

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Berbagai penelitian terkait antenna mikrostrip untuk mendukung aplikasi seluler 5G telah dilakukan dengan beragam pendekatan, mulai dari variasi bentuk patch, teknik pencatutan, penggunaan struktur slot, hingga penerapan metode beamforming. Setiap penelitian memiliki keunggulan dan keterbatasan masing-masing, sehingga diperlukan perbandingan untuk menegaskan posisi dan kebaruan penelitian ini.

Pada penelitian [10], antenna mikrostrip *rectangular* untuk aplikasi LTE 700 MHz hanya menghasilkan gain sebesar 1,5–2,1 dBi dengan bandwidth sekitar 87,3 MHz, dan pola radiasi omnidirectional. Hasil ini menunjukkan bahwa antenna konvensional tanpa optimasi cenderung belum memenuhi kebutuhan sistem komunikasi modern yang menuntut gain lebih tinggi dan bandwidth lebih luas.

Selain itu, penelitian [11] mengenai antenna spiral slotted microstrip pada 700 MHz juga memperlihatkan bahwa antenna pada frekuensi rendah membutuhkan teknik khusus untuk memperlebar bandwidth serta memperbaiki performa radiasi. Pada studi tersebut, teknik slotting dan miniaturisasi spiral masih menghasilkan bandwidth yang relatif terbatas (50–100 MHz) dan pola radiasi yang tidak sepenuhnya optimal karena adanya scan-blindness dan variasi directivity. Hasil ini menguatkan bahwa antenna 700 MHz membutuhkan optimasi impedansi, modifikasi ground plane, atau konfigurasi *array* agar performanya meningkat secara signifikan.

Pada penelitian ini [12] dirancang dan direalisasikan sebuah antenna mikrostrip untuk mendukung komunikasi 5G pada spektrum 28 GHz. Antenna yang digunakan berbentuk patch bowtie dengan konfigurasi MIMO 4×4, di mana setiap elemen memiliki dimensi yang sama. Pemilihan patch bowtie bertujuan untuk memperoleh bandwidth yang lebih lebar, sedangkan penerapan teknik MIMO digunakan untuk mengatasi permasalahan multipath fading yang umum terjadi pada sistem komunikasi nirkabel. Proses perancangan antenna dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite dengan fokus pada parameter performa, yaitu return loss, VSWR, bandwidth, dan mutual coupling. Hasil perancangan menunjukkan bahwa antenna MIMO 4×4 ini mampu bekerja dengan baik pada frekuensi 28 GHz. Nilai return loss yang diperoleh pada masing-masing port adalah -13,7617

dB (port 1), -8,49 dB (port 2), -11,8011 dB (port 3), dan -11,4207 dB (port 4). Sementara itu, nilai VSWR yang diperoleh yaitu 1,516 pada port 1, 2,205 pada port 2, 1,692 pada port 3, dan 1,734 pada port 4. Bandwidth yang dihasilkan adalah sekitar 500 MHz, dengan mutual coupling yang lebih kecil dari -20 dB. Berdasarkan hasil tersebut, antenna mikrostrip MIMO 4×4 ini memenuhi spesifikasi dasar dan dapat digunakan pada aplikasi komunikasi 5G dengan frekuensi kerja 28 GHz.

Pada penelitian ini [13] dirancang antenna mikrostrip *rectangular array* yang dikombinasikan dengan metode beamforming menggunakan butler matrix untuk mendukung teknologi 5G pada spektrum millimeter wave. Teknologi beamforming dipilih karena mampu meningkatkan cakupan dan kapasitas jaringan 5G dengan cara menggabungkan sinyal pada elemen *array* serta menyelaraskan fasa sinyal sehingga terbentuk pancaran radiasi terarah. Butler matrix 4×4 digunakan untuk menghasilkan perbedaan fasa pada setiap elemen antenna, sehingga arah radiasi dapat difokuskan sesuai kebutuhan. Proses perancangan dilakukan melalui dua skenario desain butler matrix 4×4, kemudian dipilih skenario terbaik untuk digabungkan dengan antenna mikrostrip *array* MIMO 4×4. Hasil simulasi menunjukkan bahwa return loss pada elemen antenna masing-masing adalah -14,504 dB, -6,71 dB, -6,79 dB, dan -15,129 dB. Nilai VSWR yang diperoleh sebesar 1,46; 2,716; 2,687; dan 1,424, dengan gain sebesar 11,1 dBi, 10,8 dBi, 10,8 dBi, dan 11 dBi. Pola radiasi yang dihasilkan bersifat unidirectional dengan arah radiasi berbeda-beda, di mana sudut elevasi pancar utama berada pada 0°, 8°, -8°, dan -22°. Hasil tersebut membuktikan bahwa penerapan butler matrix 4×4 pada perancangan antenna mikrostrip *array* MIMO 4×4 mampu meningkatkan nilai gain sekaligus menghasilkan pola radiasi yang terarah dengan variasi sudut pancaran sesuai kebutuhan komunikasi 5G.

Pada penelitian ini [14] diusulkan sebuah antenna mikrostrip untuk mendukung teknologi komunikasi generasi kelima (5G) dengan frekuensi kerja 26 GHz. Antenna dirancang menggunakan tambahan double U-slot pada bagian patch serta metode *Defected Ground Structure* (DGS) dengan tujuan untuk meningkatkan bandwidth dan mengurangi efek *mutual coupling*. Antenna yang dikembangkan memiliki karakteristik pola radiasi directional dan polarisasi linier. Untuk sistem pencatutan digunakan metode *proximity coupled*, di mana pencatu ditempatkan pada lapisan substrat yang berbeda dengan elemen peradiasi. Metode pencatutan ini dipilih karena mampu meningkatkan bandwidth impedansi secara signifikan. Material substrat yang digunakan adalah RT Duroid 5880, yang dipilih karena memiliki permitivitas relatif rendah, mendukung dimensi yang lebih besar, dan tetap dapat bekerja pada frekuensi tinggi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa antenna yang

dirancang mampu menghasilkan bandwidth impedansi tertinggi sebesar 1,6564 GHz, dengan nilai *mutual coupling* tetap berada di bawah -20 dB. Selain itu, antenna ini juga memiliki nilai gain sebesar 7,1151 dB, sehingga dapat memenuhi kebutuhan antenna untuk aplikasi 5G pada frekuensi 26 GHz.

Pada penelitian ini [15] disajikan perancangan dan realisasi antenna MIMO 4×4 berbentuk mikrostrip patch lingkaran dengan konfigurasi *array* dua elemen yang bekerja pada frekuensi 15 GHz. Proses perancangan diawali dengan simulasi menggunakan perangkat lunak antenna, kemudian dilanjutkan dengan fabrikasi menggunakan substrat Duroid 5880. Hasil simulasi menunjukkan bahwa antenna mampu mencapai koefisien refleksi sebesar -22,557 dB, nilai VSWR sebesar 1,161, *mutual coupling* sebesar -40,525 dB, lebar pita sebesar 1,482 GHz, serta gain mencapai 9,69 dB pada frekuensi resonansi 15 GHz. Antena yang direalisasikan memiliki dimensi fisik sebesar 40 × 60,64 mm. Hasil pengukuran antenna yang telah difabrikasi menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan hasil simulasi, dengan koefisien refleksi terbaik sebesar -26,87 dB, nilai VSWR sebesar 1,095, bandwidth sebesar 1,26 GHz, dan gain sebesar 14,39 dB pada frekuensi kerja 15 GHz. Dengan hasil tersebut, antenna mikrostrip patch lingkaran MIMO 4×4 ini dinilai memenuhi spesifikasi yang dibutuhkan dan layak digunakan pada aplikasi komunikasi berfrekuensi tinggi.

