

RANCANG BANGUN ANTENA BROADBAND UNTUK APLIKASI 5G [Broadband Antenna Design for 5G Application]

Julian Mindria Rosyadi ¹, Cahyo Mustiko O. M ², Sudi M. Al Sasongko ³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro Universitas Mataram

¹mindriajulian@gmail.com, ² cahyo,muvianto@unram.ac.id, ³ mariyantosas@unram.ac.id

ABSTRAK

Perluasan frekuensi adalah tantangan pada implementasi teknologi 5G sehingga diperlukan antena broadband yang mampu mencakup pita frekuensi 5G pada sub-6 GHz. Penelitian ini merancang antena mikrostrip patch menggunakan metode stepped impedance, partial ground plane dan triangular feed line untuk memperoleh profil antena broadband. Konfigurasi antena mikrostrip patch array 1x2 antena diwujudkan dengan mengimplementasikan wilkinson power divider sebagai saluran pencatu. Reflektor logam diletakkan dibelakang antena array untuk meningkatkan direktivitas dan gain antena rancangan. Wideband t-junction power divider diaplikasikan untuk merealisasikan array 2x2. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa antena dapat bekerja pada empat pita frekuensi yaitu 900, 1800, 2300 dan 3500 MHz dengan karakteristik return loss < -10 dB, VSWR < 2 dan bandwidth 100 MHz pada keempat pita frekuensi tersebut. Nilai gain puncak 16,5 dBi diperoleh pada frekuensi 2300 MHz dengan total dimensi antena pabrikan adalah 800 x 200 x 105 mm³. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa antena layak digunakan pada aplikasi 5G sub-band 6 GHz.

Kata kunci : antena, broadband, power divider, 5G, array, reflektor metal

ABSTRACT

Frequency expansion is a challenge in the implementation of 5G technology, broadband antenna is needed to cover the 5G frequency band within the sub-6 GHz. This study designed a microstrip patch antenna using the stepped impedance, partial ground plane and triangular feed line methods to obtain a broadband profile. The configuration of the 1x2 microstrip patch array antenna is realized by implementing the Wilkinson power divider as feedline. Metallic reflector are placed behind the antenna to increase the directivity and gain of the designed antenna. Wideband t-junction power divider is applied to realized an array of 2x2. The results of this study indicate that the proposed antenna can operate at 900 MHz, 1800 MHz, 2300 MHz and 3500 MHz with return loss characteristics < -10 dB, VSWR < 2 and 100 MHz bandwidth. The peak gain of 16.5 dBi obtained at 2300 MHz with The total dimension of the fabricated antenna is 800 x 200 x 105 mm³. These results make the presented antenna appropriate for 5G sub-6 GHz applications.

Keywords: antenna, broadband, power divider, 5G, array, metallic reflector

PENDAHULUAN

Aplikasi teknologi nirkabel pada perangkat multimedia, transportasi dan sistem komunikasi bergerak berkelanjutan memerlukan implementasi sistem komunikasi generasi kelima (5G) untuk mengimbangi perkembangan teknologi terkini. Sejak awal teknologi 5G telah diperkenalkan konsepnya, banyak pihak telah melakukan kajian terkait

dengan kandidat frekuensi yang akan digunakan dalam teknologi 5G.

Pada tahun 2017, beberapa negara di eropa dan china telah mengumumkan penggunaan sub-band frekuensi 6 GHz yaitu 3.3-3.8 GHz untuk implementasi 5G, pita frekuensi n78 (3.5 GHz) telah banyak digunakan untuk produk 5G. Di Indonesia, implementasi layanan 5G telah dilakukan pada acara internasional seperti MotoGP Mandalika dimana layanan 5G disediakan oleh operator

seluler Telkomsel dan Indosat pada band LTE 3 (1800 MHz) untuk Indosat dan LTE 40 (2300 MHz) untuk operator Telkomsel.

Pengembangan antena mikrostrip untuk aplikasi 5G telah menjadi salah satu topik yang menarik dalam beberapa tahun terakhir. Ukuran yang low profile, mudah dipabrikasi dan kompatibilitas dengan sirkuit planar lain menjadi kelebihan antena mikrostrip ketika diimplementasikan pada sistem Array dan MIMO (Guo dan Ziolkowski, 2021).

Sebelumnya terdapat beberapa penelitian terkait antena mikrostrip untuk aplikasi 5G seperti perancangan antena mikrostrip yang beroperasi pada multi frekuensi untuk meningkatkan daya cakup pengaplikasian antena sehingga dapat digunakan untuk Wi-Fi, WIMAX dan 5G (Fauzan N dkk, 2020).

Terdapat berbagai macam metode untuk meningkatkan bandwidth antena mikrostrip, penggunaan AGS (Artificial Ground Structure) yaitu metode implementasi metamaterial pada bagian ground plane untuk meningkatkan bandwidth antena rancangan dapat diaplikasikan pada sistem 5G (Ira C dkk, 2021).

