

DESAIN ANTENA MIKROSTRIP RADAR CUACA PESAWAT PADA FREKUENSI 9,4 GHZ DENGAN METODE WILKINSON POWER DIVIDER

Renata Salma Ramadhanty¹, Bambang Bagus Hariyanto², dan Teguh Imam Suharto³
^{1,2,3}Politeknik Penerbangan Surabaya Jl. Jemur Andayani I/73, Surabaya, 60236
Email: renata18.salma@gmail.com

Abstrak

Penerapan radar dalam dunia penerbangan adalah adanya radar cuaca pesawat untuk memantau kondisi cuaca di sekitar pesawat secara aktual. Radar cuaca pesawat memerlukan antena untuk menunjang deteksi. Artikel ini berisi penelitian desain antena mikrostrip menggunakan metode Wilkinson Power Divider (WPD) yang dikombinasikan dengan teknik array untuk menghasilkan parameter gain yang tinggi. Metode penelitian menggunakan 4D dari Thiagarajan yaitu Define, Design, Develop dan Disseminate. Untuk mendapatkan gain yang tinggi, pada penelitian ini membuat rancangan desain antena single patch, array 1x2, 4x4, dan 8x4 dengan teknik pencatutan insert feed dan coaxial. Kemudian membandingkan berdasarkan substrat yang digunakan yaitu FR-4 dan Rogers RT-5880. Analisa parameter terdiri dari gain, VSWR, return loss, bandwidth dan pola radiasi. Desain mikrostrip dibuat dengan melakukan perhitungan antena serta menentukan metode yang digunakan yaitu array dan WPD kemudian perancangan desain pada aplikasi. Desain antena mikrostrip substrat FR-4 dan Rogers RT-5880 memiliki nilai VSWR <2 dan return loss <-10 dB. Gain tertinggi pada array 8 x 4 insert feed Rogers RT-5880 sebesar 17.979 dBi dan bandwidth dengan nilai tertinggi array 1x2 Rogers RT-5880 sebesar 651.1 MHz. Gain meningkat sebanding dengan jumlah patch. Bahan Rogers RT-5880 menghasilkan gain yang lebih tinggi dari FR-4.

Kata Kunci : Mikrostrip, WPD, Array, FR-4, Rogers RT-5880

Abstract

The application of radar in the world of aviation is the existence of aircraft weather radar to monitor weather conditions around the aircraft in real time. Aircraft weather radar requires an antenna to support detection. The author makes microstrip antenna design research using the Wilkinson Power Divider (WPD) method combined with array techniques to produce high gain parameters. The research method uses 4D from Thiagarajan, namely Define, Design, Develop and Disseminate. To obtain high gain, this study designs single patch, 1x2, 4x4, and 8x4 antenna designs with insert feed and coaxial integration techniques. Then compare based on the substrate used, namely FR-4 and Rogers RT-5880. Analysis includes gain, VSWR, return loss, bandwidth and radiation pattern. The microstrip design is made by doing antenna calculations and determining the method used, namely array and WPD, then designing the design in the application. The FR-4 and Rogers RT-5880 substrate microstrip antenna design has a VSWR value <2 and return loss <-10 dB. The highest gain on the 8 x 4 insert feed Rogers RT-5880 array was 17.979 dBi and the bandwidth with the highest value of the 1x2 Rogers RT-5880 array was 651.1 MHz. Gain increases proportional to the number of patches. The Rogers RT-5880 material produces higher gain than FR-4.

Keywords : Microstrip, WPD, Array, FR-4, Rogers RT-5880

PENDAHULUAN

Dalam bidang penerbangan, Radar memungkinkan pemantauan objek dengan jangkauan yang lebih luas dan jauh. Radar berfungsi untuk menemukan dan mengidentifikasi lokasi suatu objek dengan memancarkan gelombang elektromagnetik dan memproses sinyal pantulan. Fungsi radar, menurut Annex 10 Volume IV, adalah untuk mengidentifikasi posisi pesawat dalam jangkauan dan azimuth. Salah satu jenis radar dalam dunia penerbangan adalah radar cuaca pesawat yang memungkinkan pilot untuk memantau kondisi cuaca di sekitar pesawat secara aktual. Radar cuaca mampu mendeteksi kekuatan curah hujan dan kondisi cuaca yang tidak menguntungkan, seperti badai [1].

