

BAB II

DASAR TEORI

2.1 *Ground Penetrating Radar*

Ground Penetrating Radar (GPR) merupakan metode geofisika dengan menggunakan teknik elektromagnetik yang dirancang untuk mendeteksi objek yang terkubur di dalam tanah dan mengevaluasi kedalaman objek tersebut. GPR juga dapat digunakan untuk mengetahui kondisi dan karakteristik permukaan bawah tanah tanpa mengebor ataupun menggali tanah.

Penerapan dari pendeteksi posisi atau *radar imaging* salah satu contohnya adalah untuk aplikasi GPR. GPR yang memiliki prinsip kerja sama seperti radar, dan merupakan suatu alat yang digunakan untuk proses deteksi benda-benda yang terkubur di bawah tanah atau di balik tembok dengan tingkat kedalaman tertentu dengan menggunakan gelombang radio [6]. Untuk mendapatkan resolusi kedalaman yang baik maka ukuran pulsa haruslah sependek mungkin, itulah sebabnya *monocycle* digunakan.

Adapun faktor yang berpengaruh dalam menentukan tipe antena yang digunakan, sinyal yang ditransmisikan, dan metode pengolahan sinyal yaitu :

1. Jenis objek yang akan dideteksi
2. Kedalaman objek
3. Karakteristik elektrik medium tanah atau properti elektrik.

Dari proses pendeteksian oleh GPR, maka akan didapatkan suatu citra dari letak dan bentuk objek yang terletak di bawah tanah atau dipermukaan tanah.

Untuk menghasilkan pendeteksian yang baik, suatu sistem GPR harus memenuhi empat persyaratan sebagai berikut [7]:

1. Kopling radiasi yang efisien ke dalam tanah
2. Penetrasi gelombang elektromagnetik yang efisien
3. Menghasilkan sinyal dengan amplitudo yang besar dari objek yang dideteksi.
4. *Bandwidth* yang cukup untuk menghasilkan resolusi yang baik.

2.1.1 Prinsip Kerja GPR

Sistem GPR dapat dibagi menjadi empat kategori berdasarkan prinsip kerja, yaitu [1] :

2.1.1.1 *Impulse* GPR

Mayoritas sistem GPR menggunakan impuls sinyal elektromagnetik dan disebut radar impuls. Untuk tipe radar ini, pulsa digunakan pada antena pemancar yang menggunakan bentuk Gaussian dengan durasi pendek. Setiap pulsa yang identik diterapkan pada interval waktu yang sama dengan tingkat pengulangan yang bervariasi dari satu mikrodetik untuk beberapa ratus mikrodetik. Sinyal output ditangkap oleh penerima diproses oleh konverter analog-digital atau berurutan penerima *sampling*. Prosedur ini memiliki efek pemetaan sinyal RF di nanodetik wilayah waktu untuk versi setara di kedua wilayah kalinya mikro atau milidetik. Teknik modulasi yang digunakan pada radar impuls didasarkan pada modulasi amplitudo.

2.1.1.2 *Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Radar*

Sistem FMCW GPR didasari oleh prinsip yang sudah biasa digunakan pada radar konvensional untuk pertahanan udara. Radar FMCW didasari oleh transmisi sinyal dengan frekuensi pembawa yang terus berubah karena dipengaruhi efek dari *voltage controlled oscillator* (VCO). Frekuensi pembawa berubah dengan bervariasi secara berulang-ulang. Sebuah *mixer* digunakan untuk mencampur sinyal yang diterima dengan sampel dari gelombang yang ditransmisikan. Kemudian, *mixer* menghasilkan frekuensi berbeda yang juga disebut "*Intermediate Frequency (IF)*". IF terkait dengan jarak terhadap target.

2.1.1.3 *Stepped Frequency Radar*

Radar *stepped frequency* juga disebut radar pulsa sintesis. Radar ini mentransmisikan serangkaian frekuensi individu yang berurutan dimana amplitudo dan fasenya telah diketahui. Dalam *time domain*, ini sama dengan mentransmisikan gelombang impulsif secara berulang-ulang. Amplitudo dan fasa dari sinyal yang diterima kemudian diubah dan disimpan. Beberapa pengolahan pasca melibatkan *inverse kompleks Fast Fourier Transform (FFT)* dilakukan untuk memperoleh sinyal pantulan dalam domain waktu.

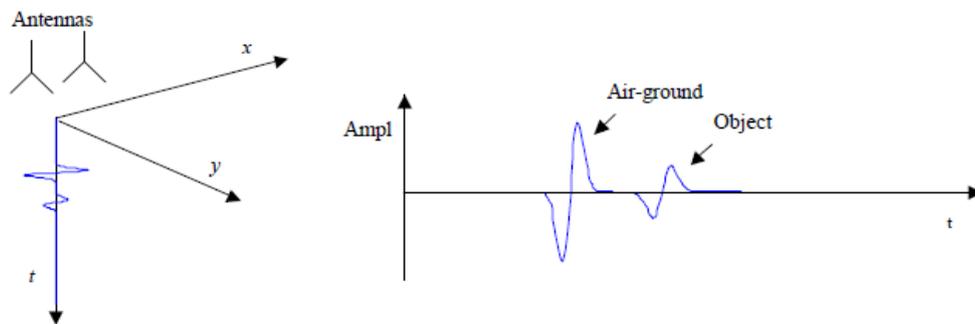
2.1.1.4 *Single Frequency Radar*

Radar *single frequency* merekam amplitudo dan fasa dari sinyal yang diterima kemudian membentuk gambaran dari sumber radiasi. Metode hologram dapat digunakan untuk membentuk gambar tersebut.

2.1.2 Model Umum GPR

2.1.2.1 A-Scan

Rekaman sinyal yang dipantulkan pada posisi tetap mengarah ke bentuk gelombang memiliki variasi amplitudo terhadap waktu (atau jarak). Gelombang tunggal ini disebut sebagai *A-scan*. Secara matematis, kita dapat mewakili *A-scan* sebagai gelombang $w(x_i, y_j, t)$ di mana x_i dan y_j adalah konstanta dan t adalah waktu. Gambar 2.1 menunjukkan representasi *A-scan*.

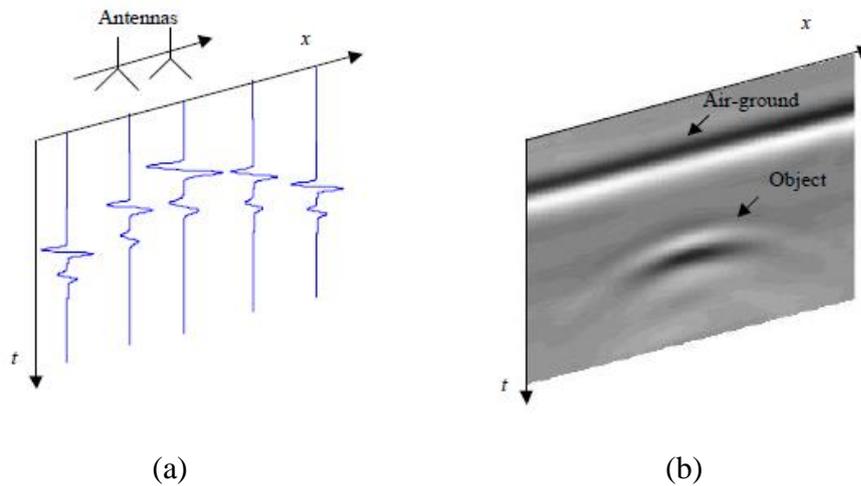


Gambar 2.1 Konfigurasi dan gambaran dari *A-scan*

2.1.2.2 B-Scan

B-scan adalah kumpulan seperangkat *A-scan*. Secara praktis, *B-scan* $w(x, y_j, t)$ diperoleh dengan menggerakkan radar sepanjang garis lurus di atas wilayah tanah. Gambar 2.2 menunjukkan representasi *B-scan* ketika radar dioperasikan di atas tanah dan target terkubur yang kemudian bergerak sepanjang sumbu x . Dengan radar bergerak lebih dekat ke posisi target, gelombang refleksi menjadi semakin kuat dan berlangsung pada waktu yang lebih singkat karena jarak antara radar dan target objek semakin dekat. Sebaliknya, gelombang refleksi akan menjadi semakin lemah dan mempunyai waktu yang lebih lama saat radar tersebut

berjalan menjauhi objek sasaran. Dengan mengumpulkan satu set *A-scan* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, dapat dengan jelas melihat bentuk karakteristik hiperbola, yang terbentuk karena adanya objek.