Perluasan frekuensi operasi komunikasi 5G menjadi tantangan lain dalam merancang antena untuk komunikasi 5G. Antena yang dirancang perlu beresonansi pada pita yang lebar dikarenakan sistem 5G bekerja pada 3 klasifikasi frekuensi berbeda yaitu low band (700-900 MHz), mid band (1800 – 3500 MHz) dan high band/millimeter wave. Namun, sangat sulit untuk memperoleh antena dengan bandwidth yang lebar tanpa memperbesar dimensi antena misalnya dengan menambah ketebalan substrat seperti pada stacked antenna. Permasalahan ini menjadi semakin buruk pada frekuensi rendah.

DASAR TEORI

A. Antena

Antena di definisikan sebagai sebuah alat yang berfungsi sebagai perangkat yang dapat mencarkan ataupun menerima gelombang elektromagnetik dan terbuat dari bahan logam konduktor. Dengan kata lain antena merupakan suatu susunan transisi yang merambat melalui ruang bebas dan dapat membawa gelombang elektromagnetik melalui saluran transmisi sehingga dapat dilepaskan (dipancarkan) dan juga ditangkap (diterima)

kembali menggunakan media yang sama (Balanis, 2016).

Pada suatu sistem komunikasi tanpa kabel modern, sebuah antena difungsikan sebagai antena yang dapat memancarkan sekaligus menerima gelombang elektromagnetik dengan baik pada suatu arah tertentu (Alaydrus, 2011).

B. Parameter Antena

Penentuan parameter antena adalah hal penting saat melakukan perancangan antena, parameter antena menjadi acuan pada proses perancangan antena. Parameter tersebut saling berhubungan dan semua parameter ditentukan untuk menggambarkan performansi antena secara lengkap (Balanis, 2005).

Pada penelitian ini, parameter yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Pola radiasi
2. Beamwidth
3. Gain
4. VSWR
5. Bandwidth

C. Perangkat PocketVNA

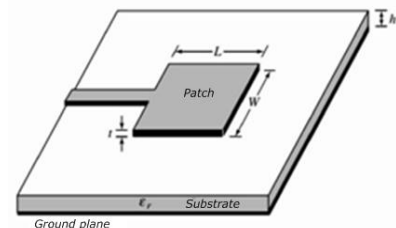
PocketVNA 2.0 adalah Perangkat yang digunakan pada pengukuran parameter pola radiasi, bandwidth, VSWR dan gain.



Gambar 1. PocketVNA 2.0

D. Antena Mikrostrip

Antena mikrostrip menjadi sangat populer pada 1970-an terutama untuk aplikasi ruang angkasa. Sampai saat ini digunakan untuk aplikasi pemerintah dan komersial. Antena ini terdiri dari sebuah patch konduktor, substrat dan ground.



Gambar 2. Antena mikrostrip patch kotak

E. Antena Array

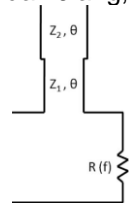
Penyusunan beberapa antena yang saling berdekatan akan menghasilkan pola radiasi yang lebih terarah. Beberapa antena dapat diukur dalam jarak tertentu dan dihubungkan satu sama lain untuk membentuk suatu pola radiasi yang diinginkan, konfigurasi ini disebut dengan konfigurasi array. Konfigurasi elemen dari antena array dapat disusun dalam berbagai bentuk. Untuk konfigurasi yang berbentuk suatu garis lurus disebut antena array linier, konfigurasi yang berbentuk bidang datar disebut array planar, dan konfigurasi yang berbentuk lingkaran disebut circular array. Sedangkan jenis array yang lain adalah conformal array, dimana elemen – elemennya terletak pada bidang tak datar.

F. Reflektor logam

Reflektor berbahan logam diaplikasikan pada antena mikrostrip dengan tujuan meningkatkan gain. Dengan meletakkan reflektor di belakang antena maka akan membalikkan radiasi backlobe dengan mengubah fasa backlobe 180° ke arah radiasi utama sehingga meningkatkan direktivitas dan efisiensi elektrik sehingga gain juga akan meningkat. Pengaturan Gap (H) antara reflektor dengan patch perlu dilakukan untuk memperoleh hasil yang optimum (Kumar dkk, 2020).

G. Stepped Impedance Resonator (SIR)

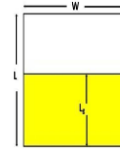
Struktur SIR telah banyak digunakan pada desain filter, duplexer dan unit metamaterial. SIR mengimplementasikan tingkatan impedansi rendah hingga impedansi tinggi pada suatu saluran transmisi. Saluran impedansi tinggi berperan sebagai induktor seri sedangkan saluran impedansi berperan sebagai kapasitor paralel. SIR resonator mengontrol respon frekuensi dengan mengatur rasio impedansi dan panjang resonator sehingga dapat diperoleh respon frekuensi yang lebih lebar (Ma dan Jiang, 2020).



Gambar 3. Model sirkit stepped impedance (Gowrish & Basu, 2017).

