

Simulasi peningkatan *broadband* antenna menggunakan material dielektrik artifisial dan *defected ground structure*

Hepi Ludyati^{1*}, Marisa Putri Supriadi², Ghania Yuntafa Putri³, Eka Pratiwi⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Kecamatang Parongpong, Kabupaten Bandung Barat, Indonesia

^{1*}hepi.ludyati@polban.ac.id, ²marisa.putri.tkom18@polban.ac.id, ³ghania.yuntafa.tkom19@polban.ac.id,

⁴eka.pratiwi.tcom417@polban.ac.id,

ABSTRAK

Antena merupakan perangkat telekomunikasi yang sangat penting dalam proses penerimaan dan pengiriman sinyal informasi. Operator telekomunikasi di Indonesia telah meluncurkan teknologi telekomunikasi 5G yang dapat melayani berbagai kebutuhan masyarakat. Untuk memenuhi semua kebutuhan layanan tersebut, diperlukan antena *multiple input multiple output* (MIMO) *conformal* yang memiliki *bandwidth* lebar dan *gain* yang tinggi. Akan tetapi, sebuah antena MIMO konvensional memiliki *bandwidth* yang sempit dan *gain* yang rendah. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja *broadband* antena dengan menggunakan material artifisial dielektrik dan *defected ground structure*. Antena dirancang pada frekuensi 26 GHz dengan *bandwidth* di atas 500 MHz dan *gain* lebih tinggi dari 5 dBi. Penggunaan material dielektrik artifisial dilakukan dengan cara menyisipkan *strip* konduktor pada substrat antena, sedangkan penggunaan *defected ground structure* yaitu sebuah metoda pencacatan *ground* yang dapat memberikan dampak *bandwidth* yang lebih lebar. Berdasarkan simulasi menggunakan aplikasi CST Microwave didapatkan hasil parameter antena MIMO dengan artifisial dielektrik dan *defected ground structure* berupa *gain* sebesar 5,59 dBi, *bandwidth* sebesar 5,12 GHz, dan *return loss* pada frekuensi tengah sebesar 39,81 dB.

Kata kunci: antena MIMO, 5G, dielektrik artifisial, *defected ground structure*

ABSTRACT

Antenna is a telecommunication device which is very important in the process of receiving and sending information signals. Telecommunication operators in Indonesia have launched 5G telecommunication technology that can serve various needs of society. To meet all these service requirements, a conformal multiple input multiple output (MIMO) antenna which has a wide bandwidth and high gain is required. However, a conventional MIMO antenna has a narrow bandwidth and low gain. This study aims to improve the performance of broadband antennas by using artificial dielectric material and defected ground structure. The antenna is designed at a frequency of 26 GHz with a bandwidth above 500 MHz and a gain higher than 5 dBi. The use of artificial dielectric material is carried out by inserting a conductor strip on the antenna substrate, while the use of a defected ground structure is a ground cutting method that can provide a wider bandwidth impact. Based on the simulation using the CST Microwave application, the results of the MIMO antenna parameters with an artificial dielectric and defected ground structure are a gain of 5.59 dBi, a bandwidth of 5.12 GHz, and a return loss at the center frequency of 39.81 dB.

Keywords: antenna MIMO, 5G, artificial dielectric, *defected ground structure*

1. PENDAHULUAN

Pertambahan pengguna teknologi di Indonesia yang semakin meningkat menuntut peningkatan layanan komunikasi yang handal, cepat, dan ekonomis. Operator telekomunikasi di Indonesia telah meluncurkan teknologi telekomunikasi 5G yang dapat melayani berbagai kebutuhan masyarakat seperti *video streaming*, *private voice call* dan *collective voice call over IP*, *video on demand*, *teleconference*, transmisi data, *telemedicine*, dan lain-lain. Konferensi Komunikasi Radio Dunia atau *World Radio Communications Conferences* (WRC) 2019 yang diselenggarakan di Mesir telah menetapkan 3 (tiga) pita frekuensi baru di *millimeter wave* untuk 5G yaitu 26 GHz (24,5 - 27,5 GHz), 40 GHz (37- 43,5 GHz) dan 66 GHz. Dalam hal ini, Indonesia diberikan otoritas layanan 5G pada

frekuensi 26 GHz dengan *bandwidth* 2.750 MHz. Dari *bandwidth* 2.750 MHz, setiap operator 5G diberikan *bandwidth* 500 MHz [1].