Sistem radar cuaca pesawat memerlukan sebuah perangkat berupa antenna untuk menunjang proses deteksi. Antena merupakan bagian dari komponen elektronik yang bekerja untuk mengirimkan dan penerima gelombang elektromagnetik. Ketika berfungsi sebagai pengirim (transmitter), antena berperan sebagai transduser elektromagnetik pada saluran transmisi kabel yang mengubah energi listrik menjadi gelombang elektromagnetik. Sedangkan ketika berfungsi sebagai penerima (receiver), antena berperan dalam mengubah gelombang elektromagnetik menjadi sinyal listrik [2].

Antena mikrostrip tersusun dari bahan PCB yang tersusun dari lempengan – lempengan yang memiliki fungsi masing – masing. Bagian tersebut terdiri dari patch sebagai lempengan konduktor yang dipisahkan oleh substrat yang merupakan lempengan bersifat isolator sekaligus sebagai pemisal dengan lempengan groundplane atau lempengan ground pada bagian paling bawah. Antena mikrostrip memiliki kelebihan seperti bentuk yang ringkas,

kemampuan *dual frequency*, dan dapat mudah diintegrasikan dengan peralatan [3].

Pada artikel ini, dirancang antena mikrostrip pada frekuensi 9.4 GHz menggunakan metode Wilkinson Power Divider dan array dengan frekuensi 9.4 GHz. Desain antena menggunakan substrat FR-4 dan Rogers RT-5880. Berdasarkan penjelasan di atas, maka akan dibuat artikel ilmiah dengan judul “Desain Antena Mikrostrip Radar Cuaca Pesawat Pada Frekuensi 9.4 GHz dengan Metode Wilkinson Power Divider”.

Tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah untuk mendesain antena mikrostrip rectangular menggunakan teknik array dan Wilkinson Power Divider, menganalisa kinerja antena mikrostrip rectangular menggunakan bahan substrat FR-4 dan Rogers RT-5880 meliputi parameter VSWR, gain, return loss, bandwidth dan pola radiasi, serta membandingkan hasil gain antena mikrostrip menggunakan substrat FR-4 dan Rogers RT-5880.

METODE

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian dan pengembangan atau *Research and Development* (R&D) dengan model pengembangan 4D (four-D). Model penelitian dan pengembangan model 4D terdiri dari 4 tahapan, yaitu; define, design, develop, dan disseminate [4].

1. Define

Pada penelitian ini tahap Define dapat dilakukan dengan melakukan analisis kebutuhan dan pengumpulan informasi terkait syarat pengembangan antena mikrostrip rectangular menggunakan teknik array dan Wilkinson Power Divider untuk aplikasi radar cuaca pada frekuensi 9.4 GHz. Beberapa hal yang perlu diperhatikan pada tahap Define pada penelitian ini yaitu menentukan

karakteristik desain dan melakukan studi literatur. Karakteristik desain tercantum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Antena

Parameter	Hasil
Frekuensi	9.4 GHz
VSWR	< 2
Return Loss	< -10 dB
Gain	> 12 dBi
Pola Radiasi	Directional

2. Design (Perancangan)

Tahap Design dilakukan dengan

melakukan perancangan atau desain antena mikrostrip rectangular menggunakan teknik array dan Wilkinson Power Divider dengan menggunakan aplikasi simulasi antena. Serta melakukan tes pada desain melalui aplikasi simulasi yang digunakan untuk menganalisa kinerja antena mikrostrip rectangular. Substrat yang digunakan meliputi FR-4 dan Rogers RT-5880 sebagai pembanding.

Tabel 2. Spesifikasi Substrat FR-4

Karakteristik	Nilai Ideal
Konstanta Dielektrik Relatif (ϵ_r)	4.3
Dielektrik Loss Tangent (δ)	0.0265
Ketebalan Substrat (FR4 Epoxy)	1.6 mm
Frekuensi Kerja	9,4 GHz

Sumber : Wiyanto et al., (2018)

Tabel 3. Spesifikasi Substrat Rogers RT-5880

Karakteristik	Nilai Ideal
Konstanta dielektrik relatif (ϵ_r)	2.2
Dielektrik Loss tangent (δ)	0.0009
Ketebalan Substrate (Rogers RT-5880)	1.575 mm

