

Sistem Antena Reflektor Parabola Untuk Radar Cuaca Menggunakan Metamaterial Sebagai *Feed* Antena

1st Salshabila Natasya

School of Electrical Engineering
Telkom University
Jakarta, Indonesia

salshabilanatasya@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Kamelia Quzwain

School of Electrical Engineering
Telkom University
Jakarta, Indonesia

kquzwain@telkomuniversity.ac.id

3rd Aisyah Novfitri

School of Electrical Engineering
Telkom University
Jakarta, Indonesia

aisyahnovf@telkomuniversity.ac.id

Abstrak - Indonesia sebagai negara kepulauan di daerah tropis sering mengalami cuaca yang tidak stabil, sehingga dibutuhkan sistem pemantauan yang andal seperti radar cuaca. Penelitian ini mengembangkan antena mikrostrip berbasis reflektor untuk meningkatkan *gain* dan *bandwidth* pada sistem radar cuaca. Antena dirancang menggunakan struktur *E-Shaped Microstrip Antenna* (MSA) dengan penambahan metamaterial sebagai elemen peningkat performa. Substrat yang digunakan adalah Rogers RT 5880, dan antena dioperasikan pada frekuensi 5,8 GHz. Simulasi dan analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak simulator desain antena dan simulator pemrograman teknis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa antena yang dikembangkan mampu mencapai *gain* sebesar 25,99 dBi, *bandwidth* 106,8 MHz, *return loss* -12,07 dB, dan nilai VSWR sebesar 1,04. Dengan performa tersebut, antena ini terbukti layak digunakan sebagai bagian dari sistem radar cuaca di Indonesia untuk meningkatkan akurasi dan keandalan pemantauan cuaca.

Kata Kunci - Antena Parabola, *E-Shaped Microstrip Antenna*, Metamaterial, Radar cuaca.

I. PENDAHULUAN

Kondisi geografis Indonesia sebagai negara kepulauan mempengaruhi perubahan cuaca yang tidak stabil dan rentan akan fenomena cuaca ekstrim seperti kekeringan atau curah hujan yang berlebih. Untuk mengatasi hal tersebut diperlukan sistem peringatan dini yang efektif dan akurat secara *real-time* menggunakan teknologi radar cuaca. Radar cuaca merupakan alat pengamatan berbasis penginderaan jauh yang dapat mengetahui kondisi partikel yang ada di atmosfer guna mendeteksi dan memprediksi kondisi cuaca [1].

Dalam pengembangannya melibatkan antena, seperti antena parabola, untuk memfokuskan dan menerima gelombang radio dari objek atmosfer dan jangkauan geografis yang luas menggunakan frekuensi

C-Band berkisar 4 - 8 GHz, seperti pada radar yang dioperasikan oleh Badan Meteorologi Klimatologi Dan Geofisika (BMKG) pada rentang 5600 - 5650 MHz [2]. Antena parabola dengan kinerja *gain* yang tinggi dapat mendukung sistem radar sebagai pendeteksi yang akurat. Fleksibilitas desain dengan dimensi yang relatif kecil, dan kemudahan fabrikasi, mendukung antena mikrostrip menjadi solusi alternatif yang tepat dalam pengembangan *Feed* (sistem pencatu) antena parabola. Namun, penggunaan antena mikrostrip memiliki *bandwidth* dan karakteristik *gain* yang rendah [3].

Terdapat beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan berbagai pendekatan, seperti penggunaan antena bowtie dengan reflektor parabola untuk layanan *boardband wireless access* yang menunjukkan peningkatan *gain* hingga 12,45 dB [4]. Penelitian lainnya adalah *Feed* antena *inverted E-Shape* serta *Feed* antena berbasis metamaterial [5], [6], [7].

Maka, penelitian ini mengusulkan penggunaan antena reflektor dengan modifikasi mikrostrip seperti penambahan metamaterial sebagai *feeding system* atau sistem pencatu antena reflektor untuk meningkatkan *gain* untuk keperluan radar cuaca yang akurat. Solusi ini memiliki keunggulan seperti bobot yang lebih ringkas dan sederhana, meskipun kelemahan utama mikrostrip adalah *gain* yang rendah, sehingga reflektor digunakan untuk memaksimalkan kinerja antena.