Kondisi geografis kontur bumi Indonesia yang beragam ketinggian dari permukaan laut, memungkinkan gelombang elektromagnetik pada layanan 5G mengalami redaman propagasi [2]. Redaman propagasi ini diakibatkan oleh banyaknya *obstacle* berupa bukit, gunung, dan pohon-pohon tinggi juga curah hujan tinggi yang menyebabkan level daya terima di *end user* tidak stabil atau yang dikenal dengan sebutan *fading* [3]. Jika operator telekomunikasi dapat menyediakan pancaran gelombang elektromagnetik pada frekuensi 5G lebih dari satu gelombang, maka *end user* akan berpeluang menerima gelombang elektromagnetik dengan level daya cukup walaupun terjadi *fading*. Antena yang memiliki kemampuan memancarkan lebih dari satu gelombang elektromagnetik adalah antena *multiple input multiple output* (MIMO) [4]. Antena MIMO untuk teknologi 5G diisyaratkan memiliki sifat *conformal*, *gain* lebih tinggi dari 5 dBi, dan *bandwidth* 500 MHz pada frekuensi tengah 26 GHz. Pilihan yang tepat untuk antena MIMO dengan sifat *conformal* adalah dalam bentuk antena *mikrostrip* [5]. Sebuah antena *mikrostrip* MIMO konvensional memiliki *bandwidth* sempit dan *gain* rendah [6]. Sebelumnya telah dilakukan penelitian oleh [7] yang melakukan perancangan antena MIMO 4 x 4 menggunakan material dielektrik artifisial termodifikasi dengan cara menyisipkan lembar konduktor (*stripline*) diantara substrat, serta menggunakan metode *defected ground structure*. Berdasarkan simulasi, didapatkan *gain* sebesar 5,43 dB, *bandwidth* sebesar 834,75 MHz, *return loss* pada frekuensi tengah atau parameter S_{1,1} sebesar 53,24 dB. Namun pada penelitian ini masih belum diketahui pengaruh dari perbedaan arah, ukuran, dan jumlah *strip* konduktor yang digunakan untuk meningkatkan *gain* dan *bandwidth* pada antena. Penggunaan material dielektrik artifisial dapat dikombinasikan dengan *defected ground structure*, yaitu sebuah metoda “pencacatan” bentuk elemen *groundplane* untuk memberikan efek resonansi pada daerah frekuensi lain yang berdampak pada pelebaran *bandwidth* dan peningkatan *gain* [8].

Berdasarkan studi literatur yang telah penulis lakukan terhadap penelitian terdahulu, maka pada penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan *gain* dan *bandwidth* antena MIMO dengan menggunakan material artifisial dielektrik dan *defected ground structure* serta meneliti pengaruh jumlah, ukuran, dan orientasi dari *strip-strip* tembaga terhadap *gain* dan *bandwidth* antena.

2. METODE PENELITIAN

Tahapan awal dalam pengerjaan penelitian ini yaitu dengan melakukan studi literatur dan simulator. Kemudian, dilakukan pemilihan material antena yang akan digunakan. Setelah didapatkan material yang akan digunakan, dilanjutkan dengan melakukan perhitungan dimensi antena. Hasil perhitungan kemudian dibuat perancangannya pada simulator CST Suites Studio. Jika hasil simulasi masih belum sesuai dengan spesifikasi, maka dilakukan optimasi dengan mengubah dimensi antena. Tahapan optimasi ini terus dilakukan sampai mendapatkan hasil yang optimal. Apabila sudah didapatkan hasil yang optimal, maka dilakukan evaluasi dan analisis dari hasil yang telah didapatkan.

2.1 Spesifikasi Perancangan

Antena *mikrostrip* yang dibuat, terdiri dari tiga lapisan substrat FR-4 Epoxy dengan masing-masing ketebalan 0,3 mm. Pada lapisan awal substrat terdapat *patch* yang dipotong menjadi bentuk trapesium. Kemudian, pada lapisan kedua terdapat *feedline*, dan pada lapisan ketiga disisipkan *strip* konduktor. Pada lapisan paling bawah terdapat *ground plane* yang telah dilakukan pencacatan atau *defected ground*.

