

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi komunikasi dan sistem penginderaan jarak jauh semakin pesat, khususnya dalam bidang radar cuaca yang memiliki peran penting untuk memantau kondisi atmosfer. Radar cuaca bekerja dengan memancarkan gelombang elektromagnetik ke udara dan menerima pantulan dari tetesan hujan, salju, maupun partikel lainnya untuk menganalisis pola pergerakan awan dan intensitas cuaca.

Dalam sistem radar cuaca, antena merupakan komponen utama yang menentukan efisiensi transmisi dan kualitas penerimaan sinyal. Salah satu jenis antena yang banyak digunakan adalah antena mikrostrip, karena memiliki ukuran yang kompak, ringan, mudah difabrikasi, serta dapat diintegrasikan dengan perangkat elektronik lainnya. Namun demikian, antena mikrostrip memiliki kelemahan berupa *bandwidth* sempit dan *gain* yang rendah, sehingga performanya masih perlu ditingkatkan agar dapat digunakan secara optimal pada sistem radar cuaca yang menuntut ketelitian dan efisiensi tinggi (Madiawati et al., 2022).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk meningkatkan kinerja antena mikrostrip. Salah satunya adalah penerapan Defected Ground Structure (DGS), yaitu teknik modifikasi pada bidang *ground* dengan menambahkan *slot* tertentu untuk mengubah distribusi arus permukaan. Teknik ini terbukti dapat memperbaiki pencocokan impedansi, menurunkan *return loss*, memperlebar *bandwidth*, serta meningkatkan *gain* tanpa memperbesar ukuran fisik (Sandi et al., 2022).

Selain DGS, konfigurasi array juga sering digunakan untuk memperkuat daya pancar dan mengarahkan pola radiasi antena. Struktur array 2x1 memungkinkan dua elemen antena disusun sejajar dan bekerja secara bersamaan, sehingga menghasilkan peningkatan *gain* serta efisiensi radiasi yang lebih baik dibandingkan antena tunggal. Antena mikrostrip array 2x1 dengan penerapan DGS mampu meningkatkan *gain* hingga lebih dari 6 dBi serta memperlebar *bandwidth* tanpa memperbesar dimensi substrat secara signifikan (Madiawati et al., 2022).

Antena mikrostrip yang dioperasikan pada pita C-Band sekitar 5,8 GHz semakin mendapat perhatian karena karakteristiknya yang stabil dan efisiensi tinggi. Dalam pengembangan radar cuaca, seringkali melibatkan antena seperti antena mikrostrip untuk memfokuskan dan menerima gelombang radio dari objek atmosfer pada jangkauan geografis yang luas. Operasi ini umumnya menggunakan frekuensi C-Band yang berkisar 4-8 GHz, sebagaimana diterapkan pada radar yang dioperasikan oleh Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) pada rentang 5600-5800 MHz (Wardoyo, 2017).

Pada penelitian ini, frekuensi 5,8 GHz dipilih sebagai frekuensi kerja karena berada pada batas atas rentang operasional radar BMKG. Pemilihan ini didasarkan pada pendekatan batas atas antena dirancang untuk tetap bekerja optimal pada kondisi propagasi yang lebih menantang. Secara fisik, fenomena *rain attenuation* yang melibatkan proses *absorption* oleh partikel hujan cenderung meningkat seiring dengan peningkatan frekuensi. Oleh karena itu, frekuensi yang lebih rendah secara teoritis memiliki *attenuation* yang lebih kecil dibandingkan 5,8 GHz. Dengan demikian, kinerja yang lebih baik dapat diindikasikan bahwa antena yang lebih rendah dapat beroperasi stabil pada rentang frekuensi yang lebih rendah (Maruddani et al., 2014).

Salah satu kelemahan antena, khususnya besaran *gain* dan pola radiasinya, merupakan faktor yang mempengaruhi akurasi sinyal daya yang diterima dalam sistem radar cuaca. Daya yang diterima ini selanjutnya menjadi dasar dalam estimasi intensitas hujan melalui



implementasi persamaan radar cuaca (Emadian & Ghobadi, 2024).

Gunesser et al. (2024) mendesain sebuah antenna mikrostrip berbentuk E-shape pada substrat FR-4 dengan ketebalan 1,6 mm dan teknik pencatutan mikrostrip *line* 50 Ω , di mana hasil pengukuran menunjukkan *return loss* -23,68 dB dan VSWR 1,14 pada frekuensi sekitar 5,75 GHz menandakan pencocokan impedansi yang sangat baik dan performa radiasi yang optimal. Temuan tersebut menunjukkan bahwa frekuensi 5,8 GHz mempunyai potensi yang kuat untuk dikembangkan ke aplikasi sistem atmosfer atau radar cuaca karena efisiensi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis antenna mikrostrip C-Band 5,8 GHz berbasis DGS dengan konfigurasi array 2x1 yang digunakan untuk sistem radar cuaca jarak menengah. Selain itu, parameter antenna yang telah dikarakterisasi akan digunakan sebagai masukan dalam pemodelan simulasi untuk menganalisis dan memprediksi hubungan antara daya *echo* diterima dengan intensitas hujan berdasarkan persamaan radar cuaca. Melalui penelitian ini diharapkan dapat dihasilkan antenna yang efisien, berperforma tinggi, dan mudah diaplikasikan pada sistem radar cuaca portabel, serta menjadi referensi bagi pengembangan antenna mikrostrip di bidang radar dan telekomunikasi di masa mendatang.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang antenna mikrostrip C-Band dengan frekuensi kerja 5,8 GHz berbasis struktur DGS?
2. Bagaimana pengaruh penerapan struktur DGS terhadap karakteristik antenna, khususnya terhadap nilai *gain* dan pola radiasi?
3. Bagaimana hasil pengukuran antenna yang telah direalisasikan dibandingkan dengan hasil simulasi yang diperoleh?
4. Bagaimana pengaruh kinerja antenna terhadap kemampuan sistem radar cuaca dalam mendeteksi intensitas hujan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan merealisasikan antenna mikrostrip C-Band 5,8 GHz berbasis struktur DGS.
2. Menganalisis pengaruh struktur DGS terhadap peningkatan *gain* dan karakteristik antenna.
3. Membandingkan hasil simulasi dan pengukuran untuk mengetahui tingkat kesesuaian kinerja antenna yang dirancang.
4. Menganalisis pengaruh kinerja antenna terhadap kemampuan sistem radar cuaca dalam mendeteksi intensitas hujan sebagai dasar kelayakan aplikasinya.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:



Penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan pemahaman dan nulis dalam proses perancangan, simulasi, dan analisis performa, khususnya antenna berbasis Defected Ground Structure (DGS) C-band 5,8 GHz. Selain itu, penelitian ini juga menjadi sarana di elektromagnetik dalam pengembangan sistem antenna untuk rca.

2. Bagi Mahasiswa dan Masyarakat: Penelitian ini dapat menjadi referensi dan sumber wawasan baru bagi mahasiswa serta masyarakat yang tertarik dalam bidang telekomunikasi, terutama mengenai desain dan optimasi antenna mikrostrip berbasis DGS. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk pengembangan lebih lanjut dalam teknologi radar cuaca dan sistem komunikasi nirkabel di masa depan.
3. Bagi Institusi: Penelitian ini dapat mendukung pengembangan riset di bidang antenna, propagasi gelombang, serta sistem radar di lingkungan akademik. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan berkontribusi dalam peningkatan kualitas penelitian dan inovasi di bidang teknik elektro, khususnya pada pengembangan sistem radar berbasis antenna mikrostrip.

1.5 Batasan Masalah

1. Penelitian ini difokuskan pada perancangan antenna mikrostrip yang bekerja pada frekuensi C-Band sebesar 5,8 GHz.
2. Antena yang digunakan adalah antenna mikrostrip patch konfigurasi array dengan penerapan teknik Defected Ground Structure (DGS) untuk meningkatkan performa *gain* dan efisiensi radiasi.
3. Bahan substrat yang digunakan adalah FR-4 dengan konstanta dielektrik (ϵ_r) sebesar 4,4, ketebalan 1,6 mm, dan nilai *loss tangent* 0,02.
4. Penelitian ini mencakup tahap perancangan, simulasi, dan pembuatan fisik (realisasi) antenna mikrostrip berdasarkan hasil desain yang telah dioptimasi melalui simulasi CST.
5. Pengujian dilakukan menggunakan Vector Network Analyzer (VNA) dan anechoic chamber untuk memperoleh nilai return loss, bandwidth, VSWR, pola radiasi dan gain aktual.
6. Pemodelan simulasi kinerja radar cuaca dilakukan di MATLAB menggunakan parameter antenna hasil pengukuran, untuk memperoleh hubungan daya echo diterima dengan intensitas hujan.

1.6 Landasan Teori

1.6.1 Antena

Antena adalah komponen penting pada sistem pemancar dan penerima yang berfungsi mengubah sinyal listrik menjadi gelombang elektromagnetik untuk dipancarkan ke udara, serta sebaliknya, menerima gelombang elektromagnetik dan mengubahnya kembali menjadi sinyal listrik (Rahimi, 2024).

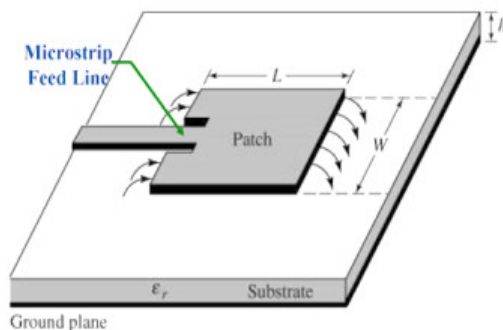
Antena adalah perangkat penting dalam sistem komunikasi nirkabel yang berfungsi sebagai transduser, mengubah sinyal listrik menjadi gelombang elektromagnetik dan sebaliknya. Menurut Balanis (2016), antena adalah struktur yang memungkinkan transisi antara gelombang terpandu dan gelombang bebas, sehingga memungkinkan transmisi atau penerimaan energi elektromagnetik.

