetakan (*molding*) untuk membuat pipa, beberapa part otomotif, dan yang lainnya.

Sementara resin PVC fleksibel diberikan *plasticizer* (bahan aditif untuk meningkatkan fleksibilitas) untuk membuatnya lebih lentur dan fleksibel.

Pada penelitian ini PVC digunakan sebagai dielektrik metamaterial karena memiliki sifat yang fleksibel. PVC juga menjadi salah satu bahan isolator dan dapat menyimpan energi listrik. Penggunaan PVC sebagai dielektrik metamaterial pada penelitian ini diharapkan dapat diaplikasikan ke dalam geometri bentuk pesawat yang cukup kompleks. PVC ini sendiri memiliki properti elektrik permitivitas sekitar 3 (tiga) [23].

2.9 CST *Studio Suite*

CST *Studio Suite* merupakan perangkat lunak yang memiliki fungsi untuk mendesain, melakukan simulasi, dan mengoptimalkan segala sistem elektromagnetik [24]. Perangkat lunak milik *Dassault Systemes* ini sangat berguna untuk orang yang ingin meneliti dan mempelajari bagaimana sifat gelombang elektromagnetik akan bekerja pada suatu objek. Perangkat lunak ini juga membantu kita dalam memecahkan masalah dalam bidang-bidang yang berhubungan dengan gelombang elektromagnetik. Bidang-bidang yang kerap menggunakan *software* ini dalam memecahkan persoalannya adalah gelombang mikro & RF (*Radio Frequency*)/*Optical*, elektronik, frekuensi rendah/statis, *particle dynamic*, dan EMC (*Electromagnetic Compatibility*) atau EMI (*Electromagnetic Interference*) [24]. Salah satu metode simulasi penyelesaian masalah (*simulation solver*) yang ada di CST *Studio Suite* adalah FIT (*Finite Integration Technique*).

Finite Integration Technique adalah metode yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan Maxwell dalam bentuk persamaan integral [25]. Solusi dari metode ini merupakan hasil numerik. Metode FIT dapat digunakan penerapannya dalam memecahkan berbagai persoalan di gelombang elektromagnetik.

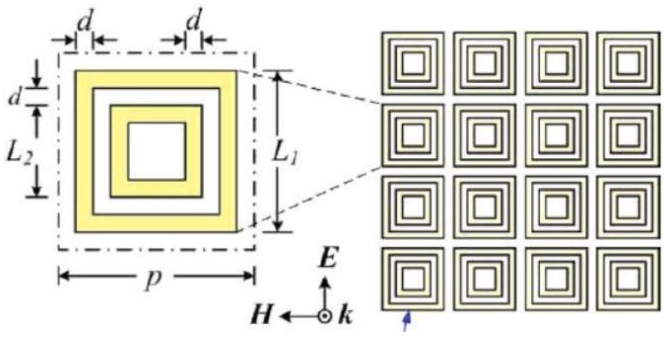
2.10 Penelitian Terkait

2.10.1 Teknologi Siluman di Dunia Militer

Telah ada penelitian sebelumnya tentang penerapan teknologi siluman di bidang militer Indonesia [2]. Rachmawati [2] dalam penelitiannya mengembangkan teknologi cat kapal yang dapat menyerap gelombang radar pada rentang *x-band*, sehingga kapal tersebut tidak akan terdeteksi. Cat kapal dicampurkan dengan material Barium M-Heksaferit dan Polianilin, dimana kedua material tersebut telah disintesis terlebih dahulu secara terpisah. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa peningkatan material Polianilin pada campuran cat berhasil menghasilkan penyerapan gelombang radar yang semakin besar, hingga mencapai 99,86547% penyerapan gelombang radarnya.

2.10.2 Bentuk Sel Satuan

Telah ada penelitian sebelumnya tentang desain sel satuan yang akan menjadi referensi pada penelitian kali ini. Chung [26] mendesain metamaterial yang bertindak untuk meningkatkan *bandwidth* pada frekuensi 2,45 GHz menggunakan desain seperti pada Gambar 2.7. Hasil penelitian menunjukkan antena yang diletakkan metamaterial tersebut berhasil meningkatkan efisiensi antena dari -4,3 dB menjadi -1,4 dB.



Gambar 2.7 Desain metamaterial yang digunakan pada penelitian Chung [26]