Adapun spesifikasi dan parameter antena yang hendak dicapai dari pembuatan antena MIMO 4 x 4 menggunakan artifisial dielektrik dan *defected ground structure* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi antena

Spesifikasi	Keterangan
Frekuensi kerja	26 GHz
<i>Bandwidth</i>	≥ 500 MHz
<i>Return loss</i>	≥ 30 dB
VSWR	≤ 2
<i>Gain</i> antena	≥ 5 dBi

2.2 Perhitungan Dimensi Antena

Dimensi antena didapat dari perhitungan matematis menggunakan rumus-rumus berdasarkan [9] dan [10] sebagai berikut:

1. Lebar *patch* antena

$$Wp = \frac{c}{2fr\sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}}} \quad (1)$$

dengan Wp adalah lebar *patch*, c adalah kecepatan cahaya, fr adalah frekuensi resonansi, dan ϵ_r adalah konstanta dielektrik. Persamaan (1) merupakan persamaan untuk menghitung lebar *patch* antena dalam satuan mm.

2. Panjang *patch* antena

Sebelum menghitung panjang antena, dilakukan perhitungan penambahan panjang *patch* (L) akibat adanya *fringing effect*. Adapun persamaannya sebagai berikut:

$$\Delta L = 0.412h \left[\frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \right] \quad (2)$$

dengan

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1+\frac{12h}{w}}} \right) \quad (3)$$

dimana ϵ_{reff} adalah konstanta dielektrik efektif, ΔL adalah penambahan nilai L , h adalah tebal substrat, dan W adalah lebar *patch*. Persamaan (3) merupakan persamaan untuk menghitung permitivitas relatif efektif. Setelah didapatkan panjang *patch* maka dengan persamaan (4) akan didapatkan panjang antena, yaitu sebagai berikut:

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (4)$$

dengan,

$$L_{eff} = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (5)$$

Persamaan (5) merupakan persamaan untuk menghitung panjang relatif efektif.

3. Lebar substrat (W_g) dan *ground* antena

$$Wg = 6h + Wpatch \quad (6)$$

Persamaan (6) merupakan persamaan untuk menghitung lebar substrat dan *ground* antena dengan satuan mm.

4. Panjang substrat dan *ground* antena

$$Lg = 6h + Lp + Lf \quad (7)$$

dengan Lp adalah panjang *patch* dan Lf adalah panjang saluran. Persamaan (7) merupakan persamaan untuk menghitung panjang substrat dan *ground* antena dengan satuan mm.

5. Lebar *strip* antenna

$$Wf = \frac{2h}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right) \right] \tag{8}$$

dimana

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \tag{9}$$

dengan Z_0 adalah impedansi saluran.

6. Panjang *strip* antenna

$$L_f = \frac{1}{4} \lambda_g \tag{10}$$

Persamaan (10) merupakan persamaan untuk menghitung panjang *strip* antenna dengan satuan mm, dengan

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \tag{11}$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \tag{12}$$

Dimana λ_g adalah panjang gelombang *guide* pada saluran dan λ_0 adalah panjang gelombang.

3. **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bagian ini dilakukan simulasi antenna mikrostrip MIMO 4 x 4 konvensional dan antenna mikrostrip MIMO 4 x 4 dengan artifisial dielektrik dan *defected ground structure*. Antenna MIMO 4 x 4 konvensional digunakan sebagai antenna pembanding, sedangkan antenna MIMO 4 x 4 dengan artifisial dielektrik dan *defected ground structure* digunakan sebagai antenna preferensi. Hasil perhitungan manual antenna konvensional dapat dilihat pada Tabel 2.

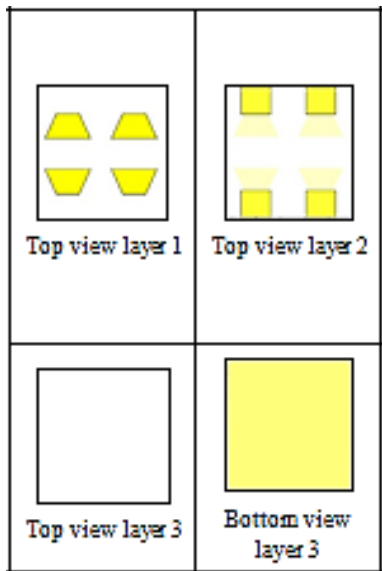
Tabel 1. Hasil perhitungan antenna mikrostrip

