

Antena MIMO 4 Elemen untuk Komunikasi 5G pada Frekuensi 3,5 GHz

Ananata Putri Prakusya, Dwi Andi Nurmantris, dan Radial Anwar
Universitas Telkom
Jl. Telekomunikasi, Bandung 40257
e-mail: dwiandi@telkomuniversity.ac.id

Abstrak—Teknologi komunikasi selular sedang mengalami perkembangan yang pesat dengan hadirnya 5G. Generasi ini menargetkan peningkatan laju data dan kapasitas yang lebih baik dari generasi sebelumnya. *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) adalah salah satu teknik yang tetap dipertahankan dan bahkan ditingkatkan penggunaannya pada 5G untuk menunjang peningkatan laju data yang sangat tinggi. Pada penelitian ini dilakukan perancangan dan realisasi antena MIMO empat elemen untuk komunikasi 5G pada frekuensi 3,5 GHz. Frekuensi ini dipilih karena *middle frequency* dianggap lebih berpeluang untuk dijadikan frekuensi layanan 5G di Indonesia serta memiliki cakupan yang lebih besar sehingga menghemat biaya pengembangan jaringan. Struktur antena *patch* berbasis *monopole* diterapkan pada penelitian ini untuk memenuhi kebutuhan *bandwidth* 5G yang besar, kemudian dilakukan miniaturisasi agar antena berdimensi lebih kecil. Hasilnya, didapat suatu desain antena dengan dimensi single elemen 3×2 cm bekerja pada 3,5 GHz dengan *bandwidth* 1800 MHz (46%). Perancangan ini menghasilkan parameter, seperti *return loss* pada elemen satu sebesar -10,513 dB, pada elemen dua sebesar -10,215 dB, pada elemen tiga sebesar -17,229 dB, dan pada elemen empat sebesar -14 dB. Nilai pada elemen satu sebesar 1,84, elemen dua sebesar 1,31, elemen tiga sebesar 1,31, dan elemen empat sebesar 1,49. Nilai *bandwidth* ≥ 1500 MHz dan nilai *mutual coupling* $\leq -19,254$ dB.

Kata kunci: mikrostrip, miniaturisasi, mimo, 5g

Abstract—Cellular communication technology is experiencing rapid development with the arrival of 5G. This generation targets an increase in data rates and better capacity than the previous generation. MIMO is a technique that can be used to improve the performance of 5G communications. The frequency used this time is the middle frequency because it is considered more likely to be used as a 5G service frequency in Indonesia and has a larger coverage so as to save network development costs. In this study, the design and realization of a four-element MIMO antenna for 5G communication at a frequency of 3.5 GHz was carried out. The antenna used this time is a four-element MIMO antenna that has a monopole-based patch form which is then miniaturized so that the antenna has smaller dimensions. This design produces parameters, such as Return Loss on element one of -10.513 dB, for element two of -10.215 dB, for element three of -17.229 dB, and for element four of -14 dB. The value of element one is 1.84, element two is 1.31, element three is 1.31, and element four is 1.49. Bandwidth value ≥ 1500 MHz, and Mutual Coupling value ≤ -19.254 dB.

Keywords: microstrip, miniaturization, mimo, 5g

I. PENDAHULUAN

Teknologi 5G hadir untuk memecahkan masalah dan kebutuhan untuk meningkatkan efisiensi dan kapasitas jaringan, peningkatan *data rate* dengan cakupan yang lebih baik pada konsumsi daya yang rendah. Maka dari itu diperlukan suatu perancangan antena yang cocok untuk komunikasi nirkabel 5G guna mencapai *bandwidth* yang lebih besar, radiasi yang lebih baik, efisiensi antena yang lebih baik, dan kinerja yang baik. Sebagai generasi baru jaringan komunikasi 5G memiliki keunggulan transmisi *data rate* yang tinggi dan pemanfaatan sumber spektrum dibandingkan dengan jaringan 4G dan cakupannya juga sangat meningkat. Telah banyak dilakukan kegiatan penelitian diseluruh dunia untuk memajukan jaringan

nirkabel berikutnya yaitu 5G atau generasi kelima.

Teknik MIMO merupakan teknik yang menggunakan multi antena baik pada *transmitter* maupun *receiver*. MIMO adalah salah satu teknik yang dapat meningkatkan performansi jaringan 5G. Antena MIMO dibuat lebih dari satu antena pemancar dan lebih dari satu antena penerima bertujuan untuk memanfaatkan propagasi *multipath*.