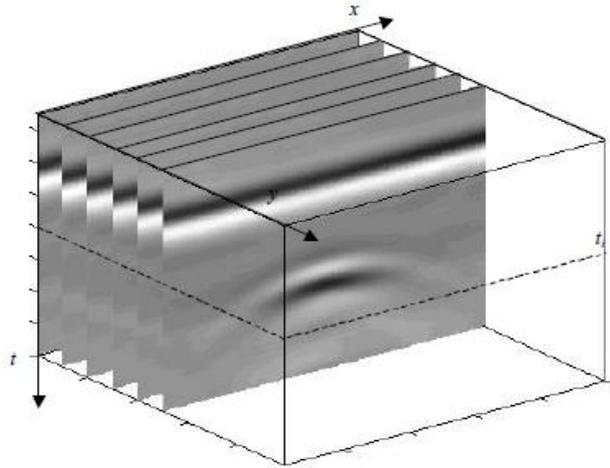


Gambar 2.2 (a) Sejumlah *A-scan* yang membentuk *B-scan*

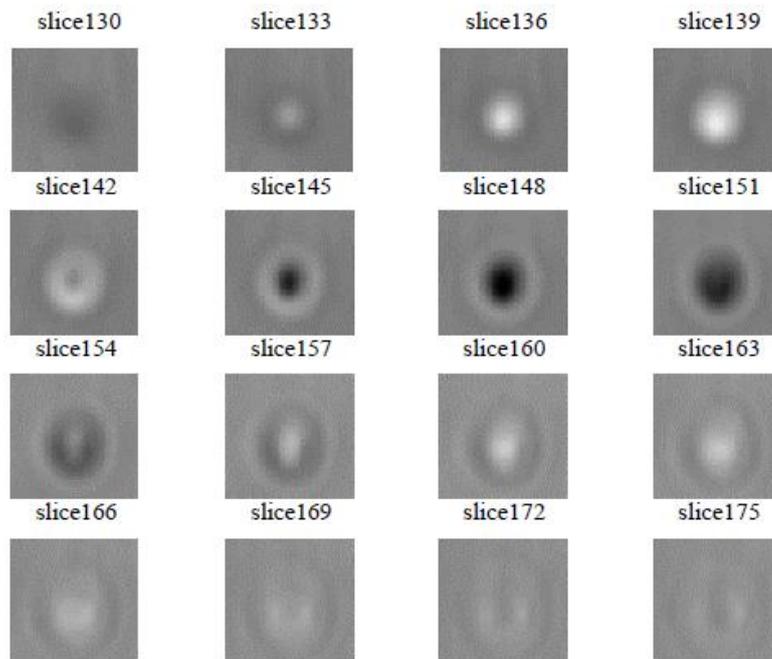
(b) Gambaran *B-scan*

2.1.2.3 C-Scan

C-scan $w(x, y, t)$ didefinisikan sebagai satu set *B-scan*. Hal ini diperoleh dengan menggerakkan sistem radar disepanjang *grid* (garis) reguler disebuah pola tetap di atas tanah. Sebuah *C-scan* berisikan data-data yang cukup untuk memungkinkan membentuk gambaran tiga dimensi dari target. *C-scan* dapat direpresentasikan sebagai gambar tiga dimensi maupun gambar dua dimensi terhadap kedalaman yang berbeda. Gambar 2.3 dan 2.4 masing-masing menunjukkan bentuk gambaran dan sampling dari *C-scan* dengan lebih detail.



Gambar 2.3 Konfigurasi B-scan yang di paralel membentuk C-scan

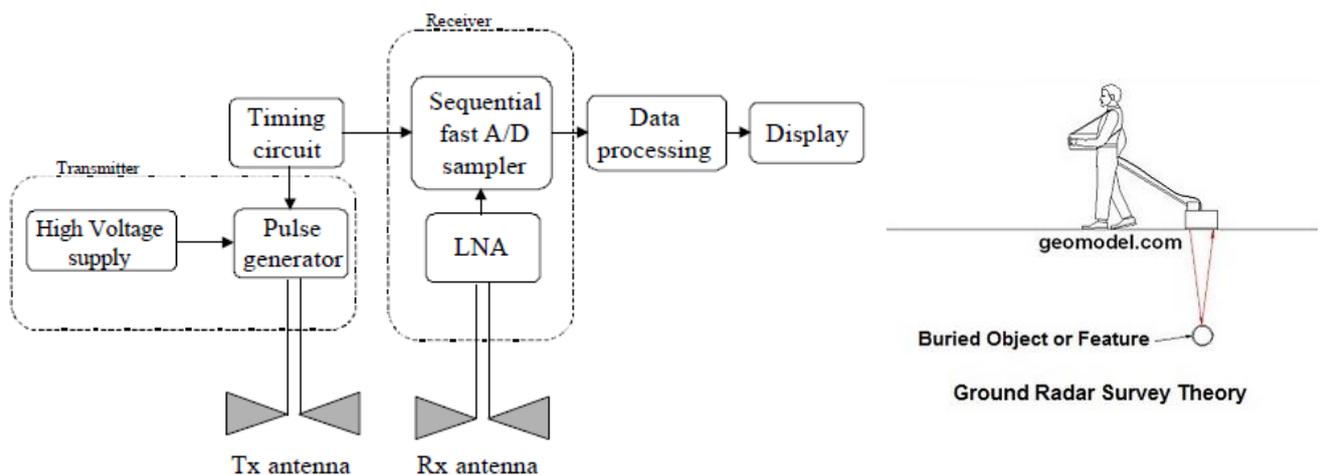


Gambar 2.4 Sampling C-scan dengan potongan horisontal pada kedalaman yang berbeda

2.1.3 Sistem *Impulse* GPR

Dalam sistem *impulse* GPR, peralatan yang digunakan terdiri dari unit kontrol, antena pengirim dan antena penerima, penyimpanan data yang sesuai dan

peralatan *display*. Untuk cara kerja dari GPR itu sendiri beroperasi dengan mengirimkan pulsa gelombang radio ke dalam sebuah media melalui *transducer* (juga disebut antenna). Sistem GPR terdiri atas pengirim (*transmitter*), yaitu antenna yang terhubung ke generator sinyal dengan adanya pengaturan *timing circuit*, dan bagian penerima (*receiver*), yaitu antenna yang terhubung ke LNA dan ADC yang kemudian terhubung ke unit pengolahan data hasil survei serta *display* sebagai tampilan *output*-nya dan *post processing* untuk alat bantu mendapatkan informasi mengenai suatu objek.



Gambar 2.5 Blok diagram Impulse *Ground Penetrating Radar* (GPR)

Berdasarkan blok diagram pada Gambar 2.5, masing-masing blok mempunyai fungsi yang penting dan saling berkaitan. Hal ini dikarenakan GPR merupakan suatu sistem, *high voltage supply* sebagai pencatu daya mengaktifkan *pulse generator*, setelah *pulse generator* aktif maka *pulse generator* membangkitkan sinyal gelombang dengan karakteristik yang beroperasi pada

frekuensi 2.6 GHz sesuai referensi GSSI [3], guna menembus bahan konsentrat beton [5]. Dengan *timing circuit* yang men-*trigger* generator sinyal untuk melakukan transmisi melalui antena Tx dengan sifat polarisasi linier pada frekuensi 2.6 GHz. Sinyal mengenai objek dan juga *clutter* dan dipantulkan kembali ke antena penerima. Selanjutnya ketika sinyal diterima oleh antena Rx maka sinyal tersebut diperkuat oleh perangkat LNA. Sinyal analog masuk ke perangkat *A/D Converter* yang akan merubah sinyal analog menjadi digital, dengan banyak dan cepatnya sinyal yang diterima oleh perangkat penerima maka diperlukan *timing circuit* untuk melakukan proses *sampling* sehingga tidak semua sinyal diterima yang perlu diproses. Hasil sinyal *sampling* kemudian diproses oleh pengolahan data guna disimpan maupun ditampilkan berupa citra hasil survey di perangkat display sehingga didapatkan informasi mengenai objek yang dideteksi.

2.1.4 Fungsi Komponen Sistem GPR

1. *Transmitter* (pemancar) terdiri dari 2 bagian yaitu :
 - a. *High voltage supply* sebagai pencatu daya untuk mengaktifkan generator pulsa.
 - b. Dalam desain radar GPR, penting untuk mengembangkan generator pulsa UWB yang dapat menghasilkan pulsa tinggi dengan amplitudo besar, level *ringing* rendah dan PRF yang lebar. Generator pulsa terdiri dari tiga unit fungsional: (1) *converter* sinyal amplitudo, (2) generator pulsa Gaussian, dan (3) filter pulsa-pembentuk. Sinyal *converter* amplitudo mengandung penguat operasional umpan balik arus, konverter tegangan negatif, dan 50-

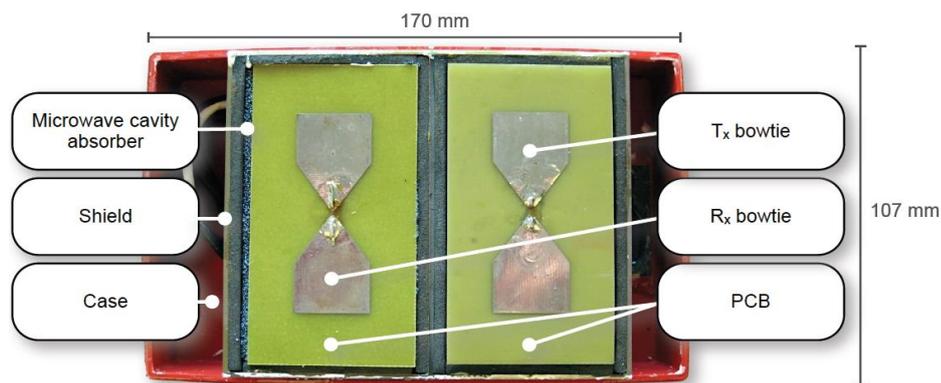
V resistor terminal. Sinyal polaritas ganda V_s bertindak sebagai sinyal stimulus untuk SRD Gaussian unit pembangkit pulsa. Memasukkan *attenuator* listrik meredakan nonlinier SRD disebabkan oleh pencocokan impedansi. Sirkuit pulsa-membentuk ini memainkan dua peran. Di satu sisi, ia bertindak sebagai filter *high-pass* untuk menghilangkan riak frekuensi rendah; di sisi lain, bertindak sebagai pembeda untuk menghasilkan pulsa *monocycle* dari input pulsa Gaussian. Pembeda menyebabkan amplitudo pulsa *monocycle* menjadi proporsional dengan kemiringan pulsa Gaussian. Karena Gaussian pulsa sangat sempit dan memiliki tajam transisi tepi, sehingga amplitudo pulsa *monocycle* tinggi [8].