Pada penelitian ini [16] dibahas desain antenna mikrostrip MIMO yang diimplementasikan pada sistem komunikasi 5G dengan frekuensi kerja pada band N40 (2,3–2,4 GHz) dan frekuensi tengah 2,35 GHz. Fokus utama dari penelitian ini adalah analisis terhadap *mutual coupling* dan koefisien korelasi antar elemen antenna MIMO, mengingat konfigurasi MIMO dipilih untuk memenuhi kebutuhan transmisi data berkecepatan tinggi pada jaringan 5G. Antena dirancang menggunakan patch berbentuk persegi dengan teknik pencatutan *microstrip insert feed-line*, sedangkan material substrat yang digunakan adalah FR-4 dengan konstanta dielektrik sebesar 4,3. Setelah desain antenna elemen tunggal yang sesuai kriteria diperoleh, antenna kemudian disusun dalam konfigurasi MIMO 2×2 dengan polarisasi antar elemen yang tidak seragam.

Penelitian [17] Radar cuaca memiliki peranan penting dalam mendeteksi curah hujan, menghitung pergerakan awan, serta mengidentifikasi jenis objek seperti hujan, salju, atau hujan es. Untuk aplikasi tersebut, pita frekuensi C-Band pada rentang 3,7 GHz hingga 4,2 GHz umumnya digunakan. Salah satu tantangan utama pada sistem ini adalah peningkatan gain antenna guna memperoleh kinerja sistem yang lebih optimal. Penelitian ini bertujuan untuk merancang antenna mikrostrip downlink C-Band pada frekuensi kerja 3,9

GHz. Untuk meningkatkan nilai gain, digunakan konfigurasi antena *array* 4×2 . Sebelum proses perancangan, dilakukan perhitungan dan simulasi menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite 2019. Hasil perancangan menunjukkan nilai return loss sebesar $-29,171$ dB, VSWR sebesar 1,061, bandwidth sebesar 713 MHz, serta gain sebesar 8,23 dB. Kontribusi penelitian ini adalah peningkatan gain dan bandwidth yang lebih baik dibandingkan dengan penelitian sejenis.

Berdasarkan kajian terhadap berbagai penelitian terdahulu, dapat diidentifikasi bahwa sebagian besar pengembangan antena mikrostrip untuk aplikasi 5G masih berfokus pada pita frekuensi tinggi, khususnya pada rentang millimeter wave (26–28 GHz), dengan memanfaatkan konfigurasi MIMO, teknik beamforming, serta struktur tambahan seperti double U-slot dan Defected Ground Structure (DGS) untuk meningkatkan bandwidth, gain, dan menekan mutual coupling. Pendekatan tersebut terbukti efektif pada frekuensi tinggi, namun cenderung menghasilkan struktur antena yang kompleks, memerlukan toleransi fabrikasi yang ketat, serta kurang sesuai untuk implementasi 5G low-band yang menuntut jangkauan luas dan efisiensi radiasi pada frekuensi rendah.

Pada sisi lain, penelitian antena mikrostrip pada frekuensi rendah, khususnya di sekitar pita 700 MHz, masih relatif terbatas dan umumnya menggunakan konfigurasi patch tunggal atau desain sederhana tanpa optimasi lanjutan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa antena mikrostrip konvensional pada frekuensi ini cenderung memiliki bandwidth yang sempit, gain rendah, serta pola radiasi yang kurang optimal, sehingga belum sepenuhnya memenuhi kebutuhan sistem komunikasi 5G low-band. Upaya peningkatan performa melalui teknik slotting atau miniaturisasi pada frekuensi rendah juga masih menghasilkan bandwidth yang terbatas dan belum mampu memberikan peningkatan gain yang signifikan secara konsisten.

Selain itu, sebagian penelitian yang berhasil meningkatkan gain dan bandwidth pada frekuensi sub-6 GHz lebih banyak diterapkan pada aplikasi non-seluler, seperti radar cuaca atau sistem komunikasi khusus, dengan konfigurasi *array* yang belum secara spesifik diarahkan untuk kebutuhan 5G low-band. Penelitian-penelitian tersebut belum mengkaji secara mendalam penerapan *array* berukuran besar pada pita 700–800 MHz dengan fokus pada keseimbangan antara peningkatan gain, pelebaran bandwidth, dan kesederhanaan desain tanpa melibatkan konfigurasi MIMO atau sistem pencatutan yang kompleks.

Dengan demikian, terdapat celah penelitian dalam perancangan antena mikrostrip untuk aplikasi 5G low-band pada frekuensi 700–800 MHz, khususnya dalam pengembangan antena mikrostrip *rectangular patch* dengan konfigurasi *array* 4×4 yang mampu

menghasilkan bandwidth mendekati 100 MHz, gain yang lebih tinggi dan stabil, serta pola radiasi directional, tanpa menggunakan pendekatan MIMO maupun struktur modifikasi ground plane yang rumit.

Tabel 2.1 Ringkasan gap penelitian antenna mikrostrip untuk aplikasi 5G

No	Penelitian Terdahulu	Frekuensi Kerja	Pendekatan / Metode	Kelebihan	Keterbatasan	Gap Penelitian
1	Antena LTE <i>rectangular</i> [10]	700 MHz	Patch tunggal konvensional	Desain sederhana	Gain rendah (1,5–2,1 dBi), bandwidth sempit	Diperlukan peningkatan gain dan bandwidth pada frekuensi 700 MHz
2	Antena spiral slotted [11]	700 MHz	Slotting, miniaturisasi spiral	Ukuran lebih kecil	Bandwidth terbatas (50–100 MHz), radiasi tidak optimal	Belum memanfaatkan konfigurasi <i>array</i> untuk peningkatan gain
3	Antena bowtie MIMO 4×4 [12]	28 GHz (mmWave)	MIMO 4×4, patch bowtie	Bandwidth lebar, mutual coupling < –20 dB	Frekuensi tinggi, struktur kompleks, kurang relevan untuk 5G low-band	Belum mengkaji antenna 5G low-band 700–800 MHz dengan desain sederhana dan jangkauan luas
4	Antena <i>array</i> + Butler Matrix [13]	mmWave	Beamforming, Butler matrix 4×4	Gain tinggi, pola radiasi terarah	Kompleksitas tinggi, sulit diimplementasikan pada frekuensi rendah	Belum ada kajian <i>array</i> non-MIMO di low-band tanpa beamforming
5	Antena dengan double U-slot & DGS [14]	26 GHz	Slotting, DGS, proximity coupling	Bandwidth sangat lebar, mutual coupling rendah	Fokus mmWave, struktur multilayer kompleks	Belum diterapkan pada frekuensi 700–800 MHz dengan pendekatan sederhana
6	Antena MIMO patch lingkaran [15]	15 GHz	MIMO 4×4, patch circular	Gain dan bandwidth tinggi	Dimensi relatif besar, masih frekuensi tinggi	Tidak membahas performa antenna pada low-band 5G
7	Antena MIMO N40 [16]	2,3–2,4 GHz	MIMO 2×2, insert feed	Mutual coupling dan ECC rendah	Gain terbatas, fokus sub-6 GHz non-700 MHz	Belum menyentuh pita 700–800 MHz dan konfigurasi <i>array</i> besar
8	Antena <i>array</i> radar cuaca [17]	3,9 GHz	<i>Array</i> 4×2	Gain dan bandwidth meningkat	Aplikasi non-seluler	Belum diaplikasikan untuk 5G low-band 700–800 MHz
9	Penelitian ini	700–800 MHz	<i>Array</i> 4×4 <i>rectangular patch</i>, <i>step impedance transformer</i>, <i>partial ground plane</i>	Gain lebih tinggi, bandwidth mendekati 100 MHz, desain sederhana	Dimensi antenna relatif besar. Desain belum menggunakan teknik lanjutan seperti MIMO, DGS, atau beamforming	Mengisi celah penelitian antenna 5G low-band non-MIMO dengan <i>array</i> besar dan optimasi sederhana

Penelitian ini diharapkan dapat mengisi kekosongan tersebut dengan menawarkan desain antenna yang lebih sederhana, efisien, dan relevan untuk implementasi jaringan 5G low-band di Indonesia. Berdasarkan Tabel 2.1, dapat disimpulkan bahwa penelitian-penelitian terdahulu umumnya berfokus pada pengembangan antenna mikrostrip untuk aplikasi 5G pada frekuensi tinggi (mmWave) atau sub-6 GHz non-700 MHz dengan pendekatan, beamforming, serta struktur antenna yang kompleks. Sementara itu, penelitian pada pita frekuensi 700–800 MHz masih terbatas dan didominasi oleh desain antenna konvensional dengan gain rendah dan bandwidth yang sempit. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk mengisi celah tersebut melalui perancangan antenna mikrostrip *rectangular patch* dengan konfigurasi *array* 4×4 pada frekuensi 700–800 MHz yang mengutamakan peningkatan gain, pelebaran bandwidth, serta kesederhanaan desain tanpa menggunakan konfigurasi. Pendekatan ini diharapkan menghasilkan antenna yang lebih praktis dan relevan untuk implementasi jaringan 5G low-band di Indonesia.

