

BAB II

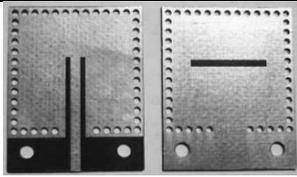
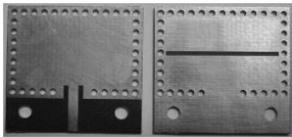
TINJAUAN PUSTAKA

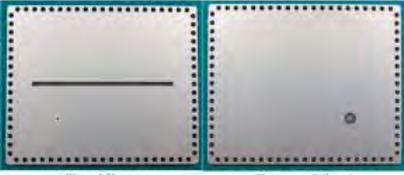
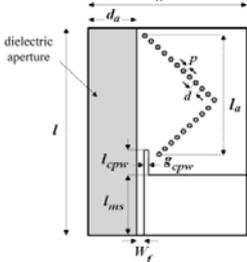
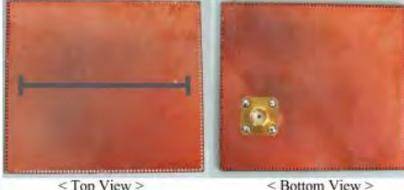
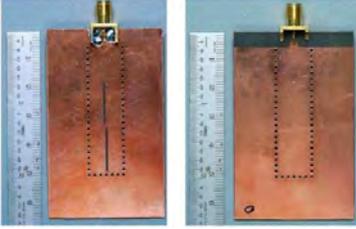
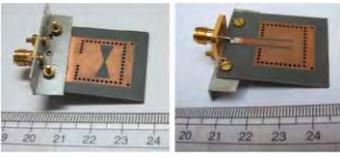
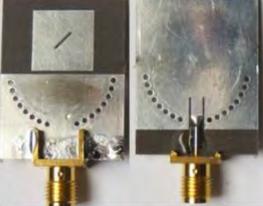
Pada bab 2 ini akan dibahas mengenai penelitian-penelitian antenna SIW sebelumnya. Selanjutnya membahas mengenai dasar teori parameter antenna dan dimensi antenna SIW.

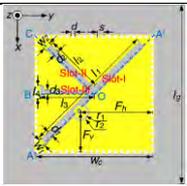
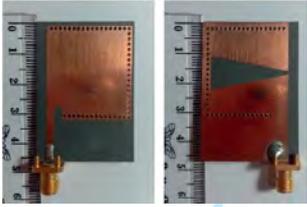
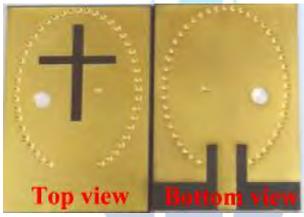
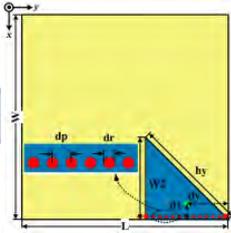
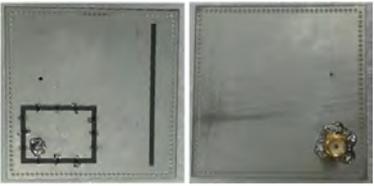
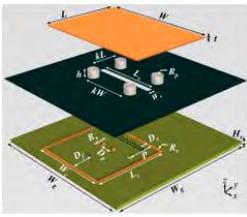
2.1 Studi Literatur

