

Peningkatan *Bandwidth* Antena dengan menggunakan Metode *Defected Ground Structure Double Layer*

1st Agung Hikmatullah
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

agunghikmatullah@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Bambang Setia Nugroho
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

bambangsetianugroho@telkomuniversity.ac.id

3rd Yus Natali
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

yusnatali@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Kebutuhan akses data untuk memperoleh informasi secara bebas sangat dibutuhkan masyarakat termasuk masyarakat Indonesia. Meningkatnya kebutuhan internet tentunya harus diimbangi dengan kecepatan akses data yang dapat memenuhi kebutuhan itu. *Long Term Evolution* (LTE) menjadi salah satu solusi yang dapat ditawarkan untuk layanan telekomunikasi *broadband* karena mempunyai kemampuan *downlink up to 100 Mbps* dan *Uplink up to 50 Mbps*. Pada proyek akhir diusulkan desain antena *microstrip* berbentuk *rectangular* yang di optimasi menggunakan metode *Defected Ground Structure* (DGS) dan *double layer* yang bekerja pada frekuensi 2,3 GHz. Metode DGS bertujuan untuk memperlebar *bandwidth* dan metode *double layer* digunakan untuk memperbesar *gain* dari antena yang dirancang. Jenis substrat dari antena yang akan digunakan yaitu FR4-Epoxy dengan nilai konstanta dielektrik 4,3 ketebalan substrat 1,6 mm. Berdasarkan hasil simulasi antena DGS *double layer* pada frekuensi 2,3 GHz didapatkan nilai *Return Loss* sebesar -18,911 dB, nilai *gain* sebesar 4,347 dBi, *bandwidth* mencapai 370,7 MHz, pola radiasi *omnidirectional* serta memiliki dimensi total 50 x 50 x 27,6 mm. Berdasarkan hasil pengukuran antena DGS *double layer* pada frekuensi 2,3 GHz didapatkan nilai *Return Loss* sebesar -12,91, *gain* 3 dBi, Pola radiasi *unidirectional* dB dan *bandwidth* sebesar 205 MHz.

Kata kunci— *Long Term Evolution, Defected Ground Structure, Double Layer, Antena Rectangular*

Abstract — The need for data access to obtain information freely is very much needed by the community, including the Indonesian community. The increasing need for internet must of course be balanced with the speed of data access that can meet that need. *Long Term Evolution* (LTE) is one of the solutions that can be offered for *broadband* telecommunications services because it has a *downlink capability of up to 100 Mbps* and an *uplink of up to 50 Mbps*. In the final project, a *rectangular microstrip* antenna design is proposed which is optimized using the *Defected Ground Structure* (DGS) method and a *double layer* that works at a frequency of 2.3 GHz. The DGS method aims to widen the *bandwidth* and the *double layer* method is used to increase the *gain* of the designed antenna. The type of substrate for the antenna to be used is FR4-Epoxy with a dielectric constant value = 4.3 substrate thickness = 1.6 mm.

Based on the simulation results of the double layer DGS antenna at a frequency of 2.3 GHz, the *Return Loss* value is -18.911 dB, the *gain* value is 4.347 dBi, the *bandwidth* reaches 370.7 MHz, the radiation pattern is *omnidirectional* and has a total dimension of 50 x 50 x 27.6 mm. Based on the measurement results of the double layer DGS antenna at a frequency of 2.3 GHz, the *Return Loss* value is -12.91 dB, 3 dBi *gain*, *unidirectional* radiation pattern and the *bandwidth* is 205 MHz.