2.2 Teknologi 5G

Secara umum, teknologi jaringan dapat didefinisikan sebagai sebuah sistem interkoneksi yang menghubungkan berbagai perangkat dan teknologi agar dapat saling berkomunikasi. Perkembangan teknologi jaringan telah melalui beberapa fase, dimulai dari generasi nol (0G) hingga mencapai generasi keempat (4G) [18]

Evolusi jaringan ini berlangsung secara bertahap. Generasi nol (0G) merupakan awal mula teknologi komunikasi nirkabel yang berbasis pada sistem radio telepon bergerak. Kemudian, muncul generasi pertama (1G) yang mengadopsi sistem circuit switched dan teknologi multiplexing. Selanjutnya, generasi kedua (2G) diperkenalkan dengan penggunaan teknologi Time Division Multiple Access (TDMA) dan Code Division Multiple Access (CDMA), serta kehadiran Global System for Mobile Communication (GSM). Setelah itu, jaringan berkembang menjadi generasi ketiga (3G) yang memanfaatkan teknologi seperti Wideband CDMA (WCDMA), CDMA2000, dan Time Division Synchronous CDMA (TD-SCDMA). Kemudian lahirlah generasi keempat (4G) yang dikenal dengan teknologi Long Term Evolution (LTE), yang kini banyak digunakan secara luas oleh masyarakat. Tidak berhenti di situ, inovasi terus dilakukan hingga lahir generasi kelima (5G) atau Fifth Generation[19].

Teknologi jaringan 5G merupakan hasil pengembangan lanjutan dari jaringan generasi sebelumnya, yaitu 4G LTE. Dibandingkan dengan generasi keempat, jaringan 5G

menawarkan kecepatan transfer data yang jauh lebih tinggi, bahkan diklaim mampu mencapai tiga kali lipat kecepatan dari 4G. Dalam penerapannya, jaringan 5G mengandalkan lima teknologi utama, yaitu beamforming, gelombang milimeter, byte full-duplex, jaringan sel kecil (small cell), serta teknologi Multiple Input Multiple Output (MIMO) [20].



Gambar 2.1 Teknologi 5G

Teknologi jaringan 5G bekerja dengan cara mentransmisikan data melalui gelombang radio, yang memiliki berbagai frekuensi sesuai dengan kebutuhan komunikasinya. Salah satu komponen utama yang digunakan dalam sistem ini adalah spektrum gelombang milimeter, di mana proses pengiriman data berlangsung melalui media gelombang radio [20].

Seperti halnya teknologi lainnya, jaringan 5G memiliki sejumlah kelebihan dan kekurangan. Beberapa keunggulan utama dari jaringan generasi kelima ini meliputi [20]:

a. Kecepatan Tinggi

Jaringan 5G mampu mencapai kecepatan transfer data hingga 1 Gbps, jauh melampaui jaringan 4G yang hanya menawarkan kecepatan maksimal sekitar 40 hingga 60 Mbps.

b. Kemampuan Unggah yang Lebih Baik

Salah satu kelebihan lainnya adalah kecepatan unggah data yang dapat mencapai 23 Mbps, dibandingkan dengan jaringan 4G yang umumnya hanya memiliki kecepatan unggah sekitar 17,7 Mbps.

c. Perangkat yang Lebih Cerdas

Teknologi ini memiliki kemampuan untuk secara cerdas mengidentifikasi dan membedakan perangkat yang terhubung dalam jaringan.

d. Waktu Latensi yang Rendah

Latensi, yaitu jeda waktu antara pengiriman dan penerimaan data, menjadi jauh lebih rendah pada jaringan 5G, memungkinkan komunikasi real-time yang lebih responsif. Namun, teknologi ini juga memiliki beberapa keterbatasan [21], antara lain:

a. Kepadatan Spektrum Frekuensi

Dengan kebutuhan frekuensi hingga 6 GHz, implementasi jaringan 5G bisa menjadi tantangan karena spektrum radio saat ini sudah cukup padat.

b. Risiko Terhadap Privasi dan Keamanan

Kecepatan tinggi dalam transmisi data juga membawa potensi risiko terhadap privasi dan keamanan, karena data bisa lebih mudah disadap jika tidak diimbangi dengan sistem perlindungan yang kuat.

c. Daya Tembus Sinyal Terbatas

Meskipun memiliki jangkauan konektivitas yang luas, sinyal 5G cenderung kurang mampu menembus hambatan fisik seperti tembok, beton, maupun pohon, jika dibandingkan dengan teknologi sebelumnya.

d. Biaya Implementasi yang Tinggi

Untuk dapat mengakses jaringan 5G, diperlukan investasi yang cukup besar, baik dari sisi infrastruktur maupun perangkat, sehingga membuat biaya layanan ini menjadi lebih mahal dibandingkan generasi sebelumnya.

2.3 Antena

Antena adalah perangkat yang didesain untuk mengirimkan atau menerima gelombang elektromagnetik ke atau dari ruang bebas. Dalam sistem komunikasi radio, antena sangat penting karena mampu mengeluarkan energi elektromagnetik ke udara atau ruang bebas, dan sebaliknya. Antena memiliki tiga fungsi utama dengan peran yang berbeda-beda, yaitu sebagai pemancar (*transmitter*), penerima (*receiver*), dan *transceiver*.

a. Pemancar (*transmitter*) adalah jenis antena yang bertugas untuk mengirimkan gelombang elektromagnetik ke antena penerima.

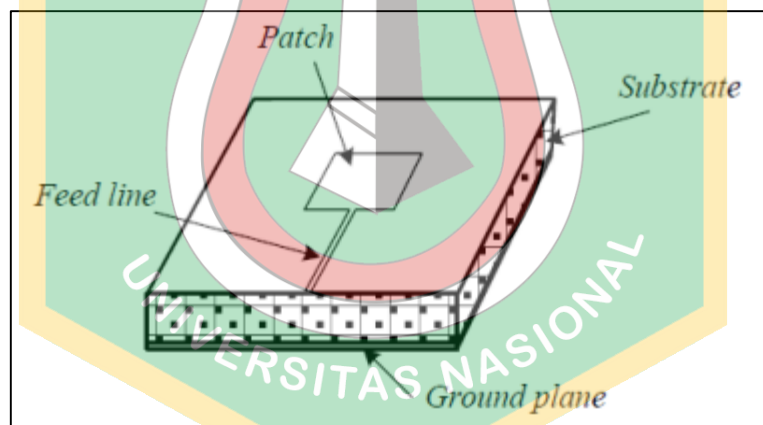
b. Penerima (*receiver*) adalah jenis antena yang berperan sebagai penerima gelombang elektromagnetik dari antena pemancar.

c. *Transceiver* adalah jenis antena yang memiliki dua peran, yaitu sebagai pengirim dan penerima gelombang elektromagnetik secara bersamaan.

Selain fungsi utama untuk mengirim atau menerima gelombang, antenna juga dapat digunakan untuk mengoptimalkan energi dalam arah tertentu dan mengurangi energi dalam arah lainnya. Oleh karena itu, terdapat berbagai bentuk dan model antenna yang dirancang dengan tujuan memiliki gain dan efisiensi yang tinggi, *bandwidth* yang luas, bobot yang ringan, serta biaya yang terjangkau [22].