H. Partial ground plane

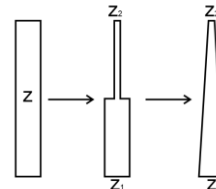
Teknik partial ground plane merupakan bagian dari teknik DGS (Defected Ground Structure), teknik ini direalisasikan dengan memotong bagian ground plane dengan panjang tertentu dengan tujuan untuk meningkatkan bandwidth dari antena. Implementasi partial ground plane dilakukan untuk memperoleh karakteristik broad band dari antena yang dirancang, dengan mengatur panjang ground (L_G) maka efek kopel elektromagnetik antara ground dan patch dapat disesuaikan untuk meningkatkan bandwidth.



Gambar 4. *Partial ground plane* (Ankan dkk, 2022).

I. Triangular Tapered Feed

Pengaplikasian triangular tapered feed (feedline berbentuk segitiga) bertujuan untuk meningkatkan bandwidth. Metode ini mentransformasikan saluran transmisi impedansi rendah (Z_1) ke saluran transmisi dengan impedansi tinggi (Z_2). Dimensi saluran transmisi (W_f) dengan impedansi Z dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Ghafouri-Shiraz dan Rabbani, 2014).



Gambar 5. Skema perancangan *triangular tapered feed*.

J. Power divider

Power divider merupakan suatu teknik yang dapat mendukung sebuah impedance matching pada suatu sistem transmisi antena, terutama antena mikrostrip. Power divider yang paling umum digunakan dengan metode Wilkinson power divider. Wilkinson power divider berfungsi untuk membagi sinyal masukan menjadi beberapa sinyal keluaran dengan cara membatasi efek refleksi sinyal, karena pada kondisi *loss less, three-port*

network tidak memiliki port-port yang secara simultan *match*. Wilkinson menambahkan sebuah resistor untuk mendapatkan ketiga port pada keluarannya *match* dan secara penuh akan mengisolasi port 2 dan port 3 pada frekuensi tengah (*fc*) (Alaydrus, 2011). Pengaplikasian Wilkinson power divider biasanya dikombinasikan dengan metode T-Junction yang secara umum digunakan pada antena Array.

K. Spektrum 5G

Saat ini layanan 5G telah di komersialisasi oleh beberapa operator telekomunikasi Indonesia, Untuk implementasi 5G di Indonesia, Indosat Ooredoo menggunakan pita frekuensi 1800 MHz atau 1,8 GHz, dengan lebar pita 20 MHz dalam rentang 1837,5 MHz sampai dengan 1857,5 MHz. Sementara Telkomsel saat ini mengoperasikan 30MHz di pita 2.300 MHz. GSMA bersama dengan ITU-R mengklasifikasikan spektrum frekuensi yang dialokasikan pada jaringan 5G dalam tiga klasifikasi utama, yaitu:

1. Sub 1 GHz
2. Spektrum 1 – 6 GHz
3. Spektrum diatas GHz

METODOLOGI

A. Rancangan Sistem

Proses perancangan dimulai dengan melakukan studi literatur yang dilanjutkan dengan penentuan *parameter* antena. Alur perancangan antena dibagi menjadi dua bagian yaitu bagian simulasi antena dan bagian realisasi antena. Keseluruhan desain dan simulasi antena dibagi menjadi tiga tahap yaitu perancangan antena mikrostrip *patch*, perancangan antena *patch array 1x2* dan perancangan antena *patch array 1x2* dengan reflektor. Tahap realisasi antena dilakukan guna mengukur performa antena yang sebelumnya telah dirancang dan disimulasikan. Pengukuran dilakukan pada tiga konfigurasi antena berbeda yaitu antena *patch array 1x2*, antena *patch array 1x2* dengan reflektor dan antena *patch array 2x2* menggunakan *power divider*.

B. Spesifikasi antena

Studi dilakukan untuk menentukan spesifikasi antena yang ingin dicapai. Tabel 1 menunjukkan spesifikasi antena sebagai acuan perancangan antena.

Tabel 1. Spesifikasi antena

Spesifikasi Antena	Keterangan
Jenis Antena	Mikrostrip
Frekuensi kerja	900 MHz, 1800 MHz, 2300 MHz, 3500 MHz
<i>Return loss</i>	< -10 dB
VSWR	< 2
<i>Gain</i>	> 5 dBi
Impedansi Input	$\pm 50\Omega$
<i>bandwidth</i>	>100 MHz pada frekuensi kerja

Spesifikasi substrat yang digunakan pada saat simulasi dan realisasi adalah sebagai berikut:

- Jenis substrat : FR-4 Epoxy
- Konstanta dielektrik (ϵ_r) :4.4
- Ketebalan lapisan dielektrik (h) :1.6 mm
- *Loss tangent (tan δ)* : 0.019
- Ketebalan bahan konduktor (t) :0.035mm

C. Pengujian antena

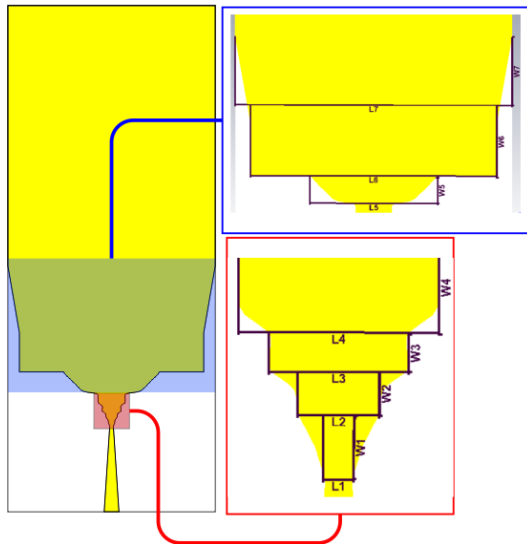
Pengujian antena bertujuan untuk mengkonfirmasi hasil simulasi pada aplikasi *CST Microwave Studio* terhadap realisasinya dengan menguji performa antena pada parameter-parameter berikut (Fauzan, 2021):

