

ANALISIS PERANCANGAN ANTENA MICROSTRIP PLANAR ARRAY RECTANGULAR PATCH UNTUK FREKUENSI RADAR

Imam Ashar¹⁾, Desyderius Minggu²⁾, Ananda Herdi Akbar³⁾
1), 2), 3) Prodi Teknik Telekomunikasi Militer. Politeknik Angkatan Darat
Jl. Raya Anggrek No.1 Junrejo, Batu, Indonesia
1) imamasharstmt@gmail.com, 2) desyderius07@gmail.com
3) aherdiakbar@gmail.com

DESIGN ANALYSIS OF A RECTANGULAR PATCH PLANAR ARRAY MICROSTRIP ANTENNA FOR RADAR FREQUENCY

Abstract: This study aims to design and analyze a Rectangular Patch Planar Array Microstrip Antenna for radar frequency applications. The results of the analysis and design indicate that the proposed Rectangular Patch Planar Array Microstrip Antenna, based on calculations using empirical formulas, is capable of operating at radar frequencies. The microstrip antenna operates within the Ultra Wide Band (UWB) range and achieves a resonant frequency of 1.5 GHz with an antenna gain of 8.70 dB. In addition, the obtained Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) value is 1.44.

Keywords: Microstrip Planar Array, Rectangular Patch, Radar Frequency, UWB.

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis sebuah Antena Microstrip Planar Array Rectangular Patch untuk frekuensi Radar. Hasil analisis dan perancangan didapatkan bahwa antena Microstrip Planar Array Rectangular Patch berdasarkan perhitungan dengan rumus empiris dapat beroperasi pada frekuensi radar. Antena Microstrip dapat bekerja pada jalur Ultra Wide Band (UWB) dan bekerja pada frekuensi resonansi sebesar 1,5 GHz dengan gain antena sebesar 8,70 dB. Nilai Voltage Standing Wave Rasio (VSWR) adalah 1,44.

Kata kunci: Microstripe Planar Array, Rectangular Patch, Frekuensi Radar, UWB.

PENDAHULUAN

Pengiriman informasi baik berupa suara, gambar ataupun data dapat disalurkan dengan menggunakan beberapa media transmisi yaitu konduktor, serat optik dan media udara (ruang bebas). Media transmisi ruang bebas ini berguna untuk pengiriman informasi yang sangat jauh dan tidak tergantung tempat sehingga baik pengiriman maupun penerimaan bebas berada dimana saja. Siaran Radio dan Televisi merupakan salah satu contoh dari sistem komunikasi radio yang menggunakan ruang bebas sebagai media dalam mendistribusikan sinyal-sinyal informasi dari pemancar ke penerima. Media untuk menghubungkan antara

pemancar dan penerima itu diperlukan suatu peralatan khusus yang dipasang pada kedua ujungnya yang dinamakan antena.

Dalam komunikasi radio sinyal informasi dipancarkan dari Radio melalui antena berupa Gelombang Elektromagnetik kemudian merambat melalui udara dan dipancarkan ketempat lain yang letaknya cukup jauh dan panjang gelombangnya tergantung frekuensi kerja radio komunikasi yang digunakan. Gelombang radio yang dipancarkan disebut Radio Frekuensi (RF) apabila daya dipancarkan semakin jauh maka penerimaannya semakin lemah sehingga untuk mendapatkan sinyal yang kuat pada penerima maka daya dari pemancar harus

cukup besar, dengan kata lain efisiensi dari antena penerima dan antena pemancar harus mempunyai daya jangkauan yang cukup jauh serta dapat menerima sinyal semaksimal mungkin.

Pada Radar perlunya pemanfaatan antena yang dapat beroperasi pada frekuensi kerja radar dengan model yang sederhana efektif dan efisien. Hal ini akan dirancang dengan analisis model antena microstrip planar array rectangular patch. Adapun analisis antena ini merupakan wujud dari pemanfaatan teknologi microstrip yang bekerja di jalur Ultra Wide Band (UWB).

1. Pengertian Antena

Antena adalah suatu instrumen yang penting dalam suatu sistem komunikasi radio. Dalam sistem radio, gelombang elektromagnetis berjalan dari pemancar ke penerima lewat ruang dan diperlukan antena pada kedua ujung tersebut untuk keperluan hubungan pemancar dan penerima ke hubungan ruang udara. Oleh karena itu fungsi utama antena adalah sebagai sarana untuk keperluan pemindahan energi-energi gelombang elektromagnetis dari pemancar ke penerima. Pada antena daya yang diradiasikan ke ruang bebas diusahakan mempunyai efisiensi setinggi mungkin, hal ini terjadi jika impedansi saluran sesuai dengan impedansi antena.