II. KAJIAN TEORI

A. Radar Cuaca

Radar awalnya dikembangkan untuk keperluan militer pada masa Perang Dunia II dan bekerja dengan gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi dan mengukur objek. Radar cuaca merupakan bentuk penginderaan jauh yang digunakan untuk memantau kondisi cuaca, memberikan prakiraan harian, serta peringatan dini [8]. Selain itu, radar cuaca berperan penting di sekitar bandara dengan menyediakan data cuaca akurat secara hampir *real-time*, termasuk prakiraan

curah hujan jangka pendek [9]. Secara teknis, radar cuaca umumnya beroperasi pada pita frekuensi S-band (2–4 GHz), C-band (4–8 GHz), atau X-band (8–12 GHz), pemilihan pita frekuensi disesuaikan dengan kebutuhan jangkauan, resolusi, serta ketahanan terhadap atenuasi hujan [10]. Jenis antenna yang paling umum digunakan adalah *parabolic reflector* berputar, karena mampu menghasilkan *narrow beam* (sekitar 1°) dengan *gain* tinggi untuk deteksi presipitasi jarak jauh [11].

B. Antena Mikrostrip

Antena berperan penting dalam transmisi dan dapat berfungsi sebagai pengirim maupun penerima gelombang elektromagnetik. Salah satu jenis yang banyak dikembangkan adalah antena mikrostrip karena bentuknya ringkas, mudah direalisasikan, dan dapat diintegrasikan dengan perangkat modern seperti GPS, PCS, DBS, dan radar. Meski demikian, antena mikrostrip memiliki kelemahan berupa efisiensi rendah dan *bandwidth* sempit. Struktur dasarnya terdiri dari *groundplane*, substrat, *patch*, dan *Feedline* atau saluran transmisi, dengan berbagai bentuk *patch* sebagai elemen peradiasi [12].

C. Parameter Antena Mikrostrip

Untuk mendapatkan performansi antena mikrostrip yang baik dan mengatasi kelemahan antena mikrostrip, dapat dilakukan modifikasi dimensi antena dan mengoptimasi parameter-parameter antena [13] sebagai berikut:

1. *Gain* merupakan perbandingan daya yang dipancarkan oleh sebuah antenna dibandingkan dengan radiator isotropis.
2. *Return loss* merupakan parameter seperti VSWR yang menentukan keadaan *matching*, dengan mengetahui berapa banyak daya yang hilang pada beban dan tidak kembali sebagai pantulan. Antena yang baik mempunyai nilai *return loss* dibawah -10 dB, yaitu 90% sinyal dapat diserap dan 10% dipantulkan kembali.
3. Gelombang berdiri (*Standing Wave*) terjadi jika kondisi *matching* antara transmitter dan antena tidak tercapai dan kemungkinan terjadi pemantulan.

D. Metamaterial

Untuk mengatasi kelemahan antena mikrostrip seperti *gain* rendah, digunakan metode berbasis metamaterial. Metamaterial memiliki sifat elektromagnetik unik yang tidak ditemukan di alam [14], dan diklasifikasikan menjadi empat jenis: ENG, DPS, MNG, dan DNG. DNG, atau Left-Handed Materials (LHM), mampu memfokuskan gelombang karena memiliki permittivitas dan permeabilitas negatif [15]. Seperti penelitian sebelumnya yang memakai kombinasi lapisan DNG dan DPS, sebagaimana digunakan dalam studi sebelumnya dengan material OMYA [16].

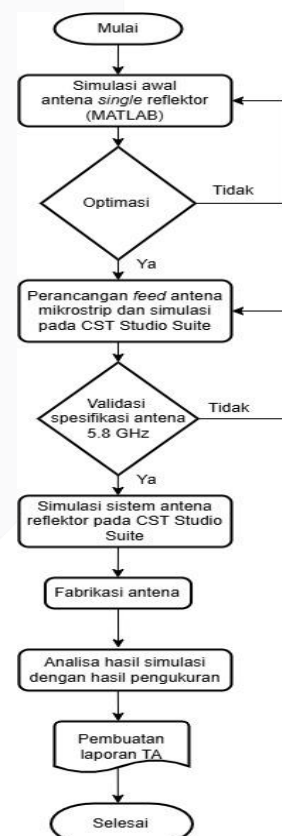
E. Antena *Single Reflektor Parabola*

Parabola dalam matematika dapat diartikan sebagai kurva yang terbentuk dari irisan kerucut oleh bidang yang sejajar dengan sisi kerucut. Kurva ini memiliki sifat simetris terhadap garis yang disebut direktris, dengan fokus sebagai titik pusat lengkung parabola [17]. Reflektor parabola merupakan sebuah alat pemantul yang permukaannya dirancang menyerupai bentuk kurva parabola. Reflektor parabola memiliki kemampuan pengarahannya yang sangat baik untuk mentransmisikan gelombang elektromagnetik, serta memiliki tingkat penguatan yang tinggi dan daya arah (*directivity*) yang besar [18]. Penggunaan reflektor parabola memungkinkan antena radar cuaca mencapai *gain* tinggi dan *beamwidth* sempit, sehingga meningkatkan kemampuan deteksi presipitasi jauh sekaligus menjaga akurasi sudut dan kualitas sinyal [19].