2.4 Antena Mikrostrip

Antena mikrostrip merupakan jenis antenna yang memiliki beberapa kelebihan, seperti bentuk yang sederhana, ringan, dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan. Nama "mikrostrip" berasal dari kata "mikro" yang mengacu pada ukuran kecil atau tipis, dan "strip" yang merujuk pada potongan atau bilah. Konsep antenna mikrostrip pertama kali diusulkan oleh Deschamps pada tahun 1950 dan kemudian direalisasikan oleh Munson dan Howell pada tahun 1970-an. Antena mikrostrip juga merupakan salah satu jenis antenna gelombang mikro yang digunakan dalam sistem telekomunikasi modern. Secara umum, antenna mikrostrip terdiri dari tiga komponen utama, yaitu patch, *dielectric substrate*, dan *ground plane*, yang dapat dilihat pada Gambar 2.2 [23].



Gambar 2.2 Antena mikrostrip rectangular [23]

a. Patch

Patch merupakan komponen dalam antenna mikrostrip yang berfungsi sebagai elemen peradiasi, memungkinkan gelombang elektromagnetik untuk diterima atau dipancarkan saat melalui saluran tertentu. *Patch* ini terbuat dari bahan logam yang memiliki konduktivitas yang lebih tinggi daripada *ground plane*. Bentuk *patch* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa antenna, terutama terhadap lebar pita frekuensi (*bandwidth*). Oleh karena itu, desain *patch* sering kali mengalami perubahan saat melakukan optimasi, karena dimensi patch dapat memberikan perubahan yang signifikan terhadap parameter antenna. Terdapat

berbagai metode perhitungan ukuran patch yang mengikuti berbagai formula untuk menciptakan bentuk dasar *patch* pada antenna, seperti *circular patch*, *rectangular patch*, dan lain-lain.

b. Substrate Dielectric

Dielectric substrate, sesuai namanya, adalah lapisan substrat yang terbuat dari bahan dielektrik. Umumnya, *dielectric substrate* memiliki tinggi (h) antara $0.002\lambda_0$ hingga $0.005\lambda_0$ dan berfungsi sebagai media penyalur GEM (Gelombang Elektromagnetik) dari sirkuit cetakan. Karakteristik substrat dielektrik sangat berpengaruh terhadap parameter antenna, seperti ketebalan substrat dielektrik yang berpengaruh pada lebar pita frekuensi (*bandwidth*), di mana peningkatan ketebalan substrat akan meningkatkan *bandwidth*.

c. Ground Plane

Ground plane adalah elemen yang terletak di bagian belakang dan di bawah substrat pada antenna. Fungsi *ground plane* meliputi menjadi reflektor antenna, mengumpulkan gelombang elektromagnetik yang diterima oleh patch, serta memantulkan gelombang elektromagnetik yang tidak diinginkan. Penentuan *ground plane* memiliki pengaruh signifikan terhadap pola radiasi antenna, karena dapat mengarahkan dan membatasi radiasi dari patch. Oleh karena itu, dimensi *ground plane* perlu diperhatikan dalam desain antenna.

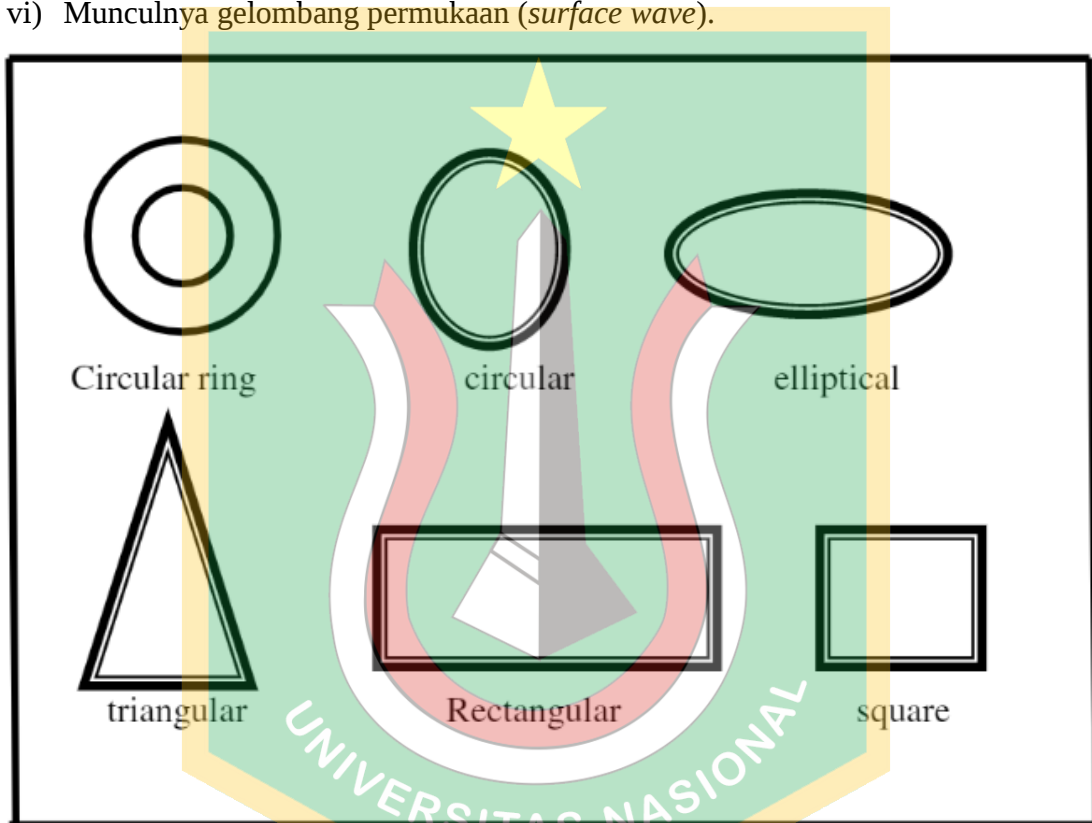
Ground plane umumnya terbuat dari bahan logam dengan karakteristik yang mirip dengan patch. Dalam antenna mikrostrip, biasanya menggunakan substrat *epoxy fiberglass* seperti FR2, FR3, dan FR4, dengan lapisan logam ganda (logam di bagian atas dan bawah). Hal ini memudahkan proses fabrikasi antenna dan dimensi *ground plane* akan disesuaikan dengan substrat baik dari segi panjang maupun lebar.

Antena mikrostrip memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan antenna lainnya, seperti yang disebutkan dalam [23]:

- i) Ringan dan berukuran kecil.
- ii) Konfigurasi yang rendah sehingga bisa disesuaikan dengan perangkat utama.
- iii) Biaya pabrikan yang murah sehingga bisa diproduksi dalam jumlah besar.
- iv) Mendukung polaritas linear dan sirkular.
- v) Integrasi mudah dengan sirkuit terpadu *mikrowave* (MICs).
- vi) Kemampuan dual *frequency*.
- vii) Tidak memerlukan tambahan pengumpan (*feed*).

Meskipun memiliki banyak kelebihan, antenna mikrostrip juga memiliki beberapa keterbatasan, seperti yang dijelaskan dalam [23]:

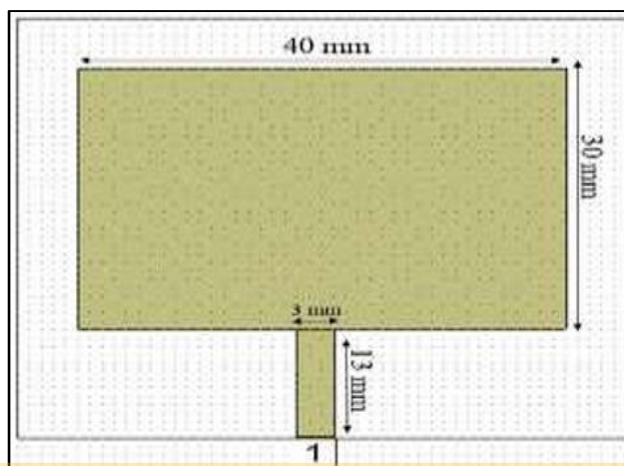
- i) *Gain* yang lebih rendah (-6dB).
- ii) *Bandwidth* yang sempit, tetapi bisa ditingkatkan dengan berbagai metode, termasuk penambahan ketebalan substrat.
- iii) Kemurnian polarisasi yang rendah.
- iv) Efisiensi yang rendah.
- v) Kemungkinan radiasi yang tidak diinginkan pada jalur pengumpan (*feed line*).
- vi) Munculnya gelombang permukaan (*surface wave*).