2. Perambatan Gelombang Line Of Sight (LOS)

Perambatan gelombang radio tergantung dan dipengaruhi oleh beberapa hal antara lain frekuensi, jarak, jenis antena, tinggi antena, keadaan atmosfer dan adanya penghalang. Propagasi line of sight disebut dengan propagasi dengan gelombang langsung (direct wave), karena gelombang yang terpancar dari antena pemancar langsung berpropagasi menuju antena penerima dan tidak merambat di atas permukaan tanah. Propagasi line of sight merupakan andalan sistem komunikasi masa kini dan akan datang karena dapat menyediakan kanal informasi yang lebih besar

dan kehandalan yang lebih tinggi serta tidak dipengaruhi oleh fenomena perubahan alam. Bidang frekuensi yang digunakan pada jenis ini sangat lebar yaitu meliputi Band VHF (30 – 300 MHz), UHF (300-3000 MHz), SHF (3-30 GHz) dan EHF (30-300 GHz) yang sering dikenal dengan bidang gelombang mikro.

3. Parameter-parameter Antena

a. Pola radiasi (Radiation Pattern). Pola radiasi dari suatu antena didefinisikan sebagai gambaran secara grafis dari sifat-sifat radiasi suatu antena sebagai fungsi koordinat ruang. Dalam kebanyakan keadaan pola radiasi ditentukan dalam daerah medan jauh dan dipresentasikan sebagai fungsi koordinat arah. Pola radiasi antena mikrostrip mempunyai fenomena yang sama dengan pola radiasi antena konvensional.

Pola radiasi merupakan fungsi perolehan yang dinormalkan terhadap nilai maksimumnya, fungsi perolehan ini merupakan karakteristik antena yang sangat penting yang dapat diukur dan dalam beberapa hal juga dapat dihitung. Fungsi perolehan menunjukkan suatu nilai maksimum yang sangat nyata, yang akan dinyatakan dengan G_M dan pola radiasi antena dinyatakan dalam hubungan sebagai berikut:

$$g(\theta, \phi) = \frac{G(\theta, \phi)}{G_M}$$

Dengan :

$$\begin{aligned} g(\theta, \phi) &= \text{Pola radiasi antena} \\ G(\theta, \phi) &= \text{Fungsi perolehan antena} \\ G_M &= \text{Nilai maksimum perolehan antena} \end{aligned}$$

Nilai maksimum G_M disini hanyalah perolehan dalam arti bahwa antena tersebut memusatkan atau memfokuskan daya pada arah maksimum untuk meningkatkan daya total yang diterima dan ini tidak meningkatkan daya total yang dipancarkan.

b. Penguatan (Gain). Penguatan daya total antena mikrostrip dapat ditentukan dari persamaan berikut

$$G = 10 \log \left(\frac{4\pi A}{\lambda_0^2} \right) - \alpha \left(\frac{D_1 + D_2}{2} \right)$$

Dengan :

G = Penguatan antena mikrostrip

D_1 = Panjang modul antena rancangan mikrostrip

D_2 = Lebar modul antena rancangan mikrostrip

A = Luas antena mikrostrip

α = Redaman substrat dan konduktor

c. Polarisasi (Polarization). Polarisasi suatu antena didefinisikan sebagai bentuk gerakan dari gelombang yang diradiasikan pada saat antena dioperasikan. Dengan kata lain polarisasi gelombang datang (incident wave) dari arah yang diberikan menghasilkan daya maksimum pada terminal antena. Polarisasi dari energi yang diradiasikan berubah menurut arah antena, sehingga dengan pola yang berbeda akan memungkinkan mempunyai polarisasi yang berbeda pula. Polarisasi antena dibedakan menjadi tiga macam yaitu polarisasi linier, polarisasi lingkaran dan polarisasi elips.

d. Impedansi Karakteristik Saluran Mikrostrip. Dalam merencanakan suatu saluran mikrostrip impedansi karakteristik saluran merupakan parameter yang terpenting, karena dapat menentukan lebar dari saluran mikrostrip, tinggi bahan substrat dan konstanta dielektriknya. Hubungan antara ketiga besaran tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Z_0 = \frac{377}{\sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{h}{w} \right)$$