III. METODE

A. Diagram Alir Perancangan

Berikut merupakan metode perancangan antena tertera pada Gambar 1 dalam bentuk diagram alir.



Gambar 1 Diagram Alir Perancangan

Alur perancangan diawali dengan pendefinisian masalah dan tujuan penelitian, kemudian dilakukan simulasi awal antena single reflektor menggunakan MATLAB untuk memperoleh gambaran kinerja awal

desain. Apabila hasil belum sesuai, dilakukan proses optimasi sampai mendapatkan hasil simulasi yang optimal pada frekuensi kerja 5.8 GHz. Tahap berikutnya adalah perancangan dimensi *Feed* antenna *E-Shaped* MSA dengan penambahan lapisan metamaterial DNG [3]. Jika hasil simulasi di CST Studio Suite belum sesuai, dilakukan optimasi hingga diperoleh performa optimal pada frekuensi 5,8 GHz. Desain akhir kemudian disimulasikan sebagai sistem antenna reflektor parabola secara menyeluruh, difabrikasi, dan diuji melalui pengukuran. Hasil simulasi dan pengukuran dianalisis untuk disusun menjadi kesimpulan dan saran dalam laporan Tugas Akhir.

B. Desain dan Spesifikasi Antena

Tabel 1 Spesifikasi Antena Reflektor

No	Parameter	Nilai
Antena Mikrostrip		
1.	Frekuensi Tengah	5.8 GHz
2.	Bandwidth	≥ 60 MHz
3.	VSWR	≤ 2
4.	Gain	≥ 5 dBi
5.	Return Loss	≤ -10 dB
6.	Polaradiasi	Unidirectional
Antena Reflektor		
7.	Diameter Reflektor (D)	900 mm
8.	Panjang Fokus Reflektor (Fm)	69.66 mm
9.	Gain	>15 dBi
10.	Return loss	<-20 dB

E-Shaped MSA menggunakan bahan Rogers RT 5880 dengan konstanta dielektrik (ϵ_r) sebesar 2.2 dan ketebalan substrat (h) 1.575 mm [20].

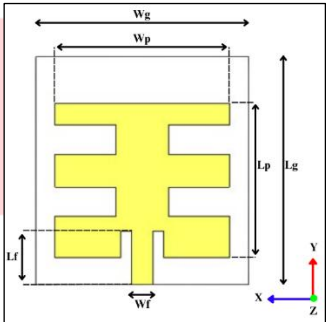
C. Perancangan Antena

Setelah perancangan menggunakan MATLAB menghasilkan dimensi antenna reflektor pada Tabel 3, dilakukan perancangan menggunakan CST Studio Suite. Hasil perhitungan untuk perancangan antenna dilampirkan pada Tabel 2.

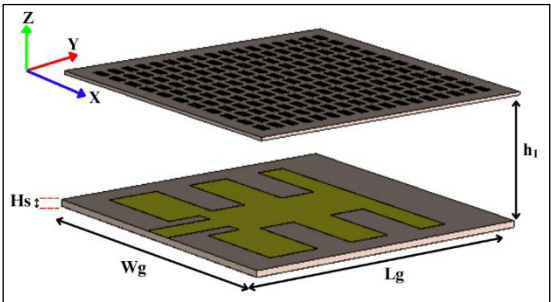
Tabel 2 Dimensi Perancangan *E-Shaped* dan Metamaterial

Variabel	Nilai (mm)
Lebar <i>Groundplane</i> (W_g)	70
Panjang <i>Groundplane</i> (L_g)	75
Lebar Substrat (W_s)	70
Panjang Substrat (L_s)	75
Panjang Substrat (L_s)	1.575
Lebar <i>Patch</i> (W_p)	57.5
Panjang <i>Patch</i> (L_p)	51.2
Lebar <i>FeedLine</i> (W_f)	7
Panjang <i>FeedLine</i> (L_f)	8.874

Celah antar elemen antenna (h_1)	30
Jarak antar 2 sel unit metamaterial DNG (S_m)	2
Jarak antar saluran konduktor (g_m)	0.17
Ketebalan substrat (h_s)	0.787
Lebar saluran konduktor (w_m)	0.15
Sumbu X pada satuan unit metamaterial DNG (l_x)	2
Sumbu Y pada satuan unit metamaterial DNG (l_y)	3.67