1. Penguatan daya/*gain* antena
2. Pola radiasi
3. *Bandwidth*

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Simulasi antena mikrostrip *patch*

Antena mikrostrip *patch* dirancang dengan dimensi total 110 x 45 mm². Hasil perancangan *patch* peradiator antena mikrostrip pada software *microwave studio* ditunjukkan pada gambar 6 dengan dimensi ditunjukkan pada tabel 2.



Gambar 6. Struktur peradiator antenna mikrostrip patch

Tabel 2. Dimensi patch peradiasi mikrostrip patch .

L1	0,78 mm	W1	1,90 mm
L2	2,40 mm	W2	1,30 mm
L3	4,10 mm	W3	1,15 mm
L4	5,90 mm	W4	2,80 mm
L5	19,8 mm	W5	4,20 mm
L6	40,00 mm	W6	12,00 mm
L7	45,00 mm	W7	11,35 mm

Struktur ground dengan teknik partial ground plane ditunjukkan pada gambar 7.



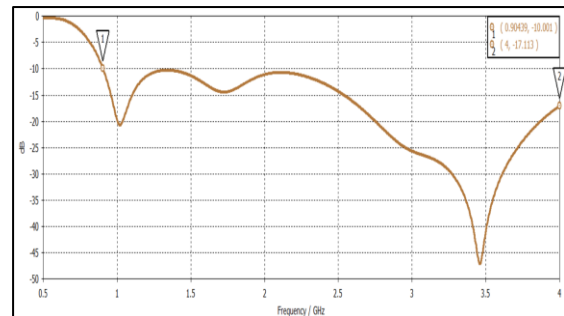
Gambar 7. Struktur partial ground plane

Dimensi ground plane telah dioptimasi untuk memperoleh profil broadband, dimensi ground plane ditunjukkan tabel 3.

Tabel 3. Dimensi ground plane antenna rancangan

Wg	40 mm	L1	3 mm
$\lambda/4$	11,7 mm	L2	2,5 mm
$\lambda/5$	8,4 mm	L3	2,5 mm
$\lambda/6$	6,3 mm	L4	2 mm
$\lambda/7$	5,25 mm	L5	2 mm
$\lambda/8$	4,2 mm	L6	8 mm

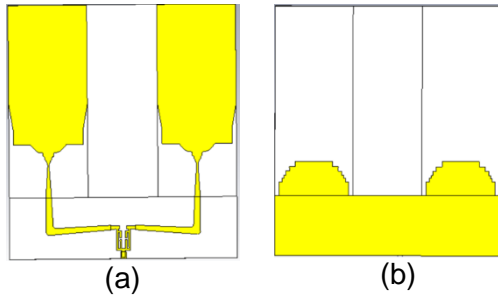
Nilai bandwidth antenna mikrostrip patch antenna diperoleh 900 – 4000 MHz dimana nilai memenuhi spesifikasi bandwidth perancangan sehingga dilanjutkan pada perancangan elemen array. Gambar 8 menunjukkan bandwidth mikrostrip patch.



Gambar 8. Bandwidth antenna mikrostrip patch

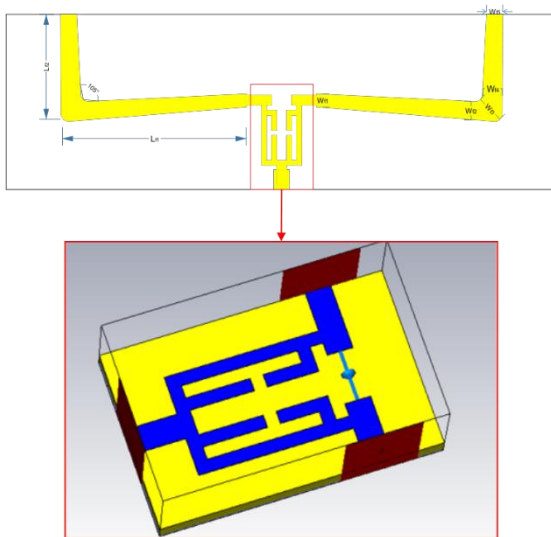
B. Simulasi antenna mikrostrip patch array 1x2

Antena mikrostrip patch pada perancangan sebelumnya dicatu dengan wilkinson power divider untuk merealisasikan elemen array 1x2. Dua antena mikrostrip patch diberi jarak 40 mm untuk mengurangi mutual coupling. Struktur antena mikrostrip patch array 1x2 ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9. antena mikrostrip patch array 1x2:
(a) tampak depan; (b) tampak belakang

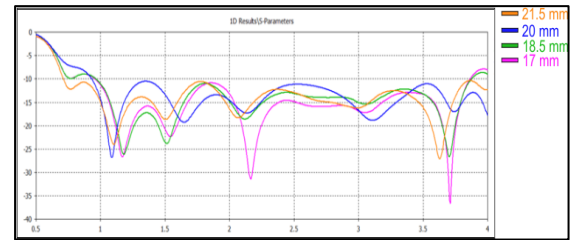
Antena dicatu dengan wilkinson power divider (WPD) yang memiliki bandwidth lebar (Sardi dkk, 2015).