Dengan :

Z_0 = Impedansi karakteristik saluran (Ω)

ϵ_r = Permittivitas dielektrik relatif substrat

h = Ketebalan substrat (mm)

w = Lebar saluran mikrostrip (mm)

377 = Impedansi karakteristik pada ruang bebas

e. Keterarahan (Directivity). Directivity adalah kemampuan antena untuk

mengkonsentrasikan energi pada arah yang diinginkan dibandingkan dengan intensitas radiasi pada arah lain. Ditinjau dari hasil percobaan directivity dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara intensitas radiasi maksimum dengan intensitas radiasi dari suatu sumber isotropis. Directivity pada antena mikrostrip dinyatakan dengan hubungan sebagai berikut:

$$D = \frac{4\pi \left(\frac{180}{\pi} \right)^2}{\Phi^0 \theta^0}$$

Dimana

$$D_0 = 10 \log D$$

Dengan:

D = Nilai Directivity

D_0 = Directivity antena (dB)

Φ = Sudut lebar berkas setengah daya (-3dB) untuk pola radiasi vertikal

θ = Sudut lebar berkas setengah daya (-3dB) untuk pola radiasi horisontal

f. Impedansi masukan terminal antena mikrostrip. Impedansi masukan antena perlu diketahui agar keperluan pemindahan daya dari atau ke antena menjadi maksimum. Untuk menentukan impedansi masukan dari tiap elemen peradiasi dengan menggunakan persamaan berikut:

$$R_{in} = 60 \frac{\lambda_0}{W}$$

Dimana :

R_{in} = Impedansi masukan antena (Ω)

λ_0 = Panjang gelombang diruang bebas (m)

W = Lebar strip konduktor (mm)

g. Batasan frekuensi pada substrat, perlu diketahui batasan frekuensi maksimum yang dapat dilewatkan pada substrat tanpa adanya pengaruh kopel antara gelombang permukaan. Besar frekuensi batasan maksimum diberikan dalam persamaan sebagai berikut:

$$f_m = \frac{c \times \tan^{-1} \epsilon_r}{\pi \times h \sqrt{2(\epsilon_r - 1)}}$$

Dimana:

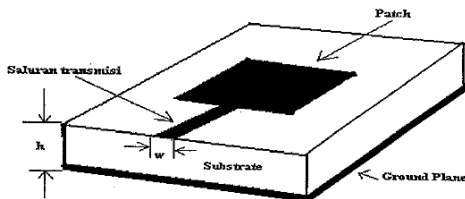
f_m = Frekuensi maksimum pada substrat (Hz)

c = Kecepatan cahaya diudara bebas (m/det)

h = Tinggi substrat (mm)

ϵ_r = Konstanta dielektrik relatif substrat

g. Saluran Transmisi Antena Mikrostrip



Gambar 1. Struktur Dasar Saluran Mikrostrip

Dasar perancangan antenna mikrostrip dapat ditentukan melalui dimensi panjang (L) dan dimensi lebar (W).

$$L = 0,49 \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$W = \frac{V_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

Sedangkan untuk menentukan frekuensi resonansi (f_r) dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$f_r = \frac{V_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}}$$

METODE PENELITIAN

Bagian metode penelitian ini memaparkan langkah-langkah sistematis dalam merancang antenna *microstrip planar array rectangular patch* untuk aplikasi frekuensi radar melalui dua tahapan utama, yaitu rekayasa perhitungan dimensi fisik dan pengukuran karakteristik performa. Pendekatan metodologis ini diawali dengan analisis teoretis menggunakan rumus-rumus empiris untuk menentukan geometri elemen peradiasi serta memastikan pemancaran daya yang efisien ke ruang bebas.