Gambar 2 Hasil Rancangan *E-Shaped* MSA

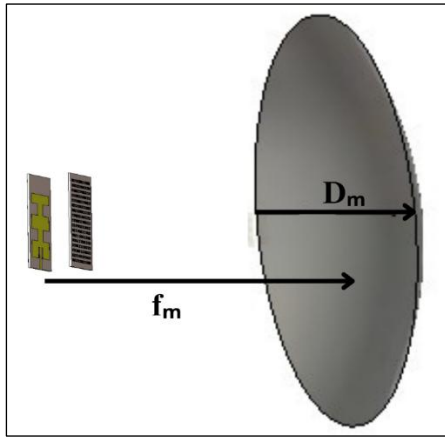


Gambar 3 Perancangan *Feed* Antena

Hasil simulasi perancangan *E-Shaped* MSA dengan metamaterial yang sesuai dengan perhitungan tampak Gambar 3 mendapatkan hasil parameter antenna yang optimal pada frekuensi yang diharapkan 5.8 GHz. Hasil perhitungan antenna reflektor dengan simulasi MATLAB dilampirkan pada Tabel 3.

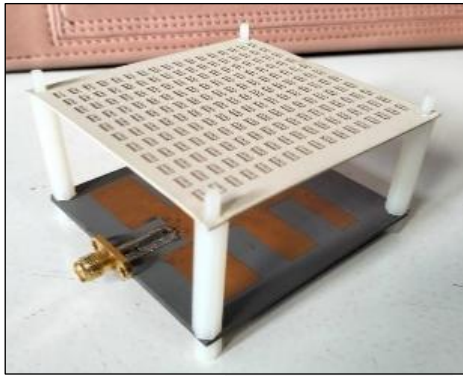
Tabel 3 Hasil Perhitungan Antena Reflektor dengan Simulasi MATLAB

Parameter	Nilai
Frekuensi	5.8 GHz
Diameter reflektor (D_m)	900 mm
Panjang Fokus Reflektor (f_m)	30.8 mm
Sudut maksimum reflektor	72°



Gambar 4 Sistem Antena Reflektor Parabola

Hasil simulasi perancangan penggabungan *Feed* dan reflektor yang sesuai dengan perhitungan tampak Gambar 4 mendapatkan hasil parameter antena yang optimal pada frekuensi yang diharapkan 5.8 GHz.



Gambar 5 Prototipe E-Shaped MSA dengan Metamaterial



Gambar 6 Prototipe Antena Reflektor berbasis *Feed* E-Shaped MSA dengan DNG Metamaterial

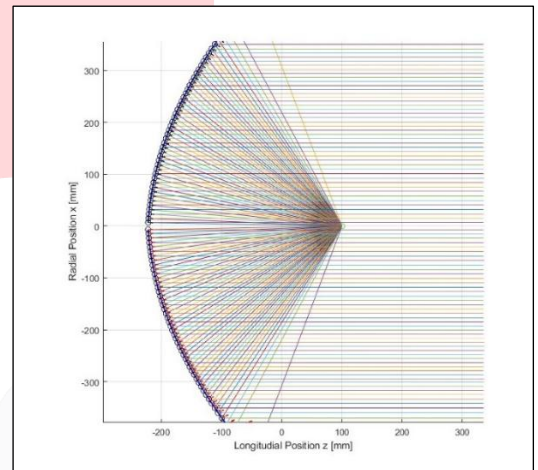
Gambar 5 tampak hasil fabrikasi E-Shaped MSA yang dengan lapisan metamaterial dan Gambar 6

tampak hasil penggabungan *feed* dengan reflektor. Yang kemudian dilakukan pengukuran daya terima (P_{rx}) terhadap sudut azimuth untuk memperoleh pola radiasi antena pada bidang H-plane, serta terhadap sudut elevasi dilakukan untuk mengetahui karakteristik polarisasi antena pada bidang E-plane dengan sudut elevasi bervariasi dari 0° hingga 360° .

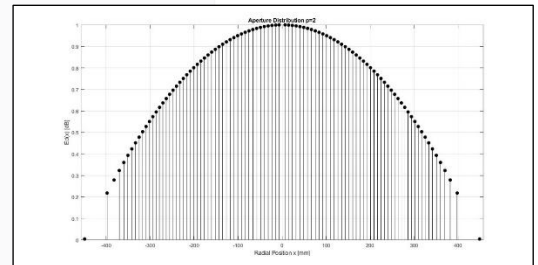
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perancangan Dengan Matlab

Dalam perancangan antena reflektor dilakukan melalui simulasi berbasis MATLAB dan didapatkan hasil bentuk reflektor dan *ray tracing* seperti pada Gambar 7.