Frekuensi	9.4 GHz
-----------	---------

Sumber : Hariyadi et al., (2018)

Perancangan awal dilakukan dengan melakukan perhitungan antena mikrostrip menggunakan persamaan di bawah ini.

$$W = \frac{c}{2f_0\sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}}} \quad (1)$$

Keterangan :

W = Lebar Patch

c = Panjang gelombang udara

f_0 = Frekuensi kerja

ϵ_r = Permeabilitas material

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w}\right]^{-1/2} \quad (2)$$

Keterangan :

ϵ_{eff} = Permeabilitas efektif

ϵ_r = Permeabilitas material

h = Ketebalan substrat

W = Panjang Patch

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3)$$

Keterangan :

ϵ_r = Permeabilitas material

f_0 = Frekuensi kerja

ϵ_{eff} = Permeabilitas efektif

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{eff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \quad (4)$$

Keterangan :

ΔL = Selisih panjang patch

h = ketebalan substrat

W = Lebar Patch

ϵ_{eff} = Permeabilitas efektif

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (5)$$

Keterangan :

L = Panjang Patch

ΔL = Selisih panjang patch

L_{eff} = Panjang efektif Patch

Perancangan dimensi groundplane:

$$L_g = 2 \times L \quad (6)$$

$$W_g = 2 \times W \quad (7)$$

Keterangan :

L_g = Panjang groundplane

W_g = Lebar groundplane

L = Panjang Patch

W = Lebar Patch

$$W_f = \frac{7.48 \times h}{3.9484} - 1.25 \times t \quad (8)$$

Keterangan :

W_f = Lebar feedline

h = ketebalan substrat

t = Ketebalan copper

Perhitungan antenna array dapat dilakukan menggunakan teknik percabangan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Z = Z_0 \sqrt{N} \quad (9)$$

Keterangan :

Z = Output Impedansi percabangan

Z₀ = Impedansi input

N - Jumlah cabang

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (10)$$

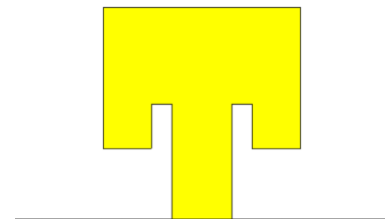
Keterangan :

d = Jarak antar patch

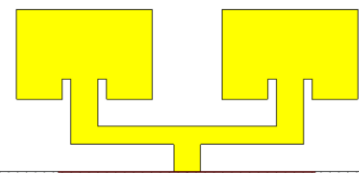
λ = Panjang gelombang frekuensi resonansi

Setelah dilakukan perhitungan kemudian desain dibuat dan disimulasikan menggunakan *software* simulasi antenna. Langkah awal desain yaitu membuat antenna tunggal atau single patch berbentuk persegi panjang dengan sistem pencatuan feed insert. Kemudian, perancangan kedua yaitu pembuatan desain antenna array yang dibuat menggunakan perhitungan dari patch antenna tunggal yang telah dirancang sebelumnya. Teknik

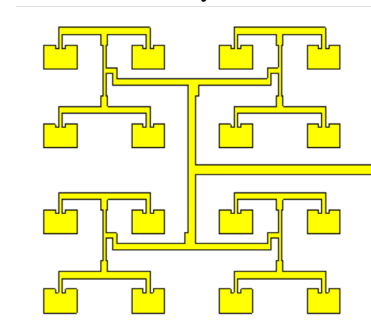
Wilkinson Power Divider digunakan untuk menyatukan antenna array yang terdiri dari satu patch. Antena ini menggunakan dua nilai impedansi, 50 Ohm dan 70.7 Ohm.