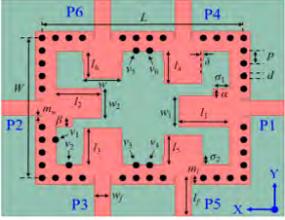
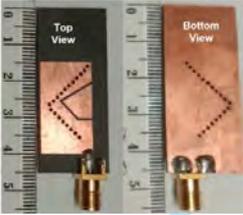
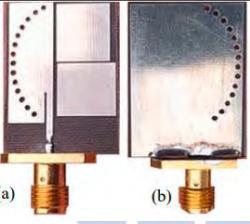
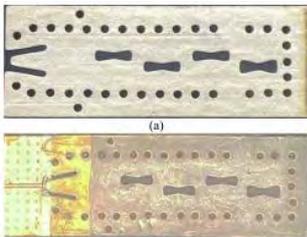
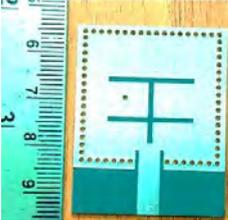
Perkembangan teknologi antenna berbasis *Substrate Integrated Waveguide* (SIW) telah menjadi topik penelitian yang menarik, terutama dalam upaya meningkatkan bandwidth, efisiensi, dan miniaturisasi. Berbagai inovasi telah dilakukan, termasuk modifikasi geometri *slot*, penggunaan via shorting untuk resonansi tambahan, desain hybrid resonator, serta penerapan teknologi Half-Mode dan Quarter-Mode SIW (HMSIW/QMSIW). Pendekatan-pendekatan ini dirancang untuk mengatasi keterbatasan pada antenna konvensional, seperti bandwidth yang sempit dan dimensi yang besar, sehingga menghasilkan antenna yang lebih kompak, efisien, dan mendukung aplikasi modern seperti radar, komunikasi nirkabel, dan sistem satelit. Studi ini memberikan gambaran tentang metode dan hasil penelitian sebelumnya yang menjadi dasar pengembangan antenna dalam penelitian ini.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu

No	Judul	Desain Antena	Metode	Frekuensi Band	FBW (%)
(1)	<i>Planar slot antenna backed by substrate integrated waveguide cavity</i>		Penggunaan modifikasi <i>slot</i> persegi panjang dengan <i>cavity</i> berbasis SIW	X-band	1.7
(2)	<i>Bandwidth-Enhanced Low-Profile Cavity-Backed Slot Antenna by Using Hybrid SIW Cavity Modes</i>		Hybrid resonansi <i>cavity</i> berbasis SIW	X-band	6.3

(3)	Bandwidth and efficiency enhancement of cavity-backed slot antenna using a substrate removal	 <p><Top View> <Bottom View></p>	Penghilangan substrat di sekitar <i>slot</i> untuk meningkatkan efisiensi	S-band	2.16
(4)	Development of a Linearly Polarized Cavity-Backed Antenna Using HMSIW Technique		Penggunaan desain <i>cavity</i> HMSIW untuk polarisasi linier	X-band	4.9
(5)	Bandwidth enhancement of cavity-backed slot antenna using a via-hole above the slot	 <p>< Top View > < Bottom View ></p>	Penambahan lubang pada <i>cavity</i> untuk resonansi tambahan	S-band	3.3
(6)	Bandwidth Broadening of Dual-Slot Antenna Using Substrate Integrated Waveguide (SIW)		Kombinasi <i>slot</i> ganda pada <i>cavity</i> berbasis SIW	X-band	8.5
(7)	Quarter-Mode Substrate Integrated Waveguide and Its Application to Antennas Design		Penggunaan desain <i>Quarter-Mode</i> SIW (QMSIW)	X-band	21.6
(8)	Broadband substrate integrated waveguide cavity-backed bow-tie slot antenna		Penggunaan <i>Slot bow-tie</i> untuk resonansi lebar pada anten FMSIW	X-band	9.4
(9)	Development of Low-Profile Patch and Semi-Circular SIW Cavity Hybrid Antennas		Penggunaan <i>patch planar</i> dan <i>cavity semi-circular</i>	X-band	10