2. *Receiver* (penerima) terdiri dari 2 bagian :
 - a. *Low Noise Amplifier* (LNA) berfungsi sebagai penguat sinyal yang diterima oleh antena Rx.
 - b. *A/D Conversion* berfungsi untuk mengkonversi (merubah) sinyal analog menjadi digital dengan tehnik sampling yang dikontrol oleh *timing circuit*.
3. Antena :
 - a. Antena Tx berfungsi sebagai media pemancar dari sinyal ke dalam tanah.
 - b. Antena Rx berfungsi sebagai media penerima sinyal hasil pantulan dari dalam tanah.
4. *Timing circuit* merupakan kontroler pada sistem. *Timing circuit* bertanggung jawab terhadap 2 fungsi :

- a. Sebagai *trigger* untuk generator sinyal.
 - b. Menghasilkan sinyal waktu yang diperlukan *A/D Converter* dalam melakukan *sampling*.
5. *Data Processing* berfungsi untuk memproses dan menyimpan data hasil konversi berupa sinyal digital untuk nantinya dapat ditampilkan pada *display*.
 6. *Display* berfungsi sebagai komponen untuk menampilkan *image* hasil pencitraan GPR, baik berupa 2D maupun 3D.

2.1.5 Antena GPR Acuan

Penelitian ini mengacu pada produk GPR yang telah ada dipasaran, GSSI 2.6 GHz dan juga tambahan info parameter dari hasil penelitian Craig Warren & Antonios Giannopoulos, *Investigation of The Directivity of a Commercial Ground-Penetrating Radar Antena Using a Finitite Difference Time-Domain Antenna Model* [4].



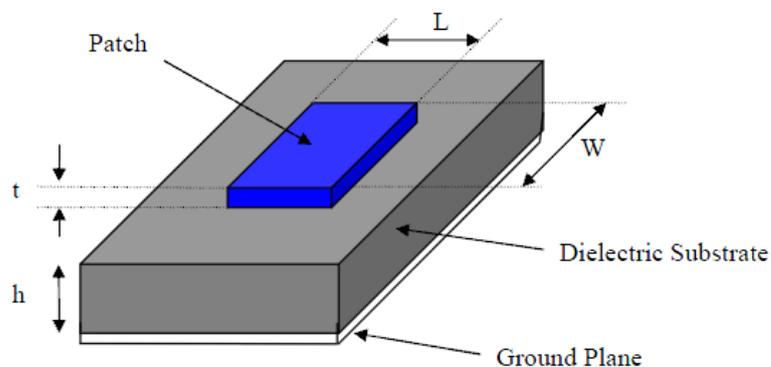
Gambar 2.6 Foto Antena GSSI 1.5

Dari hasil penelitiannya dan data tambahan data dari *SIR System-3000 Manual* [5], diketahui karakteristik antena dengan parameter sebagai berikut :

Model Patch	: Mikrostrip Bow-tie
Frekuensi Operasi	: 1.3 – 5.2 GHz
Frekuensi Resonansi	: 2.6 GHz
Pola Radiasi	: <i>Unidirectional</i>
Beamwidth	: 48°
Gain display	: 6 dB (Gain display = Gain antenna + Gain LNA)

2.2 Antena Mikrostrip

Antena mikrostrip adalah suatu konduktor metal yang menempel diatas *ground plane* yang diantaranya terdapat bahan dielektrik seperti tampak pada Gambar 2.7. Antena mikrostrip merupakan antena yang memiliki massa ringan, mudah untuk dipabrikasi, dengan sifatnya yang konformal sehingga dapat ditempatkan pada hampir semua jenis permukaan dan ukurannya kecil dibandingkan dengan antena jenis lain. Karena sifat yang dimilikinya, antena mikrostrip sangat sesuai dengan kebutuhan saat ini sehingga dapat diintegrasikan dengan peralatan telekomunikasi lain yang berukuran kecil, akan tetapi antena mikrostrip juga memiliki beberapa kekurangan yaitu: *bandwidth* yang sempit, *gain* dan *directivity* yang kecil, serta efisiensi rendah.



Gambar 2.7 Struktur antena mikrostrip

Pada Gambar 2.7, antena mikrostrip mempunyai struktur dari 3 lapisan yaitu :

1. *Patch* bagian yang terletak paling atas dari antena dan terbuat dari bahan konduktor dengan ketebalan (t) yang biasanya dibuat sangat tipis, ini berfungsi untuk meradiasikan gelombang elektromagnetik ke udara. *Patch* dapat berbentuk lingkaran, persegi panjang, segitiga dsb. Umumnya *patch* terbuat dari logam konduktor seperti tembaga atau emas dengan bentuk yang bervariasi [9].
2. Substrat berfungsi sebagai media penyalur gelombang elektromagnet dari sistem pencatutan dengan ketebalan (h) antara $0.003\lambda_0 - 0.05\lambda_0$. Karakteristik substrat sangat berpengaruh pada besar parameter-parameter antena. Ketebalan substrat berpengaruh pada *bandwidth* dari antena.
3. *Ground plane* yaitu lapisan paling bawah yang berfungsi sebagai reflektor yang memantulkan sinyal yang tidak diinginkan.

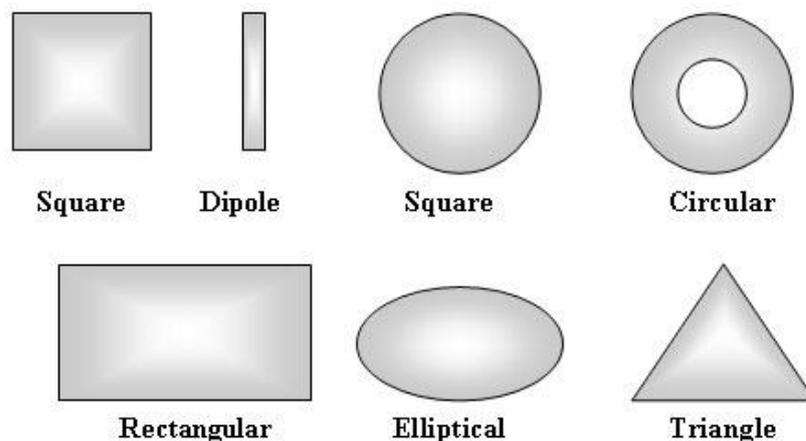
Teknologi mikrostrip tidak lepas dari perkembangan teknologi substrat itu sendiri. Sebagai material dielektrikum yang digunakan untuk saluran transmisi gelombang mikro tetapi juga antena. Untuk substrat komersial yang tersedia umumnya memiliki dua data ukuran properti fisik, yaitu : konstanta dielektrik atau permitivitas (ϵ_r) dan *loss tangent* atau faktor disipasi ($\tan \delta$). Pada rancang bangun ini jenis substrat yang digunakan RT/Duroid 5880 yang memiliki spesifikasi : konstanta dielektrik (ϵ_r) = 2.2, ketebalan (h) = 1.57 mm, dan *loss tangent* ($\tan \delta$) = 0.002.

2.3 Elemen Peradiasi Antena

Peradiasi atau *patch* radiator merupakan komponen utama dari suatu antena mikrostrip, dimana pola propagasi gelombang elektromagnetik akan dipancarkan pada ruang bebas atau udara. Secara keseluruhan, antena mikrostrip dapat dibagi menjadi empat kategori dasar, yaitu antena mikrostrip *patch*, antena mikrostrip *dipole*, antena *printed slot* dan antena mikrostrip *travelling-wave* [10].

2.3.1 Antena Mikrostrip Patch

Sebuah antena mikrostrip *patch* terdiri dari sebuah *patch* berbentuk planar ataupun non-planar pada satu sisi substrat dielektrik dan *ground plane* pada sisi lainnya. Ada beberapa model *patch* antena yang dapat digunakan didalam merancang suatu antena mikrostrip dan lebih mudah dianalisa, yaitu bujur sangkar, persegi panjang, lingkaran, segitiga samasisi, lingkaran dan elips [11]. Adapun model-model antena mikrostrip terlihat pada Gambar 2.8.