Gambar 10. Struktur feedline dengan WPD

Triangular feed yang tercatu dari WPD digunakan untuk memperoleh respon broadband dengan transisi $Wf_1 = 4.1 \text{ mm}$ ($38,7 \Omega$) ke $Wf_2 = 2.6 \text{ mm}$ (56.54Ω) dimana panjang triangular feed pertama (Lf_1) = $36,78 \text{ mm}$. Triangular feed pertama terhubung secara tegak lurus pada sudut 105° dengan triangular feed kedua, dengan $Wf_3 = 5,5 \text{ mm}$ merupakan lebar transisi antara triangular feed pertama dan triangular feed kedua. Triangular feed kedua memiliki variabel transisi $Wf_4 = 4.1 \text{ mm}$ ($38,7 \Omega$) ke $Wf_5 = 3,2 \text{ mm}$ (50Ω) dengan konfigurasi variabel Lf_2 sebagai tuning untuk memperoleh return loss yang optimal. Hasil

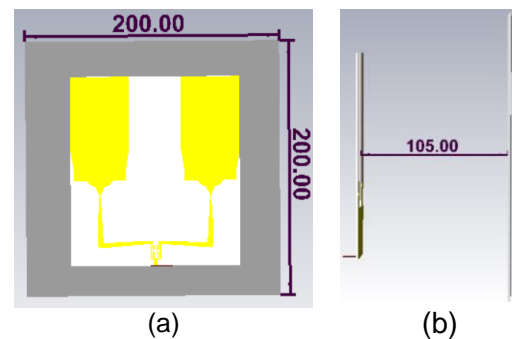
simulasi tuning Lf_2 ditunjukkan gambar 11 sebagai berikut.



Gambar 11. Tuning Lf_2 pada simulasi antena array 1x2

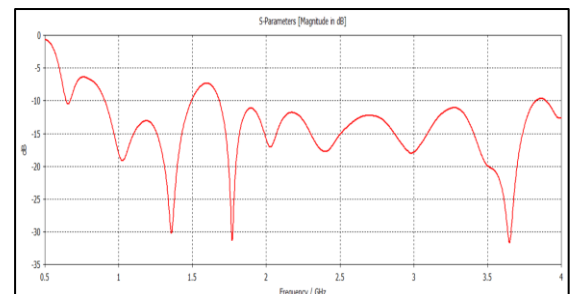
Nilai $Lf_2 = 21,5$ memenuhi spesifikasi bandwidth perancangan.

C. Aplikasi reflektor pada antena array 1x2



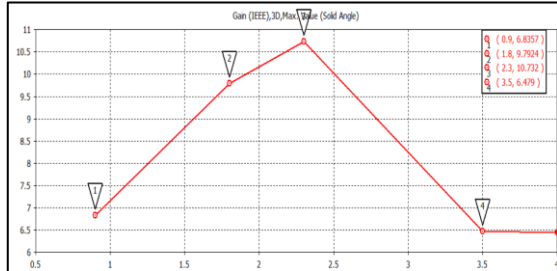
Gambar 12. Konfigurasi reflektor pada antena array 1x2

Reflektor PEC diletakkan di belakang antena array 1x2 untuk meningkatkan direktivitas dan gain. Nilai *return loss* antena dapat dilihat pada gambar 13.



Gambar 13. Return loss antenna array 1x2 dengan reflektor

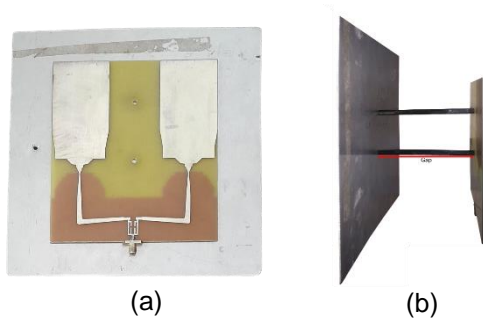
Antena memenuhi spesifikasi perancangan bandwidth yaitu > 100 MHz pada frekuensi kerja 900, 1800, 2300 dan 3500 MHz.



Gambar 14. Gain antenna array 1x2 dengan reflektor

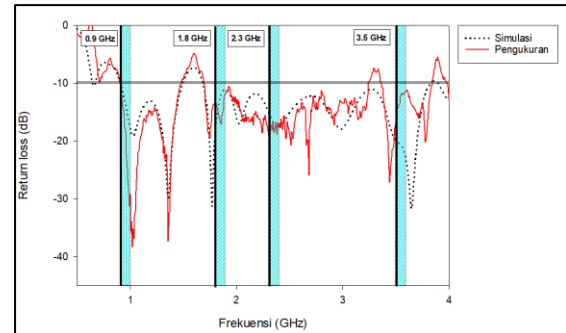
Gain > 5 dBi diperoleh pada frekuensi kerja 900, 1800, 2300 dan 3500 MHz sehingga antenna telah memenuhi spesifikasi perancangan dan dilanjutkan ke tahap realisasi.