(10)	<i>Size Reduction of Cavity Backed Slot Antenna using Half Mode Substrate Integrated Waveguide Structure</i>		Penggunaan desain HMSIW untuk pengurangan dimensi 50%	S-band	1.22
(11)	<i>Bandwidth enhancement of low-profile SIW cavity antenna using fraction modes</i>		Resonansi <i>fractional</i> mode dalam <i>cavity</i> SIW	S-Band	13.5
(12)	<i>Bandwidth Enhancement on Half-Mode Substrate Integrated Waveguide Antenna Using Cavity-Backed Triangular Slot</i>		Slot segitiga dalam <i>cavity</i> HMSIW	S-band	9.1
(13)	<i>Characterization and design of wideband penta- and hepta-resonance SIW elliptical cavity-backed slot antennas</i>		Penggunaan <i>Cavity</i> elips untuk penta- dan hepta-resonansi	X-band	21.8
(14)	<i>A Low-Profile Eighth-Mode SIW Antenna With Dual-Sense Circular Polarization, Enhanced Bandwidth and Simple Structure</i>		Penggunaan desain eighth-mode SIW dengan polarisasi melingkar	S-Band	4.7
(15)	<i>Frequency Reconfigurable Antenna Based on Substrate Integrated Waveguide for S-Band and C-Band Applications</i>		Reconfigurable frekuensi berbasis SIW pada 2 frekuensi yang berbeda	S-Band C-band	0.7 dan 5.5
(16)	<i>Pin-Loaded Patch Antenna Fed With a Dual-Mode SIW Resonator for Bandwidth Enhancement and Stable High Gain</i>		Penggunaan resonator dual-mode dengan pin loading	C-band	21

(17)	<i>A Compact SIW Cavity-Backed Self-Multiplexing Antenna for Hexa-Band Operation</i>		Self-multiplexing cavity SIW untuk multi-band	C-band	N/A
(18)	<i>Development of a wideband hexagonal SIW cavity-backed slot antenna array</i>		Array cavity heksagonal untuk bandwidth lebar	X-band	14
(19)	<i>Hybrid HMSIW Cavities Antenna With a Half-Pentagon Ring Slot for Bandwidth Enhancement</i>		HMSIW dengan slot setengah pentagon	X-band	31.83
(20)	<i>Development of hybrid resonator antennas using elliptical cavity and microstrip patch radiator</i>		Resonator elips dan patch planar	X-band	20
(21)	<i>A W-Band Self-Packaged SIW-Based Slot Antenna With Gain and Bandwidth Enhancement</i>		SIW self-packaged dengan parasitic folded patches	W-band	17
(22)	<i>Bandwidth enhancement of a planar SIW cavity-backed slot antenna using slot and metallic-shorting via</i>		Kombinasi slot T-shaped dan via-shorting	C-band	5.8

2.1.1 Modifikasi Geometri Slot

Pendekatan modifikasi geometri slot telah banyak digunakan untuk meningkatkan bandwidth antenna dengan menciptakan resonansi ganda atau multi-resonansi melalui desain slot berbentuk khusus. Referensi penelitian pada Table 2.1

nomor (8) menunjukkan efektivitas penggunaan *slot* berbentuk *bow-tie* dalam menghasilkan *bandwidth* lebar, mencapai FBW sebesar 9,4% dengan gain 3,7 dBi. Teknik ini memungkinkan pola radiasi yang optimal, meskipun memerlukan fabrikasi presisi tinggi. Selanjutnya, referensi penelitian nomor (13) memanfaatkan *cavity* berbentuk elips untuk mendukung penta- dan hepta-resonansi, menghasilkan FBW hingga 21,8% dengan gain serupa, yaitu 7,4 dBi. Pendekatan ini memperkuat konsep bahwa desain *slot* dengan geometri unik dapat secara signifikan meningkatkan kinerja antenna.

Selain itu, referensi penelitian nomor (19) menggunakan *slot* berbentuk setengah pentagon pada *cavity hybrid* berbasis HMSIW untuk menghasilkan resonansi ganda. Hasilnya menunjukkan peningkatan *bandwidth* hingga FBW 31,83% dengan *gain* 7,62 dBi. Meskipun memiliki keunggulan dalam menghasilkan *bandwidth* lebih luas, pendekatan ini tetap menghadapi tantangan dalam hal kompleksitas fabrikasi yang lebih tinggi. Secara keseluruhan, pendekatan modifikasi geometri *slot* memberikan solusi yang efektif untuk meningkatkan *bandwidth* antenna, terutama dengan memilih geometri *slot* yang sesuai untuk aplikasi spesifik.