Gambar 2.3 Bentuk patch antenna mikrostrip [23]

2.5 Antena Mikrostrip *Rectangular Patch*

Bentuk *rectangular patch* adalah bentuk patch yang sederhana dan mudah untuk difabrikasi, karena analisisnya yang mudah dilakukan dan konfigurasinya yang sederhana. Antena *rectangular patch* sering dimodelkan sebagai saluran transmisi mikrostrip dengan panjang (L), lebar (W), dan ketebalan substrat (h). Sebelum merancang antenna mikrostrip *rectangular patch*, penting untuk mengetahui parameter bahan yang digunakan, termasuk ketebalan dielektrik (h), konstanta dielektrik (ϵ_r), dan *loss tangent* dielektrik ($\tan \delta$). Dengan menggunakan nilai-nilai ini, dimensi antenna mikrostrip (L dan W) dapat ditentukan menggunakan persamaan 2.1 [23], yang didasarkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Antena microstrip rectangular [23]

$$W = \frac{c}{2f \sqrt{\frac{\{\epsilon_r + 1\}}{2}}} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan:

- W = Lebar konduktor (m)
- ϵ_r = Konstanta dielektrik relatif
- c = Kecepatan cahaya (3×10^8 m/s)
- f = Frekuensi kerja antena (GHz)

Sementara itu, untuk menentukan panjang antena mikrostrip diperlukan parameter yang merupakan pertambahan panjang ΔL dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.2 [23].

$$\Delta L = 0.412 (h) \left(\frac{(\epsilon_{reff} + 0,3)}{(\epsilon_{reff} - 0,258)} \frac{(\frac{W}{h} + 0,262)}{(\frac{W}{h} - 0,262)} \right) \dots\dots\dots(2.2)$$

- ΔL = Pertambahan panjang (m)
- ϵ_{reff} = Konstanta dielektrik
- W = Lebar konduktor (m)
- h = Ketebalan substrat (mm)

Berikut adalah persamaan ϵ_{reff} yang merupakan konstanta dielektrik efektif dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.3 [23].

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{\frac{W}{h}} \right) \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

- ϵ_{reff} = Konstanta dielektrik
- ϵ_r = Konstanta dielektrik relatif
- W = Lebar konduktor (m)

h = Ketebalan substrat (mm)

Sedangkan patch efektif dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.4 [23].

$$L_{eff} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{reff}}} \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan:

L_{eff} = Patch efektif (m)

c = Kecepatan cahaya (3×10^8 m/s)

ϵ_{reff} = Konstanta dielektrik

f = Frekuensi kerja antenna (GHz)

Sehingga panjang patch dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.5 [23].

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan:

L = Panjang konduktor (m)

ΔL = Pertambahan panjang (m)

L_{eff} = Patch efektif (m)

Ground plane sama dengan ukuran substrat, menggunakan Persamaan 2.6 dan Persamaan 2.7.

$$L_g = W + 6h \dots \dots \dots (2.6)$$

$$W_g = L + 6h \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan:

L_g = Panjang ground plane (m)

W_g = Lebar ground plane (m)

L = Panjang konduktor (m)

W = Lebar konduktor (m)

h = Ketebalan substrat (mm)

2.6 Parameter Antena Mikrostrip

Untuk memastikan bahwa antenna yang dibuat sesuai dengan standar yang telah ditentukan, digunakan beberapa parameter sebagai berikut:

2.6.1 Gain

Gain adalah peningkatan daya yang dipancarkan dalam arah tertentu oleh suatu antenna dibandingkan dengan daya yang dipancarkan dalam arah yang sama oleh antenna

referensi. *Gain* antena, juga dikenal sebagai *power gain*, dapat dihitung menggunakan persamaan 2.8 [23].

$$G = \frac{4\pi f^2 A}{c^2} \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan:

- G = *Gain* (dBi)
- f = Frekuensi kerja (GHz)
- A = Luas Antena (m²)
- c = Kecepatan cahaya (3 × 10⁸ m/s)

Skema pengukuran *gain* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.9 [23].

$$P_{TX} - L_{TX} + G_{TX} - FSL + G_{RX} - L_{RX} - P_{RX} = 0 \dots\dots\dots(2.9)$$

Secara makna:

- P_{TX} = daya pancar (dBm)
- L_{TX} = rugi kabel / konektor sisi pemancar (dB)
- G_{TX} = gain antena pemancar (dBi)
- FSL = free space loss (dB)
- G_{RX} = gain antena penerima (dBi)
- L_{RX} = rugi kabel / konektor sisi penerima (dB)
- P_{RX} = sensitivitas penerima (dBm)

Dimana FSL dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.10 [23].

$$FSL = 32,44 + 20 \log D + 20 \log F \dots\dots\dots(2.10)$$

2.6.2 VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*)

VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*) merupakan fungsi dari koefisien pantul (*reflection coefficient*). Nilai VSWR selalu real dan positif [10]. Semakin kecil nilai VSWR yang dihasilkan oleh antena, semakin baik performanya. Nilai minimum VSWR adalah 1, yang menunjukkan bahwa tidak ada daya yang dipantulkan oleh antena.

Ketika sinyal merambat dalam saluran transmisi, perbandingan antara tegangan dan arus sinyal dapat dianggap sebagai impedansi karakteristik saluran. VSWR adalah perbandingan antara tegangan rms maksimum ($|V|_{\max}$) dan minimum ($|V|_{\min}$) yang terjadi pada saluran tidak cocok (*mismatch*). Jika saluran transmisi tidak cocok, di mana impedansi saluran berbeda dari impedansi beban, gelombang berdiri akan terbentuk karena adanya tegangan datang (V_0^+) dan tegangan pantul (V_0^-).

Koefisien pantul atau koefisien refleksi, yang ditandai dengan simbol Γ , menggambarkan perbandingan antara level tegangan yang datang ke beban dan yang kembali ke sumber. Nilai koefisien pantul berkisar antara 0 hingga 1. Jika nilainya 0, artinya tidak ada pantulan, sedangkan jika nilainya 1, artinya seluruh sinyal yang datang ke beban dipantulkan kembali ke sumber. Koefisien pantul dapat dihitung menggunakan persamaan 2.11 [23].

$$\Gamma = \frac{V_o^-}{V_o} \dots\dots\dots(2.11)$$

Hubungan antara koefisien refleksi, impedansi karakteristik dan impedansi beban dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.12 [23].

$$\Gamma = \frac{V_o^-}{V_o} = \frac{Z_l - Z_o}{Z_l + Z_o} \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan:

Z_l = Impedansi beban (*load*) (ohm)

Z_o = Impedansi saluran (*lossless*) (ohm)

Koefisien refleksi tegangan memiliki nilai kompleks, untuk beberapa kasus yang sederhana, ketika bagian imajiner dari Γ adalah nol, maka:

- a. $\Gamma = -1$: refleksi negatif maksimum, ketika saluran terhubung singkat.
- b. $\Gamma = 0$: tidak ada refleksi, ketika saluran dalam keadaan matched sempurna.
- c. $\Gamma = +1$: refleksi positif maksimum, ketika saluran dalam rangkaian terbuka.

Tegangan maksimum dan minimum dalam gelombang berdiri dalam saluran ditentukan oleh tegangan dan arus pantul. Secara sederhana, rumus untuk menghitung VSWR dapat ditentukan menggunakan persamaan 2.13 [23].

$$S = \frac{|V|_{max}}{|V|_{min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \dots\dots\dots(2.13)$$

Nilai VSWR yang ideal adalah 1, menandakan bahwa tidak ada refleksi saat saluran cocok dengan sempurna. Nilai VSWR digunakan sebagai indikator apakah antenna dapat berfungsi pada frekuensi yang diinginkan. Semakin besar nilai VSWR, semakin besar daya yang dipantulkan.

SWR meter digunakan untuk mengukur VSWR dengan menghubungkannya ke antenna menggunakan kabel koaksial. Dalam transmisi daya RF, jika impedansi saluran transmisi tidak sesuai dengan impedansi beban, maka akan terjadi pantulan daya dalam saluran transmisi.