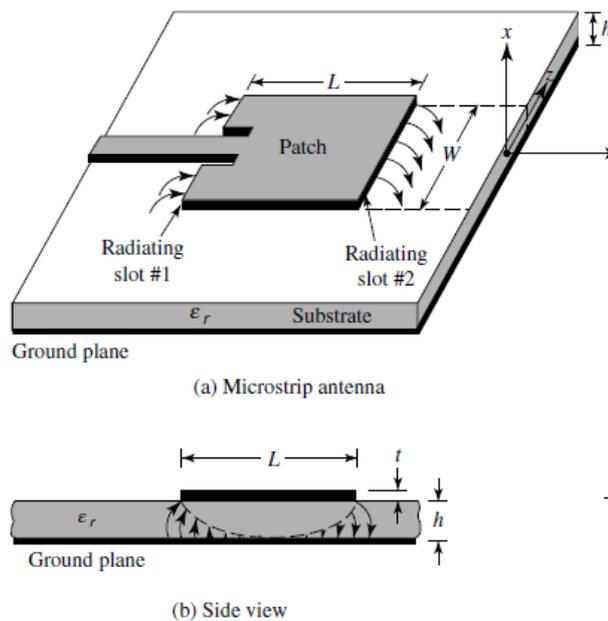


Gambar 2.8 Jenis-jenis antena mikrostrip

Bentuk rancangan dari *patch* antenna dalam perancangan ini menggunakan model bujur sangkar didasarkan ukuran yang lebih kecil dan fleksibel dalam penempatan posisi. Sebuah peradiasi bujur sangkar terdiri dari empat buah sisi dengan masing-masing memiliki ukuran yang sama.

2.3.1.1 Antena Mikrostrip *Patch* Bujur Sangkar

Salah satu bentuk umum dari *patch* peradiasi adalah persegi panjang, selain bentuk lingkaran (*circular*) dan segi tiga (*triangular*). Gambar 2.9 memperlihatkan struktur sebuah *patch* dari antena mikrostrip pada lapisan permukaan dielektrik substrat dengan ketebalan (h), dimana *patch* persegi panjang dengan dimensi ukuran panjang (L) dan lebar (W) dengan ketebalan konduktor (t), sedangkan *patch* bujur sangkar dengan dimensi ukuran $L = W$. Pada sisi lapisan bawah konduktor dijadikan sebagai *ground plane*.



Gambar 2.9 Struktur antena mikrostrip *patch* bujur sangkar

Bentuk struktur dari *patch* persegi terhadap frekuensi resonansi (f_r) dipengaruhi oleh mode dominan propagasi gelombang *transverse magnetic* (TM_{mn}) dimana m dan n merupakan mode orde. Sehingga dimensi *patch* persegi diperoleh melalui persamaan :

$$f_r = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \left[\left(\frac{m}{L} \right)^2 + \left(\frac{n}{W} \right)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots(2.1)$$

Untuk radiasi efektif dengan lebar *patch* diperoleh dengan persamaan :

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

- f_r : frekuensi resonansi (Hz)
- ϵ_r : konstanta dielektrik
- c : kecepatan cahaya (3×10^8 m/s).

Untuk mode dominan TM_{10} , maka panjang sisi (L) *patch* persegi diperoleh melalui persamaan :

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}} \dots\dots\dots(2.3)$$

Untuk sisi panjang efektif *patch* bujur sangkar dengan pertimbangan terhadap efek *fringing* pada sisi tepi peradiasi diperluas dengan menambahkan ΔL seperti yang terlihat pada Gambar 2.10. Besarnya ΔL dapat diperhitungkan dengan persamaan :

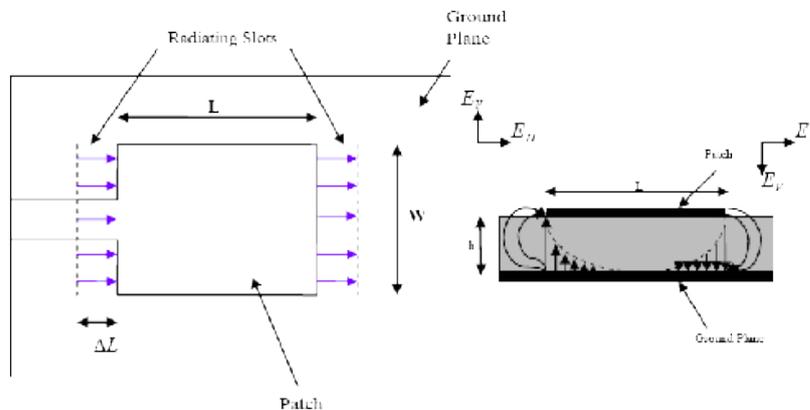
$$\Delta L = 0.412h \left[\frac{\left(\epsilon_{reff} + 0.3 \right) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{\left(\epsilon_{reff} - 0.258 \right) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \right] \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana konstanta dielektrik efektif (ϵ_{reff}) untuk $W/h \geq 1$ dengan W adalah lebar *patch* dan h adalah ketebalan substrat dielektrik [10] :

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1 + 12h}{W} \right)^{-1/2} \dots\dots\dots(2.5)$$

Sehingga panjang efektif untuk sisi *patch* bujur sangkar diperoleh melalui persamaan :

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \dots\dots\dots(2.6)$$



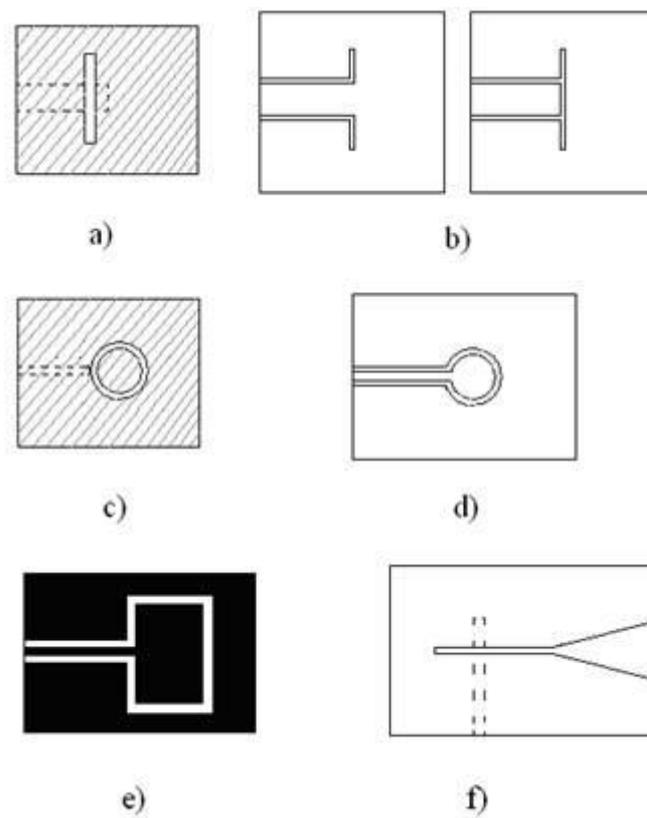
Gambar 2.10 Efek *fringing*

2.3.2 Antena Mikrostrip *Dipole*

Mikrostrip *dipole* memiliki geometris yang berbeda dari *patch* antenna persegi panjang pada ukuran dimensinya. Lebar antenna *dipole* biasanya kurang dari setengah λ_0 . Antena tipe ini sangat cocok untuk penggunaan frekuensi yang lebih tinggi dengan substrat dielektrik yang tebal, sehingga dapat mencapai *bandwidth* besar. Penentuan pemilihan mekanisme pencatutan juga merupakan bagian yang sangat penting dalam bagian analisis.

2.3.3 Antena *Printed Slot*

Antena ini merupakan bentuk modifikasi dari geometri dasar antena mikrostrip *patch*, secara teoritis sebagian besar bentuk *patch* mikrostrip dapat direalisasikan dalam bentuk celah (*slot*). Seperti halnya *patch* antena mikrostrip, antena *slot* dapat diberikan pencatuan baik oleh saluran mikrostrip atau *coplanar waveguide*. Beberapa bentuk dasar antena *slot* dapat dilihat seperti Gambar 2.11 dibalik ini.