Dalam konteks komunikasi modern, antena tidak hanya berfungsi sebagai pemancar dan penerima sinyal, tetapi juga memainkan peran penting dalam kualitas transmisi data. Desain dan karakteristik antena mempengaruhi kinerja sistem komunikasi, termasuk dalam hal jangkauan, keandalan sinyal. Pada penelitian Pant dan Malviya (2023) pengembangan antena yang dapat memenuhi kebutuhan berikutnya, seperti 5G dan 6G, yang memerlukan antena dengan kemampuan adaptasi yang lebih baik.



1.6.2 Antena Mikrostrip

Menurut *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas*, antena diartikan sebagai sarana untuk memancarkan atau menerima gelombang radio. Antena mikrostrip mempunyai karakteristik profil rendah yang dapat disesuaikan dengan permukaan planar dan non-planar, sederhana dan sangat berguna dalam berbagai hal seperti resonansi frekuensi, pola polarisasi dan impedansi. Kelebihan dari antena mikrostrip adalah bersifat *low profile* jika dibandingkan dengan antena *full-sized*, harga yang relatif murah karena menggunakan material yang mudah digunakan dan biaya fabrikasi rendah serta mudah dibentuk menjadi elemen array. Sedangkan kekurangannya adalah mempunyai *gain* yang rendah dan *bandwidth* (Madiawati et al., 2022)



Gambar 1 Struktur Antena Mikrostrip
(Yahia et al., 2011)

1. Elemen peradiasi (*Patch*)

Patch atau elemen peradiasi terbuat dari bahan konduktor dan letaknya berada paling atas antena atau diatas suatu substrat antena. Kegunaan dari *patch* adalah memancarkan gelombang elektromagnetik dengan saluran pencatu yang terletak diatas substrat. Jenis logam yang biasa digunakan dalam pembuatan antena mikrostrip adalah logam jenis tembaga (Auli Nurrahman,2024).

2. Substrat

Substrat merupakan bagian dari antena yang berfungsi sebagai media penyalur gelombang elektromagnetik dari pencatu. Karakteristik substrat sangat mempengaruhi parameter-parameter antena. Tebal dari substrat dapat mempengaruhi *bandwidth* dari antena mikrostrip, dengan menambah ketebalan substrat maka konstanta dielektriknya semakin kecil sehingga dapat memperlebar *bandwidth*. Substrat terbuat dari bahan bahan dielektrik yang memiliki tinggi (*h*) antara 0,002 — 0,005.

3. *Groundplane*

Groundplane merupakan lapisan yang paling bawah dari antena mikrostrip, yang menutupi seluruh lapisan yang berada di atasnya. Lapisan ini berfungsi sebagai bidang *reflector* sempurna, yang mengembalikan kembali energi melalui substrat menuju udara bebas. Memiliki ukuran sepanjang dan selebar substrat.

Menurut penelitian yang dilakukan Auli Nurrahman (2024), untuk menghitung panjang dari *groundplane* maupun substrat, digunakan persamaan berikut :

$$L_g = 6h + L_p \quad (1)$$

Untuk menghitung lebar *groundplane* maupun substrat menggunakan

$$W_g = 6h + W_p \quad (2)$$



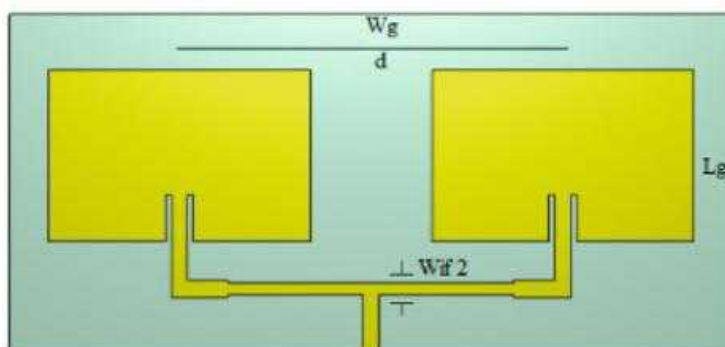
L_p = Panjang *patch*;
 h = Ketebalan substrat

W_g = Lebar *groundplane*

1.6.3 Antena Mikrostrip Array

Antena mikrostrip array adalah susunan beberapa elemen antena mikrostrip yang bekerja secara kolektif untuk menghasilkan karakteristik radiasi yang diinginkan. Antena array adalah rakitan elemen antena yang diumpangkan dengan cara tertentu untuk mendapatkan karakteristik radiasi yang diinginkan. Dengan menyesuaikan jarak dan fase relatif setiap elemen, array dapat mengontrol arah lobus utama, menekan lobus samping, dan meningkatkan penguatan keseluruhan. Artinya, jarak antar elemen (*spacing*) dan perbedaan fasa antar elemen sangat penting untuk memperoleh *gain* yang tinggi serta pola radiasi yang terarah (Fang, 2010).

Selain itu, elemen patch mikrostrip dapat disusun dalam konfigurasi linear, planar, atau circular, sesuai dengan kebutuhan aplikasi, seperti radar cuaca atau sistem komunikasi (Fang, 2010).



Gambar 2 Antena Mikrostrip Array
 (Santoso et al., 2023)

Pada Gambar 2 merupakan Antena mikrostrip array memiliki keunggulan dibandingkan antena tunggal karena mampu meningkatkan gain tanpa menambah ukuran fisik secara signifikan. Konfigurasi array, seperti 2x1 atau 2x2, banyak digunakan pada sistem komunikasi C-Band maupun radar cuaca karena dapat memperluas *bandwidth* dan meningkatkan *directivity*. Penelitian oleh Madiawati, Simanjuntak, Sulaeman, dan Hibban (2022) menunjukkan bahwa penerapan teknik Defected Ground Structure (DGS) pada antena array dapat meningkatkan kinerja radiasi, memperbaiki pencocokan impedansi, dan meminimalkan rugi-rugi gelombang, sehingga antena lebih efisien dan cocok untuk aplikasi radar yang membutuhkan daya pancar tinggi dan pola radiasi terarah.

1.6.4 Radar Cuaca

Radar cuaca merupakan alat pengamatan berbasis penginderaan jauh yang dapat mengetahui kondisi partikel yang ada di atmosfer untuk memantau kondisi cuaca, memberikan prakiraan harian, serta peringatan dini. Selain itu, radar cuaca sekitar bandara dengan menyediakan data cuaca akurat secara masuk prakiraan curah hujan jangka pendek. Radar awalnya keperluan militer pada masa Perang Dunia II dan bekerja dengan agnetik untuk mendeteksi objek (Manalu et al., 2024).



, radar cuaca umumnya beroperasi pada pita frekuensi C-band an pita frekuensi disesuaikan dengan kebutuhan jangkauan, anan terhadap atenuasi hujan. Salah satu frekuensi yang umum r cuaca C-Band adalah 5,8 GHz, yang sering dijadikan frekuensi

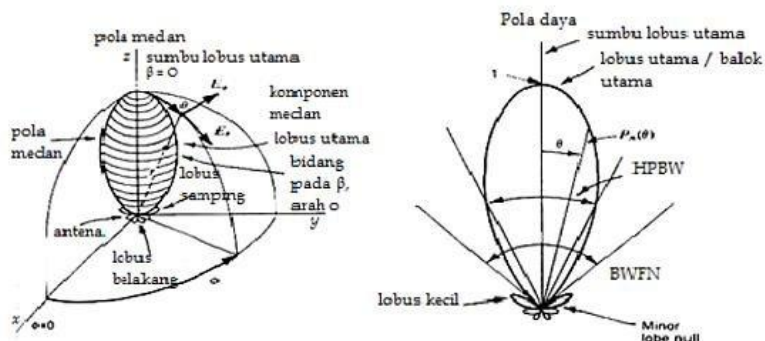
referensi dalam perancangan sistem radar dan antenna mikrostrip. Jenis antenna yang paling umum digunakan adalah Antenna C-Band yang mampu menghasilkan *narrow beam* dan *gain* tinggi, sehingga efektif dalam mendeteksi pola hujan (Oh et al., 2020).

1.6.5 Parameter Kinerja Antena

Parameter kinerja antenna merupakan faktor penting dalam menentukan efektivitas antenna dalam menerima dan memancarkan sinyal. Parameter-parameter tersebut meliputi pola radiasi, *bandwidth*, VSWR, direktivitas, *gain*, dan *return loss*.

1. Pola Radiasi Antena

Pola radiasi antenna atau pola antenna didefinisikan sebagai fungsi matematis atau representasi grafis dari sifat-sifat radiasi antenna sebagai fungsi dari koordinat ruang. Dalam kebanyakan kasus, pola radiasi ditentukan di wilayah medan jauh dan direpresentasikan sebagai fungsi dari koordinat arah. Dengan demikian, pengukuran pola radiasi biasanya dilakukan di wilayah medan jauh (*far-field*) dan divisualisasikan berdasarkan koordinat arah untuk menilai performa antenna dalam memancarkan gelombang elektromagnetik (Balanis, 2016).

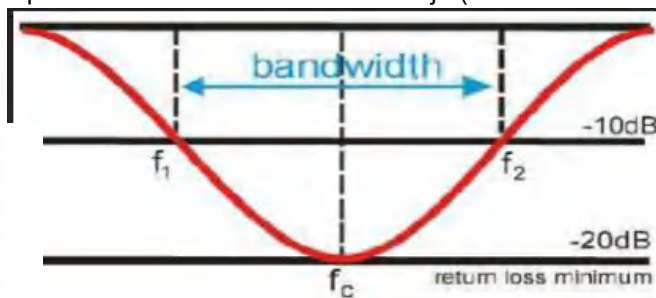


Gambar 3 Struktur Pola Radiasi
(Balanis, 2016)

2. Bandwidth

Bandwidth antenna merupakan rentang frekuensi di mana antenna dapat bekerja dengan performa yang optimal, termasuk pencocokan impedansi yang baik dan nilai *return loss* yang memenuhi standar. Semakin lebar bandwidth, semakin fleksibel antenna dalam mendukung berbagai aplikasi komunikasi nirkabel (Balanis, 2016).