Parameter	Nilai
H	0,3 mm
T	0,036 mm
Wp	3,5 mm
Lp	2,3 mm
Wg	8,9 mm
Lg	9,2 mm
Wf	1,533 mm
Lf	1,72 mm

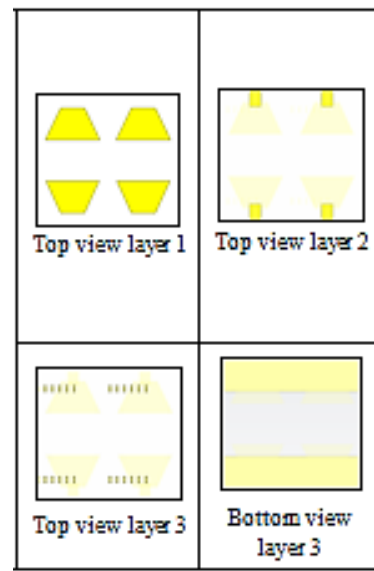
Hasil pengukuran antenna konvensional dan artifisial setelah dilakukan optimasi dapat dilihat pada Tabel 3, sedangkan desain antenna konvensional dan artifisial dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.

Tabel 2. Optimasi ukuran antenna mikrostrip konvensional dan artifisial

Parameter	Antena mikrostrip konvensional	Antena mikrostrip artifisial
H	0,27 mm	0,27 mm
t	0,036 mm	0,035 mm
Wp	3,7 mm	5,395 mm
Lp	2,3 mm	3,15 mm
Wg	5,32 mm	7,015 mm
Lg	6,72 mm	6,47 mm
Wf	2,4 mm	1,1 mm
Lf	2,8 mm	1,7 mm



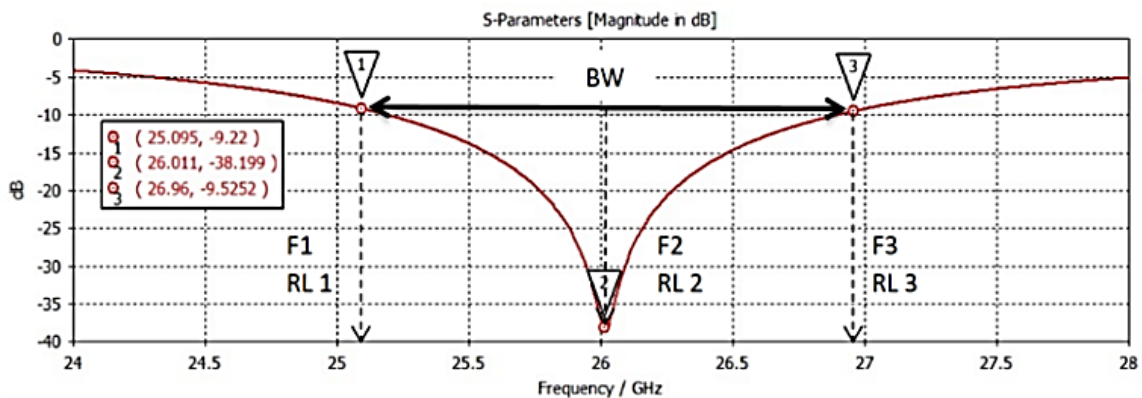
Gambar 1. Tampilan antenna mikrostrip MIMO 4x4 konvensional



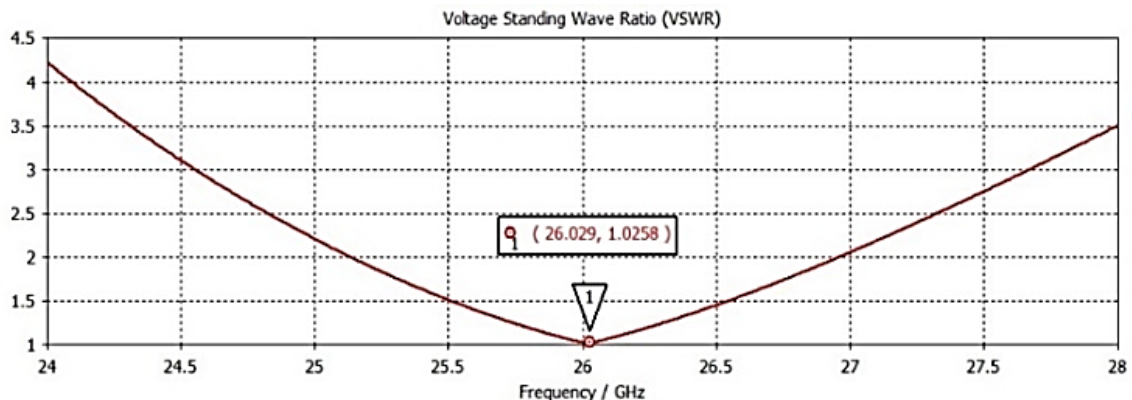
Gambar 2. Tampilan antenna mikrostrip MIMO 4x4 artifisial dan *defected ground structure*