Keywords— *Long Term Evolution, Defected Ground Structure, Double Layer, Antena Rectangular*

I. PENDAHULUAN

Seiring meningkatnya kebutuhan masyarakat Indonesia akan akses data yang cepat dan stabil, terutama untuk menunjang komunikasi dan akses informasi, teknologi jaringan seperti *Long Term Evolution* (LTE) menjadi solusi utama karena mampu menyediakan kecepatan unduh hingga 100 Mbps dan unggah hingga 50 Mbps. Untuk mendukung teknologi ini, dibutuhkan antena yang memiliki ukuran kecil namun mampu bekerja pada frekuensi tinggi, seperti antena *microstrip*. Meskipun memiliki keunggulan dari segi dimensi dan kemudahan fabrikasi, antena *microstrip* memiliki keterbatasan dalam hal *gain* dan *bandwidth* yang sempit. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode untuk meningkatkan performa antena, salah satunya adalah dengan menerapkan teknik *Defected Ground Structure* (DGS), yang bekerja dengan memodifikasi pola *ground plane* tanpa menambah kompleksitas struktur antena. Berdasarkan penelitian sebelumnya, penggunaan DGS terbukti dapat meningkatkan nilai *return loss*, *gain*, dan *bandwidth* pada antena *microstrip*. Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang antena *microstrip* patch *rectangular* berbasis substrat FR4 dengan metode DGS untuk aplikasi jaringan LTE pada frekuensi 2,3 GHz.

II. KAJIAN TEORI

1. Long Term Evolution

Layanan *mobile broadband* mengalami perkembangan pesat seiring dengan meningkatnya aktivitas masyarakat dan kebutuhan akan akses internet. Beragam teknologi seluler telah mengalami kemajuan, dimulai dari GSM/GPRS/EDGE (2G), UMTS/HSPA

(3G), hingga LTE. LTE merupakan standar jaringan seluler terbaru yang menawarkan performa lebih baik dibandingkan dengan GSM/EDGE dan UMTS/HSPA. Teknologi ini merupakan inovasi baru dalam sistem komunikasi mobile berkecepatan tinggi dan menjadi tahap transisi menuju generasi keempat (4G) teknologi radio, yang dirancang untuk meningkatkan kapasitas serta kecepatan jaringan seluler. LTE sendiri merupakan bagian dari proyek third generation partnership project (3GPP).

2. Antena Mikrostrip

Antena mikrostrip adalah konduktor logam yang dipasang ke tanah di antaranya adalah bahan substrat dielektris. Antena mikrostrip banyak digunakan untuk frekuensi gelombang mikro karena kenyamanan dan kompatibilitasnya pada papan sirkuit tercetak (PCB), yang juga mudah dibuat dengan elemen pancaran tunggal atau dengan beberapa elemen pancaran (array) [pertama]. Antena mikrostrip bisa disebut sebagai salah satu jenis antena yang memiliki keunggulan sederhana, enteng dan dapat juga custom-made. Pemakaian pada antena mikrostrip sangat tepat untuk penggunaan yang membutuhkan antena kompak seperti yang digunakan untuk pesawat , roket, satelit dan kapal laut.

3. Defected Ground Structure

Dalam beberapa waktu terakhir, terdapat perkembangan signifikan dalam aplikasi gelombang mikro dan milimeter, khususnya pada rangkaian Electromagnetic Band Gap (EBG). Beberapa rangkaian telah berhasil dikembangkan dengan memanfaatkan struktur yang dikenal sebagai Defected Ground Structure (DGS). DGS merupakan pola yang dibentuk atau diukir pada bidang ground [11]. Umumnya, struktur ini digunakan dalam rangkaian filter pada jalur mikrostrip untuk menghambat frekuensi tertentu, mirip dengan prinsip kerja struktur EBG. Selain diterapkan pada jalur mikrostrip dan filter, DGS juga dapat digunakan pada antena mikrostrip [11].