Secara garis besar, implementasi dari metode penelitian ini mencakup beberapa

komponen penting berikut:

a. Spesifikasi Substrat dan Konduktor. Rekayasa perancangan ini menggunakan substrat jenis epoxy fiber glass dengan konstanta permitivitas dielektrik relative substrat (ϵ_r) sebesar 4,8 dengan ketebalan substrat (h) 1,408 mm, strip konduktor (t) sebesar 0,065 mm. Maka batasan frekuensi yang dapat dilewatkan dengan menggunakan bahan tersebut adalah :

$$f_m = \frac{c \times \tan^{-1} \epsilon_r}{\pi \times h \sqrt{2(\epsilon_r - 1)}}$$

$$f_m = \frac{3.10^8 \times \tan^{-1} 4,8}{3,14 \times 1,408.10^{-3} \sqrt{2(4,8 - 1)}} = 1925,595 \text{ GHz}$$

b. Panjang elemen peradiasi

$$L = 0,49 \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$L = 0,49 \frac{200}{\sqrt{4,8}} = 44,731 \text{ mm}$$

c. Lebar elemen peradiasi

$$W = \frac{V_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

$$W = \frac{30}{2(1,5)} \sqrt{\frac{2}{4,8+1}} = 60,302 \text{ mm}$$

d. Impedansi Masukan elemen peradiasi

$$R_{in} = 60 \frac{\lambda_0}{W}$$

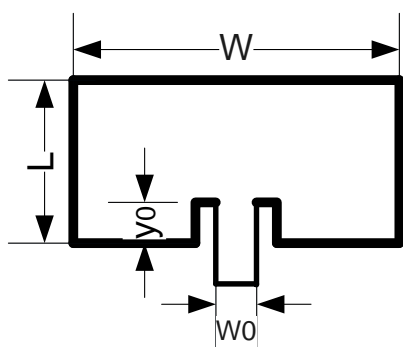
$$R_{in} = 60 \frac{200}{15,975 \text{ mm}} = 363,655 \text{ Ohm}$$

e. Frekuensi resonansi yang bekerja pada antenna adalah :

$$f_r = \frac{V_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$f_r = \frac{300}{2(44,371)\sqrt{4,8}}$$

$$= 1,5 \text{ GHz}$$



Gambar 2. Bentuk Dimensi Antena Rancangan

f. Impedansi Saluran Transmisi dan Transformer $1/4 \lambda_d$

Impedansi masukan pada titik catu match dengan impedansi kabel coaxial yang digunakan (RG-58/U) dengan impedansi 50Ω . Untuk nilai $y_0 = 1/3$ panjang elemen peradiasi yaitu $14,910\text{mm}$ dengan w_0 adalah sebesar $9,55\text{mm}$. Impedansi karakteristik pengumpaan masing-masing adalah 100Ω . Impedansi transformer $1/4 \lambda_d$ yang masuk ke elemen peradiasi;

$$Z_{Tr} = \sqrt{Z_0 \times R_{in}}$$

$$Z_{Tr} = \sqrt{100 \times 363,655} = 190,697 \Omega$$

g. Lebar Saluran Transmisi dan Transformer $1/4 \lambda_d$

Ukuran pada tiap-tiap saluran pengumpaan dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

- Lebar saluran Transmisi

$$W_t = \frac{377}{\sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{h}{Z_0} \right)$$

$$W_t = \frac{377}{\sqrt{4,8}} \left(\frac{1,408}{100} \right) = 2,4238 \text{ mm}$$

- Lebar Transformer $1/4 \lambda_d$

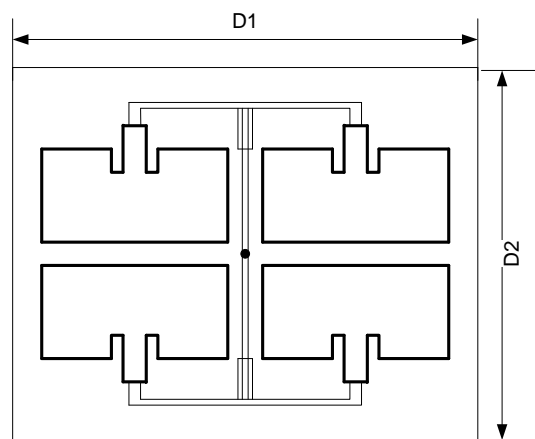
$$W_{tf} = \frac{377}{\sqrt{4,8}} \left(\frac{1,408}{190,697} \right) = 1,2705 \text{ mm}$$