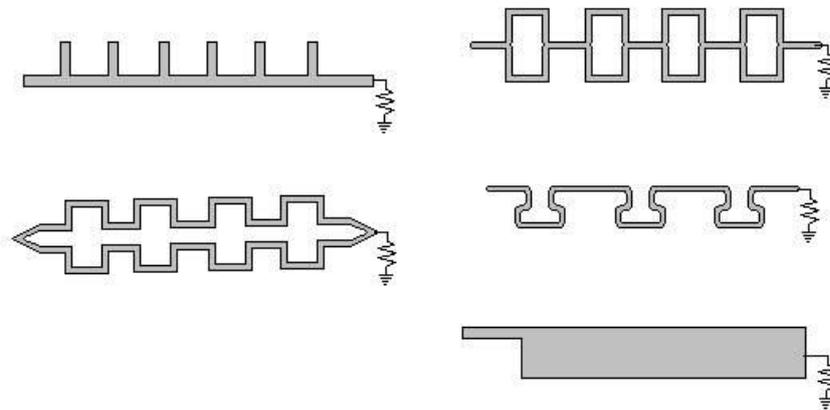


Gambar 2.11 Bentuk dasar antena *printed slot*

- a) *Rectangular slot with microstrip feed*
- b) *Rectangular slot with CPW feed*
- c) *Annular slot with microstrip feed*
- d) *Annular slot with CPW feed*
- e) *Rectangular ring slot*
- f) *Tapered slot*

2.3.4 Antena Mikrostrip *Travelling Wave*

Sebuah antena mikrostrip *travelling wave* (MTA) dapat terdiri dari bentuk susunan *patch* konduktor atau garis mikrostrip yang cukup panjang untuk mendukung mode *transverse electric* (TE). Ujung lain dari antena *travelling wave* diakhiri dalam beban resistif, teknik ini digunakan untuk menghindari gelombang berdiri pada antena. MTA dapat dibentuk sedemikian rupa dengan bentuk susunan *patch* disegala arah. Contoh bentuk antena ini seperti terlihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Bentuk dasar antena mikrostrip *travelling wave*

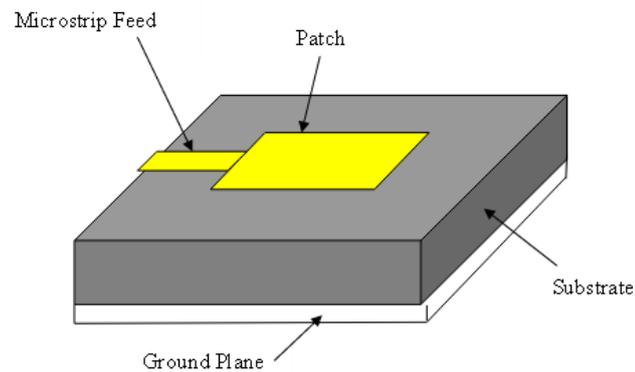
2.4 Teknik Pencatuan

Antena *patch* mikrostrip dapat diberikan saluran dengan berbagai metode. Metode ini dapat diklasifikasikan ke dalam dua kategori, yaitu kontak langsung dan kontak tidak langsung [12]. Dalam kategori kontak langsung, daya transmisi radio frekuensi disalurkan langsung pada *patch* menggunakan elemen penyambung seperti saluran mikrostrip. Dalam skema saluran kontak tidak langsung, yaitu pengkoplingan medan elektromagnetik, dilakukan untuk mentransfer daya antara saluran mikrostrip dan *patch* yang diradiasi.

Teknik pencatuan yang paling populer digunakan untuk kategori catuan kontak langsung adalah saluran catu mikrostrip dan probe koaksial, sedangkan untuk kategori catuan kontak tidak langsung yaitu *aperture coupling* dan *proximity coupling*.

2.4.1 Saluran Transmisi Mikrostrip

Pada jenis saluran ini, sebuah garis langsung terhubung ke tepi dari *patch* mikrostrip seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13. Saluran mikrostrip tersebut lebih kecil jika dibandingkan dengan ukuran *patch* dan dalam hal ini saluran dapat dibuat satu sket dengan substrat yang sama dan teknik ini disebut struktur planar.



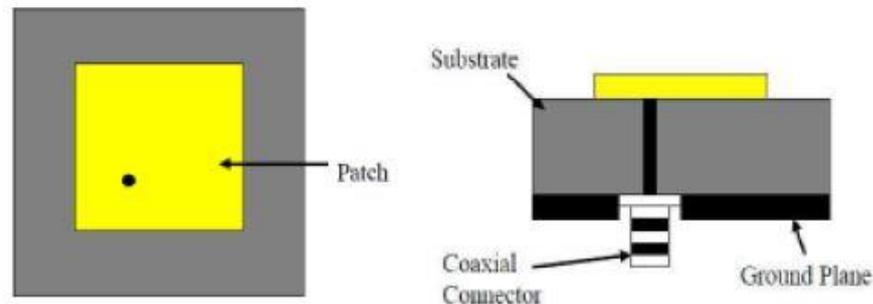
Gambar 2.13 Saluran transmisi mikrostrip

Tujuan dari penyisipan *cut in* dalam *patch* ini adalah untuk menyesuaikan impedansi dari saluran terhadap *patch* tanpa memerlukan penambahan elemen penyesuai lainnya. Hal ini dapat dicapai dengan benar dengan melakukan kontrol yang tepat pada posisi salurannya. Hal ini merupakan skema pembuatan saluran yang mudah, karena memberikan kemudahan pabrikasi dan kesederhanaan dalam pemodelan serta penyesuaian impedansi. Namun dengan ketebalan dielektrik

substrat yang digunakan, gelombang permukaan dan penyebaran radiasi saluran juga meningkat, yang dapat menghambat *bandwidth* dari antenna. Radiasi saluran juga menghasilkan radiasi terpolarisasi yang tidak diinginkan.

2.4.2 Saluran Koaksial/*Probe*

Saluran koaksial atau saluran *probe* adalah teknik yang sangat umum digunakan untuk saluran antenna mikrostrip. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.14, dimana bagian dalam konduktor dari konektor koaksial melewati bagian dielektrik substrat dan di solder pada *patch*, sedangkan bagian luar konduktor terhubung pada *ground plane*.



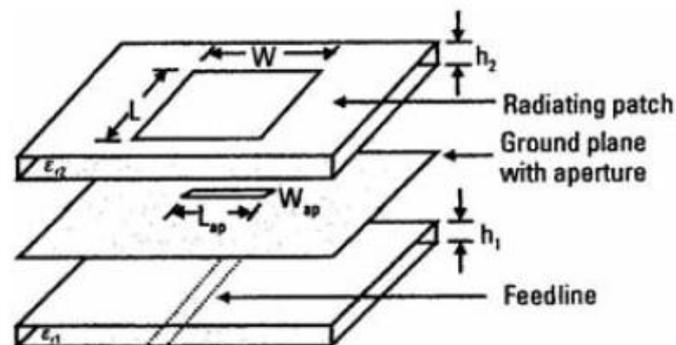
Gambar 2.14 Saluran koaksial/*probe*

Keunggulan utama dari model saluran ini adalah bahwa saluran transmisi dapat ditempatkan dibagian manapun didalam *patch* untuk dapat menyesuaikan dengan impedansi input. Model saluran ini mudah dipabrikasi dan mempunyai nilai sebaran radiasi yang kecil. Kelemahan model ini terdapat pada konektor konduktor dari koaksial sehingga hanya bekerja menghasilkan *bandwidth* sempit dan sulit dalam pemodelan karena adanya lubang saluran yang dibor pada substrat,

dan konektor yang menonjol keluar pada bagian *ground plane*, sehingga menjadikannya tidak sepenuhnya planar untuk ketebalan substrat ($h > 0.002\lambda_0$). Untuk substrat yang lebih tebal pun peningkatan panjang probe akan membuat impedansi masukan yang lebih induktif, sehingga bermasalah dalam matching impedansi. Karena kelemahan-kelemahan tersebut maka teknik saluran tanpa koneksi langsung yang akan menjawab permasalahan ini.

2.4.3 Saluran *Aperture Coupled*

Dalam jenis teknik saluran ini, radiasi *patch* dan saluran mikrostrip dipisahkan oleh *ground plane* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15. Penghubung antara *patch* dan saluran dilakukan melalui *slot* atau *aperture* pada *ground plane*.



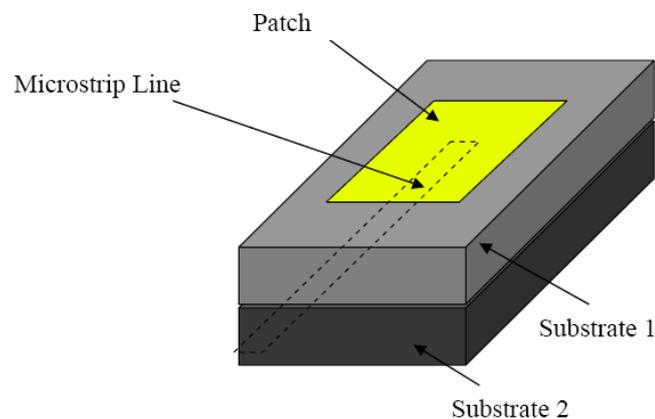
Gambar 2.15 Model saluran *aperture coupled*

Celah kopling biasanya berpusat di bawah *patch*, yang mengarah lebih rendah dengan konfigurasi simetris dengan polarisasi menyilang. Jumlah kopling dari saluran untuk *patch* ditentukan oleh bentuk, ukuran dan lokasi celah. Karena *ground plane* memisahkan *patch* dan saluran, maka radiasi yang tersebar dapat

diminimalkan. Secara umum, bahan dielektrik yang tinggi digunakan untuk substrat dasar dan lebih tebal, untuk material yang memiliki konstanta dielektrik yang rendah digunakan untuk substrat atas agar mengoptimalkan radiasi dari *patch*. Kelemahan utama dari teknik saluran ini adalah kesulitan pabrikan karena terdiri dari beberapa lapisan, sehingga menambah ketebalan antenna. Model saluran ini juga hanya memberi pengaruh *bandwidth* yang sempit.