DGS merupakan teknik yang melibatkan kombinasi berbagai bentuk celah (slot) pada bidang groundplane. Untuk memperoleh bandwidth yang lebih luas, teknik ini menawarkan beberapa metode pemotongan pada groundplane [11]. Terdapat tiga metode utama yang dapat diterapkan, yaitu:

1. penyusutan ground secara vertical
2. penyusutan ground secara horizontal
3. penyusutan ground dengan lingkaran

Pemotongan ground secara vertical ini dilakukan dari 0,5 hingga 8 mm. agar mendapatkan hasil yang maksimal maka pemotongan dilakukan 2 sisi yaitu kanan dan kiri, dengan nilai parameter yang sama lebar dan sama Panjang[12]. Kekurangan yang dimiliki metode DGS ini yaitu menurunkan nilai Gain pada perancangan awal antena

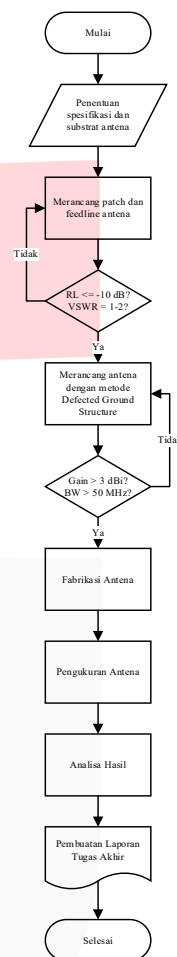
4. Double Layer

Salah satu cara untuk meningkatkan performa antena adalah dengan menambahkan lapisan parasitik. Pada antena mikrostrip, patch utama yang memancarkan gelombang dicetak di atas satu lembar bahan dielektrik (seperti FR4, Duroid, dan lain-lain) sebagai lapisan utama. Kemudian, ditambahkan patch tambahan yang dicetak pada lembar dielektrik lain dan disusun secara bertingkat sebagai elemen parasitik, dengan jarak pemisah tertentu (air gap). Desain seperti ini dikenal sebagai antena multilayer. Dalam konfigurasi ini, hanya patch utama yang diberi catuan langsung, sedangkan elemen parasitik mendapatkan eksitasi melalui kopling elektromagnetik dari medan dekat yang dipancarkan oleh patch utama.

III. METODE

1. Diagram Alir Penelitian

Antena yang dirancang adalah Antena mikrostrip yang berbentuk persegi panjang (*rectangular*) dengan substrat *FR-4 Epoxy*. Perancangan awal penelitian ini frekuensi 2,3 GHz tanpa metode *defected ground structure*(DGS). Selanjutnya dilakukan uji coba dengan penambahan metode *DGS* dengan iterasi melalui perangkat lunak komputer yaitu *CST*.



Gambar 1 (Diagram Alir Proses Penelitian)

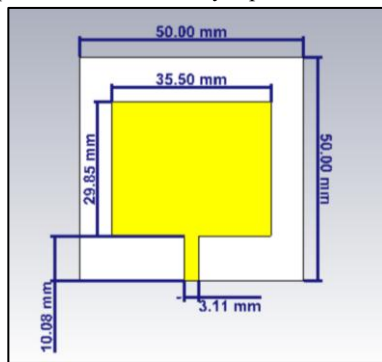
2. Spesifikasi Substrat

Jenis Antena	Mikrostrip
Patch	Rectangular
Frekuensi	2300 MHz
Substrat	FR-4 Epoxy
Konstanta dielektrik (ϵ_r)	4,3
Ketebalan substrat (h)	1,6 mm
Ketebalan konduktor (t)	0,035 mm
Loss tangent	0,025

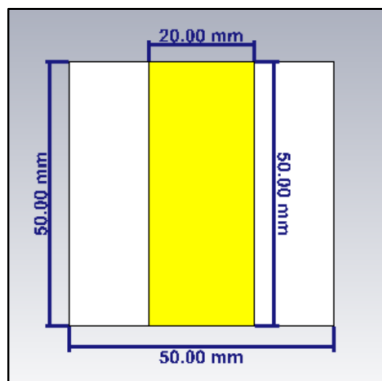
Tabel 1 (Spesifikasi FR-4 Epoxy)