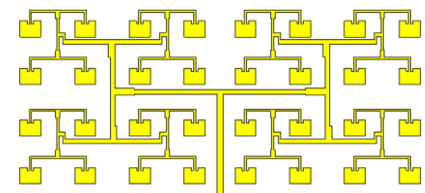
1. Single Patch



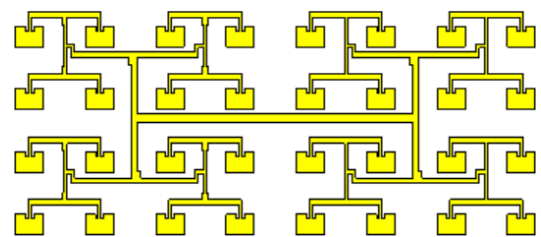
2. Array 1 x 2



3. Array 4 x 4



4. Array 8 x 4



5. Array 8 x 4 Coaxial

Gambar 1. Desain antenna mikrostrip single dan array 1 x 2, 4 x 4 dan 8 x 4

Tabel 4. Ukuran Dimensi Antena

No.	Bagian	Simbol	Ukuran Setelah Optimasi	
			FR-4	Rogers RT-5880
1.	Lebar Patch	W	9.8 mm	12.65 mm
2.	Panjang Patch	L	7 mm	9.99 mm
3.	Panjang Groundplane	Lg	14 mm	17.5 mm
4.	Lebar Groundplane	Wg	19.6 mm	19.5 mm
5.	Lebar Gap	Gap	1 mm	1 mm
6.	Jarak Antar Patch	d	16 mm	16 mm

Gambar 1a merupakan gambar single patch yang merupakan patokan dimensi yang akan digunakan pada tahap desain array. Single patch merupakan desain paling sederhana pada penelitian ini. Gambar 1b menunjukkan desain array 1 x 2 dengan menggunakan metode Wilkinson Power Divider untuk menggabungkan antar patch antena. Desain tersebut menggunakan dua percabangan yang terhubung ke satu pencatu daya untuk memperoleh input tegangan. Pada gambar 1c dan 1 d menunjukkan desain array menggunakan pencatu daya insert feed dengan desain yang lebih kompleks karena memiliki jumlah patch dan percabangan yang lebih banyak dari desain Gambar 1b. Jumlah patch terbanyak terdapat pada desain Gambar 1d dan 1e berjumlah 32 patch. Perbedaan desain pada Gambar 1d dan 1e terletak pada metode pencatuan yang digunakan yaitu insert feed dan coaxial feed.

Dalam desain array, jarak antara patch dihitung dengan menggunakan setengah panjang gelombang dari jarak terdekat untuk mengurangi interferensi yang mungkin terjadi. Agar didapatkan kinerja peralatan antena yang baik dan sesuai parameter, maka perlu dilakukan optimasi dimensi antena hingga didapatkan

parameter yang sesuai. Karena perhitungan yang dilakukan hanya bersifat pendekatan pada parameter yang diinginkan sehingga perlu dilakukan optimasi setelah proses desain selesai dilakukan. Optimasi dilakukan dengan cara merupakan ukuran dimensi antena sehingga menghasilkan ukuran dimensi antena yang baru.

3. Develop

Perancangan yang sudah dibuat selanjutnya dilakukan simulasi pengukuran menggunakan aplikasi *software* simulasi antena. Parameter pengukuran meliputi return loss, VSWR, gain, bandwidth dan pola radiasi. Pengukuran menggunakan 2 jenis substrat untuk setiap desainnya yaitu Rogers RT-5880 dan FR-4.

4. Disseminate

Tahap Disseminate merupakan tahap penyebaran atau distribusi hasil penelitian kepada publik atau target pengguna, meliputi :

1. Hasil penelitian ini di disebarakan melalui publikasi di jurnal atau media online yang relevan dengan topik penelitian.
2. Laporan penelitian yang berisi hasil penelitian dan kesimpulan yang telah diperoleh akan disusun dan disebarakan kepada Lembaga Pendidikan Politeknik Penerbangan Surabaya yang nantinya dapat menjadi salah satu acuan penelitian proyek akhir selanjutnya yang berhubungan dengan antena mikrostrip.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan meliputi parameter antena return loss, VSWR, bandwidth, gain dan pola radiasi. Setiap dari parameter tersebut mempengaruhi pancaran atau sinyal yang akan dihasilkan oleh antena. VSWR

merupakan rasio antara amplitudo maksimum ($|V|_{max}$) dan minimum ($|V|_{min}$) dari gelombang berdiri (standing wave). Nilai VSWR sebesar 1 menunjukkan bahwa tidak ada sinyal pantulan atau refleksi yang ada pada saluran ketika kondisi matching sempurna. Namun, pada realisasinya untuk mencapai kondisi seperti ini sulit dilakukan. Nilai VSWR yang diterima secara umum adalah ≤ 2 [7].