D. Realisasi antenna dengan reflektor



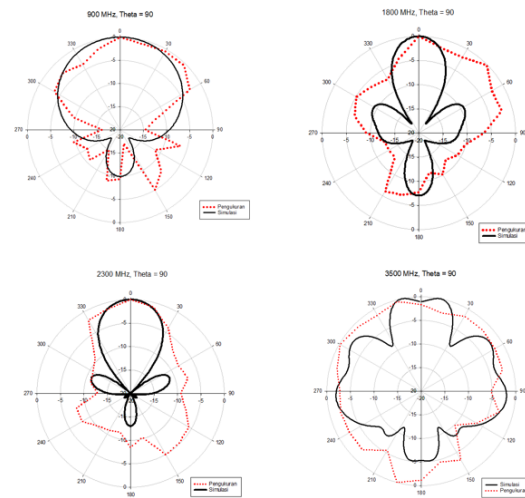
Gambar 15. Realisasi antenna array 1x2 dengan reflektor

Antena direalisasikan menggunakan substrat FR-4 epoxy dan reflektor berbahan aluminium. Hasil pengukuran return loss antenna ditunjukkan pada gambar 16.



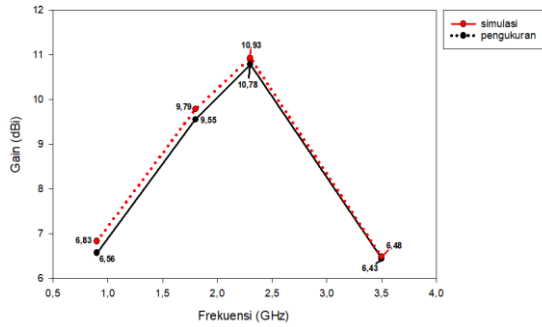
Gambar 16. Return loss antenna dengan reflektor

Hasil pengukuran menunjukkan antenna memiliki bandwidth 100 MHz pada empat frekuensi 900, 1800, 2300 dan 3500 MHz. hasil ini menunjukkan bahwa antenna memenuhi spesifikasi bandwidth perancangan.



Gambar 17. Pola radiasi antenna dengan reflektor

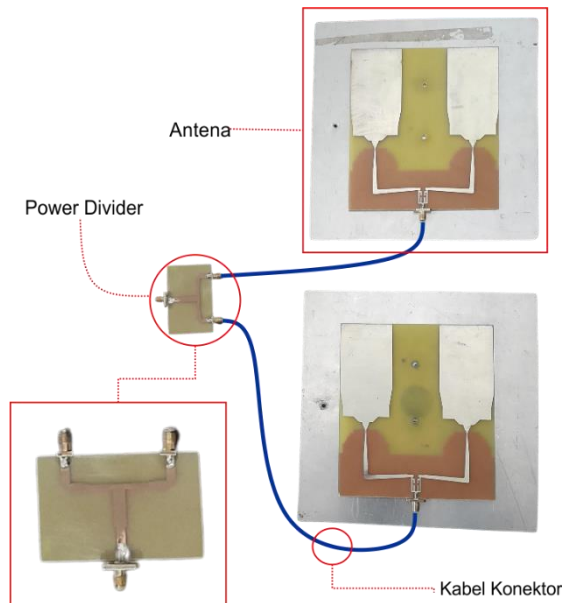
Hasil pengukuran pola radiasi azimuth menunjukkan antenna memiliki pola radiasi direksional pada keempat pita frekuensi, dimana terdapat pola daya bernilai 0 dB di salah satu titik.



Gambar 18. Gain antenna dengan reflektor

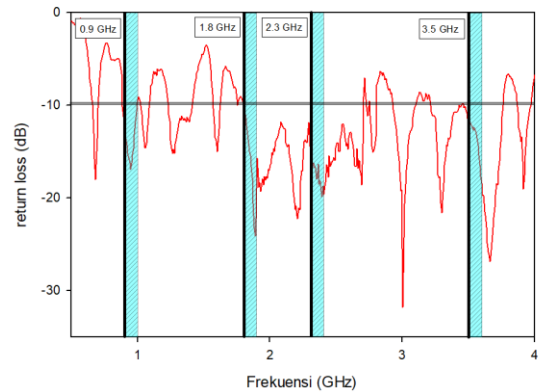
Nilai gain > 5 dBi diperoleh dari pengukuran sehingga hasil ini telah memenuhi spesifikasi perancangan antenna.