3. Perancangan Antena Defected Ground Structure dengan penambahan Double Layer pada Simulator

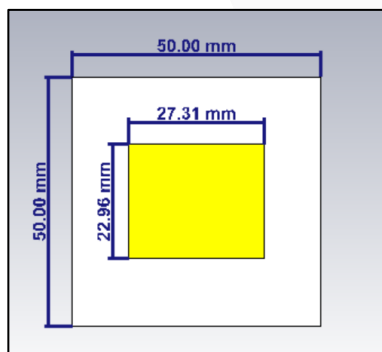
Pada rancangan Antena DGS yang sudah dibuat belum mendapatkan nilai yang ideal pada gain. Tahapan selanjutnya yaitu Antena DGS ditambahkan metode *Double Layer*. *Double Layer* penerapannya pada tugas akhir ini adalah dengan menambahkan 1 layer tambahan diatas layer utama dengan substrat FR4-Epoxy dan menambahkan patch pada layer 2 dengan ukuran patch yang telah diperkecil dari patch utama pada layer 1. Berikut merupakan rancangan Antena DGS dengan penambahan double layer pada simulator.



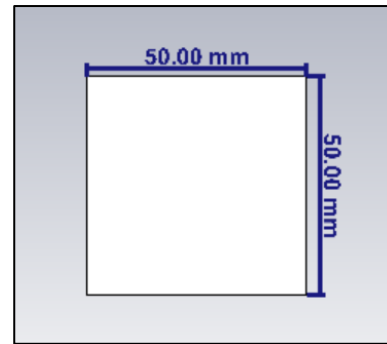
Gambar 2 (Tampak depan tampilan layer 1 antenna DGS dengan Double Layer)



Gambar 3 (Tampak belakang tampilan layer 1 antenna DGS dengan Double Layer)



Gambar 4 (Tampak depan tampilan layer 2 antenna DGS dengan Double Layer)



Gambar 5 (Tampak belakang tampilan layer 2 antenna DGS dengan Double Layer)

4. Fabrikasi dan Pengukuran

Untuk memvalidasi hasil simulasi antenna pada simulator, kemudian antenna yang diusulkan dalam penelitian ini telah dilakukan fabrikasi. Rancangan antenna double layer telah diimplementasikan pada material substrat FR-4 Epoxy dengan ketebalan substrat 1,6 mm dan permitivitas dielektrik (ϵ_r) 4,3 serta dengan ketebalan copper yang digunakan adalah 0,035 mm. Gambar 6 merupakan antenna utama yang telah difabrikasi.



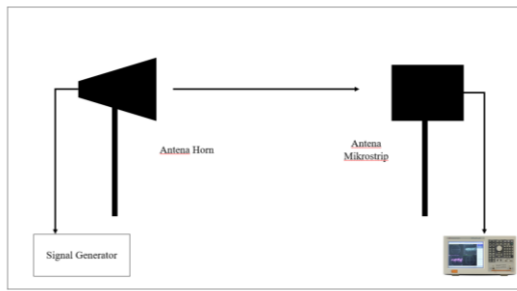
Gambar 6 (Hasil fabrikasi antenna DGS double layer)

Selain itu dua buah material substrat dengan ketebalan 1,6 mm dan permitivitas dielektrik (ϵ_r) 4,3 dipilih sebagai lapisan layer 2. Konektor SubMiniature version A (SMA) dipilih untuk digunakan pada antenna yang diusulkan. Konektor SMA tersebut disolder ke tepi feedline yang digunakan untuk menghubungkan kabel perangkat keras pengukuran ke antenna yang diusulkan. Vector Network Analyzer (VNA) digunakan untuk mengukur Return Loss (S_{11}) dari antenna utama dan antenna double layer dengan lapisan layer 2 yang difabrikasi, pengukuran menggunakan VNA dilakukan dua kali yang pertama menggunakan NanoVNA dan kedua menggunakan LibreVNA. Masing-masing melalui kabel koaksial 50 Ohm seperti yang diilustrasikan pada Gambar 7.