3.1 Hasil Simulasi Antena Mikrostrip Konvensional

Hasil pengujian pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa antenna sudah bekerja sesuai dengan frekuensi yang ditentukan yaitu pada frekuensi 26,1 GHz, dengan *return loss* yang didapatkan 38,2 dB dan memiliki *bandwidth* sebesar 1,87 GHz.

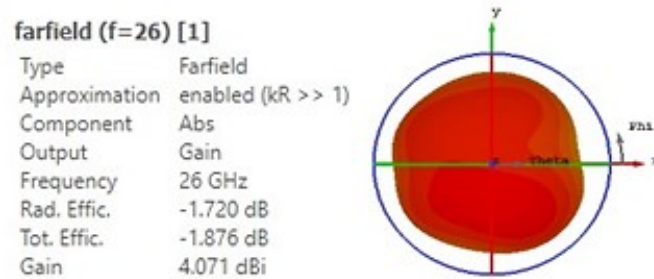


Gambar 3. Grafik frekuensi dan *return loss* antenna konvensional



Gambar 4. Grafik VSWR antenna konvensional

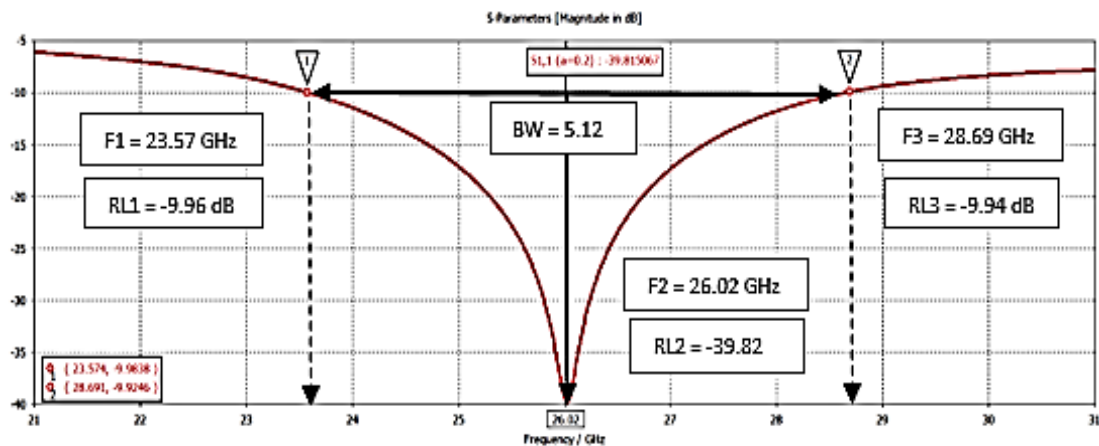
Berdasarkan Gambar 4 dapat dilihat bahwa pada frekuensi kerja antenna ini memiliki VSWR sebesar 1,03. Adapun *gain* yang dihasilkan sebesar 4,071 dBi seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. *Gain* antenna konvensional