E. Konfigurasi antenna array 2x2 dengan power divider



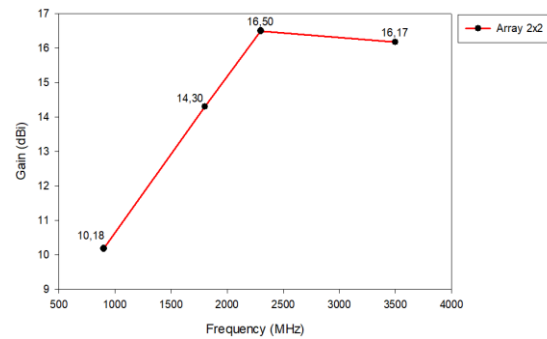
Gambar 19. Konfigurasi antenna array 2x2 dengan power divider

Wideband T-Junction power divider yang beresonansi pada frekuensi 0,8 – 5,3 GHz digunakan untuk merealisasikan antenna array 2x2 (Tiwari, dkk. 2018). Antena dikonfigurasi dalam bentuk panel untuk dianalisis performa bandwidth dan gain.



Gambar 20. Return loss antenna array 2x2 dengan power divider

Bandwidth > 100 MHz diperoleh pada keempat frekuensi 900, 1800, 2300 dan 3500 MHz sehingga antenna dengan konfigurasi tersebut masih layak digunakan untuk sistem 5G sub-6 GHz.



Gambar 21. Gain antenna array 2x2 dengan power divider

Nilai gain pada keempat frekuensi 900, 1800, 2300 dan 3500 MHz diperoleh > 10 dBi. Nilai ini memenuhi spesifikasi perancangan awal antenna yaitu > 5 dBi.

KESIMPULAN

Berdasarkan Analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan:

1. Perancangan antenna broadband yang mencakup pita frekuensi 900 MHz, 1800 MHz, 2300 MHz dan 3500 MHz untuk aplikasi 5G telah memenuhi spesifikasi awal perancangan antenna dan berhasil

- direalisasikan menggunakan bahan FR-4 fiber epoxy dan plat alumunium.
2. Berdasarkan hasil pengukuran, antena array 1x2 bekerja pada rentang frekuensi 762 – 4000 MHz dengan koefisien refleksi < -10 dB dan VSWR < 2. Antena memenuhi karakteristik broadband dengan fH/fL > 2 dimana diperoleh nilai 5,24. Nilai gain antena array 1x2 diukur pada pita frekuensi 900 MHz, 1800 MHz, 2300 MHz dan 3500 MHz, hasil pengukuran gain pada empat pita frekuensi tersebut secara berurutan adalah 3,36 dBi, 5,34 dBi, 6,28 dBi dan 5,19 dBi.
 3. Aplikasi reflektor aluminium meningkatkan gain antena array 1x2 dengan mempertahankan resonansi pada empat pita frekuensi 900 MHz, 1800 MHz, 2300 MHz dan 3500 MHz dengan koefisien refleksi < -10 dB dan VSWR < 2. Bandwidth 100 MHz dan pola radiasi direksional diperoleh dengan nilai gain pada empat pita frekuensi tersebut secara berurutan adalah 6,56 dBi, 9,55 dBi, 10,78 dBi dan 6,43 dBi.
 4. Implementasi power divider pada antena broadband array 2x2 dengan reflektor dapat meningkatkan gain dan mempertahankan resonansi pada keempat pita frekuensi 900 MHz, 1800 MHz, 2300 MHz dan 3500 MHz. Berdasarkan hasil pengukuran diperoleh nilai koefisien refleksi < -10 dB dan VSWR < 2 pada keempat pita frekuensi. Bandwidth 100 MHz diperoleh pada empat pita frekuensi dengan nilai gain secara berurutan adalah 10,18 dBi, 14,3 dBi, 16,5 dBi dan 16,17 dBi.

DAFTAR PUSTAKA

- Constantine, B. A. (2016). *Antenna Theory Analysis and Design (4th edition)*. John Wiley & Sons, Inc.
- Stutzman, W.L. 1981. *Antenna Theory and Design*, John Wiley & Sons: New York.
- Guo, Y.J., Ziolkowski, R.W. *Advanced Antenna Array Engineering for 6G and Beyond Wireless Communications*. John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2021.
- Fauzan, N. A., Ismail, N., & Lindra, I. (2020). Rancang Bangun Antena Mikrostrip Multi Band Dengan Patch Rectangular Untuk Frekuensi 2,4 GHz, 2,6 GHz, Dan 3,5 GHz Design Of Multi Band Microstrip Antenna With Rectangular Patch For 2,4 GHz, 2,6 GHz (Vol. 3).
- Rütschlin, M., Wittig, T., & Iluz, Z. (2016, May 31). *Phased antenna array design with CST STUDIO SUITE. 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2016*. <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2016.7481530>
- Admaja, A. F. S. (2015). Kajian Awal 5G Indonesia (5G Indonesia Early Preview). *Buletin Pos Dan Telekomunikasi*, 13(2), 97. <https://doi.org/10.17933/bpostel.2015.130201>
- Dinas Kominfo. (2016). Kajian Lanjutan 5G Indonesia. *Puslitbang Sumber Daya, Perangkat, Dan Penyelenggaraan Pos Dan Informatika Badan Penelitian Dan Pengembangan Sumber Daya Manusia Kementerian Komunikasi Dan Informatika*, iii.
- K. Ozenc, M. E. Aydemir, A. Oncu. 2013. "Design of a 1.26 GHz high gain microstrip patch antenna using double layer with Airgap for satellite reconnaissance," in *Proc. 6th Int. Conf. Recent Advances Space Technologies*, Istanbul, Turkey, June 2013, pp. 499–504.
- Ira, C., Anggitaratna, D., Bambang, S., Nugroho, S. T., Levy, O., & Nur, S. T. (2021). Perancangan Dan Analisis Antena Mikrostrip Berbasis Metamaterial Pada Frekuensi 3,5 GHz Untuk Aplikasi 5G. <https://doi.org/10.34818/eoe.v8i1.14268>
- Dinas Kominfo. (2018). *Studi Lanjutan 5G Indonesia 2018 Spektrum Outlook dan Use Case untuk Layanan 5G Indonesia*. <http://balitbangsdm.kominfo.go.id>
- Sardi, A., Errkik, A., El Abdellaoui, A.,