Gambar 7 (Ilustrasi Pengukuran return loss Antena)

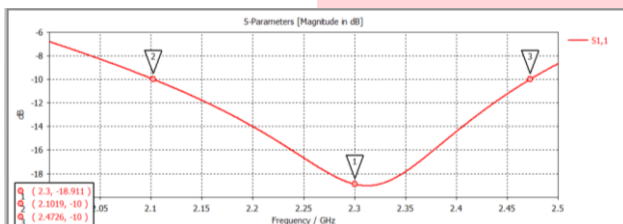
Selanjutnya adalah melakukan pengukuran pada gain dan pola radiasi yaitu dengan cara sebagai berikut.



Gambar 8 (Ilustrasi Pengukuran gain dan pola radiasi Antena)

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut merupakan hasil simulasi antenna yang telah dirancang penulis. Hasil merupakan antenna rancangan dengan metode defected ground structure dan double layer yang telah dioptimasi.



Gambar 9 (Hasil return loss dan bandwidth rancangan antenna)

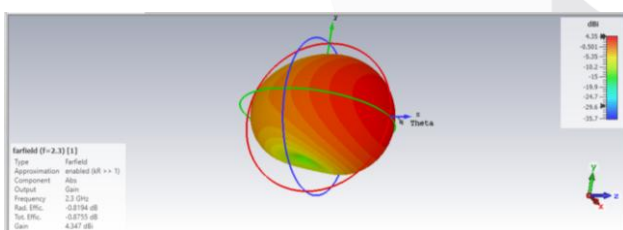
Dimana dari gambar plot di atas menunjukkan bahwa antenna metode DGS dengan penambahan double layer yang dirancang mampu menghasilkan nilai Return Loss yang baik pada frekuensi tengah 2,3 GHz yaitu sebesar -18,911 dB. Nilai dari Return Loss masih dikatakan diatas standar, dimana nilai standar untuk Return Loss adalah <-10 dB.

Rancangan antenna ini memberikan nilai rentang bandwidth yang besar

$$\text{Bandwidth} = 2,4726 - 2,1019 = 0,3707 \text{ GHz} = 370,7 \text{ MHz}$$

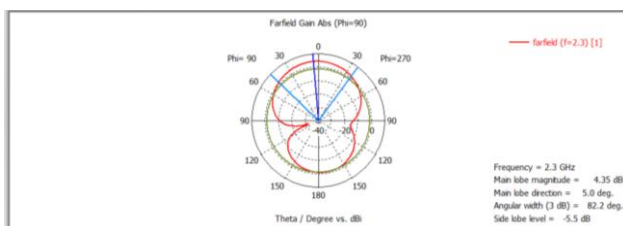
Dimana jika nilai ini dipersentasekan menjadi

$$\text{Percentage Bandwidth} = \frac{2,4726 - 2,1019}{2,3 \text{ GHz}} \times 100 = 16,12\%$$



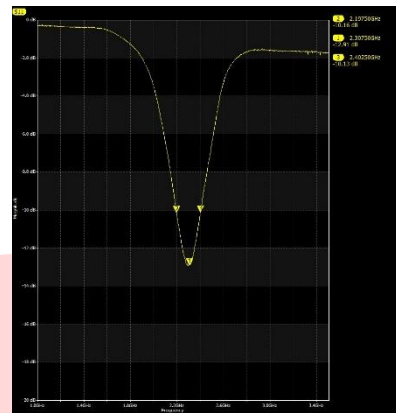
Gambar 10 (Hasil gain rancangan antenna)

Dari hasil simulasi antenna setelah ditambahkan metode double layer didapat gain sebesar 4,347 dBi yang mana gain mengalami kenaikan dan memenuhi target yang diinginkan untuk aplikasi LTE.