2.1.2 *Via Shorting* untuk Resonansi Tambahan

Teknik *via shorting* menjadi inovasi penting dalam menciptakan resonansi tambahan pada antenna *cavity*. Referensi penelitian nomor (2) menunjukkan bahwa *hybrid cavity* yang dilengkapi dengan *via shorting* dapat menghasilkan FBW sebesar 6,3% dengan gain mencapai 6,0 dBi. Teknik ini memungkinkan *coupling* yang lebih baik antara mode dominan dan mode tinggi, sehingga meningkatkan *bandwidth* secara signifikan. Pendekatan ini diperkuat oleh referensi penelitian nomor (16), yang memanfaatkan *resonator dual-mode* dengan *pin loading* untuk mengoptimalkan resonansi *cavity*. Dengan *via shorting*, desain ini berhasil mencapai FBW 21% dengan gain sebesar 11,9 dBi.

Selanjutnya, referensi penelitian nomor (22) menggabungkan *slot T-shaped* dengan *via shorting* untuk menciptakan resonansi tambahan yang lebih stabil.

Pendekatan ini menghasilkan FBW sebesar 5,8% dengan gain 6,1 dBi. Meskipun struktur planar yang digunakan relatif sederhana, teknik *via shorting* memerlukan pengaturan presisi tinggi untuk memastikan *coupling* optimal antara mode resonansi. Secara keseluruhan, *via shorting* menawarkan solusi yang efisien untuk meningkatkan *bandwidth*, meskipun tantangan fabrikasi tetap menjadi perhatian utama.

2.1.3 Hybrid Resonator

Hybrid resonator menggabungkan berbagai elemen resonansi, seperti *cavity* berbentuk khusus dan elemen tambahan, untuk menghasilkan *bandwidth* lebar. Referensi penelitian nomor (3) memanfaatkan teknik penghilangan substrat di sekitar *slot* antena untuk meningkatkan efisiensi radiasi, menghasilkan FBW sebesar 2,16%. Pendekatan ini memberikan efisiensi tinggi melalui metode sederhana, meskipun rentan terhadap perubahan parameter substrat.

Referensi penelitian nomor (20) memperkuat konsep *hybrid resonator* dengan menggunakan *cavity* elips yang digabungkan dengan *patch planar*, menghasilkan FBW sebesar 20% dan gain mencapai 6,8 dBi. Teknik ini terbukti efektif untuk aplikasi *wideband*, meskipun membutuhkan fabrikasi yang lebih canggih. Selanjutnya, referensi penelitian nomor (18) menggunakan desain *array cavity* heksagonal untuk mendukung resonansi *hybrid*, yang menghasilkan FBW sebesar 14% dan gain 12 dBi. Pendekatan ini menunjukkan bahwa kombinasi elemen resonansi dapat menghasilkan performa optimal untuk aplikasi komunikasi modern.

2.1.4 Miniaturisasi dengan HMSIW/QMSIW

Miniaturisasi antena menggunakan teknologi HMSIW dan QMSIW menawarkan pengurangan dimensi antena yang signifikan tanpa mengorbankan performa. Referensi penelitian nomor (4) menggunakan *cavity* berbasis HMSIW untuk menghasilkan antena yang lebih kecil, mencapai FBW sebesar 4,9% dengan gain 6,7 dBi. Teknik ini menunjukkan pengurangan dimensi hingga 50%

dibandingkan desain SIW konvensional. Pendekatan serupa ditemukan pada referensi penelitian nomor (10), di mana HMSIW digunakan untuk mendesain antenna dengan performa stabil, menghasilkan FBW sebesar 1,22% dengan gain 3,64 dBi.

Lebih lanjut, referensi (14) menggunakan teknologi *eighth-mode* SIW untuk menghasilkan antenna kompak dengan polarisasi melingkar. Meskipun *bandwidth* relatif kecil (FBW sebesar 4,7%), desain ini tetap efektif untuk aplikasi berprofil rendah. Miniaturisasi dengan HMSIW/QMSIW menawarkan solusi yang efisien untuk antenna yang membutuhkan dimensi lebih kecil, terutama dalam aplikasi portabel.