2.4.4 Saluran *Proximity Coupled*

Jenis teknik saluran ini juga disebut sebagai skema kopling elektromagnetik. Pada Gambar 2.16, digunakan dua substrat dielektrik dan garis saluran diantara kedua substrat tersebut serta radiasi *patch* pada bagian atas untuk substrat bagian atas. Keunggulan utama dari teknik ini adalah bahwa saluran dapat menghilangkan radiasi palsu dan dapat menyediakan *bandwidth* yang sangat tinggi (sekitar 13%), dikarenakan oleh kenaikan keseluruhan ketebalan mikrostrip *patch* antenna. Model ini memberikan pilihan antara dua bahan media elektrik yang berbeda, satu untuk *patch* dan satu lagi untuk saluran guna mengoptimalkan performa individu.



Gambar 2.16 Saluran *Proximity Coupled*

Matching dapat dicapai dengan mengontrol panjang garis saluran dan lebar ke garis rasio *patch*. Kelemahan utama dari model saluran ini adalah sulit untuk di pabrikan, karena penggabungan dua *layer* substrat yang berbeda dielektrik perlu penggabungan yang akurat. Juga ada peningkatan ketebalan dari keseluruhan antenna.

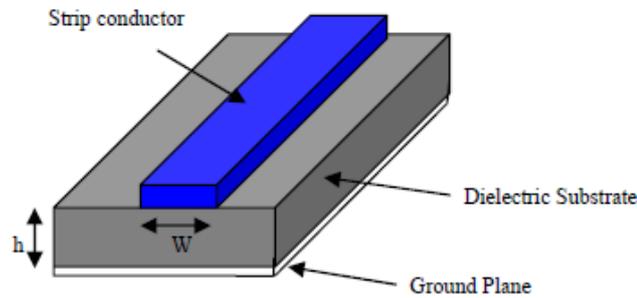
2.5 Metode Analisa

Model pilihan untuk analisis antenna mikrostrip *patch* adalah model transmisi *line*, model *cavity*, dan model *full wave*, yang meliputi persamaan integral utama, *Moment of Method* (MoM). Model saluran transmisi ini adalah yang paling sederhana dan memberikan wawasan fisik yang baik tetapi kurang akurat. Model *cavity* lebih akurat dan memberikan wawasan fisik yang baik tetapi kompleks. Model *full wave* sangat akurat, fleksibel dan dapat mengatasi elemen tunggal, array terbatas dan tidak terbatas, unsur ditumpuk, elemen berbentuk sewenang-wenang dan kopleng. Ini memberikan sedikit wawasan dibandingkan dengan dua model yang disebutkan di atas dan jauh lebih kompleks di alam.

2.5.1 Model Saluran Transmisi

Saluran transmisi merupakan suatu media rambatan bagi gelombang yang dikirimkan dari sumber ke beban. Bagian dari sistem antenna adalah saluran transmisi yang dihubungkan dengan *patch* antenna. Ada empat model yang dapat digunakan sebagai saluran pencatu *patch* antenna, yaitu : rangkaian saluran mikrostrip planar, probe koaksial, *aperture coupling* dan *proximity coupling*. Karakteristik dan dimensi saluran transmisi mikrostrip ditentukan oleh nilai

konstanta dielektrik *relative substrate* dan *loss tangent*.



Gambar 2.17 Model saluran transmisi

2.5.2 Konstanta Dielektrikum Efektif

Analisa nilai parameter impedansi karakteristik dari mikrostrip secara dimensional dibatasi oleh nilai rasio antara lebar saluran konduktor dengan ketebalan dielektrikum bahan. Konstanta dielektrikum efektif diperlukan untuk menentukan hubungan bahan dari kedua dielektrikum yaitu substrat dan *patch* konduktor. Untuk menentukan nilai konstanta dielektrikum efektif dapat dicari melalui persamaan berikut.

Konstanta dielektrik efektif (ϵ_{reff}) untuk $W/h \geq 1$ digunakan persamaan :

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1 + 12h}{W} \right)^{-1/2} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dan konstanta dielektrik efektif (ϵ_{reff}) untuk $W/h \leq 1$ digunakan persamaan:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(\frac{1 + 12h}{W} \right)^{-1/2} + 0.04 \left(\frac{1 - 12h}{h} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana :

ϵ_{reff} : Konstanta dielektrik efektif

ϵ_r : Konstanta dielektrik

h : Ketebalan substrat (mm)

W : Lebar saluran transmisi (mm)

2.5.3 Karakteristik Impedansi

Salah satu parameter utama yang penting untuk diketahui pada suatu saluran mikrostrip adalah impedansi karakteristik (Z_0). Impedansi karakteristik, induktansi dan kapasitansi saluran transmisi ditentukan oleh besaran fisik saluran. Nilai impedansi karakteristik ditentukan oleh lebar saluran (W), ketebalan substrat (h), dan konstanta dielektrik (ϵ_r). Nilai impedansi karakteristik merupakan hambatan yang terjadi sepanjang saluran yang secara analisis dapat ditentukan melalui persamaan :

Untuk $W/h \geq 1$ digunakan persamaan :

$$Z_0 = \frac{120\pi(\epsilon_{reff})^{-1/2}}{\frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \ln\left(1.444 + \frac{W}{h}\right)} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dan untuk $W/h \leq 1$ digunakan persamaan :

$$Z_0 = 60(\epsilon_{reff})^{-1/2} \ln\left(\frac{8h}{W} + \frac{0.25W}{h}\right) \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana :

Z_0 : Impedansi karakteristik (Ω)

ϵ_{reff} : Konstanta dielektrik efektif

h : Ketebalan substrat (mm)

W : Lebar saluran transmisi (mm)

2.5.4 Rugi-rugi Saluran Transmisi

Mikrostrip sebagai media saluran transmisi yang bekerja pada frekuensi tinggi akan menghasilkan rugi-rugi bersifat meredam terutama yang ditimbulkan oleh faktor dielektrikum bahan dan konduktor. Terdapat dua rugi-rugi pada saluran transmisi, yaitu rugi konduktor dan rugi dielektrikum.

2.5.4.1 Rugi Konduktor

Besarnya rugi konduktor pada mikrostrip menurut Hammerstad dan Bekkadal dinyatakan dengan persamaan :

$$\alpha_c = 0.072 \frac{\sqrt{f_c}}{WZ_0} \lambda_g \left(\frac{dB}{\lambda_g} \right) \dots\dots\dots(2.11)$$

Untuk panjang gelombang guide (λ_g) dapat dicari dengan persamaan :

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_c} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana :

α_g : Rugi konduktor (dB/ λ_g)

f_c : Frekuensi center (Hz)

λ_0 : Panjang gelombang di udara saat osilasi (mm)

λ_g : Panjang gelombang guide pada saluran (mm)

2.5.4.2 Rugi Dielektrikum

Rugi dielektrikum lebih disebabkan oleh bahan medium sebuah substrat

dengan loss tangent yang dimilikinya. Dinyatakan dengan persamaan :

$$\alpha_d = 27.3 \frac{\epsilon_r (\epsilon_{reff} - 1) \tan \delta}{\epsilon_{reff} (\epsilon_{reff} - 1)} \left(\frac{dB}{\lambda_g} \right) \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

α_d : Rugi dielektrikum (dB/ λ_g)

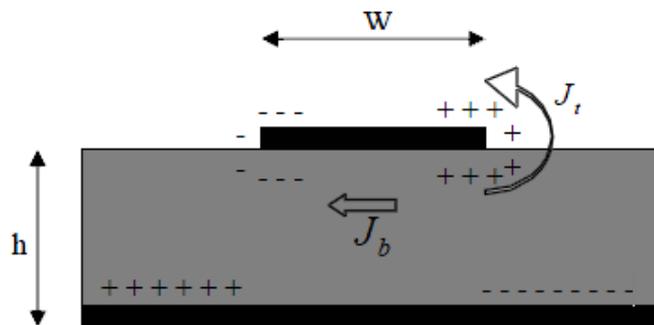
$\tan\delta$: Dielektrik *loss tangent*

2.5.5 Model Cavity

Antena mikrostrip merupakan antena yang memiliki pita resonansi yang sempit, keadaan ini disebut juga *lossy cavities*. Antena mikrostrip menyerupai lubang-lubang yang dipenuhi oleh bahan dielektrik yang menghasilkan resonansi pada orde yang tinggi. Nilai medan yang ternormalisasi di dalam substrat dielektrik yang dapat dicari dengan lebih akurat dengan mencermati daerah tersebut sebagai lubang (*cavity*) yang diselubungi oleh konduktor pada bagian atas dan bawah,serta pada dinding magnet. Model ini merupakan model pendekatan yang berprinsip pada impedansi masukan reaktif dan tidak meradiasikan daya.