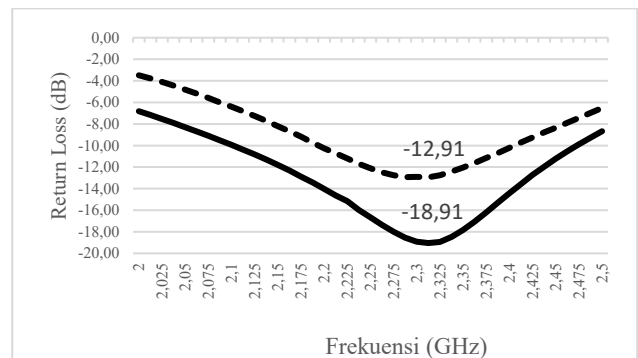
Gambar 11 (Hasil pola radiasi rancangan antenna)

Setelah simulasi antenna metode DGS dengan penambahan double layer telah dilakukan, kemudian antenna tersebut diuji dengan memfabrikasi dan dilakukan pengukuran. Kabel Coaxial 50 Ω digunakan untuk menghubungkan antenna dengan Vector Network Analyzer (VNA). Pengukuran Return Loss dilakukan menggunakan NanoVNA dan LibreVNA.



Gambar 12 (Hasil return loss pengukuran antenna)

Dari hasil pengukuran didapat bahwa nilai Return Loss mengalami penurunan dari yang sebelumnya -18,911 dB pada simulator menjadi -12,91 dB pada pengukuran. Namun nilai masih berada di atas standar dari Return Loss yaitu <-10 dB.



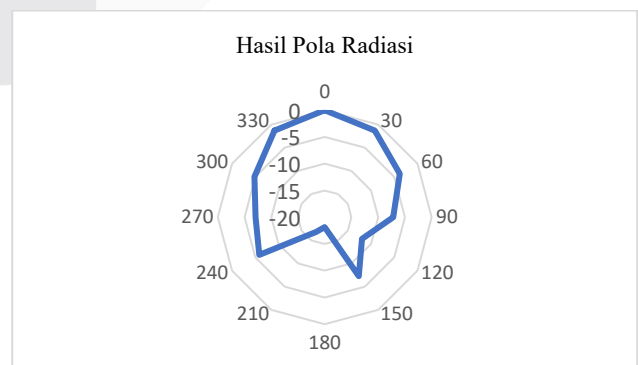
Gambar 13 (perbandingan return loss simulasi dan pengukuran)

Hasil pengukuran juga memberikan nilai rentang bandwidth

$$\text{Bandwidth} = 2,4025 - 2,1975 = 0,205 \text{ GHz} = 205 \text{ MHz}$$

Dimana jika nilai ini dipersentasekan menjadi

$$\text{Percentage Bandwidth} = \frac{2,4025 - 2,1975}{2,3 \text{ GHz}} \times 100 = 8,91\%$$



Gambar 14 (Hasil pola radiasi pengukuran antenna)

Dapat dilihat bahwa setelah dilakukan pengukuran didapat bahwa antenna penulis yang telah difabrikasi menghasilkan pola radiasi unidirectional dan gain 3 dBi.

Adanya perbedaan hasil Return Loss dan bandwidth antara hasil simulasi dan hasil pengukuran antenna DGS double layer dapat disebabkan oleh ketidaksempurnaan saat proses fabrikasi, misalnya dalam menempatkan lapisan superstrat, saat proses pencetakan antenna maupun pada saat proses penyolderan konektor.

Hasil Keseluruhan

Antenna Properties	Reference of Antenna			
	Perancangan Antena Segitiga Gerigi Circular Slot untuk Menguatkan Sinyal LTE [4]	Perancangan Antena Mikrostrip MIMO 2x2 Patch Persegi Panjang pada Frekuensi LTE 2,3 GHz [3]	Karya Penulis	
	Simulasi	Pengukuran	Simulasi	Pengukuran
Frekuensi	2,3 GHz	2,3 GHz	2,3 GHz	2,3 GHz
Return Loss	-24,6419 dB	-22,943 dB	-18,911 dB	-12,91 dB
Bandwidth	73,3 MHz	60 MHz	370,7 MHz	205 MHz
Gain	6,6598 dBi	3,483 dBi	4,347 dBi	3 dBi
Pola Radiasi	-	-	Omnidirectional	Unidirectional
Dimensi Antena	71,9239 x 72,9239 x 1,58 mm	150 x 60 x 1,6 mm	50 x 50 x 27,6 mm	50 x 50 x 27,6 mm