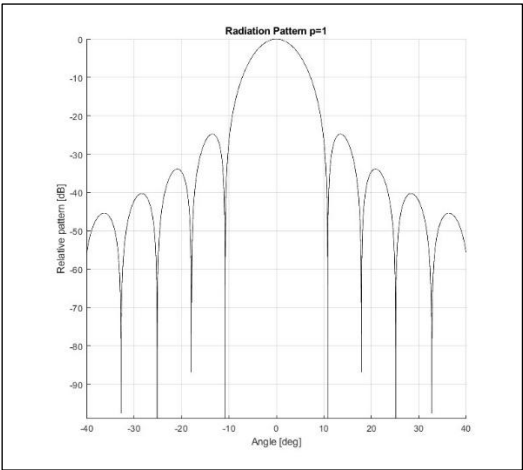


Gambar 7 Ray Tracing



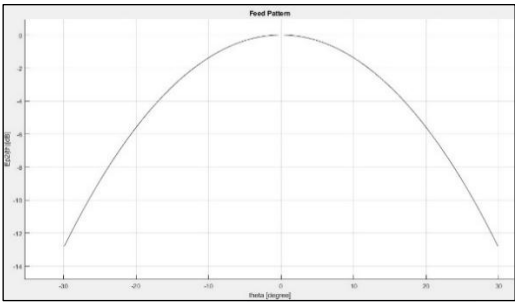
Gambar 8 Distribusi *Aperture*

Parameter kontrol $p=2$ mengacu pada fungsi distribusi amplitudo aperture, yang menentukan bentuk penurunan energi menghasilkan distribusi energi di sepanjang *aperture* antena seperti pada Gambar 8, dengan nilai maksimum energi di pusat *aperture* ($x=0$) sebesar $E(0)=1$ dB, dan nilai minimum di tepi *aperture* ($x = \pm x_m$) sebesar $E(x_m)=0$ dB.



Gambar 9 Polaradiasi

Polaradiasi yang didapatkan seperti yang ditunjukan pada Gambar 9, dengan *mainlobe* berada pada rentang sudut -10° hingga 10° dB dan level *sidelobe* (SLL) sebesar -25 dB.

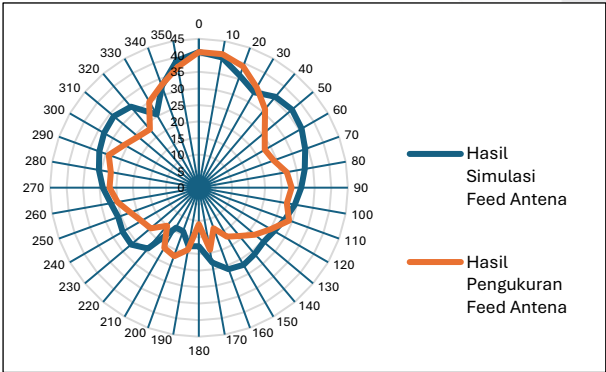


Gambar 10 Polaradiasi Feed

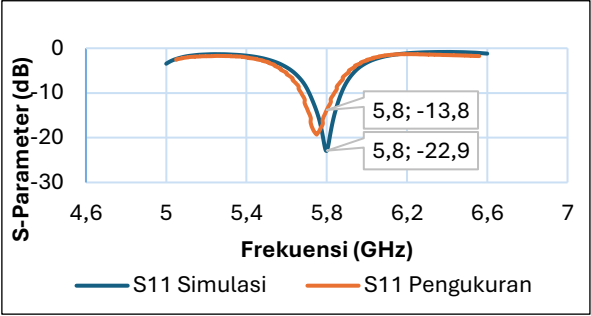
Polaradiasi antenna *Feed* minimum harus setidaknya -10 dB[21]. Pada Gambar 10 didapatkan hasil SLL -12.5 dB.

B. Hasil Perancangan Antena Reflektor

Persignifikan antara hasil simulasi dan pengukura seperti pada Gambar 11 disebabkan oleh faktor eksternal seperti gangguan lingkungan, refleksi *multipath*, dan ketidakpastian penempatan antenna.