2.1.5 *Array dan Multi-Band Design*

Desain *array* dan *multi-band* memberikan fleksibilitas dalam mendukung berbagai frekuensi dalam satu konfigurasi antenna. Referensi penelitian nomor (17) menggunakan teknik *self-multiplexing* pada *cavity* SIW untuk mendukung operasi *hexa-band*, menghasilkan 6 frekuensi kerja antara 5 GHz – 8 GHz dengan gain berkisar 4,5 dBi – 6,6 dBi. Teknik ini sangat cocok untuk aplikasi *multi-band*, meskipun memerlukan tuning yang kompleks untuk setiap *band*.

Referensi penelitian nomor (18) melengkapi pendekatan ini dengan desain *array* berbasis *cavity* heksagonal untuk menghasilkan pola radiasi yang terfokus. Desain ini berhasil mencapai FBW sebesar 14% dengan gain tinggi, yaitu 12 dBi. Meskipun performanya sangat baik, optimasi *array* tetap menjadi tantangan untuk memastikan efisiensi radiasi pada setiap *band*. Desain *array* dan *multi-band* menunjukkan potensi besar dalam memenuhi kebutuhan komunikasi modern dengan aplikasi pada berbagai frekuensi.

2.2 Parameter Antena

2.2.1 Antena SIW

Sejarah antena SIW adalah pengembangan dari teknologi waveguide konvensional, yang sebelumnya digunakan dalam aplikasi mikrogelombang dan mikrostrip. SIW pertama kali diperkenalkan oleh Ke Wu dan Kai Chang di University of California, Los Angeles (UCLA), pada awal tahun 2000-an. Mereka mengusulkan konsep gelombang dielektrik yang terintegrasi dalam bahan dielektrik dan kemudian digunakan untuk menggantikan konduktor logam yang biasa digunakan dalam waveguide konvensional. Pendekatan ini memungkinkan desain yang lebih efisien, terutama dalam aplikasi yang memerlukan antena dan saluran transmisi dalam ruang terbatas. Sejak itu, SIW telah menjadi subjek penelitian yang penting dalam bidang antena dan mikrogelombang.

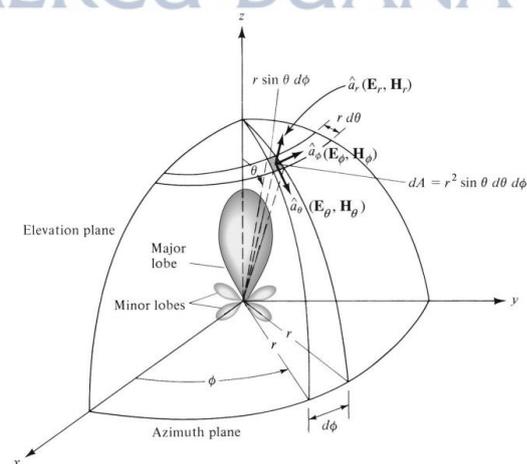
Teknologi ini digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk komunikasi nirkabel, radar, dan sistem mikrogelombang yang memerlukan antena yang efisien, terintegrasi, dan kompak. Desain SIW antena terus berkembang dengan pengenalan teknologi baru dan pengoptimalan untuk berbagai aplikasi. Dengan perkembangan komunikasi nirkabel yang pesat, antena profil rendah dengan kinerja radiasi yang baik sangat diminati, terutama pada aplikasi luar angkasa seperti satelit, pesawat terbang dan radar di beberapa platform militer. Antena *slot*, karena karakteristiknya yang menarik seperti profil yang rendah, kesesuaian dengan permukaan planar atau lengkung, integrasi yang mudah dengan sirkuit planar dan isolasi yang lebih baik dari jaringan feed, sangat sesuai untuk aplikasi ini dan telah dipelajari secara ekstensif oleh banyak peneliti.