Gain memiliki hubungan dengan fungsi antenna yang dapat mengarahkan radiasi atau pancaran sinyal dan menangkap sinyal dari arah tertentu. Gain antenna adalah rasio antara tingkat radiasi maksimum antenna dengan tingkat radiasi antenna referensi dengan masukan daya yang sama. Gain antenna dinyatakan dalam satuan desibel (dB) terhadap antenna referensi. Dalam persamaan Friss, gain dari kedua antenna dapat dihitung dan dinyatakan dalam satuan dBi.

Return loss merupakan rasio antara amplitudo gelombang yang dipantulkan atau direfleksikan dengan amplitudo gelombang dipancarkan. Hal ini terjadi karena adanya ketidaksesuaian impedansi (mismatch) antara saluran pengiriman pancaran dan impedansi input beban (antenna). Antenna dikatakan memiliki nilai return loss baik jika < -10 dB. Nilai ini di dapat dari persamaan nilai return loss dan VSWR. Berikut ini :

$$\Gamma = \frac{VSWR-1}{VSWR+1} \quad (11)$$

$$VSWR = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad (12)$$

$$\Gamma = 10^{\frac{-RL}{20}} \quad (13)$$

$$Return Loss = -20 \log \left[\frac{VSWR-1}{VSWR+1} \right] \quad (14)$$

$$Return Loss = -20 \log (\Gamma) \quad (15)$$

$$VSWR = \frac{1+10^{\frac{-RL}{20}}}{1-10^{\frac{-RL}{20}}} \quad (16)$$

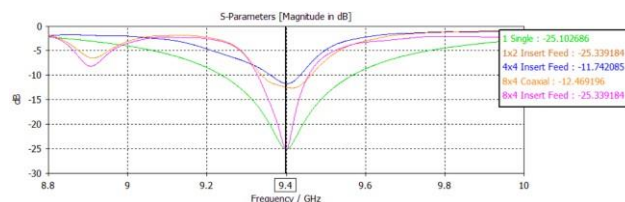
Keterangan :

Γ : Reflection Coefficient

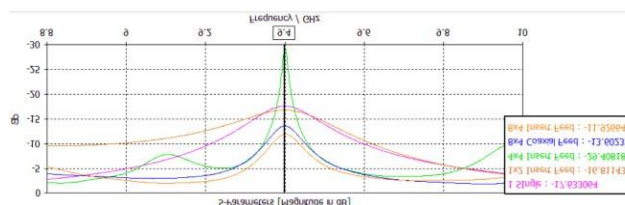
RL : Return Loss (dB)

Bandwidth antenna dapat didefinisikan sebagai rentang frekuensi dimana nilai VSWR atau return loss-nya tetap di bawah suatu ambang batas tertentu .Pola radiasi antenna terdiri dari beberapa jenis yaitu isotropis, bidirectional, omnidirectional dan unidirectional. Pola radiasi menggambarkan struktur dari pancaran antenna dalam bentuk koordinat bola. Hasil simulasi dari desain antenna mikrostrip yang telah dilakukan pada aplikasi simulasi antenna adalah sebagai berikut.

1. Return Loss



Gambar 1. Grafik Return Loss FR-4

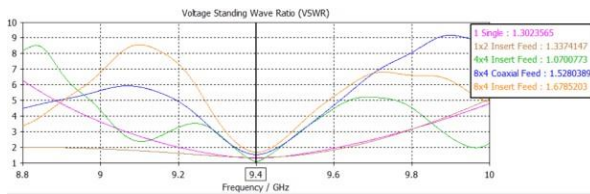


Gambar 2. Grafik Return Loss Rogers RT-5880

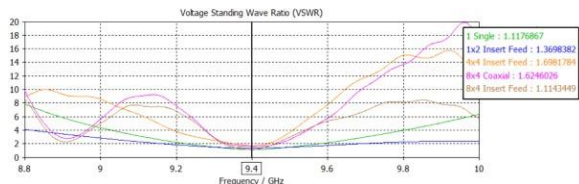
Grafik pada Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan nilai return loss pada setiap desain tidak dipengaruhi dengan bertambahnya jumlah patch pada antenna. Semua desain yang menggunakan substrat Rogers RT-5880 dan FR-4 memiliki nilai yang optimum karena semua desain memiliki nilai return loss < -10 dB yang merupakan nilai minimum parameter pembuatan antenna.. < -10 dB didapat dari persamaan perhitungan return loss dan VSWR jika diketahui VSWR adalah 2 yang merupakan nilai maksimum pada antenna. Nilai return loss terbaik

terdapat pada desain array 4 x 4 Rogers RT-5880.