h. Panjang Transformer $1/4 \lambda_d$

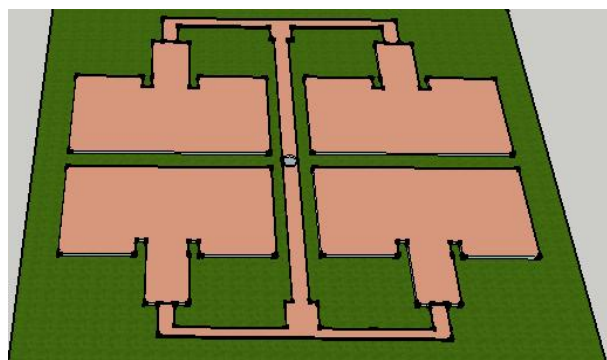
$$L_{tf} = 0,25 \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$L_{tf} = 0,25 \frac{200}{\sqrt{4,8}}$$

$$= 22,821 \text{ mm}$$



Gambar 3. Sketsa Antena Hasil Rancangan



Gambar 4. Bentuk Antena Hasil Rancangan

i. Analisis proses perhitungan Penguatan Antena

$$G = 10 \log \left(\frac{4\pi A}{\lambda_0^2} \right) - \alpha \left(\frac{D_1 + D_2}{2} \right)$$

$$G = 10 \log \left(\frac{4\pi 0,24}{0,02^2} \right) - \alpha \left(\frac{15,06 + 15,94}{2} \right)$$

$$= 8,77 \text{ dB} - 0,071 \text{ dB}$$

$$= 8,70 \text{ dB}$$

j. Analisis perhitungan Bandwidth Antena
Bandwidth antena untuk frekuensi kerja 1,5 GHz dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$BW = 4f^2 \left(\frac{t}{0,794} \right)$$

$$BW = 4 \times (1,5)^2 \left(\frac{1,408}{0,794} \right)$$

$$= 15,95 \text{ MHz}$$

HASIL PENELITIAN

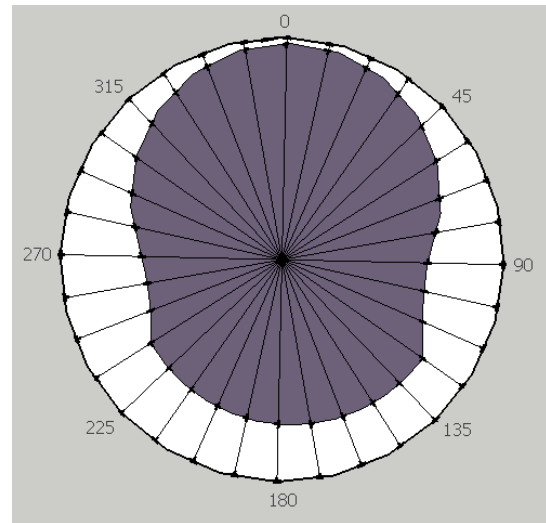
1. Analisis perhitungan VSWR

Tabel 1. Data Analisa perhitungan VSWR

No	Frekuensi (GHz)	Z(Ω)	r	VSWR	Sudut
1	1,2	36,25	0,45	2,63	42,30
2	1,3	40,02	0,30	1,85	27,58
3	1,4	42,92	0,20	1,66	11,99
4	1,5	44,60	0,19	1,44	10,15
5	1,6	49,65	0,18	1,50	19,25
6	1,8	55,98	0,25	1,67	20,57

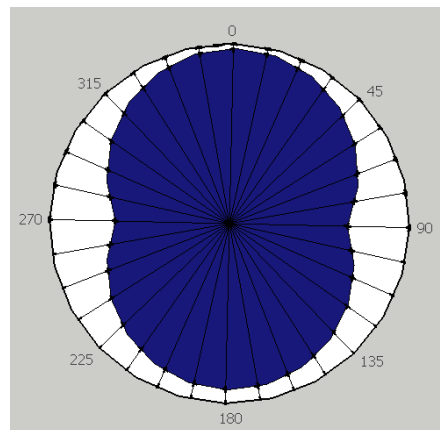
Dengan hasil data VSWR terbaik adalah 1,44 maka antena mikrostrip hasil rancangan termasuk jenis antena Resonansi yang beresonansi tepat pada frekuensi 1,5GHz

2. Analisis pengukuran pola radiasi



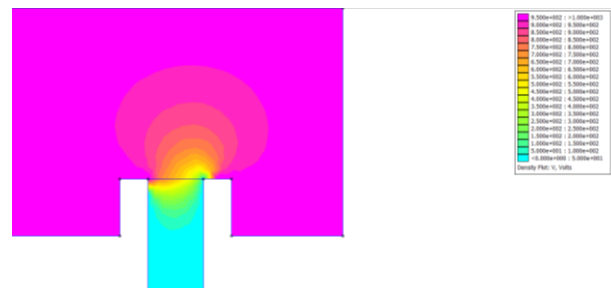
Gambar 5. Bentuk Pola Radiasi Vertikal Antena