Tabel 2 (perbandingan hasil antenna penulis dengan jurnal pembeding)

V. KESIMPULAN

Berdasarkan perbandingan hasil simulasi antara antenna awal tanpa dan dengan menggunakan metode DGS double layer, terbukti bahwa melalui metode DGS double layer ini dapat meningkatkan kinerja gain sebesar 1,603 dBi atau sebesar 58,4% dan bandwidth sebesar 302,7 MHz atau 445,1%. Berdasarkan hasil pengukuran antenna awal dengan menggunakan metode DGS double layer pada frekuensi 2,3 GHz didapatkan nilai Return Loss sebesar -12,91 dB, gain sebesar 3 dBi, pola radiasi unidirectional dan bandwidth sebesar 205 MHz. dari hasil pengukuran tersebut meskipun mengalami penurunan dari antenna simulasi, dapat dikatakan antenna masih dalam keadaan bagus untuk aplikasi LTE karena memenuhi nilai target yang ditetapkan. Berdasarkan hasil yang telah didapat diketahui bahwa antenna yang diusulkan dengan menggunakan metode DGS dan double layer dapat diaplikasikan untuk penggunaan LTE pada frekuensi 2,3 GHz.

REFERENSI

- [1] Eva Y. D. Utami, M. Asra Gupita, Yuyu Wahyu, "Perancangan Antena MIMO Rectangular Patch Double Layer pada Frekuensi 2,35 GHz," *Jurnal Telematika*, vol. 19, no. 1, pp. 29-36, 2024.
- [2] A. C. N. K. H. D. Febby Eriane Putri, "Perancangan Antena Segitiga Gerigi Circular Slot untuk Menguatkan Sinyal LTE," *Jurnal ELECTRON*, vol. 2, no. 2, pp. 23-32, 2021.
- [3] Eva Yovita Dwi Utami, Muhamad Asra Gupita, Fransiscus Dalu Setiaji, "PERANCANGAN ANTENA MIKROSTRIP MIMO 2x2 PATCHPERSEGI PANJANG PADA FREKUENSI LTE 2,3 GHz," *JIRE (Jurnal Informatika & Rekayasa Elektronika)*, vol. 4, no. 1, pp. 12-20, 2021.
- [4] H. W. D. A. Andre Ulil Abshor Ichsanuddin, "Perancangan Dan Realisasi Antena Log Periodic X-Band Untuk Radar