Pada Gambar 4 merupakan Nilai *bandwidth* dapat diketahui apabila frekuensi bawah (*lower frequency*) dan frekuensi atas (*upper frequency*) dari antenna tersebut diketahui. Frekuensi bawah merupakan nilai awal dari frekuensi kerja antenna, sedangkan frekuensi atas merupakan nilai akhir dari frekuensi kerja (Mukminin & Nurhayati, 2020).



Gambar 4 Spesifikasi Bandwidth
(Balanis, 2016)



Rumus yang digunakan untuk menentukan *bandwidth* dalam persen adalah sebagai berikut:

$$BW(\%) = \left(\frac{F_2 - F_1}{F_c} \right) \times 100\% \quad (3)$$

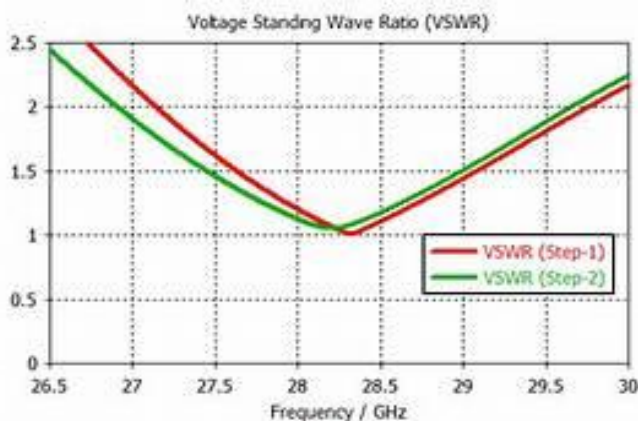
f_1 = Frekuensi Terendah

f_2 = Frekuensi Tertinggi

f_c = Frekuensi Tengah

Bandwidth yang disebutkan di atas sering kali diukur sebagai *bandwidth* fraksional untuk antenna *narrowband*, sedangkan untuk antenna *broadband*, *bandwidth* biasanya digambarkan dengan rasio antara frekuensi batas atas dan batas bawahnya.

3. Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)



Gambar 5 Tampilan Grafik VSWR
(Paul et al., 2021)

Menurut *Indonesian Journal of Electronics Engineering* (Vol. 4 No. 2, 2021), VSWR merupakan ukuran kesesuaian impedansi antara saluran transmisi dan antenna. Parameter ini menunjukkan seberapa efisien daya dari pemancar dapat ditransfer ke antenna tanpa dipantulkan kembali ke sumber.

Pada Gambar 5 merupakan Nilai ideal VSWR adalah 1, yang menunjukkan bahwa impedansi antara antenna dan saluran transmisi sepenuhnya cocok sehingga tidak terjadi pantulan daya. Dalam praktiknya, nilai $VSWR \leq 2$ masih dianggap baik karena pantulan daya yang terjadi relatif kecil dan efisiensi antenna tetap tinggi. Semakin kecil nilai VSWR, semakin besar nilai *return loss* (lebih negatif), yang menandakan pencocokan impedansi antenna semakin baik. Oleh karena itu, pengukuran VSWR menjadi parameter penting dalam menentukan seberapa optimal antenna mentransmisikan daya pada frekuensi kerjanya (Balanis, 2016).

4. Direktivitas dan *Gain*

Direktivitas adalah ukuran seberapa fokus antenna memancarkan energi ke arah tertentu dibandingkan dengan antenna isotropik yang memancarkan secara merata ke segala arah. Semakin tinggi nilai direktivitas, semakin sempit dan terarah pola radiasi antenna. Direktivitas penting dalam aplikasi di mana sinyal perlu diarahkan ke arah tertentu untuk efisiensi transmisi yang lebih baik.



Antenna menggabungkan direktivitas dengan efisiensi radiasi untuk menunjukkan seberapa efektif antenna memancarkan atau menerima energi. Direktivitas dibandingkan dengan antenna referensi. Nilai *gain* yang tinggi menunjukkan bahwa antenna dapat memfokuskan energi lebih baik ke arah yang diinginkan. Direktivitas dan *gain* adalah parameter yang penting dalam komunikasi jarak jauh dan aplikasi radar.

Dalam penelitian oleh Munziah et al. (2024), analisis pola radiasi dan *gain* pada antenna Cassegrain menunjukkan bahwa desain antenna yang tepat dapat meningkatkan performa sistem komunikasi, terutama pada frekuensi C-Band. Penelitian ini menekankan pentingnya optimasi desain antenna untuk mencapai direktivitas dan *gain* yang optimal dalam aplikasi praktis.

5. Return Loss

Return Loss (RL) menunjukkan seberapa besar daya dipantulkan kembali akibat ketidakcocokan impedansi antara antenna dan saluran transmisi.



Gambar 6 Alur Kerja Return Loss
(Närhi, 2022)

Gambar 6 merupakan Semakin besar nilai RL (dalam dB), semakin kecil daya yang dipantulkan, yang berarti pencocokan impedansi semakin baik.

$$RL = -20\log_{10}|\Gamma| \quad (4)$$

di mana:

RL = Return Loss

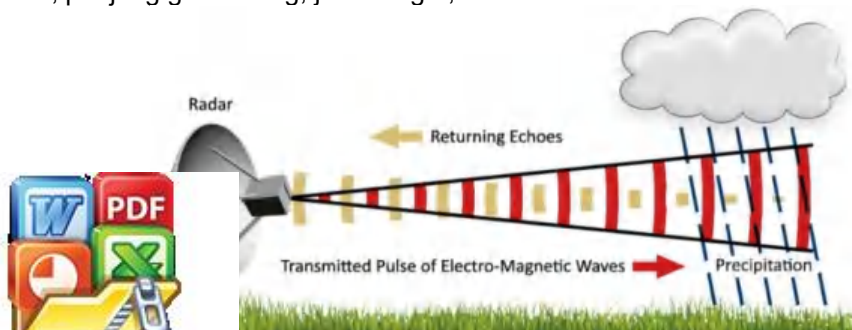
Γ = Koefisien Refleksi

1.6.6 Parameter Kinerja Radar

Kinerja radar cuaca ditentukan oleh sejumlah parameter yang menggambarkan kemampuan sistem dalam mendeteksi, mengukur, dan menginterpretasikan fenomena atmosfer, khususnya presipitasi. Parameter-parameter ini menjadi dasar dalam perancangan dan evaluasi sistem radar agar mampu beroperasi secara andal pada berbagai kondisi lingkungan. Parameter utama yang umum digunakan meliputi daya terima (*received power*), rasio sinyal terhadap derau (*Signal-to-Noise Ratio* atau SNR), ambang batas deteksi minimum (*Minimum Detectable Signal* atau MDS), margin deteksi, serta reflektivitas hujan.

1. Daya Terima

Daya terima merupakan besaran daya sinyal yang diterima kembali oleh antenna radar setelah gelombang elektromagnetik dipancarkan dan dipantulkan oleh target. Dalam konteks radar cuaca, target yang dimaksud adalah partikel hujan yang berada di atmosfer. Besarnya daya terima dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti daya pancar radar, panjang gelombang, jarak target, serta karakteristik hamburan dari partikel hujan.

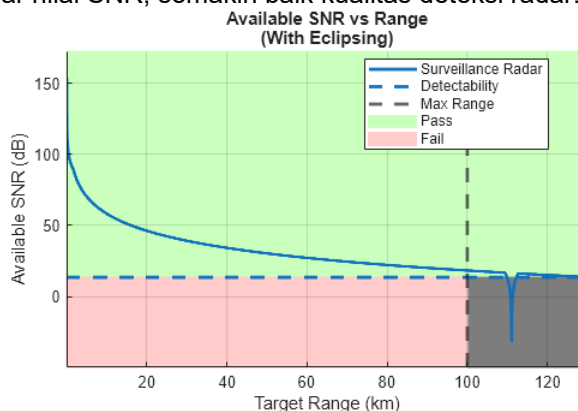


Gambar 7 Alur Kerja Daya Diterima
(Skolnik, 2008)

Secara umum, daya terima akan menurun seiring bertambahnya jarak antara radar dan target. Hal ini disebabkan oleh penyebaran energi gelombang di ruang bebas dan atenuasi propagasi. Oleh karena itu, daya terima menjadi parameter penting untuk menentukan batas jangkauan efektif radar dalam mendeteksi fenomena cuaca. Untuk menentukan apakah sinyal masih dapat dideteksi, nilai daya terima dibandingkan dengan ambang batas sensitivitas sistem, yaitu Minimum Detectable Signal (MDS). Jika daya terima berada di atas MDS, maka sistem dianggap masih mampu mendeteksi target hujan secara layak (Zhang et al., 2023).

2. Signal-to-Noise Ratio (SNR)

Signal-to-Noise Ratio (SNR) merupakan perbandingan antara daya sinyal yang diterima dengan daya derau (noise) pada sistem penerima. Parameter ini menunjukkan seberapa jelas sinyal target dapat dibedakan dari gangguan noise. Pada gambar 8 dapat dilihat semakin besar nilai SNR, semakin baik kualitas deteksi radar.



Gambar 8 Tampilan Grafik SNR (Mathworks)

Dalam sistem radar cuaca, nilai SNR menjadi parameter penting karena sinyal pantulan dari partikel hujan umumnya sangat lemah. Jika nilai SNR berada di bawah batas minimum (biasanya 0 dB), maka sinyal tidak dapat dibedakan dari noise, sehingga informasi cuaca yang diperoleh menjadi tidak akurat. Oleh sebab itu, SNR digunakan sebagai indikator kualitas deteksi pada variasi jarak dan intensitas hujan (Keränen & Chandrasekar, 2014).