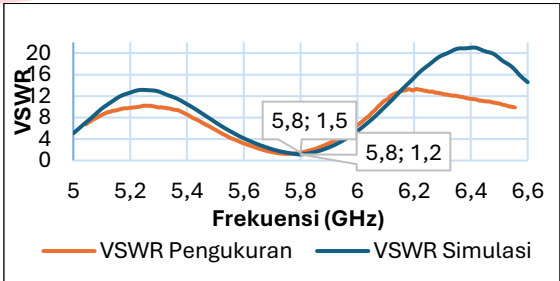


Gambar 11 Perbandingan Pola Radiasi Feed Antena



Gambar 12 Perbandingan Return loss Feed Antena

Karakterisasi antenna melalui *Return Loss* (S11) dan VSWR menunjukkan pencocokan impedansi yang baik pada frekuensi 5.8 GHz, pada Gambar 12 nilai S11 minimum -22.89 dB (simulasi) dan -13.42 dB (pengukuran), serta VSWR masing-masing 1.15 dan 1.5 seperti pada Gambar 13. Perbedaan kecil ini dapat dipengaruhi oleh toleransi fabrikasi, koneksi RF, sifat bahan, dan refleksi dari objek sekitar.



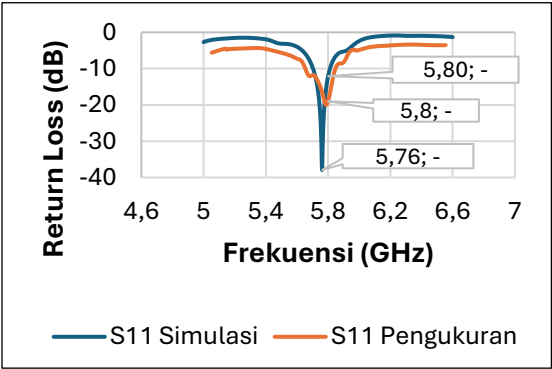
Gambar 13 Perbandingan VSWR Feed Antena

Hasil pengujian pola radiasi pada penggabungan *Feed* dan reflektor yang telah di fabrikasi ditunjukkan pada **Error! Reference source not found.** dengan polarisasi unidirectional dan polaradiasi omnidirectional.

Perbandingan hasil pengukuran *gain*, *return loss*, VSWR, dan *Bandwidth* pada penggabungan *Feed* dan reflektor dapat dilihat pada Tabel 4.

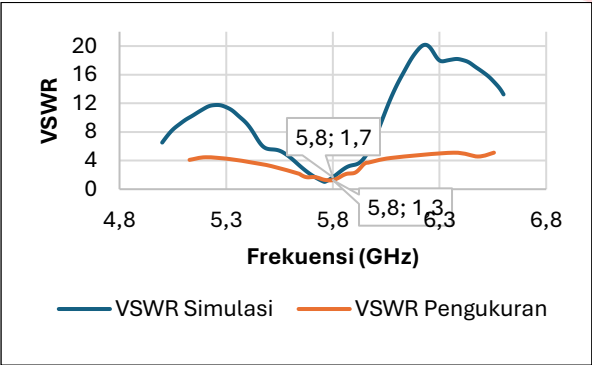
Tabel 4 Perbandingan Hasil Simulasi dan Pengukuran Penggabungan Antena Reflektor		
	Simulasi	Pengukuran
Gain	25.99 dBi	17.71 dBi
Return Loss	-12.07 dB	-19.074 dB
VSWR	1.04	1.2426
Bandwidth	106.8 MHz	120.66 MHz

Hasil simulasi menunjukkan performa radiasi lebih tinggi dibandingkan pengukuran nyata karena model simulasi yang ideal tidak mempertimbangkan kerugian nyata seperti rugi konektor, ketidaksempurnaan bahan, dan ketidaksesuaian dimensi antenna pasca fabrikasi.



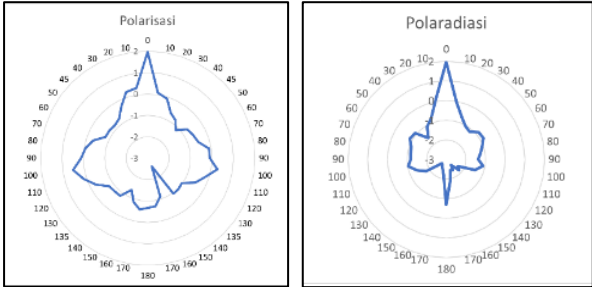
Gambar 14 Perbandingan return loss simulasi dan pengukuran penggabungan *Feed* dan reflektor

Berdasarkan Gambar 14, terlihat bahwa hasil simulasi menunjukkan nilai *return loss* minimum sebesar -12.07 dB pada frekuensi 5,8 GHz, sedangkan hasil pengukuran menunjukkan nilai minimum sebesar -19.074 dB pada frekuensi yang sama.