- Tajmouati, A., Latrach, M. 2015. A Novel Design of a Low Cost Wideband Wilkinson power divider. *International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering Vol:9, No:1, 2015*
- Khare, R., & Nema, R. (2012). *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Review of Impedance Matching Networks for Bandwidth Enhancement (Vol. 2, Issue 1)*. www.ijetae.com
- B., G., & Basu, A. (2017). *Analysis and Design of a Dual-Band Stepped Impedance PCB Monopole Antenna. IETE Journal of Education*, 58(1), 29–38. <https://doi.org/10.1080/09747338.2017.1332495>
- Barberty, M. S. 2005. *Design and Implementation of a Transceiver and a Microstrip Corporate Feed for Solid State X-Band Radar*. Electrical Engineering. University of Puerto Rico.
- Berens, J. L. 2012. *Design, Analysis, and Construction of an Equal Split Wilkinson power divider*. Marquette University.
- Lagunas, E., Tsinos, C. G., Sharma, S. K., & Chatzinotas, S. (2020). 5G cellular and fixed satellite service spectrum coexistence in C-band. *IEEE Access*, 8, 72078–72094. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985012>
- Chaabane, A., Mahri, O., Aissaou, D., Guebgoub, N. 2020. *Multiband Stepped Antenna for Wireless Communication Applications. Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials Vol. 50, No. 4(2020), 275 – 283*.
- Alaydrus, M. (2011). *Antena Prinsip dan Aplikasi (1st ed.)*. Graha Ilmu.
- Prasad, P., Singh, S., Kumar, A. (2021). A Wheel Shaped Compact UWB Antenna for GPR Applications. 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT).
- Kumar, A., Dwari, S., Pandey, G. P., Kanaujia, B. K., & Singh, D. K. (2020). A high gain wideband circularly polarized microstrip antenna. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 12(7), 678–687. <https://doi.org/10.1017/S1759078719001612>
- Ankan, S.S.A., Paul, L.C., Rani, T., Das, S.C., Lee, W.S. (2022). A Planar Monopole Antenna Array with Partial Ground plane and Slots for Sub-6 GHz Wireless Applications. *Pabna University of Science & Technology*.
- Tiwari, A., Pattapu, U., Das, S. (2018). A Wideband 1:2 T-Junction Power divider for Antenna Array with Optimum Results. *2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP 2018), 9-11 February, 2018*
- Mohamed, N., Yasmin Mohamad, S., Farihah Abdul Malek, N., & Nadia Mohd Isa, F. (2019). A Compact and Lightweight Microstrip Antenna Array with Wilkinson Power divider for X-band Application at 9.5 GHz. <https://doi.org/10.1109/APACE47377.2019.9021074>.
- Moradikordalivand, A., Rahman, T. A., Ebrahimi, S., & Hakimi, S. (2014). An equivalent circuit model for broadband modified rectangular microstrip-fed monopole antenna. *Wireless Personal Communications*, 77(2), 1363–1375. <https://doi.org/10.1007/s11277-013-1585-y>
- Agrawal, S., Parihar, M.S., Kondekar, P.N. (2017). *Broadband Rectenna for Radio Frequency Energy Harvesting Application. IETE JOURNAL OF RESEARCH, 2017*
- Romiza, A.A. (2019). *Desain Antena Dual Band Untuk Kebutuhan Massive MIMO*. Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh November.
- Fauzan, M.A. (2021). *Perancangan Antena Mikrostrip Patch Square Array 4x1 Menggunakan Double Reflector Defected Ground Structures Pada Frekuensi 2.45 Ghz*. Departemen Teknik Elektro, Universitas Mataram.
- Ma, Z. H., & Jiang, Y. F. (2020). L-shaped slot-loaded stepped-impedance microstrip structure UWB antenna. *Micromachines*,

11(9).

<https://doi.org/10.3390/mi11090828>

Alieldin, A., Huang, Y., Boyes, S. J., Stanley, M., Joseph, S. D., Hua, Q., & Lei, D. (2018). A Triple-Band Dual-Polarized Indoor Base Station Antenna for 2G, 3G, 4G and Sub-6 GHz 5G Applications. *IEEE Access*, 6, 49209–49216. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2868414>