2.2.2 Radiation Pattern

Diagram radiasi merupakan karakteristik terpenting antena yang menunjukkan sebaran energi yang dipancarkan antena di ruang bebas. Pengukuran dilakukan pada medan jauh (*far-field*) dengan jarak konstan ke antena dan sudut yang bervariasi (θ dan ϕ). Hal ini memungkinkan pembedaan antara antena dengan sifat radiasi:

1. Isotrop: Antena hipotetis yang memancarkan energi secara merata ke segala arah.
2. Omnidireksional: Antena yang memancarkan energi secara merata pada satu bidang potong tertentu.
3. Direksional: Antena yang memfokuskan energi pancarannya ke arah sudut tertentu.

Pola radiasi antena atau pola antena didefinisikan sebagai fungsi matematis atau representasi grafis dari sifat radiasi antena sebagai fungsi koordinat ruang. Dalam kebanyakan kasus, pola radiasi ditentukan di wilayah medan jauh dan direpresentasikan sebagai fungsi dari koordinat arah. Sifat radiasi meliputi kerapatan fluks daya, intensitas radiasi, kekuatan medan, pengarahannya, fase atau polarisasi. Sifat radiasi yang paling menjadi perhatian adalah distribusi spasial dua atau tiga dimensi dari energi yang dipancarkan sebagai fungsi dari posisi pengamat di sepanjang jalur atau permukaan dengan jari-jari konstan. Satu set koordinat yang mudah ditunjukkan pada **Gambar 2.1** Jejak medan listrik (magnetik) yang diterima pada radius konstan disebut pola medan amplitudo. Di sisi lain, grafik variasi spasial dari kerapatan daya di sepanjang radius konstan disebut pola daya amplitudo. (23)



Gambar 2.1 Sistem koordinat untuk analisis antena

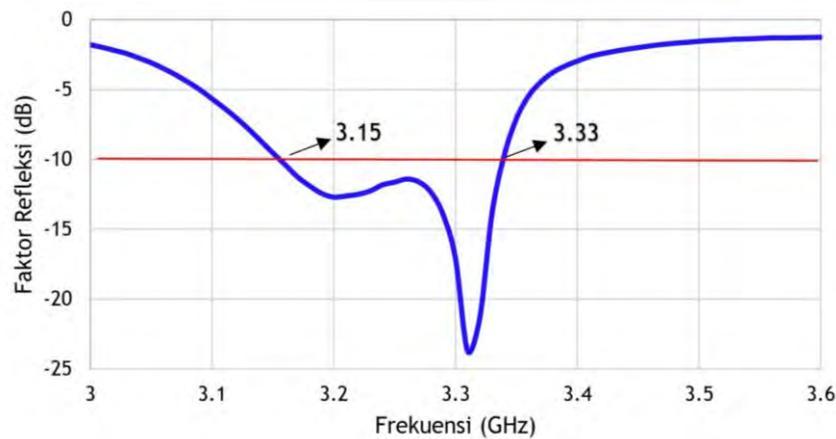
Pola medan (dalam skala linier) biasanya mewakili plot besarnya medan listrik atau medan magnet sebagai fungsi ruang sudut. Pola daya (dalam skala linier) biasanya mewakili plot kuadrat dari besarnya medan listrik atau medan magnet sebagai fungsi ruang sudut. Pola daya (dalam dB) mewakili besarnya medan listrik atau magnet, dalam desibel, sebagai fungsi dari ruang sudut.

2.2.3 *Gain*

Angka penting lain yang berguna untuk menggambarkan kinerja antena adalah *gain*. Meskipun penguatan antena berkaitan erat dengan pengarahan, ini adalah ukuran yang memperhitungkan efisiensi antena serta kemampuan pengarahannya. Pengarahan adalah ukuran yang hanya menggambarkan sifat pengarahan antena, dan oleh karena itu hanya dikontrol oleh pola sesuai teori dari referensi buku Balanis nomor (23). Penguatan antena (dalam arah tertentu) didefinisikan sebagai "rasio intensitas, dalam arah tertentu, terhadap intensitas radiasi yang akan diperoleh jika daya yang diterima oleh antena dipancarkan secara isotropis. Intensitas radiasi yang sesuai dengan daya yang diradiasikan secara isotropis sama dengan daya yang diterima (input) oleh antena dibagi dengan 4π ." Dimana target nilai *gain* dari penelitian ini adalah 7 dB.