3. Margin Deteksi

Margin deteksi merupakan selisih antara daya terima dengan ambang batas deteksi minimum sistem (MDS). Parameter ini menunjukkan seberapa besar cadangan sinyal di atas noise floor. Margin yang positif menandakan bahwa sistem masih mampu mendeteksi target dengan andal, sedangkan margin negatif menunjukkan bahwa sinyal sudah berada di bawah batas kelayakan.

$$\text{Margin} = P_r - \text{MDS} \quad (5)$$

Dimana:

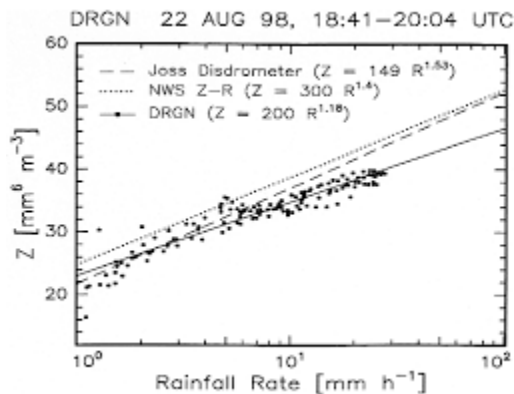
P_r = Daya Terima

MDS = Minimum Detectable Signal



isi penting dalam perancangan radar cuaca karena memberikan keandalan sistem terhadap variasi kondisi lingkungan, seperti hujan dan jarak target (Sulaiman & Elias, 2013)

in perancangan merupakan ukuran kemampuan partikel hujan dalam menangkap energi elektromagnetik radar. Parameter ini dinyatakan dalam satuan dB dan berkaitan dengan ukuran serta jumlah tetesan hujan di atmosfer.



Gambar 9 Hubungan Z-R
(Barszcz & Kaznowska, 2025)

Reflektivitas yang tinggi menunjukkan intensitas hujan yang lebih besar, sedangkan reflektivitas rendah menunjukkan hujan ringan atau presipitasi dengan jumlah partikel yang lebih sedikit. Dalam radar cuaca, reflektivitas menjadi parameter utama yang digunakan untuk mengestimasi intensitas hujan dan mengklasifikasikan jenis presipitasi. Hubungan antara reflektivitas (Z) dan intensitas hujan (R) sering dimodelkan menggunakan hubungan empiris, seperti model Marshall–Palmer, yang banyak digunakan dalam analisis radar meteorologi (Dhiram & Wang, 2016).

1.6.7 Pemilihan Material

Pemilihan material pada penelitian ini dilakukan secara cermat untuk memastikan kinerja antena mikrostrip sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan pada sistem radar cuaca di frekuensi C-band 5,8 GHz. Material antena harus memiliki karakteristik mekanik dan elektromagnetik yang stabil agar dapat mendukung performa antena dalam kondisi lingkungan yang dinamis.

Material substrat yang digunakan adalah FR-4. Substrat ini dipilih karena mudah didapat, memiliki kekuatan mekanik tinggi, stabil terhadap perubahan suhu, serta biaya yang relatif rendah. Dari sisi elektromagnetik, FR-4 memiliki permitivitas relatif (ϵ_r) sekitar 4,4 dan *loss tangent* sekitar 0,02, sehingga masih sesuai digunakan untuk aplikasi pada frekuensi 5,8 GHz. Nilai permitivitas tersebut memungkinkan dimensi antena menjadi lebih kompak sekaligus mendukung kestabilan resonansi pada frekuensi kerja yang diinginkan.

Untuk material konduktor, digunakan lapisan tembaga (*copper*) dengan ketebalan sekitar 35 μm pada sisi atas dan bawah substrat. Tembaga dipilih karena memiliki konduktivitas listrik tinggi, sehingga dapat meminimalkan rugi-rugi daya dan menjaga efisiensi radiasi antena, terutama saat energi elektromagnetik dipantulkan dan diterima dalam sistem radar.

Selain itu, pada penelitian ini diterapkan struktur Defected Ground Structure (DGS) pada bidang *ground* dengan pola tertentu. Penerapan DGS berfungsi untuk memodifikasi arus permukaan dan memperbaiki karakteristik impedansi, sehingga meningkatkan *gain* dan *bandwidth* antena pada frekuensi 5,8 GHz. Kombinasi antara pemilihan material, penerapan teknik DGS diharapkan mampu menghasilkan antena dengan performa optimal, efisiensi tinggi, serta mendukung kebutuhan sistem deteksi dan memantau kondisi atmosfer secara akurat.

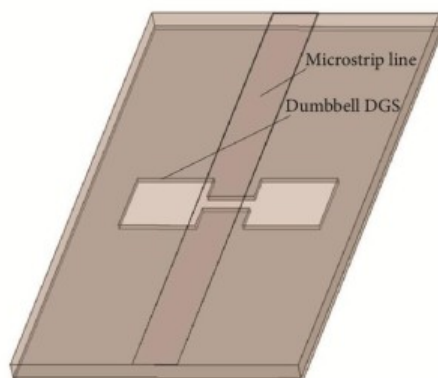


Defected Ground Structure (DGS)

Defected Ground Structure (DGS) merupakan salah satu teknik modifikasi pada bidang mikrostrip dengan cara memberikan celah, *slot*, atau pola tertentu pada bidang ini bertujuan untuk mengubah karakteristik arus permukaan

(*surface current distribution*) sehingga memengaruhi parameter antenna seperti impedansi, *bandwidth*, dan *gain* (Fadillah et al., 2024)

Dibandingkan teknik optimasi lain seperti Electromagnetic Band Gap (EBG), modifikasi bentuk patch (E-shaped), atau Dielectric Resonator Antenna (DRA), Defected Ground Structure (DGS) menawarkan keunggulan berupa struktur yang lebih sederhana, kebutuhan area tambahan yang minimal, serta kemudahan integrasi pada antenna mikrostrip. Teknik DGS dipilih karena, dibandingkan teknik optimasi lain yang memerlukan perubahan pada struktur patch atau penambahan elemen resonan baru, DGS memungkinkan evaluasi pengaruh optimasi dengan menjaga parameter utama antenna tetap sama.



Gambar 10 Defected Ground Structure (DGS)
(Khandelwal et al., 2017)

Pada penelitian ini, DGS diterapkan pada bagian *ground plane* antenna mikrostrip yang bekerja pada frekuensi 5,8 GHz (C-Band). Struktur DGS yang digunakan berbentuk slot persegi panjang dengan dimensi tertentu yang ditempatkan secara simetris di bawah jalur pencatu antenna. Pola *slot* tersebut berfungsi untuk mengganggu arus permukaan konvensional pada *ground*, sehingga meningkatkan lintasan arus efektif (*current path*) dan memperbaiki resonansi antenna.

Dengan adanya DGS, impedansi antenna menjadi lebih sesuai (*better matching*), *return loss* dapat ditekan, serta *gain* dan *bandwidth* meningkat tanpa harus memperbesar ukuran fisik antenna. Hal ini menjadikan DGS sebagai salah satu teknik yang efektif untuk optimasi performa antenna terutama pada aplikasi C-Band radar cuaca, yang membutuhkan antenna dengan efisiensi tinggi dan pola radiasi yang terarah.

Dari hasil berbagai penelitian terkini, penggunaan DGS terbukti mampu meningkatkan performa antenna secara signifikan. Misalnya, menurut Pote, Khedkar, & Sahare (2024) dalam jurnal *Defected Ground Structure Based Microstrip Patch Antenna for WLAN and WiMAX Applications*, penerapan DGS dapat meningkatkan *gain* hingga 2 dB serta memperbaiki *return loss* dari -15 dB menjadi -27 dB pada frekuensi 5 GHz. Penelitian lain oleh Gunesser et al. (2024) dalam MDPI *Mathematics* juga menunjukkan bahwa modifikasi *ground* pada antenna 5,8 GHz mampu memperluas *bandwidth* hingga 20% dan meningkatkan efisiensi radiasi sebesar 15%.



Optimized using
trial version
www.balesio.com

Sistem Radar Cuaca dan Peran Antena



Gambar 11 Blok Diagram Radar Cuaca

Radar cuaca bekerja dengan memancarkan gelombang radio ke atmosfer untuk mendeteksi dan mengukur curah hujan. Berbeda dengan radar pelacak objek, radar cuaca berinteraksi dengan jutaan butir air yang tersebar di udara. Pemancar mengirimkan pulsa energi pada frekuensi 5,8 GHz melalui antena. Ketika pulsa mengenai butiran hujan, sebagian kecil energinya dipantulkan kembali sebagai sinyal gema. Kekuatan sinyal yang kembali inilah yang digunakan untuk menghitung tingkat reflektivitas dan kemudian dikonversi menjadi intensitas hujan menggunakan model empiris seperti Marshall–Palmer. Antena memiliki peran sangat penting dalam proses ini:

1. Saat memancar, antena memfokuskan daya menjadi berkas yang terarah menuju area hujan.
2. Saat menerima, antena menangkap sinyal gema yang sangat lemah dari butiran air.

Sinyal pantulan yang diterima akan mengalami pelemahan seiring bertambahnya jarak, sehingga daya terima menjadi parameter penting dalam menentukan kemampuan deteksi radar. Daya terima ini dibandingkan dengan daya noise sistem untuk memperoleh nilai *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), yang menunjukkan kualitas sinyal. Selain itu, sistem radar memiliki batas sensitivitas minimum yang disebut *Minimum Detectable Signal* (MDS). Selisih antara daya terima dan MDS dikenal sebagai margin deteksi, yang digunakan untuk menilai kelayakan sistem dalam mendeteksi hujan.

Antena berperan penting dalam seluruh proses tersebut. Saat memancar, antena memfokuskan energi menjadi berkas yang terarah, sedangkan saat menerima, antena menangkap sinyal gema yang sangat lemah. Karakteristik antena, terutama gain, sangat memengaruhi besarnya daya terima, nilai SNR, serta margin deteksi. Dengan demikian, antena merupakan komponen kunci yang menentukan sensitivitas, jangkauan, dan keandalan sistem radar cuaca.

1.6.10 Simulasi Pengujian Antena dengan Perangkat Lunak

1.6.10.1 Pemanfaatan CST Studio Suite untuk Simulasi Antena

CST Studio Suite merupakan perangkat lunak berbasis metode numerik yang banyak digunakan dalam proses desain dan analisis antena mikrostrip. Perangkat lunak ini menggunakan pendekatan Finite Integration Technique (FIT) yang memungkinkan simulasi elektromagnetik tiga dimensi secara akurat. Melalui CST, berbagai parameter penting antena dapat dianalisis secara komprehensif, seperti *return loss* (S_{11}), pola radiasi, *gain*, *bandwidth*, VSWR, serta distribusi medan listrik dan arus permukaan pada struktur antena.