2.6.3 Return Loss

Return loss adalah rasio antara amplitudo gelombang yang dipantulkan dengan amplitudo gelombang yang dikirimkan. *Return loss* terjadi ketika terdapat diskontinuitas antara saluran transmisi dan impedansi *input* beban (antena). Sebagai hasilnya, tidak seluruh daya diradiasikan, melainkan sebagian dipantulkan kembali. Nilai *return loss* dapat dihitung dengan memasukkan koefisien tegangan [Γ] ke dalam persamaan 2.14 [23].

$$return\ loss = 20 \log_{10} |\Gamma| \dots\dots\dots(2.14)$$

Keterangan:

Γ = koefisien pantul.

Biasanya, nilai *return loss* yang digunakan berada di bawah -9,54 dB untuk menentukan lebar pita frekuensi yang sesuai. Hal ini menunjukkan bahwa gelombang yang direfleksikan tidak signifikan dibandingkan dengan gelombang yang dikirimkan, atau dengan kata lain, saluran transmisi telah terjadi kecocokan (*matching*). Nilai parameter ini digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi apakah antenna sudah bekerja pada frekuensi yang tepat atau tidak.

2.6.4 Bandwidth

Bandwidth pada sebuah antenna didefinisikan sebagai rentang frekuensi yang terkait dengan beberapa karakteristik antenna lainnya, seperti impedansi masukan, polarisasi, dan *gain*. Besar *bandwidth* dapat dihitung menggunakan persamaan 2.15 [23].

$$BW = f_t - f_h \dots\dots\dots(2.15)$$

Keterangan:

BW = *bandwidth* (Hz)

f_t = frekuensi tertinggi (Hz)

f_h = frekuensi terendah (Hz)

Biasanya, *persentase bandwidth* seperti yang tercantum dalam rumus di atas digunakan untuk menggambarkan *bandwidth* antenna yang memiliki pita frekuensi sempit (*narrow band*). Namun, untuk antenna dengan pita frekuensi yang lebar (*broad band*), biasanya digunakan definisi rasio antara batas frekuensi atas dan batas frekuensi bawah sebagai ukuran *bandwidth*.

2.7 Teknik Pencatutan Antena dan Penyesuaian Impedansi

Dalam pencatutan elektromagnetik pada antena mikrostrip, terdapat berbagai konfigurasi yang dapat digunakan. Salah satu contohnya adalah menggunakan feed line yang merupakan metode pencatutan yang sederhana. Persamaan 2.16 berikut digunakan untuk menghitung dimensi saluran transmisi mikrostrip.

$$w = \frac{2h}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ [\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,62}{\epsilon_r}] \right\} \right\} \dots\dots\dots(2.16)$$

Keterangan:

ϵ_r = Konstanta dielektrik relatif

w = Lebar *feedline* (m)

h = Ketebalan substrat (mm)

Dimana nilai A dan B dari persamaan diatas dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.17 dan persamaan 2.18 [23].

$$A = \frac{Z_0}{60} \left\{ \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right\}^{1/2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left\{ 0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right\} \dots\dots\dots(2.17)$$

$$B = \frac{60\pi^2}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \dots\dots\dots(2.18)$$

Keterangan:

ϵ_r = Konstanta dielektrik relatif

Z_0 = Impedansi masukan (ohm)

Sedangkan panjang saluran transmisi dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 2.19 [23].

$$L \text{ (saluran pencatu)} = \frac{1}{4} \lambda_g \text{ (mm)} \dots\dots\dots(2.19)$$

Keterangan:

L = Panjang saluran pencatu (m)

λ_g = Panjang saluran transmisi (m)

Perhitungan panjang saluran dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.20 [23].

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{reff}}} \times 1000(mm) \dots\dots\dots(2.20)$$

Keterangan:

λ_g = Panjang saluran transmisi (m)

ϵ_{reff} = Konstanta dielektrik

f = Frekuensi kerja antena (GHz)

Penyesuaian impedansi, juga dikenal sebagai *matching impedance*, dilakukan untuk menyesuaikan dua impedansi yang berbeda, yaitu impedansi karakteristik saluran (Z_0) dan impedansi beban (Z_{in}). Penyesuaian impedansi sangat penting dalam desain antenna untuk mencapai kecocokan antara impedansi karakteristik saluran dengan beban, sehingga *transfer* daya maksimal dapat terjadi dengan minimal pantulan daya. Salah satu teknik yang sering digunakan dalam penyesuaian impedansi adalah menggunakan *transformator* $\lambda/4$.

2.8 Teknik Planar Array

Untuk meningkatkan *gain* antenna mikrostrip, salah satu metode yang dapat digunakan adalah dengan menambahkan *patch* secara *array*. Antena mikrostrip *array* merupakan pengembangan dari antenna mikrostrip yang terdiri dari beberapa elemen radiasi yang terhubung membentuk suatu jaringan. Terdapat beberapa konfigurasi antenna *array*, seperti *linear*, *planar*, dan *circular*. Konfigurasi *planar* memiliki kelebihan dalam mengatur dan mengendalikan arah pola radiasi. Contoh konfigurasi *planar* yang umum digunakan adalah 1×1 , 1×2 , 2×2 , dan 2×4 . Dengan menggunakan antenna mikrostrip yang disusun secara *planar*, diharapkan dapat memperoleh karakteristik saluran pencatuan, *gain*, dan pola radiasi yang diinginkan. Pada perancangan *array*, penting untuk memperhatikan jarak antara elemen-elemen *patch* antenna. Jarak antar elemen dalam antenna mikrostrip *array* dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.21.

$$d = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f} \dots\dots\dots(2.21)$$

Keterangan:

d = Jarak antar *patch* (m)

λ = Panjang gelombang (m)

f = frekuensi (GHz)

c = Kecepatan cahaya (m)

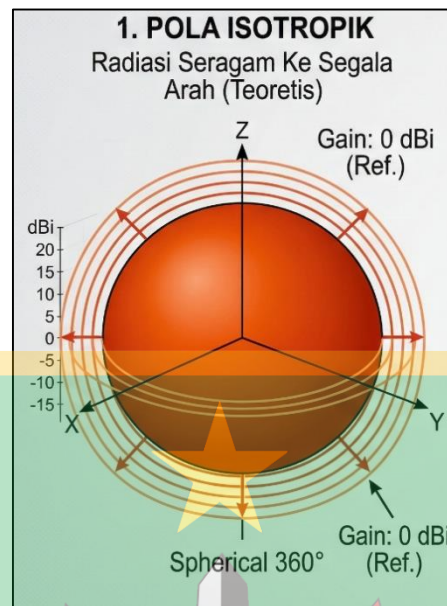
2.9 Pola Radiasi

Pola radiasi antenna dapat diinterpretasikan sebagai fungsi matematika atau representasi grafis dari radiasi antenna sebagai fungsi koordinat dalam ruang. Berikut adalah beberapa jenis pola radiasi:

a. Pola *Isotropik*

Antena *isotropik* merujuk pada arah pancaran antenna ke segala arah dengan energi yang sama dalam seluruh bidang. Pola radiasi antenna isotropik dalam tiga dimensi memiliki

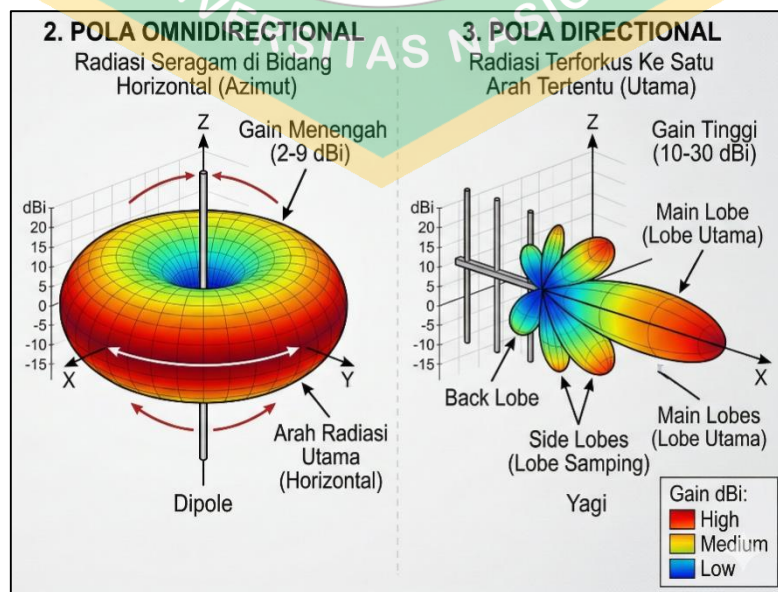
bentuk seperti bola. Antena isotropik merupakan sebuah antena hipotetis yang diasumsikan tidak memiliki kerugian dan memiliki radiasi yang sama kuat ke setiap arah.