2.2.4 *Bandwidth*

Bandwidth sebuah antena didefinisikan sebagai interval frekuensi, didalamnya antena bekerja sesuai dengan yang ditetapkan oleh spesifikasi yang diberikan. Spesifikasi tersebut meliputi: diagram radiasi, tinggi dari *side lobe*, *gain*, pola radiasi, impedansi masukan atau faktor refleksi. Berikut adalah contoh pengukuran bandwidth pada sebuah antena SIW dengan frekuensi S-Band di rentang 3.15 – 3.33 Ghz. Total lebar pita nya adalah 180 Mhz.



Gambar 2.2 Pengukuran lebar pita pada antenna SIW sebesar 180 Mhz

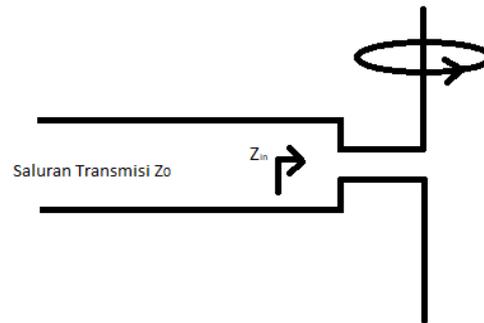
2.2.5 Polarisasi

Polarisasi dari sebuah antenna menginformasikan kearah mana medan listrik memiliki orientasi dalam perambatannya atau pada arah tertentu didefinisikan sebagai polarisasi gelombang yang dipancarkan (diradiasikan) oleh antenna. Ada 2 jenis polarisasi yaitu linier dan Eliptis. Pada polarisasi linier, arah medan listrik tidak berubah dengan waktu, yang berubah hanya orientasinya saja (positif-negatif). Polarisasi linier vertikal bisa dihasilkan dengan antenna dipole yang vertikal. Gelombang yang memiliki polarisasi linier vertikal ini juga harus diterima dengan antenna yang bisa menghasilkan polarisasi vertikal. Polarisasi Eliptis pada gelombang yang mempunyai polarisasi eliptis, dengan berjalannya waktu dan perambatan, medan listrik dari gelombang itu melakukan putaran dengan ujung panah-panahnya terletak pada sebuah permukaan silinder dengan penampang elips.

2.2.6 Impedansi, Faktor Refleksi (S_{11}) dan FBW

Impedansi masukan didefinisikan sebagai impedansi yang diberikan oleh antenna kepada rangkaian di luar, pada suatu titik acuan tertentu. Seperti divisualisasikan pada gambar 2.10, saluran transmisi penghubung yang dipasangkan antenna, akan melihat antenna tersebut sebagai beban dengan impedansi

beban sebesar Z_{in} . Impedansi ini merupakan perbandingan tegangan dan arus atau perbandingan komponen medan listrik dan medan magnet yang sesuai dengan orientasinya. Impedansi masukan penting untuk pencapaian kondisi *matching* pada saat antenna dihubungkan dengan sumber tegangan, sehingga semua sinyal yang dikirim ke antenna akan terpancarkan atau pada antenna penerima, jika kondisi *matching* tercapai, energi yang diterima antenna akan bisa dikirimkan ke *receiver*.



Gambar 2.3 Antena sebagai beban dari rangkaian sebelumnya

Kondisi beban dengan impedansi Z_{in} yang dipasang pada saluran transmisi dengan impedansi gelombang sebesar Z_o akan mengakibatkan refleksi sebesar

$$r = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \quad (2.1)$$

Yang secara logaritma bisa dihitung dengan

$$r \text{ dB} = 20 \log |r| \quad (2.2)$$

Selain dari itu dalam mengkuantifikasikan besaran refleksi, bisa di gunakan rasio gelombang tegangan berdiri *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR) dengan hubungan.

$$VSWR = \frac{1 + |r|}{1 - |r|} \quad (2.3)$$

Dalam aplikasinya sebuah antenna sering dianggap telah memiliki kinerja refleksi yang bagus jika faktor refleksinya $r \text{ dB} \leq -10 \text{ dB}$ atau energinya direfleksikan $|r| \leq 0.316$, 10% energinya direfleksikan kembali ke pemancar dan $VSWR < 1,92$ (28).