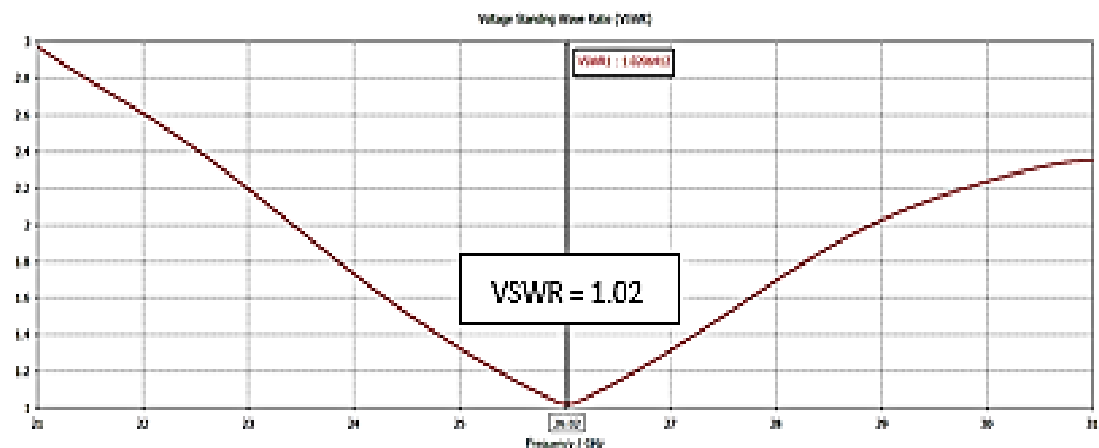
3.2 Hasil Simulasi Antena Mikrostrip Artifisial Dielektrik dan *Defected Ground Structure*

Gambar 6 menunjukkan nilai dan arah *gain* mengarahkan sinyalnya. Adapun *gain* yang didapatkan pada antenna ini sebesar 4.07 dBi. Hasil ini masih belum sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan dan membuktikan bahwa antenna MIMO konvensional memiliki *gain* yang rendah.

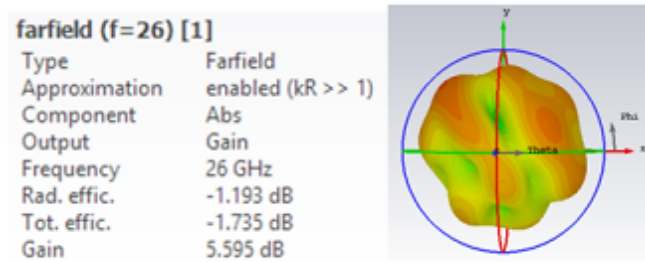


Gambar 6. Grafik frekuensi dan *return loss* antenna MIMO dengan artifisial dan *defected ground structure*

Gambar 7 menunjukkan bahwa antenna sudah bekerja sesuai dengan frekuensi yang ditentukan yaitu pada frekuensi 26,02 GHz, dengan *return loss* yang didapatkan 39,82 dB dan memiliki *bandwidth* sebesar 5,12 GHz. Berdasarkan Gambar 7 dapat dilihat bahwa pada frekuensi kerja antenna ini memiliki VSWR sebesar 1,02.



Gambar 7. Grafik VSWR antenna MIMO dengan artifisial dan *defected ground structure*



Gambar 8. *Gain* antenna MIMO dengan artifisial dan *defected ground structure*

Gambar 8 menunjukkan nilai dan arah *gain* mengarahkan sinyalnya. Adapun *gain* yang didapatkan pada antenna ini sebesar 5,6 dBi. Adapun rekapitulasi data dari hasil pengukuran parameter antenna menggunakan *software* CST Studio Suite 2018 dirumuskan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil pengukuran parameter antenna

Spesifikasi	Konvensional	Artifisial + <i>defected ground structure</i>
F 1	25,1 GHz	23,57 GHz
F 2	26,01 GHz	26,02 GHz
F 3	26,96 GHz	28,69 GHz
<i>Return loss</i>	38,2 dB	39,82 dB
<i>Bandwidth</i>	1,87 GHz	5,12 GHz
% <i>Bandwidth</i>	7,17 %	19,68 %
VSWR	1,03	1,02
<i>Gain</i>	4,07 dBi	5,6 dBi

Berdasarkan hasil pengukuran dan perbandingan, maka dapat disimpulkan bahwa penambahan *strip* konduktor tipis sebagai dielektrik artifisial dan penggunaan *defected ground structure* dapat meningkatkan *bandwidth* dan *gain* antenna. *Bandwidth* meningkat sebesar 12,51% dan *gain* meningkat sebesar 1,53 dBi dari antenna *mikrostrip* MIMO konvensional. Peningkatan *gain* disebabkan oleh penggunaan dielektrik artifisial dan peningkatan *bandwidth* disebabkan oleh penggunaan *defected ground structure*.