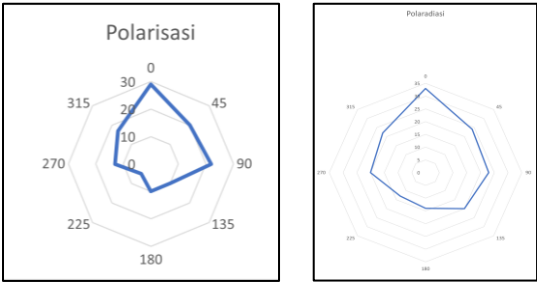


Gambar 15 Perbandingan VSWR simulasi dan pengukuran penggabungan *Feed* dan reflektor

Pada Gambar 15 di frekuensi kerja 5,8 GHz, simulasi menunjukkan fluktuasi VSWR tinggi di luar frekuensi kerja, namun turun tajam di frekuensi target. Pengukuran menunjukkan VSWR stabil dan rendah, dengan minimum 1,24.



(a)



(b)

Gambar 16 Hasil simulasi dan pengukuran polarisasi dan polaradiasi Penggabungan *Feed* dan Reflektor (a) simulasi (b) pengukuran

Gambar 16 menunjukkan perbedaan pola radiasi antara simulasi dan pengukuran antenna dengan reflektor. Simulasi menghasilkan pancaran fokus dan simetris di 0° dan 180°, sedangkan pengukuran menunjukkan pancaran menyebar di sudut lain akibat posisi reflektor yang terlalu dekat dan ruang uji tanpa *anechoic*. Meskipun begitu, antenna masih bisa bekerja.

Tabel 5 Perbandingan Hasil

Penelitian	Parameter			
	Return Loss	VSWR	Gain	Bandwidth
Hasil Simulasi E- <i>Shaped</i> dengan Metamaterial DNG Layer	-22.89 dB	1.15	10.11 dBi	159 MHz
Hasil Fabrikasi E- <i>Shaped</i> dengan Metamaterial DNG Layer	-13.42 dB	1.5	8.71 dBi	154.79 MHz
Hasil Simulasi Antena Reflektor dengan <i>Feed</i> antenna berbasis Metamaterial	-12.07 dB	1.04	25.99 dBi	106.8 MHz
Hasil Fabrikasi Antena Reflektor dengan <i>Feed</i> antenna berbasis Metamaterial	-19.074 dB	1.2426	17.71 dBi	120.66 MHz

Pada Tabel 5 hasil *gain* yang didapatkan baik melalui simulasi sebesar 25.99 dBi maupun pengukuran antenna fabrikasi sebesar 17.71 dBi mampu menjadi solusi untuk penggunaan radar cuaca yang akurat dalam frekuensi 5.8 GHz.

V. KESIMPULAN

Kondisi geografis Indonesia sebagai negara kepulauan menyebabkan cuaca yang tidak stabil dan rentan terhadap cuaca ekstrem, berdampak pada infrastruktur dan ekonomi. Untuk itu, dibutuhkan antenna dengan kinerja tinggi pada sistem radar cuaca. Penelitian ini mengusulkan pengembangan antenna reflektor dengan pencatu mikrostrip E-*Shaped* dan penambahan lapisan metamaterial DNG untuk meningkatkan performa tanpa mengorbankan desain ringkas. Antena dirancang pada frekuensi 5,8 GHz dan menunjukkan hasil *gain* 25,99 dBi, *return loss* -12,07 dB, VSWR 1,04, dan *bandwidth* 106,8 MHz. Hasil ini membuktikan bahwa kombinasi tersebut efektif dalam mengatasi keterbatasan antenna konvensional dan mendukung prediksi cuaca yang lebih akurat.