3. Analisis pengukuran polarisasi antena



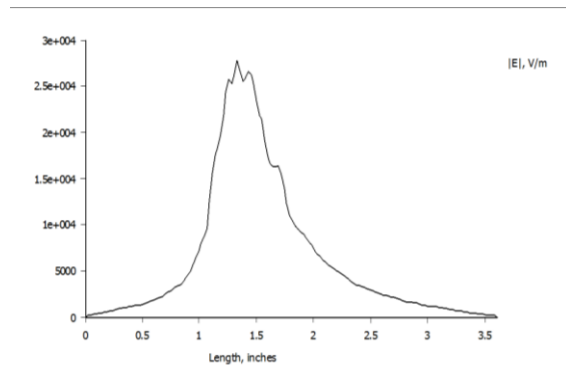
Gambar 6. Bentuk Polarisasi Antena

4. Analisis radiasi antena dengan program FEMM



Gambar 7. Bentuk Sebaran Medan Magnet Antena hasil Rancangan

Dari hasil simulasi dengan FEMM terlihat bahwa medan elektromagnetik meradiasi antena mikrostrip dengan medan yang merata diseluruh bagian layer.



Gambar 8. Grafik Medan Magnit Antena hasil rancangan

PEMBAHASAN

1. Pencapaian Parameter Utama Antena

Berdasarkan hasil rekayasa perhitungan dan analisis, antena *microstrip planar array* dengan rectangular patch ini berhasil dirancang untuk beroperasi pada frekuensi radar di jalur *Ultra Wide Band* (UWB). Parameter utama yang diperoleh menunjukkan performa yang sangat baik untuk aplikasi sistem radar. Antena ini bekerja pada frekuensi resonansi sebesar 1,5 GHz. Pada frekuensi kerja tersebut, antena menghasilkan penguatan (*gain*) yang cukup tinggi, yaitu sebesar 8,70 dB. Selain itu, nilai *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR) terbaik yang didapatkan adalah 1,44. Nilai VSWR ini mengindikasikan bahwa antena yang dirancang termasuk dalam jenis antena resonan yang mampu bekerja secara tepat dan efisien pada frekuensi target 1,5 GHz.

2. Analisis Dimensi Fisik dan Penyelarasan Impedansi

Temuan-temuan dalam penelitian ini diperoleh melalui perhitungan dimensi fisik secara empiris menggunakan spesifikasi bahan konduktor dan substrat tertentu. Substrat yang dipilih adalah jenis epoxy fiber glass dengan konstanta permitivitas dielektrik relatif sebesar 4,8, ketebalan substrat 1,408 mm, serta tebal strip konduktor sebesar 0,065

mm. Melalui spesifikasi bahan tersebut, diperoleh batasan frekuensi maksimum yang dapat dilewatkan substrat tanpa adanya pengaruh kopel gelombang permukaan sebesar 1925,595 GHz.

Dari hasil perhitungan dimensi fisik elemen peradiasi, diperoleh panjang elemen sebesar 44,731 mm dan lebar elemen sebesar 60,302 mm. Ukuran dimensi ini secara langsung menentukan ketepatan frekuensi resonansi pada 1,5 GHz. Impedansi masukan awal dari elemen peradiasi adalah sebesar 363,655. Agar pemindahan daya ke antena menjadi maksimum, impedansi masukan tersebut harus diselaraskan (*matching*) dengan kabel koaksial RG-58/U yang memiliki impedansi 50. Penyelarasan dilakukan menggunakan saluran pengumpan dengan impedansi karakteristik 100 dan transformer yang memiliki impedansi karakteristik sebesar 190,697. Hasil perhitungan geometrisnya menghasilkan lebar saluran transmisi sebesar 2,4238 mm, lebar transformer sebesar 1,2705 mm, dan panjang transformer sebesar 22,821 mm. Penyesuaian impedansi ini sangat krusial karena efisiensi radiasi tertinggi ke ruang bebas hanya akan tercapai jika impedansi saluran transmisi sesuai dengan impedansi antena.