Pada penelitian ini, CST Studio Suite dimanfaatkan untuk mensimulasikan dan mengoptimasi antena mikrostrip C-Band 5,8 GHz berbasis DGS. Proses simulasi dilakukan untuk memperoleh hasil karakteristik antena yang sesuai dengan spesifikasi sistem radar cuaca, yaitu antena dengan *gain* tinggi, impedansi yang sesuai (50Ω), dan nilai *return loss* di bawah -10 dB. Tahapan simulasi meliputi pembuatan model geometri antena, penentuan material substrat dan konduktor, penerapan struktur DGS pada bidang *ground*, serta pengaturan kondisi batas (*boundary conditions*) dan *port* eksitasi.

Penelitian oleh Guneser et al. (2024) menunjukkan bahwa penggunaan CST Studio Suite dalam menganalisis antena mikrostrip 5,8 GHz dengan berbagai variasi struktur penerapan teknik DGS untuk peningkatan *gain* dan efisiensi radiasi yang dilakukan menggunakan CST juga menunjukkan kesesuaian hasil numerik dan hasil pengukuran setelah fabrikasi, sehingga sangat direkomendasikan dalam pengembangan antena frekuensi



dalam penelitian ini. Melalui simulasi ini, performa antenna dapat dievaluasi dan dioptimalkan sebelum proses fabrikasi dilakukan, sehingga mengurangi kesalahan desain dan meningkatkan efisiensi pengembangan antenna mikrostrip C-Band untuk sistem radar cuaca.

1.6.10.2 Pemanfaatan MATLAB untuk Simulasi Radar Cuaca

MATLAB dimanfaatkan sebagai alat komputasi untuk melakukan pemodelan matematis dan evaluasi teoritis terhadap kinerja sistem radar cuaca. Berbeda dengan CST Studio Suite yang digunakan untuk memperoleh karakteristik fisik antenna, MATLAB berfungsi untuk menganalisis bagaimana parameter antenna tersebut memengaruhi performa sistem radar secara keseluruhan ketika diaplikasikan pada kondisi atmosfer nyata.

Dalam radar cuaca, target yang dideteksi bukan berupa objek tunggal, melainkan partikel hujan yang tersebar di atmosfer. Oleh karena itu, MATLAB digunakan untuk mengimplementasikan persamaan radar untuk target tersebar serta model empiris Marshall–Palmer yang menghubungkan intensitas hujan dengan nilai reflektivitas. Hubungan ini memungkinkan parameter meteorologis direpresentasikan dalam bentuk besaran elektromagnetik yang dapat dianalisis secara kuantitatif.

Melalui simulasi ini, dilakukan perhitungan daya sinyal yang diterima oleh sistem radar pada berbagai kondisi jarak dan intensitas hujan. Selain itu, tingkat derau sistem juga dihitung untuk menentukan batas minimum sinyal yang masih dapat dideteksi. Selisih antara daya terima dan batas deteksi tersebut digunakan sebagai indikator margin sistem, yang mencerminkan tingkat keandalan radar dalam mendeteksi gema hujan.

Secara teoritis, sistem radar cuaca yang layak harus mampu menghasilkan daya terima yang cukup tinggi dibandingkan tingkat derau, memiliki margin yang positif, serta menunjukkan respons yang konsisten terhadap perubahan jarak dan intensitas hujan. Respons yang stabil ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya bekerja pada kondisi tertentu, tetapi juga tetap andal pada berbagai skenario atmosfer.

Dengan demikian, MATLAB berperan sebagai alat validasi konseptual untuk menilai apakah konfigurasi antenna dan parameter sistem yang digunakan telah memenuhi kriteria dasar radar cuaca, yaitu sensitivitas yang memadai, jangkauan yang realistis, serta margin deteksi yang cukup untuk menjamin keandalan sistem.

Simulasi MATLAB ini secara efektif berfungsi sebagai alat analisis sensitivitas, menunjukkan bagaimana perubahan pada Intensitas Hujan (R) akan menghasilkan perubahan daya sinyal yang terdeteksi (P_r) oleh antenna rancangan, sehingga memberikan bukti teoritis yang diperlukan mengenai kesesuaian antenna untuk aplikasi radar cuaca.

1.6.11 Penelitian Terdahulu

Penelitian oleh Rusdiyanto et al. (2025) menunjukkan bahwa penerapan teknik *Defected Ground Structure* (DGS) pada antenna mikrostrip C-Band dapat meningkatkan performa antenna secara signifikan, khususnya pada parameter *gain* dan *bandwidth*. Melalui variasi bentuk *slot* pada bidang *ground* serta penambahan elemen parasitik seri, hasil penelitian tersebut mencatat peningkatan *gain* hingga sekitar 8,6 dBi, dengan pola radiasi yang lebih terarah dan efisien. Temuan ini memperkuat bahwa penggunaan DGS merupakan pendekatan yang efektif untuk antenna C-Band pada sistem yang membutuhkan daya



aplikasi radar cuaca berfrekuensi 5,8 GHz.

Assan dan Khudair (2024) dalam penelitian *Design and Analysis of Microstrip Antenna with Defected Ground for Weather Radar* penerapan DGS khusus untuk sistem radar cuaca. Hasil simulasi menunjukkan peningkatan *gain* sebesar 9,1 dB dan penurunan nilai *bandwidth* pada frekuensi 5,8 GHz. Hal ini membuktikan bahwa teknik DGS dapat meningkatkan efisiensi antenna pada sistem radar cuaca yang beroperasi pada frekuensi tinggi dengan ukuran yang tetap kompak.

Sementara itu, Guneser et al. (2024) melalui karya berjudul *Efficient 5,8 GHz Microstrip Antennas for Intelligent Transportation Systems: Design, Fabrication and Performance Analysis* berhasil merancang antenna mikrostrip berbentuk E-shaped dengan substrat FR-4 yang bekerja pada frekuensi 5,8 GHz. Hasil pengujian menunjukkan nilai *return loss* mencapai $-23,68$ dB dengan efisiensi radiasi tinggi, yang membuktikan bahwa frekuensi 5,8 GHz memiliki potensi besar untuk digunakan pada sistem komunikasi dan radar karena mampu memberikan performa radiasi yang baik serta bentuk antenna yang kompak.

Rusdiyanto et al. (2025) dalam penelitian *The Design of Microstrip Antenna Using DGS and Series Parasitic Methods for C-Band Applications in Satellite Communications* menerapkan teknik Defected Ground Structure (DGS) untuk meningkatkan *gain* dan memperluas *bandwidth* antenna. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan DGS pada bidang *ground* mampu memperbaiki karakteristik radiasi antenna, meningkatkan efisiensi, serta menurunkan nilai *return loss* secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa teknik DGS sangat efektif untuk optimasi performa antenna mikrostrip, khususnya dalam aplikasi C-Band yang memerlukan tingkat *gain* tinggi dan kestabilan sinyal yang baik.

Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa performa antenna mikrostrip dipengaruhi oleh faktor desain *patch*, pemilihan substrat, serta teknik modifikasi *ground* seperti DGS. Namun, sebagian besar penelitian masih difokuskan pada aplikasi komunikasi umum seperti sistem transportasi atau satelit. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki keunikan tersendiri karena berfokus pada rancang bangun antenna mikrostrip C-Band 5,8 GHz berbasis DGS yang digunakan untuk sistem radar cuaca, dengan tujuan untuk meningkatkan *gain* dan efisiensi radiasi antenna agar memberikan hasil deteksi cuaca yang lebih akurat dan stabil



BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus hingga Desember 2025 di Laboratorium Telekomunikasi, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Makassar. Kegiatan pengujian karakteristik antenna meliputi pengukuran *return loss*, *VSWR*, *bandwidth*, *gain*, dan pola radiasi menggunakan perangkat Vector Network Analyzer (VNA) dan ruang anechoic chamber untuk memastikan hasil yang akurat dan minim gangguan eksternal. Perancangan dan optimasi antenna dilakukan menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite 2025, sebelum dilanjutkan ke tahap fabrikasi dan pengujian performa. Selanjutnya, nilai *gain* aktual hasil pengukuran digunakan dalam pemodelan simulasi di MATLAB untuk memprediksi hubungan antara daya echo diterima (P_r) dan intensitas hujan (R) pada sistem radar cuaca. Keseluruhan rangkaian kegiatan penelitian dijadwalkan selesai dan disusun dalam bentuk laporan akhir pada Desember 2025.

2.2 Spesifikasi Antena

Penentuan spesifikasi antenna bertujuan untuk menetapkan parameter standar yang harus dipenuhi agar antenna yang dirancang dapat berfungsi secara optimal sesuai dengan kebutuhan sistem radar cuaca. Antena yang akan dirancang merupakan antenna mikrostrip array 2x1 berbasis Defected Ground Structure (DGS) yang memiliki spesifikasi:

Frekuensi kerja : 5,8 GHz

Jenis Substrate : FR-4

Ketebalan Substrat (h): 1,6 mm

Tebal Konduktor/*patch*: 0,035 mm

Antena yang dirancang dalam penelitian ini diharapkan mampu memenuhi standar kinerja teknis agar dapat berfungsi secara optimal pada sistem radar cuaca. Spesifikasi tersebut ditetapkan berdasarkan kebutuhan aplikasi radar pada frekuensi C-Band 5,8 GHz, dengan mempertimbangkan efisiensi radiasi, stabilitas frekuensi, dan peningkatan gain melalui penerapan Defected Ground Structure (DGS). Adapun spesifikasi yang dimaksud adalah sebagai berikut:

Tabel 1 Spesifikasi Parameter Antena yang Diharapkan

Parameter	Parameter Yang Diharapkan
Frekuensi Kerja	5,8 GHz
VSWR	≤ 2
Return Loss	≤ -10 dB
Bandwidth	>100 MHz
Gain	> 6 dBi
Polaradiasi	Directional

(Balanis, 2016)