Ketika antena mikrostrip diberikan energi distribusi muatan dibentuk pada bagian atas dan bagian bawah permukaan dari pada *patch* tersebut, dan juga pada bagian *ground plane*. Distribusi muatan dikendalikan oleh dua mekanisme, yaitu mekanisme atraktif dan mekanisme *repulsive*. Mekanisme atraktif terjadi diantara muatan-muatan yang berlawanan pada bagian bawah *patch* dan bagian *ground* yang cenderung untuk mempertahankan konsentrasi muatan pada bagian bawah *patch*. Mekanisme *repulsive* terjadi diantara muatan-muatan pada bagian bawah permukaan *patch* yang memiliki kecenderungan untuk mendorong berupa muatan

pada bagian bawah *patch* ke bagian atasnya melalui ujung-ujung *patch* tersebut. Karena kebanyakan antena mikrostrip memiliki nilai *ratio height to width* yang kecil, mekanisme atraktif menjadi dominan dan kebanyakan konsentrasi muatan berada pada bagian bawah *patch*. Arus dalam jumlah yang kecil mengalir melalui ujung *patch* ke bagian atas permukaan *patch*. Aliran arus semakin kecil seiring dengan semakin mengecilnya nilai *ratio height to width*. Kedua jenis mekanisme diperlihatkan pada Gambar 2.18, beserta kerapatan arus (J) dapat diasumsikan bahwa besaran arus yang mengalir ke atas permukaan *patch* adalah nol, sehingga tidak menyebabkan adanya medan magnet tangensial ke ujung *patch*. Hal ini menyebabkan keempat dinding samping menyerupai permukaan medan konduksi yang sempurna sehingga tidak mengganggu medan magnetik menyebabkan distribusi medan elektrik tetap di bawah permukaan *patch*.



Gambar 2.18 Distribusi muatan dan arus yang terbentuk pada *patch* mikrostrip

Cavity model merupakan dasar perhitungan yang banyak digunakan untuk analisis suatu *patch* antena mikrostrip. Sedangkan bentuk atau metode persamaan integralnya dinyatakan sebagai *Method of Moment* (MoM) yang dikenal secara umum, dimana dalam penerapannya dilakukan dengan pendekatan komputasi

maupun atau dengan cara pendekatan fisik. Antena mikrostrip mempunyai nilai radiasi yang paling kuat terutama pada daerah samping di antara tepi *patch*. Untuk performa antena yang baik, biasanya substrat dibuat tebal dengan konstanta dielektrik yang rendah. Hal ini akan menghasilkan efisiensi dan radiasi yang lebih baik serta *bandwidth* yang lebih lebar, namun akan menambah ukuran dari antena itu sendiri.

2.6 Parameter Antena Mikrostrip

Unjuk kerja (*performance*) dari suatu antena mikrostrip dapat diamati dari parameternya. Beberapa parameter utama dari sebuah antena mikrostrip akan dijelaskan sebagai berikut:

2.6.1 Return Loss

Return Loss (RL) didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan yang datang atau yang direfleksikan dengan tegangan yang keluar. Perbandingan tersebut dinamakan koefisien refleksi tegangan yang dilambangkan dengan Γ_L .

Untuk koefisien refleksi dapat juga dinyatakan dengan persamaan:

$$\Gamma_L = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana :

Γ_L : Koefisien refleksi tegangan

V_0^- : Tegangan yang dipantulkan (Volt)

V_0^+ : Tegangan yang dikirimkan (Volt)

Z_L : Impedansi beban (Ω)

Z_o : Impedansi saluran (Ω)

Parameter RL dapat juga dikatakan sebagai rugi-rugi pada transmisi, dikarenakan tidak seimbangnya impedansi karakteristik dengan impedansi beban.

Untuk RL diperoleh dengan persamaan :

$$\text{Return Loss (dB)} = 20 \log |\Gamma_L| \dots\dots\dots(2.16)$$

Nilai RL yang dikatakan baik untuk sebuah antena adalah dibawah -9.54 dB, atau untuk standar simulasi nilai RL setidaknya dibawah -10 dB. Nilai tersebut menunjukkan bahwa gelombang yang direfleksikan tidak terlalu besar dibandingkan dengan gelombang yang dikirimkan, dengan kata lain saluran tersebut dikatakan sudah dalam keadaan *matching*.

2.6.2 VSWR

Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) merupakan nilai rasio antara tegangan maksimal dengan tegangan minimal yang dihitung pada posisi terjadinya koefisien refleksi antara ujung saluran dengan beban, dalam bentuk persamaan dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + [\Gamma_L]}{1 - [\Gamma_L]} \dots\dots\dots(2.17)$$

Koefisien refleksi tegangan memiliki nilai kompleks, yang merepresentasikan besarnya magnitude dan fasa dari refleksi, dalam beberapa kasus dapat didefinisikan :

- $\Gamma_L = -1$ berarti refleksi negatif maksimum, yaitu ketika saluran terhubung singkat
- $\Gamma_L = 0$ berarti tidak ada refleksi, yaitu ketika saluran dalam keadaan matched sempurna

$\Gamma_L = +1$ berarti refleksi positif maksimum, yaitu ketika saluran dalam rangkaian terbuka

Kondisi yang paling baik adalah ketika nilai VSWR sama dengan Γ_L , atau $SWR = 1$, yang berarti tidak ada refleksi atau dalam keadaan *matching* sempurna. Namun dalam prakteknya kondisi tersebut sulit didapatkan, sehingga standar nilai VSWR untuk sebuah antena setidaknya memiliki nilai $VSWR \leq 2$.

2.6.3 Bandwidth

Bandwidth atau lebar pita antena mikrostrip merupakan jangkauan frekuensi antara kenaikan nilai VSWR dari satu sampai batas nilai yang dapat ditoleransi. Besarnya *bandwidth* pada penelitian ini adalah selisih antara frekuensi akhir f_2 dan frekuensi awal f_1 dengan batas kenaikan nilai $VSWR < 2$ dan dinyatakan dengan persamaan:

$$BW = f_2 - f_1 \dots\dots\dots(2.18)$$

Untuk nilai persen *bandwidth* dapat dituliskan dengan persamaan:

$$BW = \frac{(f_2 - f_1)}{f_r} \times 100\% \dots\dots\dots(2.19)$$

Dengan f_r dirumuskan :

$$f_r = \frac{f_2 - f_1}{2} \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana :

f_r : Frekuensi resonansi (Hz)

f_2 : Frekuensi maksimum (Hz)

f_1 : Frekuensi minimum (Hz)

BW : Bandwidth (GHz)

2.6.4 *Input Impedance*

Sebuah impedansi yang masuk ke terminal antena yang dikondisikan dalam keadaan seimbang dengan impedansi karakteristik dari saluran transmisi.

Impedansi input dinyatakan dalam persamaan:

$$Z_{in} = Z_o \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \dots\dots\dots(2.21)$$

Dimana :

Z_{in} : Impedansi input terminal (Ω)

Z_o : Impedansi karakteristik dari antena (Ω)

Γ : Koefisien refleksi

Impedansi masukan (Z_{in}) terdiri dari bagian real (R_{in}) dan imajiner (X_{in}) dan dapat dinyatakan :

$$Z_{in} = (R_{in} + jX_{in}) \Omega \dots\dots\dots(2.22)$$

Daya real (R_{in}) merupakan komponen yang diharapkan, yakni menggambarkan banyaknya daya yang hilang melalui radiasi, sementara komponen imajiner (X_{in}) menunjukkan reaktansi dari antena dan daya yang tersimpan pada medan dekat antena.

2.6.5 *Gain*

Gain didefinisikan sebagai *directivity* yang dihasilkan maksimum dari power antena yang dirancang dengan intensitas maksimum radiasi dari antena referensi yang dinyatakan dengan persamaan:

$$G = 10 \log \frac{I_0}{I} \dots\dots\dots(2.23)$$

Dimana :

I_0 : Intensitas radiasi maksimum antenna

I : Intensitas radiasi maksimum dari antenna referensi

Terdapat 2 jenis parameter gain, yaitu *absolute gain* dan *relative gain*. *Absolute gain* pada sebuah antenna didefinisikan sebagai perbandingan antara intensitas pada arah tertentu dengan radiasi yang diperoleh jika daya yang diterima oleh antenna teradiasi secara isotropik. Nilai *gain* absolut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \dots\dots\dots(2.24)$$

Sedangkan *relative gain* didefinisikan sebagai perbandingan antara perolehan daya pada sebuah arah dengan perolehan daya pada antenna referensi pada arah tertentu, dengan daya masukan sama pada kedua antenna, namun antenna referensi merupakan sumber isotropik yang *lossless*. *Gain* relatif dapat dihitung dengan persamaan :

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}(lossless)} \dots\dots\dots(2.25)$$

2.6.6 Polarisasi

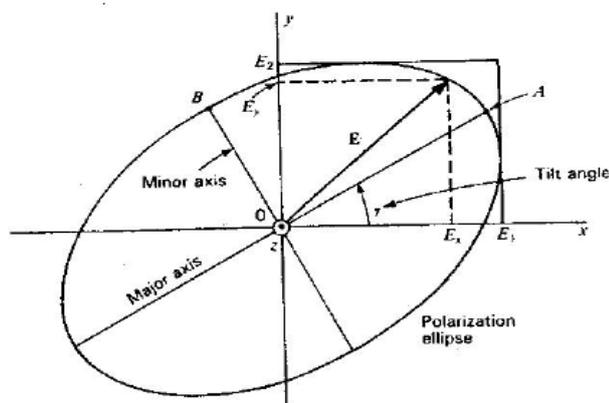
Polarisasi antenna adalah polarisasi dari gelombang yang ditransmisikan oleh antenna. Jika arah tidak ditentukan maka polarisasi merupakan polarisasi pada arah *gain* maksimum. Pada prakteknya, polarisasi dari energi yang teradiasi bervariasi dengan arah dari tengah antenna.