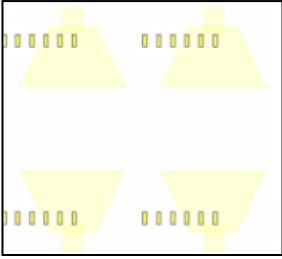
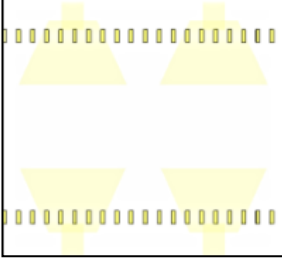
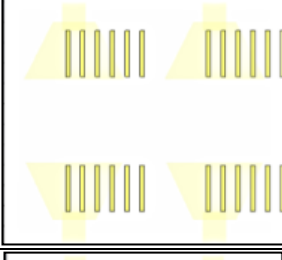
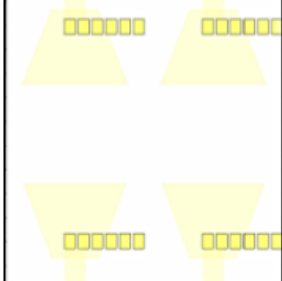
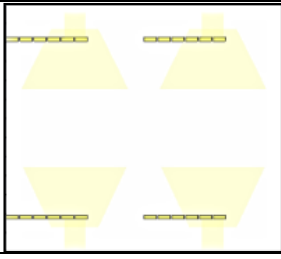
3.3 Analisis Pengaruh *Strip* Konduktor

Pada Tabel 5 dan Tabel 6 diperlihatkan pengaruh *strip* konduktor terhadap kinerja antenna. Tabel 5 memperlihatkan hasil pengukuran dimensi antenna, sedangkan Tabel 7 memperlihatkan hasil simulasi antenna. Pengujian dilakukan dengan lima kali percobaan untuk mengetahui pengaruh *strip* konduktor. Percobaan 1 merupakan *strip* konduktor preferensi yang digunakan, percobaan 2 merupakan *strip* konduktor dengan jumlah yang lebih banyak, percobaan 3 merupakan *strip* konduktor dengan ukuran yang lebih panjang, percobaan 4 merupakan percobaan dengan *strip* konduktor yang memiliki ukuran lebih lebar, dan percobaan 5 merupakan *strip* konduktor dengan arah orientasi horizontal.

Tabel 5. Dimensi pengukuran dengan berbagai ukuran dan arah orientasi

Dimensi	1(mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	5 (mm)
H	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
T	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
Wp	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
Lp	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15
Wg	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02
Lg	6,47	6,47	6,47	6,47	6,47
Wf	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Lf	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
A	0,2	0,2	0,2	0,55	0,63
C	0,63	0,63	3,95	0,63	0,2

Tabel 3. Hasil pengaruh *strip* konduktor

No.	Jenis <i>strip</i>	Parameter
1.		<i>Gain</i> = 5,61 dBi
		<i>Bandwidth</i> = 5,12 GHz
		<i>Return loss</i> = 39,82
		VSWR = 1,02
2.		<i>Gain</i> = 5,63 dBi
		<i>Bandwidth</i> = 5,07 GHz
		<i>Return loss</i> = 50 dB
		VSWR = 1
3.		<i>Gain</i> = 3,95 dBi
		<i>Bandwidth</i> = 2,9 GHz
		<i>Return loss</i> = 17,33 dB
		VSWR = 1,31
4.		<i>Gain</i> = 5,62 dBi
		<i>Bandwidth</i> = 4,98 GHz
		<i>Return loss</i> = 34,11 dB
		VSWR = 1,04
5.		<i>Gain</i> = 5,61 dBi
		<i>Bandwidth</i> = 4,98 GHz
		<i>Return loss</i> = 60,04 dB
		VSWR = 1