REFERENSI

- [1] M. F. Manalu, M. Wildan, and M. Faisal Yoga Dewantara, "Rancangan Antena Microstrip Rectangular Patch Dengan Tambahan Slot Untuk Aplikasi Antena Cuaca," *Jurnal Rekayasa Elektro Sriwijaya*, vol. 5, no. 2, 2024.
- [2] E. Wardoyo, "Analisis Interferensi Frekuensi Radar Cuaca C-Band di Indonesia," *Jurnal Telekomunikasi dan Komputer*, vol. 5, no. 2, p. 163, Feb. 2017, doi: 10.22441/incomtech.v5i2.1139.
- [3] S. R. Emadian and C. Ghobadi, "Enhanced Double Negative Metamaterial Microstrip Antenna: Bandwidth, Gain Improvement, and Size Reduction for Radar applications," *IEEE Access*, vol. 20, Nov. 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3498453.
- [4] Munawar, "Antena Bowtie dengan Reflektor Parabola untuk Layanan Broadband Wireless Access," *J Teknol*, vol. 23, no. 1, pp. 41–46, Apr. 2023.
- [5] H. Wasel and Z. Guoping, "Enhancing 5G Patch Array Antenna Gain Using DNG Metamaterial," *International Journal of Energy Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 93–96, 2018, doi: 10.5923/j.ijee.20180804.02.
- [6] W. N. Hamid, "Studi Perancangan dan Eksperimental Antena Frekuensi 5,8 GHz Teknik Log periodic Array dengan penambahan Metamaterial untuk Aplikasi Energy harvesting," 2024.
- [7] S. Hossain, Md. S. Rana, and Md. M. Rahman, "Design and analysis of inverted E-Shaped slotted patch microstrip antenna for multiband applications," in *Data Engineering and Applications*, vol. 1, J. Agrawal, S. Sharma, R. K. Shukla, and C.-S. Shieh, Eds., Springer, 2024, pp. 385–399. doi: 10.1007/978-981-97-2451-2_26.
- [8] Z. Sokol, J. Szturc, J. Orellana-Alvear, J. Popová, A. Jurczyk, and R. Céleri, "The Role of Weather Radar in Rainfall Estimation and Its Application in Meteorological and Hydrological Modelling — A Review," Jan. 20, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/rs13030351.
- [9] L. Widomurti and D. K. Suswanto, "Efektifitas Elevasi dan Produk Terbaik Estimasi Curah Hujan Radar Cuaca Berdasarkan Klasifikasi Awan," *Jurnal Widya Climago*, vol. 2, no. 2, pp. 29–37, May 2020.
- [10] S. Bin Oh, P. Kollias, J. S. Lee, S. W. Lee, Y. H. Lee, and J. H. Jeong, "Rain-rate Estimation Algorithm Using Signal Attenuation of Ka-band Cloud Radar," *Meteorological Applications*, vol. 27, no. 1, pp. 1–13, Jan. 2020, doi: 10.1002/met.1825.
- [11] A. S. Zhang, C. Y. Huang, S. Chen, P. F. Zhang, D. M. Hu, and L. S. Xiao, "Utilization of Specific Attenuation for Rainfall Estimation in Southern China," *Journal of Tropical Meteorology*, vol. 27, no. 1, pp. 48–61, Mar. 2021, doi: 10.46267/j.1006-8775.2021.005.
- [12] C. A. Balanis, *Antenna theory analysis and design*, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2005. [Online]. Available: www.copyright.com.
- [13] R. Yuwono, L. Julianto, Moch. A. Choiron, and A. Purnowidodo, "Perancangan Dimensi Antena Ultra Wide Band (Rugby Ball) Yang Paling Efektif Untuk Monostatic Microwave Radar," *TEKNO*, vol. 8, Aug. 2007.
- [14] M. M. Rahman, Y. Yang, and S. Dey, "Application of Metamaterials in Antennas for Gain Improvement: A Study on Integration Techniques and Performance," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 49489–49503, Mar. 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3552023.
- [15] T. J. Cui, D. R. Smith, and R. Liu, *Metamaterials: Theory, design, and applications*. Springer US, 2010. doi: 10.1007/978-1-4419-0573-4.
- [16] K. Quzwain, A. Ismail, and A. Sali, "Octagon fractal microstrip yagi antenna with a combined DNG and DPS layer structure," *Microw Opt Technol Lett*, vol. 59, pp. 1988–1993, Jan. 2017, doi: 10.1002/mop.30666.
- [17] M. Afkarulislam and H. Wijanto, "Perancangan dan Realisasi Antena Reflektor Parabola dengan Feed Point Mikrostrip untuk Stasiun Bumi Satelit GEO-KOMPSAT-2A," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 8, no. 5, p. 5368, Oct. 2021.
- [18] Nasrul, "Pembuatan Antena Reflektor Parabola Lingkaran untuk Penerima Sinyal

Televisi pada Jalur UHF,” *POLI REKAYASA*, vol. 13, no. 2, Apr. 2018.

[19] C. Apriono, B. P. A. Mahatmanto, and F. H. Juwono, “Rectangular Microstrip Array Feed Antenna for C-Band Satellite Communications: Preliminary Results,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 15, no. 4, Feb. 2023, doi: 10.3390/rs15041126.

[20] M. S. Rana *et al.*, “For wireless applications, design and analysis of patch antenna at 2.45 GHz,” *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 22, no. 4, pp. 799–811, Aug. 2024, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v22i4.25751.

[21] Rahman Dzul, “Desain dan Analisis Kinerja Antena Reflektor,” Penguin Group US, 2024.