Polarisasi dari gelombang yang teradiasi didefinisikan sebagai suatu keadaan gelombang elektromagnetik yang menggambarkan arah dan magnitudo vektor medan elektrik yang bervariasi menurut waktu. Selain itu, polarisasi juga dapat didefinisikan sebagai gelombang yang diradiasikan dan diterima oleh antena pada suatu arah tertentu.

Polarisasi melingkar terjadi jika suatu gelombang yang berubah menurut waktu pada suatu titik memiliki vektor medan elektrik (atau magnet) pada titik tersebut berada pada jalur lingkaran sebagai fungsi waktu. Kondisi yang harus dipenuhi untuk mencapai jenis polarisasi ini adalah :

- a. Medan harus mempunyai 2 komponen yang saling tegak lurus.
- b. Kedua komponen tersebut harus mempunyai *magnitude* yang sama.
- c. Kedua komponen tersebut harus mempunyai perbedaan fasa waktu pada kelipatan ganjil 90^0 .

Polarisasi melingkar terbagi menjadi dua, yaitu *Left Hand Circular Polarization* (LHCP), *Right Hand Circular Polarization* (RHCP). LHCP terjadi ketika $\delta = +\pi/2$, sebaliknya RHCP terjadi ketika $\delta = -\pi/2$.



Gambar 2.19 Polarisasi elips dengan sudut τ yang dibentuk E_x dan E_y dengan amplitudo E_1 dan E_2 .

Pada Gambar 2.19 diatas bentuk polarisasi elips dengan bagian sumbu pendek OB dan bagian panjang OA membentuk sudut lancip τ , maka axial ratio dapat diperoleh dengan persamaan:

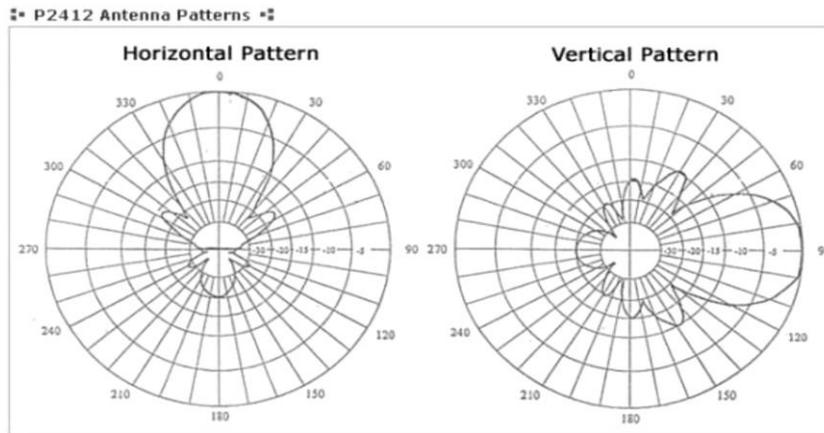
$$AR = \frac{OA}{OB} = \frac{E_x}{E_y} \quad (1 \leq AR \leq \infty) \dots \dots \dots (2.26)$$

2.6.7 Pola Radiasi

Pola radiasi atau pola antena didefinisikan sebagai fungsi matematik atau representasi grafik dari sifat radiasi antena sebagai fungsi dari koordinat. Pola radiasi dapat disebut sebagai pola medan (*field pattern*) apabila yang digambarkan adalah kuat medan dan disebut pola daya (*power pattern*) apabila yang digambarkan *pointing vector*. Di sebagian besar kasus, pola radiasi ditentukan di luasan wilayah dan direpresentasikan sebagai fungsi dari koordinat directional. Pola radiasi antena adalah plot 3-dimensi distribusi sinyal yang dipancarkan oleh sebuah antena, atau plot 3-dimensi tingkat penerimaan sinyal yang diterima oleh sebuah antena. Pola radiasi antena menjelaskan bagaimana antena meradiasikan energi ke ruang bebas atau bagaimana antena menerima energi.

2.6.7.1 Pola Radiasi Antena *Unidirectional*

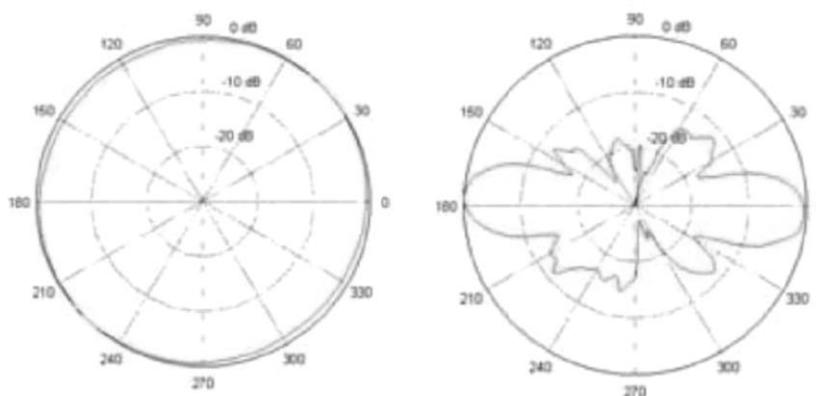
Antena *unidirectional* mempunyai pola radiasi yang terarah dan dapat menjangkau jarak yang *relative*. Gambar 2.20 merupakan gambaran secara umum bentuk pancaran yang dihasilkan oleh antena *unidirectional*.



Gambar 2.20 Bentuk Pola Radiasi Antena *Unidirectional*

2.6.7.2 Pola Radiasi Antena Omnidirectional

Antena omnidirectional mempunyai pola radiasi yang digambarkan seperti bentuk kue donat (*doughnut*) dengan pusat berimpit. Antena omnidirectional pada umumnya mempunyai pola radiasi 360^0 jika dilihat pada bidang medan magnetnya. Gambar 2.21 merupakan gambaran secara umum bentuk pancaran yang dihasilkan oleh antena omnidirectional.



Gambar 2.21 Bentuk Pola Radiasi Antena Omnidirectional

2.6.8 Beamwidth

Beamwidth adalah besarnya sudut berkas pancaran gelombang frekuensi radio utama (*main lobe*) yang dihitung pada titik 3 dB menurun dari puncak *lobe* utama. Besarnya *beamwidth* adalah sebagai berikut:

$$B = \frac{21,1}{f \times d} \dots\dots\dots(2.27)$$

Dimana :

B : 3 dB *beamwidth* (*degree*)

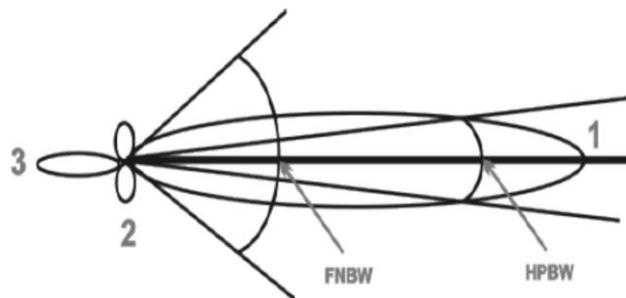
f : frekuensi (Hz)

d : diameter antena (*degree*)

Apabila *beamwidth* mengacu kepada perolehan pola radiasi, maka *beamwidth* dapat dirumuskan sebagai:

$$\beta = \theta_2 - \theta_1 \dots\dots\dots(2.28)$$

Gambar 2.22 menunjukkan tiga daerah pancaran yaitu *lobe* utama (*main lobe*, nomor 1), *lobe* sisi samping (*side lobe*, nomor 2) dan *lobe* sisi belakang (*back lobe*, nomor 3). *Half Power Beamwidth* (HPBW) adalah daerah sudut yang dibatasi oleh titik-titik ½ daya atau -3 dB atau 0,707 dari medan maksimum pada *lobe* utama. *First Null Beamwidth* (FNBW) adalah besar sudut bidang diantara dua arah pada *main lobe* yang intensitas radiasinya nol.



Gambar 2.22 *Beamwidth* antena