Tabel 7 menunjukkan berbagai pengaruh orientasi *strip* konduktor. Berdasarkan hasil pengujian dapat diketahui bahwa ukuran dan jumlah *strip* konduktor dapat mempengaruhi parameter antenna. Ketebalan dan jumlah *strip* konduktor dapat berpengaruh terhadap *gain* dan *bandwidth*, semakin tipis dan semakin banyak *strip* konduktor maka *bandwidth* dan *gain* yang didapatkan akan semakin besar. Kemudian, ukuran *strip* konduktor yang semakin panjang akan memperkecil *bandwidth* dan *gain* antenna. Selain itu, arah orientasi *strip* konduktor pun berpengaruh terhadap parameter antenna yaitu *return loss*, dengan arah orientasi horizontal akan didapatkan nilai *return loss* yang kecil.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi antenna yang telah dirancang dapat disimpulkan bahwa antenna dengan penggunaan dielektrik artifisial dan *defected ground structure* dapat menghasilkan *bandwidth* dan *gain*

yang lebih baik. Terjadi peningkatan *bandwidth* sebesar 12,51% atau 5,12 GHz telah melebihi parameter yang diinginkan yaitu lebih besar dari 500 MHz, peningkatan *gain* sebesar 1,63 dBi atau bernilai 5,6 dBi juga telah melebihi parameter yang diinginkan yaitu lebih besar dari 5 dBi. Pada penggunaan dielektrik artifisial, dilakukan analisis mengenai pengaruh ukuran dan jumlah *strip* konduktor. Berdasarkan simulasi, *strip* konduktor dengan ukuran lebih tipis dapat menghasilkan nilai *bandwidth* dan *gain* yang lebih baik, sementara *strip* konduktor dengan arah orientasi horizontal dapat menghasilkan *return loss* yang paling kecil. Nilai *bandwidth*, *gain*, dan *return loss* paling buruk terdapat pada antenna dengan *strip* konduktor dengan ukuran yang lebih panjang. Penelitian berikutnya adalah melakukan pengembangan seperti membuat prototipe dan melakukan pengukuran terhadap perancangan dan simulasi yang telah dibuat serta menggunakan metode pencatatan yang berbeda.

REFERENSI

- [1] S. El-Sheikh, 2019. [Online]. Available: <https://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/2019>. [Accessed 20 September 2020].
- [2] R. N. Dwi Meitasari, "Perencanaan Jaringan Komunikasi Antara Manado dan Sofifi menggunakan Radio Microwave," *Jurnal Ilmiah GIGA*, vol. 19, no. 1, pp. 35-42, 2016.
- [3] I. D. Kristiadi and M. I. Nashiruddin, "Analisis Perencanaan Transmisi Microwave Link Antara Semarang-Magelang untuk Radio Access Long Term," *Buletin Pos Telekomunikasi*, vol. 17, no. 2, pp. 95-110, 2019.
- [4] C. Oikonomopoulos-Zachos, E. Stavrou, R. Baggen, and O. Litschke, "A MIMO antenna array with shaped beam in waveguide technology for WiFi base stations," in *International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT)*, Athens, 2017.
- [5] H. Ludiyati, E. Elisma, W. Pardosi, and N. Nurfiyana, "Analisa Karakteristik Antena Mikrostrip Lingkaran Berbahan Substrat Material Dielektrik Artifisial Pada Frekuensi 1800 MHz," in *SENTER*, 2018, pp. 276-283.
- [6] C. You, D. Jung, M. Song, and K. Wong, "Advanced Coupled-fed MIMO Antennas for Next Generations 5G Smartphones," in *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Busan, 2018.
- [7] L. Kang, H. Li, X. Wang, and X. Shi, "Compact offset microstrip-fed MIMO antenna for band-notched UWB applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 1754-1757, 2015.
- [8] N. Aprilita, "Metode Peningkatan Kinerja Broadband Antena MIMO 4x4 Menggunakan Dielektrik Termodifikasi Pada Frekuensi 1800 MHz," *Tugas Akhir Politeknik Negeri Bandung*, Bandung, 2020.
- [9] A. Al Shifa, H. Ludiyati, and R. Solihin, "Perancangan dan Simulasi Antena Mikrostrip Satu Elemen Berbahan Material Dielektrik Anisotropik untuk Aplikasi WiFi (Wireless Fidelity) pada Frekuensi 2400 MHz," in *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, vol. 11, no. 1, 2020, pp. 613-619.
- [10] M. I. Hidayat and Y. Rahayu, "Perancangan Antena Mikrostrip Dual-Band Patch Persegi Panjang Planar Array 6 Elemen dengan Defected ground structure Berbentuk Segitiga untuk Jaringan Komunikasi Nirkabel 5G," *Disertasi Doktor Universitas Riau*, 2017.