Gambar 2.5 Pola isotropik [24]

b. Pola *Directional*

Antena *directional* mengacu pada antena yang memiliki pola radiasi atau penerimaan yang lebih efektif pada arah tertentu. Salah satu contoh antena *directional* adalah antena dengan pola *omnidirectional*. Antena *omnidirectional* memiliki pola radiasi yang menggambarkan bentuk seperti donat dengan pusat yang berimpit. Secara umum, antena *omnidirectional* memiliki pola radiasi 360 derajat jika dilihat dari bidang medan magnetiknya. Gambar 2.6 secara umum menunjukkan bentuk pola pancaran yang dihasilkan oleh antena *omnidirectional* dan *directional*.



Gambar 2.6 Pola *directional* dan *omnidirectional* [24]

c. Pola Radiasi Lobe (*cuping*)

Bagian-bagian dari pola radiasi diperlihatkan sebagai lobus-lobus yang dapat diidentifikasi sebagai *main* (utama), *side* (samping), dan *back* (belakang).

2.10 Polarisasi

Polarisasi antenna mengacu pada orientasi perambatan gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh suatu antenna, dengan mengambil arah elemen antenna terhadap permukaan bumi sebagai referensi. Ketika arahnya tidak ditentukan, polarisasi biasanya merujuk pada polarisasi dengan *gain* maksimum. Orientasi dan arah medan listrik relatif terhadap permukaan bumi atau tanah akan menentukan polarisasi gelombang. Polarisasi dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu linier, sirkular, dan eliptikal.

2.11 Analisis Perancangan Antena

Analisis antenna merupakan tahapan penting dalam perancangan sistem komunikasi nirkabel. Analisis ini bertujuan untuk memastikan bahwa antenna yang dirancang mampu mentransfer daya secara efisien dari sumber ke ruang bebas, memancarkan energi ke arah yang diinginkan, serta bekerja optimal pada rentang frekuensi yang ditargetkan. Oleh karena itu, analisis antenna dilakukan secara menyeluruh dengan mengkaji parameter pencocokan impedansi, karakteristik frekuensi, pola radiasi, *gain*, efisiensi, dan kinerja sistem.

2.11.1 Analisis Pencocokan Impedansi

Pencocokan impedansi menentukan seberapa besar daya dari sumber yang benar-benar masuk ke antenna. Impedansi masukan antenna dinyatakan sebagai bilangan kompleks:

$$Z_{in} = R + jX \dots\dots\dots (2.22)$$

di mana R merupakan komponen resistif yang berkaitan dengan daya yang diradiasikan, sedangkan X merupakan komponen reaktansi yang menunjukkan sifat induktif atau kapasitif antenna. Kondisi pencocokan ideal tercapai ketika impedansi antenna mendekati impedansi saluran transmisi, yaitu sekitar 50Ω .

Untuk menilai kualitas pencocokan impedansi digunakan koefisien refleksi:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \dots\dots\dots (2.22)$$

Nilai koefisien refleksi ini digunakan untuk menghitung Return Loss sebagai berikut:

$$RL = -20 \log_{10} |\Gamma| \text{ (dB)} \dots\dots\dots (2.23)$$

Selain Return Loss, parameter lain yang digunakan adalah Voltage Standing Wave Ratio (VSWR):

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \dots\dots\dots(2.24)$$

Nilai VSWR yang mendekati satu menunjukkan pencocokan impedansi yang semakin baik.

2.11.2 Analisis Frekuensi Resonansi dan Bandwidth

Frekuensi resonansi merupakan frekuensi di mana antenna bekerja paling optimal, yang ditandai dengan nilai Return Loss minimum atau nilai $|S_{11}|$ terendah. Pada kondisi ini, transfer daya dari sumber ke antenna berada pada kondisi terbaik.

Bandwidth antenna menunjukkan rentang frekuensi di mana antenna masih dapat bekerja dengan baik, yang umumnya ditentukan berdasarkan kriteria Return Loss ≤ -10 dB. Bandwidth antenna dinyatakan sebagai:

$$BW = f_{high} - f_{low} \dots\dots\dots(2.25)$$

Untuk mengetahui fleksibilitas antenna terhadap perubahan frekuensi, bandwidth juga dapat dinyatakan dalam bentuk persentase:

$$BW(\%) = \frac{f_{high}-f_{low}}{f_{center}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.26)$$

dengan:

$$f_{center} = \frac{f_{high}+f_{low}}{2} \dots\dots\dots(2.27)$$

2.11.3 Analisis Pola Radiasi

Pola radiasi menggambarkan distribusi energi elektromagnetik yang dipancarkan oleh antenna ke ruang bebas sebagai fungsi sudut. Analisis pola radiasi digunakan untuk mengetahui arah pancaran utama serta distribusi daya pada arah lain.

Secara matematis, intensitas radiasi dinyatakan sebagai:

$$U(\theta, \phi) = r^2 W_{rad} \dots\dots\dots(2.28)$$

Parameter penting dalam analisis ini adalah lobus utama, lobus samping, dan arah null. Tingkat lobus samping dinyatakan sebagai Side Lobe Level (SLL):

$$SLL = 10\log_{10} \left(\frac{P_{sidelobe}}{P_{main}} \right) \text{ (dB)} \dots\dots\dots(2.29)$$

2.11.4 Analisis Beamwidth

Beamwidth merupakan ukuran lebar sudut pancaran antenna. Parameter ini didefinisikan sebagai sudut antara dua titik di mana daya turun sebesar 3 dB dari nilai maksimum. Half Power Beamwidth (HPBW) dirumuskan sebagai:

$$HPBW = \theta_2 - \theta_1 \dots\dots\dots(2.30)$$

Beamwidth yang lebar cocok untuk aplikasi cakupan area luas, sedangkan beamwidth yang sempit cocok untuk sistem komunikasi terarah.

2.11.5 Analisis Directivity dan Gain

Directivity dan gain merupakan dua parameter penting yang digunakan untuk menilai kemampuan antenna dalam memancarkan energi elektromagnetik ke arah tertentu. Meskipun sering digunakan secara bersamaan, directivity dan gain memiliki makna fisik yang berbeda. Directivity menggambarkan tingkat pemusatan radiasi antenna tanpa mempertimbangkan rugi-rugi, sedangkan gain merupakan directivity yang telah memperhitungkan efisiensi antenna.

a. Directivity Antena

Directivity didefinisikan sebagai perbandingan antara intensitas radiasi maksimum yang dihasilkan antenna terhadap intensitas radiasi rata-rata jika daya yang sama dipancarkan secara isotropik. Secara matematis, directivity dirumuskan sebagai:

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{avg}} \dots\dots\dots(2.31)$$

dengan:

$$U_{avg} = \frac{P_{rad}}{4\pi} \dots\dots\dots(2.32)$$

Sehingga nilai directivity maksimum dapat dituliskan sebagai:

$$D_{max} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \dots\dots\dots(2.33)$$

di mana:

U_{max} adalah intensitas radiasi maksimum (W/sr),

P_{rad} adalah total daya yang diradiasikan antenna (W).

Nilai directivity bersifat tak berdimensi dan sering dinyatakan dalam satuan desibel isotropik (dBi), yaitu:

$$D_{dBi} = 10\log_{10}(D_{max}) \dots\dots\dots(2.34)$$

Nilai directivity yang tinggi menunjukkan bahwa antenna mampu memusatkan energi radiasi secara efektif ke arah tertentu.

b. Gain Antena

Gain antena menunjukkan kemampuan antena dalam memancarkan daya ke arah tertentu dengan memperhitungkan seluruh rugi-rugi yang terjadi, baik akibat rugi konduktor, rugi dielektrik, maupun rugi pencocokan impedansi. Oleh karena itu, gain merupakan parameter yang lebih realistis dalam menggambarkan performa antena dibandingkan directivity.