FBW pada antena adalah ukuran bagaimana lebar pita frekuensi yang dapat ditangani antena secara efektif dibandingkan dengan frekuensi operasinya. Dengan kata lain, FBW menunjukkan kemampuan antena untuk beroperasi pada rentang frekuensi tertentu. Pada penelitian ini ditargetkan mendapatkan nilai FBW pada frekuensi s-band sebesar lebih dari 15%. Dimana nilai tersebut bisa dihitung dengan menggunakan rumus (27), dimana nilai *bandwidth* dihitung dari pengurangan antara frekuensi akhir dan frekuensi awal berdasarkan nilai factor refleksi (S_{11}) dibawah -10 dB. Dan untuk frekuensi tengah adalah perhitungan dari jumlah frekuensi awal dan akhir dibagi 2.

$$FBW = \text{Bandwidth: Frequency Center} \times 100\% \quad (2.4)$$

2.2.7 Axial Ratio (AR)

Axial Ratio (AR) adalah parameter penting dalam karakterisasi antena, terutama untuk antena yang memancarkan atau menerima gelombang elektromagnetik dengan polarisasi melingkar. AR didefinisikan sebagai rasio antara sumbu utama dan sumbu minor dari elips polarisasi gelombang elektromagnetik. Dalam konteks antena, AR digunakan untuk mengukur seberapa baik antena dapat memancarkan atau menerima gelombang dengan polarisasi melingkar yang sempurna. Secara matematis, *Axial Ratio* dinyatakan dalam desibel (dB) dan dihitung menggunakan rumus:

$$AR_{dB} = 20 \text{Log}_{10} \left(\frac{E_{Max}}{E_{Min}} \right) \quad (2.5)$$

Dimana E_{max} adalah amplitudo maksimum dari komponen medan listrik elips (*polarized wave*) dan E_{min} adalah amplitudo minimum dari komponen medan listrik elips. Antena dengan polarisasi melingkar ideal (*circular polarization*), nilai $AR_{dB} = 1$ atau 0 dB. Dalam praktiknya, antena dikatakan memiliki polarisasi melingkar yang baik jika $AR_{dB} \leq 3$ dB.

2.3 Dimensi Antena

Pada perhitungan dimensi antena SIW beberapa teori dan rumus pada penelitian nomor (7) dengan judul *Quarter-Mode Substrate Integrated Waveguide and Its Application to Antennas Design* didapati sebagai berikut.

$$f_{mnp}^{SIW} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L_{eff}^{SIW}}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W_{eff}^{SIW}}\right)^2} \quad (2.6)$$

$$\begin{cases} L_{eff}^{SIW} = Lc - 1.08 \frac{D_1^2}{V_3} + 0.1 \frac{D_1^2}{Lc} \\ W_{eff}^{SIW} = Wc - 1.08 \frac{D_1^2}{V_3} + 0.1 \frac{D_1^2}{Wc} \end{cases} \quad (2.7)$$

$$W_{eff}^{HMSIW} = \frac{W_{eff}^{SIW}}{2} + \Delta W \quad (2.8)$$

$$\Delta W = h \cdot \left(0.05 + \frac{0.30}{\epsilon_r}\right) \times \ln \left(0.79 \frac{W_{eff}^{SIW}}{4h^3} + \frac{52W_{eff}^{SIW}}{h^2} + \frac{38}{h} + 2.77\right) \quad (2.9)$$

$$W_z = \frac{2h}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (2.10)$$

$$\lambda^o = \frac{c}{fc \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.11)$$

Dimana rumus ini digunakan untuk perhitungan rangkaian TE mode yang beresonansi untuk antena FMSIW yang ada pada **Tabel 3.2**, dengan hasil TE₁₀₁ pada frekuensi 1,99 GHz dan TE₁₀₂ pada frekuensi 3.15 GHz.