3. Analisis Nilai VSWR dan Bandwidth Antena

Karakteristik performa antena diuji secara analitis melalui variasi frekuensi kerja dari rentang 1,2 GHz hingga 1,8 GHz. Berdasarkan data pada Tabel 1, perubahan frekuensi secara langsung memengaruhi nilai impedansi dan tingkat refleksi gelombang (VSWR) sebagai berikut:

- Pada frekuensi 1,2 GHz, nilai VSWR berada pada angka 2,63 dengan impedansi sebesar 36,25 Ω .
- Pada frekuensi 1,3 GHz, nilai VSWR menurun menjadi 1,85 dengan impedansi sebesar 40,02 Ω .
- Pada frekuensi 1,4 GHz, nilai VSWR semakin membaik ke angka 1,66 dengan impedansi sebesar 42,92 Ω .

- Nilai VSWR paling optimal dicapai tepat pada frekuensi resonansi 1,5 GHz, yaitu sebesar 1,44 dengan impedansi sebesar 44,60 Ω .
- Ketika frekuensi dinaikkan ke 1,6 GHz, nilai VSWR menjadi 1,50 dengan impedansi sebesar 49,65 Ω .
- Pada frekuensi 1,8 GHz, nilai VSWR kembali naik menjadi 1,67 dengan impedansi sebesar 55,98 Ω .

Hasil pengujian ini membuktikan bahwa antenna memiliki tingkat kesesuaian impedansi yang sangat baik pada frekuensi operasionalnya. Adapun bandwidth yang dihasilkan pada frekuensi kerja 1,5 GHz adalah sebesar 15,95 MHz. Nilai bandwidth serta kestabilan VSWR ini memastikan efisiensi pemancaran gelombang yang optimal di udara bebas.

4. Distribusi Medan Elektromagnetik dan Solusi Sistem Radar

Arti hasil penelitian ini diperkuat oleh validasi visual melalui simulasi sebaran medan magnet menggunakan program FEMM. Dari hasil simulasi, terlihat jelas bahwa medan elektromagnetik meradiasi antenna mikrostrip dengan pola sebaran medan yang merata di seluruh bagian layer antenna.

Secara keseluruhan, hasil perancangan ini berhasil menjawab tantangan kebutuhan operasional radar akan sebuah antenna yang sederhana, efektif, dan efisien. Melalui model antenna mikrostrip planar array rectangular patch ini, kelemahan penerimaan akibat redaman jarak jauh dapat diatasi karena antenna terbukti memiliki jangkauan daya yang cukup jauh serta mampu menerima sinyal semaksimal mungkin pada media ruang bebas. Kemungkinan pengembangan lebih lanjut dari penelitian ini adalah melakukan optimasi susunan array atau memodifikasi bentuk patch konduktor guna memperluas cakupan bandwidth atau meningkatkan nilai gain untuk mendukung spesifikasi sistem radar yang lebih kompleks.

PENUTUP

Analisis dan perancangan antenna mikrostrip patch Rectangle planar array dari hasil perhitungan secara empiris didapatkan frekuensi resonansi antenna 1,5 GHz dengan Bandwidth antenna sebesar 15,95 MHz. Gain antenna didapatkan perhitungan 8,70 dB dengan VSWR 1,44. Dengan demikian antenna dapat bekerja baik di jalur Ultra Wide Band yang merupakan jalur frekuensi kerja dari Radar.

DAFTAR PUSTAKA

- Balanis, C. A. (1982). *Antenna theory: Analysis and design*. New York, NY: Wiley.
- Idris, K. (1984). *Komunikasi elektronika* (Vol. 2). Bandung, Indonesia: Erlangga.
- James, J. R., & Hall, P. S. (1989). *Handbook of microstrip antennas*. London, England: IEEE Electromagnetic Wave Series.
- Koesmarijanto. (n.d.). *Dasar sistem telekomunikasi*. Malang, Indonesia: Politeknik Negeri Malang.
- Kraus, J. D. (1988). *Antennas* (2nd ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Leung, M. (2002). *Microstrip antenna using Mstrip40*. Canberra, Australia: Division of Management and Technology, University of Canberra.
- Nakar, P. S. (2004). *Design of a compact microstrip patch antenna for use in wireless/cellular devices* (Thesis). The Florida State University, Florida, United States.
- Munson, R. E. (n.d.). *Microstrip antennas*. Ball Communication Systems Division.
- Zakerificiu, R. A. (1990). *Microwave engineering using microstrip circuit*. Sydney, Australia: Prentice Hall.