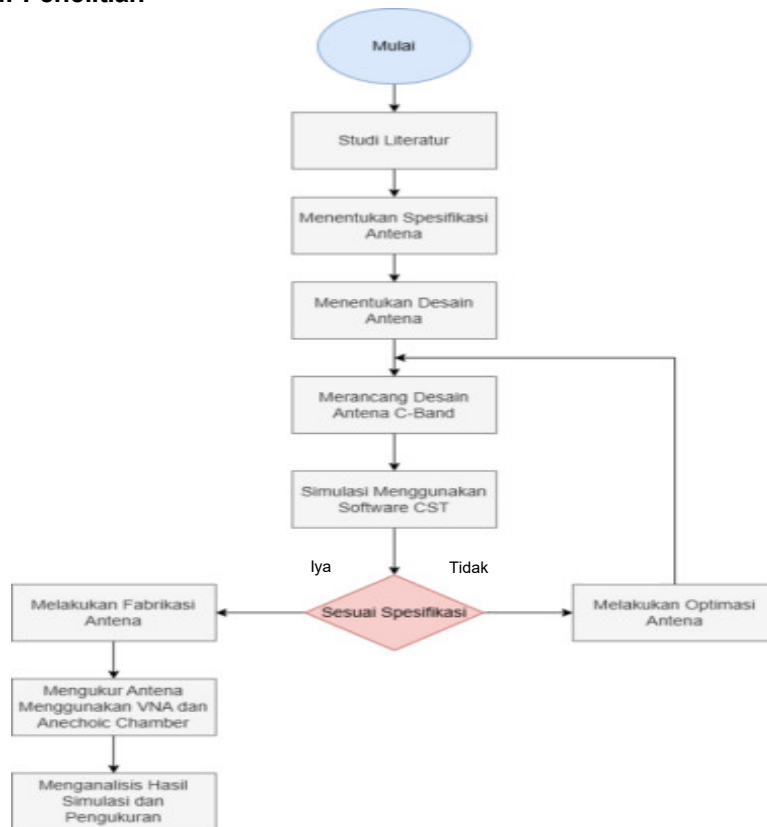


Penelitian

na mikrostrip dengan metode DGS Pada Frekuensi 5,8 GHz R-4 untuk sistem radar cuaca jarak menengah secara *real-time*. ifikasi alat yang digunakan untuk perancangan antenna mikrostrip erja 5,8 GHz.

1. Perangkat Keras
 - a. *Network Analyzer*, digunakan untuk pengukuran dari parameter antenna.
 - b. Anechoic Chamber, sebagai ruang untuk melakukan pengukuran antenna.
 - c. *Connector SMA 50 Ω*
 - d. Solder, untuk menghubungkan komponen pada antenna.
 - e. Antena mikrostrip
 - f. PCB (Printed Circuit Board)
 - g. Feri Klorida (FeCl_3) Pelarut PCB
2. Perangkat Lunak
 - a. CST Studio Suite 2025, perangkat lunak ini digunakan untuk merancang dan mensimulasikan antenna yang dibuat.
 - b. MATLAB, perangkat lunak ini digunakan untuk melakukan pemodelan komputasi dan analisis matematis kinerja sistem radar cuaca.

2.4 Alur Penelitian



Gambar 12 Diagram Alir Penelitian

Pada Gambar 12 merupakan diagram alir penelitian, diawali dengan studi literatur untuk memahami teori dasar antenna mikrostrip, karakteristik C-Band, serta metode peningkatan performa antenna seperti Defected Ground Structure (DGS) dan array 2x1. Setelah itu, dilakukan penentuan spesifikasi antenna yang meliputi frekuensi kerja 5,8 GHz, jenis substrat yang digunakan, serta parameter dimensi awal. Tahapan berikutnya adalah menghitung dimensi antenna berdasarkan teori perancangan mikrostrip, meliputi lebar *patch*, panjang *patch*, dan dimensi *ground plane*. Hasil perhitungan tersebut digunakan untuk merancang desain antenna C-Band menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite 2025, yang kemudian disimulasikan untuk memperoleh parameter performa seperti *return loss*, *VSWR*, *gain*, dan *bandwidth*. Jika hasil simulasi belum memenuhi standar spesifikasi yang diharapkan, maka dilakukan optimasi antenna hingga performanya sesuai dengan kriteria desain. Setelah desain memenuhi spesifikasi, dilakukan fabrikasi antenna sesuai hasil optimasi, kemudian antenna diuji menggunakan Vector Network Analyzer (VNA) untuk mengetahui karakteristik hasil pengukuran secara nyata. Kemudian parameter antenna dimasukkan ke MATLAB untuk pemodelan simulasi radar cuaca. Tahapan terakhir adalah menganalisis hasil simulasi dan hasil pengukuran, serta menarik kesimpulan terkait performa antenna mikrostrip array 2x1 yang telah dirancang dan difabrikasi.

2.5 Metode Pengumpulan Data

Secara umum, data yang digunakan dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu data primer dan data sekunder.

1. Data Primer

Data primer diperoleh secara langsung melalui proses perancangan, simulasi, fabrikasi, serta pengujian antenna mikrostrip C-Band 5,8 GHz berbasis Defected Ground Structure (DGS). Data ini menjadi dasar utama untuk menganalisis performa antenna pada aplikasi radar cuaca. Adapun jenis data primer meliputi:

- Data simulasi CST Studio Suite
- Data simulasi MATLAB
- Data fabrikasi antenna
- Data pengukuran antenna

2. Data Sekunder

Data sekunder diperoleh dari berbagai referensi yang mendukung landasan teori, proses perancangan, dan validasi hasil penelitian. Adapun data sekunder meliputi:

- Buku ajar dan literatur mengenai antenna mikrostrip, radar cuaca, teknik DGS, dan karakteristik antenna pada pita C-Band.

2.6. Metode Analisis Data

Metode analisis data pada penelitian ini dilakukan secara deskriptif kuantitatif melalui simulasi dan pengukuran terhadap antenna mikrostrip C-Band 5,8 GHz. Data yang diperoleh berupa parameter performa antenna, yaitu S_{11} , *Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)*, *gain*, *bandwidth*,



dan akan dengan membandingkan hasil simulasi menggunakan CST Studio Suite 2025 dengan hasil pengukuran eksperimental menggunakan Vector Network Analyzer (VNA). Perbandingan ini bertujuan untuk

mengetahui tingkat kesesuaian antara hasil simulasi dan hasil realisasi, serta mengidentifikasi deviasi yang mungkin terjadi selama proses fabrikasi. Selain itu, hasil simulasi dan pengujian juga dianalisis untuk menilai pengaruh penerapan Defected Ground Structure (DGS) terhadap peningkatan *gain* dan *bandwidth* antenna. Parameter performa antenna dievaluasi berdasarkan standar karakteristik antenna yang digunakan dalam sistem radar cuaca C-Band 5,8 GHz. Selain simulasi menggunakan CST Studio Suite 2025, penelitian ini juga melibatkan pemodelan radar cuaca berbasis MATLAB. Pada tahap ini, *output* parameter antenna hasil simulasi CST dimasukkan sebagai *input* ke dalam skenario pemodelan MATLAB untuk mensimulasikan karakteristik kerja radar cuaca.

Seluruh hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan proses interpretasi data, membandingkan performa antar model antenna, serta menilai efektivitas rancangan dalam meningkatkan kinerja antenna terhadap sistem radar cuaca.

2.7. Perhitungan Ukuran Dimensi Awal Antena Mikrostrip

Sebelum melakukan perancangan antenna, perhitungan dimensi awal antenna mikrostrip dilakukan sebagai langkah awal perancangan desain. Perhitungan ini dilakukan berdasarkan sejumlah persamaan matematis standar desain antenna mikrostrip untuk menentukan ukuran *patch*, *feedline*, serta *ground plane*.

a. Menghitung lebar *patch*

$$Wp = \frac{C}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 5,8 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{4,4 + 1}} = 15,73 \text{ mm} \quad (6)$$

b. Menghitung permitivitas efektif (ϵ_{eff})

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} (1 + 12 \frac{h}{w})^{-1/2} = \frac{4,4 + 1}{2} + \frac{4,4 - 1}{2} (1 + 12 \frac{1,6}{15,73})^{-1/2} = 3,84 \quad (7)$$

c. Menghitung perpanjangan panjang (ΔL)

$$\Delta L = 0,412 h \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) (\frac{W}{h} + 0,264)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) (\frac{W}{h} + 0,813)} \quad (8)$$

Dengan memasukkan nilai ϵ_{eff} pada persamaan 7, nilai W pada persamaan 6, dan nilai h pada spesifikasi maka didapatkan nilai perpanjangan panjang (ΔL) sebagai berikut:

$$\Delta L = 0,412 \times 1,6 \frac{(3,84 + 0,3) (\frac{15,73}{1,6} + 0,264)}{(3,84 - 0,258) (\frac{15,73}{1,6} + 0,813)} = 0,726 \text{ mm} \quad (9)$$



panjang *patch*

$$L = \frac{C}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (10)$$

masukkan nilai f_0 pada spesifikasi, nilai ϵ_{eff} pada persamaan 7 dan persamaan 9 maka didapatkan nilai sebagai berikut:

$$L = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 5,8 \times 10^9 \times \sqrt{3,84}} - 2(0,726 \times 10^{-3}) = 11,81 \text{ mm} \quad (11)$$

e. Jarak antar *patch*

$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{5,8 \times 10^9} = 51,7 \text{ mm} \quad (12)$$

$$d = 0,5 \times \lambda_0 = 25,8 \text{ mm} \quad (13)$$

f. Menghitung lebar substrat/ground

$$W = 2Wp + d \quad (14)$$

Dengan memasukkan nilai d pada persamaan 13, nilai Wp pada persamaan 6 maka didapatkan nilai sebagai berikut:

$$W = 2(15,73) + 25,8 = 57,2 \text{ mm} \quad (14)$$

g. Menghitung panjang substrat/ground

$$L = 2Lp + d \quad (15)$$

Dengan memasukkan nilai d pada persamaan 13, nilai Lp pada persamaan 10 maka didapatkan nilai sebagai berikut:

$$L = 2(11,81) + 25,8 = 49,4 \text{ mm} \quad (17)$$

h. Menghitung *feedline*

$$W_f = 2h = 3,2 \text{ mm} \quad (18)$$

$$L_f = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_{eff}}} = 5 \text{ mm} \quad (19)$$