2. VSWR



Gambar 3. Hasil Simulasi VSWR Rogers RT-5880



Gambar 4. Hasil Simulasi VSWR FR-4

Berdasarkan Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan nilai VSWR yang didapatkan tidak menunjukkan adanya korelasi dengan bertambahnya patch pada antenna. VSWR menunjukkan terdapat korelasi dengan nilai return loss yang didapat, diketahui dari nilai return loss terendah yaitu pada desain 4 x 4 insert feed pada Rogers RT-5880 yang memiliki nilai VSWR terbaik yaitu 1,07. Sebaliknya pada desain array 4 x 4 FR-4 yang memiliki return loss terbesar mempunyai nilai VSWR paling besar yaitu 1. 624. Nilai VSWR pada desain antenna menunjukkan besarnya sinyal reflected pada antenna. Seluruh desain antenna dengan substrat FR-4 memiliki nilai VSWR yang masih dalam ambang batas parameter antenna secara umum yaitu < 2 .

3. Bandwidth

Tabel 5. Hasil Simulasi Bandwidth dan Gain

No.	Desain Antena	Parameter			
		Bandwidth (MHz)		Gain (dBi)	
		FR-4	Rogers RT-5880	FR-4	Rogers RT-5880
1.	Single Patch	331.6	385.6	4.02	5.667
2.	1x2 Insert Feed	480.8	651.1	5.28	9.607
3.	4x4 Insert Feed	74.9	112.5	10.36	15.699
4.	8x4 Insert Feed	129	67.9	13.57	17.979
5.	8x4 Coaxial	124.8	101.6	13.12	17.406

Tabel 5 menunjukkan pada setiap desain antenna memiliki nilai bandwidth yang berbeda dan bertambahnya patch tidak berpengaruh terhadap bertambahnya bandwidth. Desain array 1 x 2 Rogers RT-5880 memiliki bandwidth terbesar, sedangkan bandwidth tersempit terdapat pada desain array 8 x 4 Rogers RT-5880.

4. Gain

Hasil simulasi pada Tabel 5 menunjukkan substrat Rogers RT-5880 memiliki capaian gain yang lebih tinggi dari substrat FR-4. Dapat diketahui jumlah elemen patch pada array antenna yang semakin banyak menyebabkan semakin besar gain yang dihasilkan. Jenis material atau bahan yang digunakan pada antenna juga mempengaruhi gain yang dihasilkan. Rogers RT-5880 memiliki gain yang lebih tinggi dibandingkan FR-4 karena memiliki spesifikasi substrat yang berbeda seperti nilai konstant dielektrik sebesar 2.2 sedangkan FR-4 sebesar 4.3. Hal ini disebabkan karena nilai yang rendah pada konstanta dielektrik akan menghasilkan efisiensi radiasi yang lebih tinggi [8]. Selain itu, nilai loss tangent pada FR-4 lebih tinggi, yaitu sebesar 0.0265, sedangkan loss tangent pada Rogers RT-

5880 hanya sebesar 0.00009. Loss tangent substrat yang digunakan dapat mempengaruhi capaian gain yang didapat [9].

5. Pola Radiasi

Hasil pola radiasi pada setiap desain antenna menggunakan substrat FR-4 dan Rogers RT-5880 menghasilkan pola radiasi dengan jenis direksional. Jenis ini menghasilkan pancaran dengan intensitasi radiasi yang lebih besar pada daerah tertentu dibandingkan dengan daerah yang lain, sehingga pancaran lebih terpusat pada daerah tertentu.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil yang didapatkan dalam perancangan dan perbandingan parameter yang disimulasikan menggunakan *software* simulasi antenna, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Desain antenna mikrostrip dapat dibuat dengan melakukan perhitungan dimensi antenna serta menentukan metode yang digunakan yaitu array dan wilkinson power divider untuk mendapat parameter antenna yang diinginkan, kemudian melakukan perancangan desain pada aplikasi simulasi antenna .
2. Seluruh antenna mikrostrip yang telah didesain dengan bahan FR-4 dan Rogers RT-5880 memiliki nilai VSWR < 2 , return loss < -10 dB, dan pola radiasi direksional. Gain tertinggi terdapat pada desain array 8 x 4 insert feed Rogers RT-5880 sebesar 17.979 dBi. Bandwidth pada setiap desain memiliki nilai yang bagus dengan nilai tertinggi pada desain 1x2 substrat Rogers RT-5880 sebesar 651.1 MHz.
3. Gain pada setiap desain meningkat sebanding dengan jumlah patch yang digunakan. Bahan Rogers RT-5880 menghasilkan gain yang lebih tinggi dari