- Pengawas Pantai," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 8, no. 6, pp. 3548-3554, 2022.
- [5] L. O. N. B. S. N. Dicco Febryand, "Perancangan dan Realisasi Antena Patch Rectangular Berbasis Metamaterial untuk Aplikasi 5G," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 8, no. 6, pp. 3566-3570, 2022.
- [6] W. M. C. L. Lin Li, "Successive Cancellation based Semidefinite Relaxation Detection and Decoding for Polar Coded Uplink Multiuser Massive MIMO System," *CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY*, 2019.
- [7] R. M. S. Chanwoo Kim, "Power-Normalized Cepstral Coefficients (PNCC) for Robust Speech Recognition," *IEEE/ACM TRANSACTIONS ON AUDIO, SPEECH, AND LANGUAGE PROCESSING*, vol. 24, no. 7, pp. 1315-1329, 2016.
- [8] H. Z. Y.-L. B. Z. (. C. Sihong Tao, "An Overlapped Switched-Beam Antenna Array with Omnidirectional Coverage for 2.4/5.8 GHz Three-Channel MIMO WLAN Applications," *IEEE Antennas and Wireles Propagation Letters*, pp. 1-5, 2019.
- [9] R. S. A. Valahdyo Arbandy, "Karakterisasi Antena Mikrostrip dengan H-Slot Untuk Aplikasi Synthetic Aperture Radar Pita X," *Jurnal ECOTIPE*, vol. 8, no. 2, pp. 65-74, 2021.
- [10] Z. Y. W. Achmad Rizal Ridwan Mattulada, "Perbandingan Daya Keluaran Rectenna Singleband dan Multiband pada RF Energy Harvesting 900-2400 MHz Universitas Telkom," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 760-767, 2018.
- [11] L. O. N. E. Gavin Faiz Heraldly, "Peningkatan Gain Antena Mikrostrip menggunakan Metamaterial sebagai Reflektor dalam Komunikasi 5G di Frekuensi 3,5 GHz," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 8, no. 5, pp. 5240-5249, 2021.
- [12] I. S. G. T. M. Zulfadli, "Perancangan Antena Mikrostrip Patch Segiempat Peripheral Slit menggunakan Metode Array 1x4 untuk Aplikasi Radar Maritim Frekuensi 3,2 GHz," *Jurnal Kajian Teknik Elektro*, vol. 3, no. 2, pp. 173-183, 2019.
- [13] A. Niko, "Rancang Bangun Antena Mikrostrip Patch dengan Metamaterial CRLH pada Frekuensi 110-130 MHz sebagai Receiver Gelombang Elektromagnetik dalam Sistem Komunikasi Pesawat Terbang," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.
- [14] B. S. N. E. Dzulfikar Natya Afif Hakim, "Perancangan dan Realisasi Slot Ring Patch Wearable Antenna dengan SRR Metamaterial untuk mengurangi Specific Absorption Rate (SAR)," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 9, no. 6, pp. 3666-3670, 2022.
- [15] B. S. N. L. O. N. Fadil Achmad Yuda, "Perancangan dan Analisis Antena Metamaterial Patch Sirkular untuk Teknologi 5G dengan CSRR pada Frekuensi 3,5 GHz," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 8, no. 6, pp. 11668-11681, 2021.
- [16] I. S. G. T. William Kristanto, "Perancangan Antena Microstrip Patch Multiband (2,4 GHz – 5,4 GHz) dengan

Teknik Log Periodic Array," *Ejournal Kajian Teknik Elektro*, vol. 3, no. 1, pp. 72-82, 2018.

- [17] B. S. N. S. M. L. O. N. S. M. Catharina Ira Dian Anggitaratna, "Perancangan dan Analisis Antena Mikrostrip berbasis Metamaterial pada Frekuensi 3,5 GHz untuk Aplikasi 5G," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 214-222, 2021.
- [18] R. F. S. S. M. D. H. G. Yan Soerbakti, "Investigasi Kinerja Antena berdasarkan Dispersi Anomali Metamaterial Struktur Heksagonal Split Ring Resonator," *Komunitas Fisika Indonesia*, vol. 17, no. 2, pp. 74-79, 2020.
- [19] R. I. Y. J. Y. D. W. A. D. A. C. C. A. Yus Natali, "Study on Defected Ground Structure Models with Miniaturized Patches for Broadband Wireless Systems," *Journal of Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 168-174, 2024.
- [20] M. L. Yus Natali, "Gain Enhancement Using Stub and Stacked Hexagon Microstrip Antenna for 5G Communication," *International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications*, pp. 49-52, 2019.
- [21] R. M. I. S. T. F. D. A. C. Y. N. Dian Widi Astuti, "Bandwidth Enhancement for Half Mode Substrate Integrated Waveguide Antenna using Defected Ground Structures," *INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS*, vol. 69, no. 3, pp. 449-454, 2023.
- [22] Ahmad Fachri Haekal, Joni Fat, Hadian Satria Utama, "ANALISIS ANTENA MIKROSTRIP PATCH RECTANGULAR SUBSTRAT FR-4 PADA FREKUENSI 2,3 GHZ UNTUK APLIKASILTE," *TESLA J. Tek. Elektro*, vol. 23, no. 2, pp. 171-180, 2021.