Teknik pencatutan yang digunakan pada desain ini adalah Microstrip Line dengan konfigurasi T-Junction, di mana impedansi saluran bervariasi untuk memastikan distribusi daya yang optimal ke setiap elemen patch antenna. Dengan menggunakan software CST Studio Suite kita dapat mengetahui lebar impedansi yang digunakan, dan diketahui lebar jalur tersebut pada tabel dibawah ini:

Tabel 2 Nilai Impedansi

Posisi Jalur	Impedansi (Ω)	Lebar Jalur (mm)	Panjang Cabang (mm)
Feedline Utama	50	3,2	5
	70,7	2	10



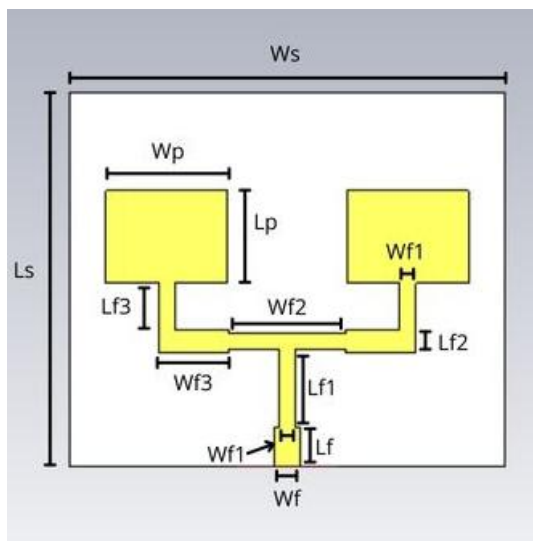
Ta Tabel 2 diperoleh melalui simulasi CST Studio Suite substrat FR-4 ($\epsilon_r = 4,4$). Meskipun diperoleh secara otomatis, nilai impedansi teoritis yang jelas. Jalur utama (*feedline*) menggunakan lebar 3,2 mm agar sesuai dengan standar konektor SMA dan menerima sinyal.

Pada T-Junction, impedansi berubah menjadi $70,7 \Omega$ dengan lebar 2 mm. Nilai ini didasarkan pada prinsip *quarter-wave transformer* untuk menghubungkan saluran 50Ω ke dua cabang elemen *patch* secara efisien, serta menjaga jarak antar pusat elemen sebesar 25,8 mm guna meminimalkan interferensi pada frekuensi 5,8 GHz. Adapun dimensi panjang dan lebar pada bagian saluran pencatu lainnya ditentukan melalui proses optimasi geometris guna menyesuaikan dengan tata letak komponen pada batas fisik substrat.

2.8. Perancangan Awal Antena Mikrostrip

Pemilihan substrat yang sesuai akan memengaruhi performa antena, seperti nilai *return loss*, *gain*, *bandwidth*, serta stabilitas pola radiasi. Pada penelitian ini digunakan substrat FR-4 lossy, karena material ini memiliki keunggulan berupa harga yang ekonomis, kemudahan dalam proses fabrikasi, serta ketersediaannya yang luas di pasaran.

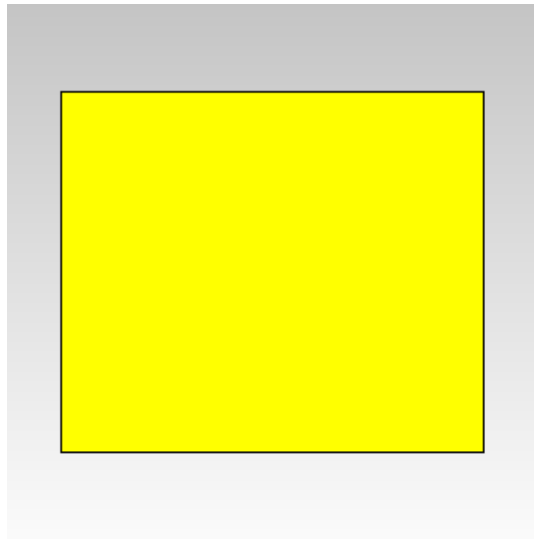
Pada tahap ini dilakukan proses perancangan awal antena mikrostrip yang bertujuan untuk memperoleh bentuk dasar dan karakteristik awal antena sebelum dilakukan proses optimasi. Desain antena dibuat menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite dengan frekuensi kerja 5,8 GHz pada pita C-Band, yang umum digunakan pada sistem radar cuaca.



Gambar 13 Tampilan Depan Antena Mikrostrip Sebelum Optimasi

Pada Gambar 13 merupakan tampilan depan dari perancangan sebelum optimasi antena mikrostrip array 2x1. Desain ini menampilkan dua elemen *patch* yang disusun sejajar secara linier dan dihubungkan oleh saluran utama dengan impedansi 50Ω . Desain ini dibuat menggunakan *io Suite 2025* untuk memudahkan proses simulasi parameter





Gambar 14 Tampilan Belakang Pada Antena Mikrostrip Sebelum Optimasi

Pada Gambar 14 merupakan tampilan belakang dari perancangan awal antena mikrostrip array 2×1 sebelum proses optimasi. Pada desain awal ini, bagian *ground plane* masih berbentuk penuh tanpa adanya pola yang dimodifikasi.

Tabel 3 Dimensi Antena Sebelum Optimasi

<i>Parameter List</i>	<i>Dimensi (mm)</i>
Lebar substrat (<i>ws</i>)	57,2
Panjang substrat (<i>ls</i>)	49,4
Lebar Ground (<i>wg</i>)	57,2
Panjang Ground (<i>lg</i>)	49,4
Lebar Patch (<i>wp</i>)	15,73
Panjang Patch (<i>lp</i>)	11,81
Tebal Tembaga (<i>t</i>)	0,035
Tebal Substrat (<i>h</i>)	1,6
Feedline (<i>lf</i>)	5
feed1 (<i>lf1</i>)	10
feed2 (<i>lf2</i>)	3
feed3 (<i>lf3</i>)	6

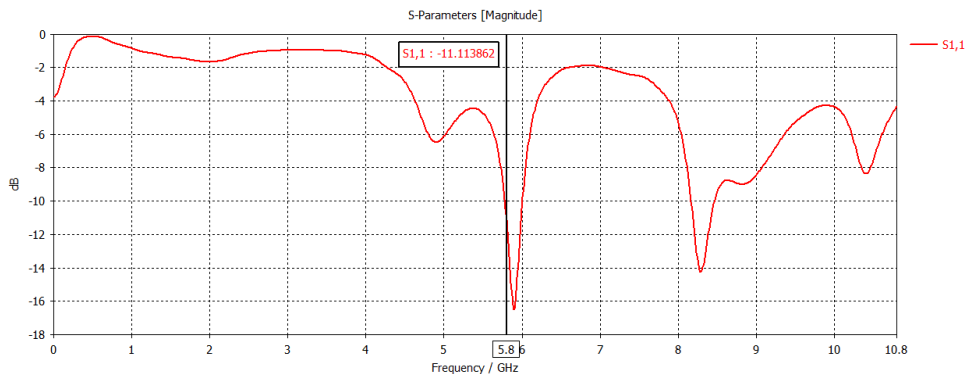


<i>Parameter List</i>	<i>Dimensi (mm)</i>
Lebar Feedline (wf)	3,2
Lebar feed1 (wf1)	2
Lebar feed2 (wf2)	15
Lebar feed3 (wf3)	9

Pada Tabel 3 merupakan hasil perancangan awal dimensi antenna mikrostrip array 2x1 sebelum dilakukan proses optimasi. Perancangan awal ini dilakukan berdasarkan perhitungan teoritis menggunakan rumus dasar antenna mikrostrip.

2.8.1 Hasil Simulasi Perancangan Awal Antena Mikrostrip

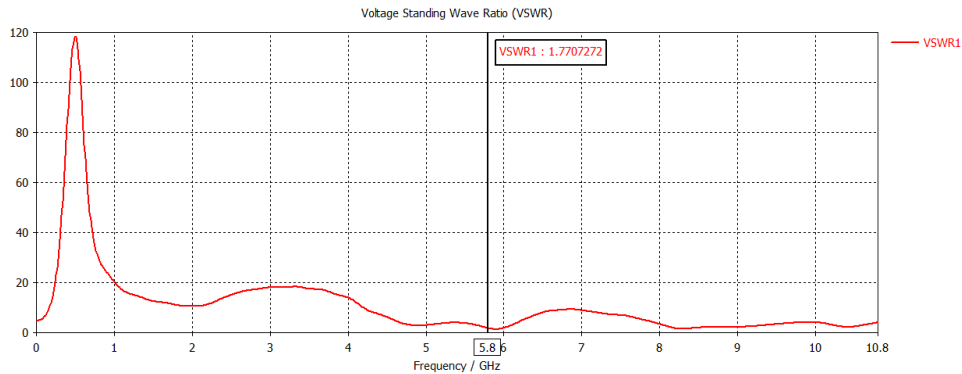
Simulasi antenna mikrostrip berdasarkan perhitungan secara teoritis menggunakan CST Studio Suite 2025 untuk mengevaluasi performa antenna pada frekuensi 5,8 GHz. Parameter yang dianalisis meliputi *return loss* (S11) untuk melihat pencocokan impedansi, VSWR untuk mengetahui efisiensi transfer daya, serta pola radiasi dan *gain* untuk menggambarkan arah dan kualitas pancaran sinyal. Hasil simulasi perancangan awal ini digunakan sebagai basis optimasi untuk mencapai kinerja antenna yang stabil dan presisi pada pita C-Band radar cuaca.