Hubungan antara gain dan directivity dirumuskan sebagai:

$$G(\theta, \phi) = \eta \cdot D(\theta, \phi) \dots \dots \dots (2.35)$$

dengan:

η adalah efisiensi total antena.

Efisiensi total antena dapat dituliskan sebagai:

$$\eta = \eta_{\text{rad}} \cdot \eta_{\text{mismatch}} \dots \dots \dots (2.36)$$

di mana:

η_{rad} adalah efisiensi radiasi,

$\eta_{\text{mismatch}} = 1 - |\Gamma|^2$ adalah efisiensi akibat pencocokan impedansi.

Dengan demikian, gain maksimum antena dapat dinyatakan sebagai:

$$G_{\text{max}} = \eta \cdot D_{\text{max}} \dots \dots \dots (2.37)$$

Dalam satuan dBi, gain antena dituliskan sebagai:

$$G_{\text{dBi}} = 10 \log_{10}(G_{\text{max}}) \dots \dots \dots (2.38)$$

atau dapat pula dinyatakan sebagai:

$$G_{\text{dBi}} = D_{\text{dBi}} + 10 \log_{10}(\eta) \dots \dots \dots (2.39)$$

c. Hubungan Directivity, Gain, dan Efisiensi

Hubungan antara directivity, gain, dan efisiensi menunjukkan bahwa nilai gain selalu lebih kecil atau sama dengan nilai directivity. Jika efisiensi antena mendekati 100%, maka nilai gain akan mendekati nilai directivity. Sebaliknya, semakin besar rugi-rugi yang terjadi pada antena, maka perbedaan antara gain dan directivity akan semakin besar.

Secara ringkas, hubungan tersebut dapat dituliskan sebagai:

$$G \leq D \dots \dots \dots (2.40)$$

Directivity yang tinggi menunjukkan bahwa antena memiliki kemampuan memfokuskan radiasi ke arah tertentu, namun tidak menjamin bahwa daya yang dipancarkan besar jika efisiensi antena rendah. Gain memberikan gambaran yang lebih nyata mengenai performa antena dalam sistem komunikasi, karena memperhitungkan seluruh rugi-rugi yang terjadi. Oleh karena itu, dalam aplikasi sistem komunikasi nyata, parameter gain lebih sering digunakan sebagai acuan utama.

Directivity menggambarkan kemampuan pemusatan radiasi antenna tanpa mempertimbangkan rugi-rugi, sedangkan gain merupakan parameter yang telah memperhitungkan efisiensi antenna. Keduanya saling berkaitan dan digunakan secara bersama-sama untuk menilai kinerja antenna dalam sistem komunikasi nirkabel.

2.11.6 Analisis Efisiensi Antena

Efisiensi antenna menunjukkan perbandingan antara daya yang benar-benar diradiasikan dengan daya yang diterima antenna. Efisiensi radiasi dirumuskan sebagai:

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{accepted}} \dots\dots\dots(2.41)$$

Sedangkan efisiensi total yang mempertimbangkan rugi akibat mismatch impedansi dinyatakan sebagai:

$$\eta_{total} = \eta_{rad}(1 - |\Gamma|^2) \dots\dots\dots(2.42)$$

2.11.7 Analisis Polarisasi

Polarisasi antenna berkaitan dengan orientasi medan listrik gelombang elektromagnetik yang dipancarkan. Ketidaksesuaian polarisasi antara antenna pemancar dan penerima dapat menyebabkan rugi daya yang signifikan.

Tingkat polarisasi silang dinyatakan sebagai:

$$X_{pol} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{cross}}{P_{co}} \right) \dots\dots\dots(2.43)$$

Untuk antenna dengan polarisasi sirkular, kualitas polarisasi dinilai menggunakan axial ratio:

$$AR = \frac{E_{major}}{E_{minor}} \dots\dots\dots(2.44)$$

dan dalam satuan dB:

$$AR_{dB} = 20 \log_{10}(AR) \dots\dots\dots(2.45)$$

2.11.8 Analisis Distribusi Arus Permukaan

Distribusi arus permukaan digunakan untuk memahami mekanisme radiasi antenna secara fisik. Secara teoritis, arus permukaan dinyatakan sebagai:

$$J_s = \hat{n} \times H \dots\dots\dots(2.46)$$

Analisis ini membantu mengidentifikasi bagian antenna yang aktif dalam proses radiasi dan menjadi dasar optimasi desain.

2.11.9 Analisis Sistem Antena

Sebagai pelengkap, analisis antena juga dapat dilakukan dalam konteks sistem komunikasi secara keseluruhan. Salah satu parameter yang digunakan adalah Effective Isotropic Radiated Power (EIRP):

$$EIRP = P_{tx} + G_{antenna} - L_{kabel} \dots\dots\dots(2.47)$$

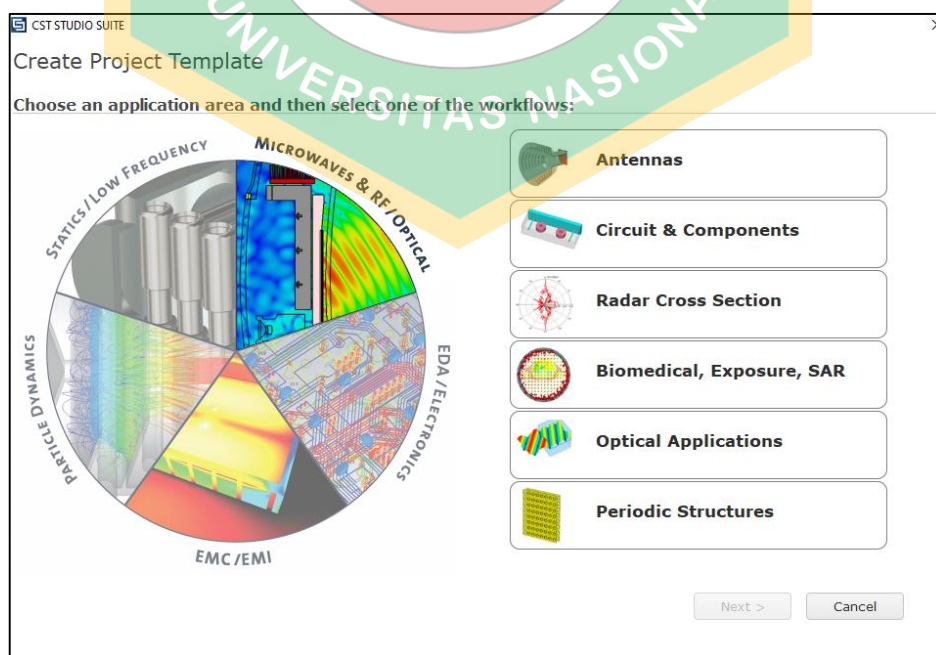
Selain itu, daya terima pada sisi penerima dapat diperkirakan melalui perhitungan link budget:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_p - L_{misc} \dots\dots\dots(2.48)$$

Melalui analisis perancangan antena yang mencakup pencocokan impedansi, karakteristik frekuensi, pola radiasi, gain, efisiensi, dan kinerja sistem, mahasiswa diharapkan mampu memahami hubungan antara teori antena dan hasil simulasi maupun pengukuran secara komprehensif.

2.12 CST Studio Suite 2024

CST Studio Suite 2024 adalah perangkat lunak simulasi yang mudah digunakan yang memungkinkan pengguna untuk merancang berbagai jenis antena atau perangkat lain yang beroperasi pada berbagai frekuensi. Dengan CST, pengguna dapat dengan mudah menganalisis parameter antena, menghitung fasa, directivity, dan mempelajari antena tunggal atau *array* dalam tiga dimensi dengan menggunakan sistem koordinat polar dan kartesian. Gambar 2.7 menampilkan tampilan antarmuka CST Studio Suite.



Gambar 2.7 Tampilan project CST Studio Suite 2024 [Data Pribadi]