FR-4 ditunjukkan dari gain seluruh desain RT-5880 selalu lebih tinggi dari desain FR-4.

Saran

Saran yang dapat digunakan untuk meningkatkan performa dari antenna mikrostrip, berikut ini beberapa saran yang dapat dijadikan acuan untuk penelitian selanjutnya :

1. Dalam proses perancangan antenna mikrostrip dibutuhkan optimasi lagi terhadap dimensi antenna pada *software* simulasi, untuk optimasi di setiap antenna dianjurkan fokus pada parameter seperti contoh merubah panjang antenna saja atau material setelah itu dapat mengganti parameter lain.
2. Sebaiknya dilakukan uji parameter ulang antenna menggunakan Network Analyzer pada antenna yang telah difabrikasi, untuk mendapatkan perbandingan antara hasil simulasi menggunakan *software* simulasi antenna dan pengukuran menggunakan Network Analyzer.
3. Penelitian ini masih perlu dilakukan studi lanjutan untuk mengembangkan antenna mikrostrip yang dapat diaplikasi pada radar cuaca pesawat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Slameta and S. Muslimawati, "Perancangan Bandpass Filter untuk Radar Cuaca dengan Metoda Hairpin Meander Fractal Resonator pada Frekuensi 9 GHz," *JTERA (Jurnal Teknol. Rekayasa)*, vol. 4, no. 2, p. 243, 2019.
- [2] H. R. Fakhriannur, Irfan, and K. Saiful, "Analisis Interferensi Frekuensi 5600 MHz Pada Radar Cuaca BMKG (Studi Kasus Di Stasiun Klimatologi Kelas I Banjarbaru)," *Dr. Diss. Univ. Islam Kalimantan*, pp. 1–11, 2019.
- [3] S. Alam and R. F. Nugroho, "Perancangan Antena Mikrostrip

- Array 2x1 Untuk Meningkatkan Gain Untuk Aplikasi LTE Pada Frekuensi 2.300 MHz,” *J. Tek. dan Ilmu Komput.*, vol. 07, pp. 365–378, 2018.
- [4] Thiagarajan, “Instructional development for training teachers of exceptional children: A sourcebook,” *J. Sch. Psychol.*, vol. 14, no. 1, p. 75, 1976, doi: 10.1016/0022-4405(76)90066-2.
- [5] E. Wiyanto, S. Alam, and B. Harsono, “Realisasi dan Pengujian Antena Mikrostrip Array 4 Elemen dengan Polarisasi Melingkar untuk Aplikasi 4G/LTE,” *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 6, no. 2, p. 244, 2018.
- [6] T. Hariyadi, S. Mulyasari, and Mukhidin, “Design and Simulation of Microstrip Hairpin Bandpass Filter with Open Stub and Defected Ground Structure (DGS) at X-Band Frequency,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 306, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/306/1/012124.
- [7] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, vol. 72, no. 7. 2005.
- [8] A. Akbar, S. Alam, and I. Surjati, “Perancangan Antena Mikrostrip Patch Circular (2,45 GHz) Array dengan Teknik Pencatu Proximity Sebagai Penguat Sinyal Wi-Fi,” *Setrum Sist. Kendali-Tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer*, vol. 6, no. 2, p. 215, 2017, doi: 10.36055/setrum.v6i2.2599.
- [9] D. Rusdiyanto, C. Apriono, and D. W. Astuti, “Analisis Parameter Antena Mikrostrip dengan Metode Split Ring Resonator pada Frekuensi L-Band,” *Matrix J. Manaj. Teknol. dan Inform.*, vol. 10, no. 3, pp. 133–139, 2020, doi: 10.31940/matrix.v10i3.2176.