Gambar 15 Hasil Return Loss Sebelum Optimasi

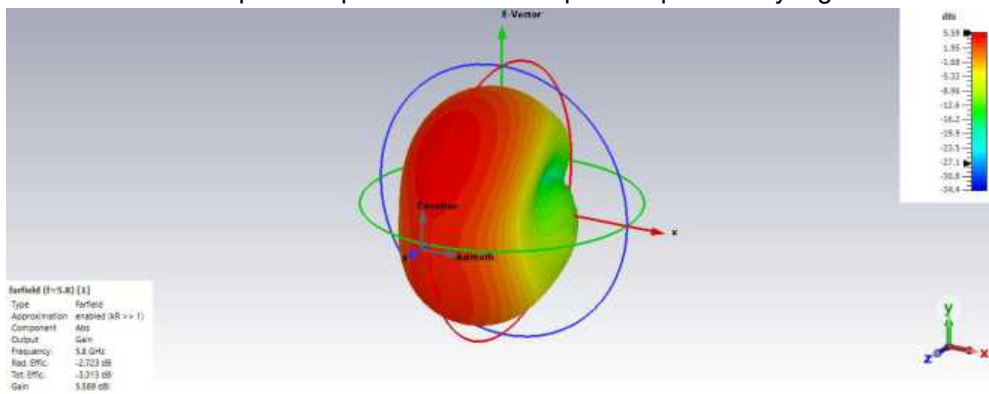
Pada Gambar 15 merupakan hasil *return loss* tahap awal sebelum dilakukan proses optimasi. pada perancangan antenna mikrostrip array 2x1. Hasil simulasi menunjukkan nilai *return loss* sebesar $-11,11$ dB pada frekuensi 5,8 GHz. Namun, frekuensi kerja tersebut belum tepat berada pada titik lembah kurva S11, melainkan sedikit bergeser dari frekuensi resonansi utama. Meskipun nilai ini telah memenuhi pencocokan impedansi antenna masih belum optimal, sehingga optimasi lebih lanjut pada dimensi patch dan feedline.





Gambar 16 Hasil VSWR Sebelum Optimasi

Pada Gambar 16 merupakan hasil VSWR tahap awal sebelum dilakukan optimasi pada perancangan antenna mikrostrip array 2x1. Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan pada grafik, diperoleh nilai VSWR sebesar 1,77 pada frekuensi 5,8 GHz. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar daya yang dikirimkan dari sumber telah berhasil dipancarkan oleh antenna, meskipun masih terdapat sebagian daya yang dipantulkan kembali. Hal ini menandakan bahwa desain antenna pada tahap awal sudah mendekati kondisi pencocokan impedansi yang optimal, namun masih memerlukan proses optimasi untuk memperoleh performa yang lebih baik.

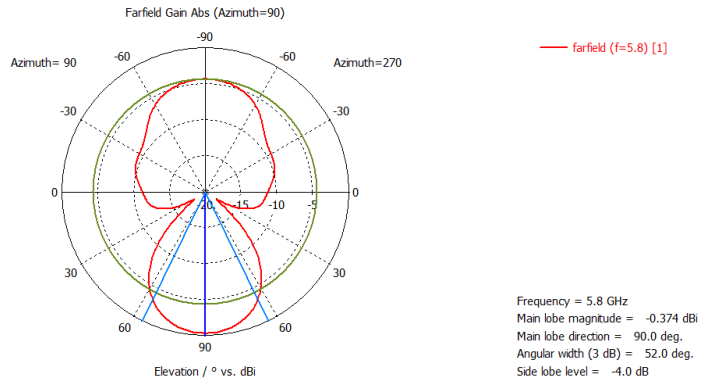


Gambar 17 Hasil Gain Sebelum Optimasi

Pada Gambar 17 merupakan hasil simulasi yang telah dilakukan, diperoleh bahwa nilai gain antenna mencapai 5,5 dBi, sedangkan spesifikasi yang ditetapkan adalah di atas 6 dBi. Hal ini menunjukkan bahwa antenna telah memiliki kemampuan radiasi yang cukup baik, namun masih sedikit di bawah target yang diinginkan.



n proses optimasi lebih lanjut untuk meningkatkan nilai gain agar ang diharapkan.



Gambar 18 Hasil Pola Radiasi Sebelum Optimasi

Pada Gambar 18 merupakan hasil pola radiasi antenna mikrostrip array 2x1 sebelum dilakukan optimasi. Berdasarkan hasil simulasi, pola radiasi yang dihasilkan menunjukkan karakteristik *directional*, namun dapat dilihat lobus utama masih cenderung lebar sehingga dibutuhkan proses optimasi.

2.9. Prosedur Simulasi Sistem Radar Cuaca

Penelitian ini menggunakan metode simulasi numerik berbasis MATLAB untuk memodelkan kinerja sistem radar cuaca secara teoritis. Simulasi dilakukan dengan mengacu pada persamaan radar untuk target tersebar, di mana hujan dimodelkan sebagai kumpulan partikel air yang tersebar secara acak di dalam volume resolusi radar dan berfungsi sebagai pemantul gelombang elektromagnetik. Tujuan utama simulasi ini adalah untuk menganalisis hubungan antara intensitas hujan dan daya echo yang diterima (P_r) serta mengevaluasi kelayakan sistem radar berdasarkan parameter kinerja utama.



Gambar 19 Diagram Alir Simulasi Sistem Radar

Pada gambar 19 merupakan tahapan simulasi sistem radar cuaca yang mengintegrasikan parameter radar, karakteristik antenna, dan pemodelan hujan untuk menghitung daya echo yang diterima.

2.9.1 Perancangan Sistem Radar Cuaca

1. Parameter Sistem Radar

Tahap awal simulasi adalah inisialisasi parameter sistem radar dan antenna yang digunakan sebagai konstanta dalam seluruh perhitungan. Parameter sistem radar yang digunakan dalam simulasi ini meliputi:



Tabel 4 Parameter Simulasi Sistem Radar

parameter	Nilai
Frekuensi Kerja (f_0)	$5,8 \times 10^9$
Kecepatan Cahaya (C)	3×10^8
Panjang gelombang (λ)	0,0517
Intensitas Elektrik Air $ K^2 $	0,93

Parameter	Nilai
Jarak Target (R)	300 m
Parameter Antena	Output CST
Daya Pancar (P_t)	25 KW
Lebar Pulsa (τ)	10×10^6

Parameter sistem radar yang digunakan dalam simulasi ini ditentukan untuk merepresentasikan kondisi operasional radar pada frekuensi 5,8 GHz serta karakteristik lingkungan pengamatan. Parameter-parameter tersebut berfungsi sebagai variabel masukan dalam perhitungan daya echo yang diterima oleh radar akibat hamburan gelombang elektromagnetik oleh partikel hujan.

2. Reflektivitas Hujan

Reflektivitas radar digunakan sebagai parameter antara untuk menghubungkan karakteristik hamburan gelombang elektromagnetik oleh tetesan hujan dengan besaran fisik yang lebih representatif, yaitu intensitas hujan (*rainfall rate*). Intensitas hujan dipilih sebagai variabel utama karena secara langsung menggambarkan kondisi curah hujan di lapangan.

Oleh karena itu, diperlukan suatu hubungan empiris yang mengaitkan antara reflektivitas radar (Z) dan intensitas hujan (R). Hubungan ini dikenal sebagai relasi ($Z - R$), salah satu yang paling umum digunakan adalah model Marshall–Palmer, yang dirumuskan sebagai:

$$Z = aR^b \quad (20)$$

Dimana:

Z = Reflektivitas radar (m^3)

R = Intensitas hujan (mm/jam)

a dan b = Konstanta empiris

Dalam penelitian ini, nilai intensitas hujan (R) divariasikan dari 0,1 mm/jam hingga 50 mm/jam untuk merepresentasikan berbagai kondisi hujan, mulai dari hujan sangat ringan hingga hujan lebat.

Tabel 5 Klasifikasi Intensitas Hujan

Intensitas Hujan (R)	Reflektivitas (dBZ)	Kategori Cuaca
< 0,5 mm/jam	< 15 dBZ	Berawan
0,5 – 2 mm/jam	15 – 25 dBZ	Hujan Ringan
2 – 10 mm/jam	25 – 35 dBZ	Hujan Sedang
10 – 50 mm/jam	35 – 50 dBZ	Hujan Lebat
> 50 mm/jam	> 50 dBZ	Hujan Sangat Lebat

(World Meteorological Organization)

Berdasarkan klasifikasi intensitas hujan pada Tabel 5, setiap kategori hujan memiliki nilai intensitas hujan (R) yang berbeda. Selanjutnya, nilai reflektivitas tersebut digunakan sebagai masukan dalam perhitungan daya echo yang diterima radar.

3. Parameter Kinerja Sistem Radar

Daya echo yang diterima oleh radar cuaca dimodelkan menggunakan

Probert-Jones untuk target tersebar (*distributed target*), yang uskan sebagai:

$$P_r = C_R \times \frac{Z}{R^2} \quad (21)$$

P_r = Daya diterima radar (W)

R = Jarak (mm/jam)



C_R = konstanta parameter radar

Z = Reflektivitas radar (m^3)

Untuk menentukan kemampuan sistem radar dalam membedakan sinyal dari derau, digunakan parameter *signal-to-noise ratio* (SNR). SNR didefinisikan sebagai perbandingan antara daya sinyal yang diterima dan daya derau sistem, yang dalam satuan desibel dinyatakan sebagai:

$$SNR = P_r - P_n \quad (22)$$

Dimana:

P_n = daya derau (dBm)

Parameter ini memberikan gambaran awal mengenai kualitas sinyal yang diterima oleh sistem radar.

4. Evaluasi Kelayakan Sistem Radar

Performa sistem juga dievaluasi menggunakan parameter margin deteksi, yang menunjukkan seberapa jauh daya sinyal berada di atas ambang batas deteksi minimum (MDS). Evaluasi kelayakan sistem radar dilakukan dengan membandingkan nilai daya terima terhadap MDS. Jika ($P_r > MDS$), maka sistem dianggap mampu mendeteksi hujan pada kondisi tersebut secara andal. Sebaliknya, jika ($P_r \leq MDS$), maka sistem dinyatakan tidak layak untuk kondisi tersebut.

Dalam simulasi MATLAB, evaluasi ini dilakukan secara otomatis untuk setiap skenario intensitas hujan pada jarak tertentu. Hasil perhitungan daya terima, SNR, dan margin kemudian dirangkum dalam bentuk tabel yang memuat kategori hujan, nilai parameter kinerja, serta status kelayakan sistem. Selain dalam bentuk tabel, hubungan antara parameter-parameter tersebut divisualisasikan untuk memperlihatkan kecenderungan perubahan kinerja sistem terhadap variasi jarak dan intensitas hujan. Penyajian ini bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai batas operasional sistem radar cuaca yang dianalisis.