Dalam perancangan antena MIMO empat elemen kali ini menggunakan *patch* berbentuk *monopole* yang diminiaturisasi, ini bertujuan untuk mengurangi ukuran *patch* dari antena tersebut. Beberapa penelitian sebelumnya juga telah dilakukan miniaturisasi *patch* antena diantaranya adalah Vladimir Ssorin dilakukan perancangan dan realisasi antena dengan bentuk *patch* yang diminiaturisasi yang diaplikasikan untuk USB *Dongle* [1]. Kemudian

pada [2] dilakukan perancangan dan realisasi antena mimo 2×2 dengan meminiaturisasi *patch monopole* yang diaplikasikan untuk LTE. Pada [3] dilakukan perancangan dan realisasi antena mimo 2×2 dengan *patch* yang diminiaturisasi dan menghasilkan *bandwidth* yang lebar. Pada [4] dilakukan perancangan antena array 2×2 *array rectangular patch* dengan U slot yang digunakan untuk komunikasi 5G. Dan pada [5] dilakukan perancangan antena array 37 GHz yang digunakan untuk komunikasi 5G. Dalam penelitian kali ini dilakukan perancangan dan realisasi antena MIMO 4 elemen yang berkerja pada frekuensi 3,5 GHz dengan menggunakan *software* CST *Microwave Studio* sehingga nantinya dapat digunakan untuk aplikasi jaringan komunikasi nirkabel 5G.

II. STUDI PUSTAKA

A. MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Multiple Input Multiple Output (MIMO) adalah suatu sistem yang terdiri dari lebih dari satu terminal atau antena pada sisi pengirim dan penerima. Dengan penggunaan antena lebih dari satu antena, MIMO mendukung spesifikasi media transmisi yang membutuhkan kapasitas besar pada sistem komunikasinya. Sistem ini menggunakan sejumlah M antena pemancar dan sejumlah N antena penerima, sehingga sering ditulis dengan sistem penulisan MIMO M×N. [6]

B. Teknik MIMO

1. Spatial Multiplexing

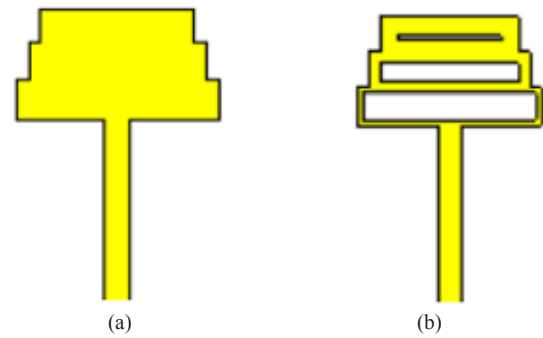
Teknik ini merupakan teknik pertama yang digunakan pada MIMO. Pada sisi pengirim sinyal akan ditransmisikan melalui beberapa lintasan *multipath* yang kemudian akan di terima di sisi penerima. Dengan teknik ini memungkinkan mencapai kapasitas kanal yang besar. Pada model *multiplexing* data masukan dapat dipecah menjadi beberapa bagian yang independen dan dikirimkan oleh masing-masing antena pemancar yang bekerja pada frekuensi yang sama. Keuntungan utama MIMO *multiplexing* didapatkan dengan mengirim sinyal yang berbeda pada *bandwidth* sama dan dapat disandikan dengan tepat pada penerima. Jadi seperti terdapat satu kanal untuk satu pemancar [7].

2. Diversity

Pada model *diversity* data yang dipancarkan pada setiap antena pemancar adalah sama. Kemudian dapat digunakan metode *transmitter selection diversity* untuk memilih satu pemancar saja dengan kualitas terbaik. Sedangkan pada penerima digunakan metode *combining* (*Equal Gain Combining/Maximum Ratio Combining*) untuk mendapatkan diversitas murni. Model *diversity* digunakan untuk mengurangi galat akibat *fading* dan *noise* dengan diversitas antena pada pemancar dan penerima [7].

3. Mutual Coupling dan Isolasi

Mutual coupling adalah efek yang menyebabkan terjadinya penurunan kualitas parameter antena MIMO.



Gambar 1. Desain *patch* antena (a) sebelum proses miniaturisasi dan (b) setelah proses miniaturisasi

Mutual coupling dapat diukur dengan melihat besaran isolasi, isolasi didefinisikan sebagai besar daya transmisi antara dua *input port* pada antena *multiport* yang diuji. Dalam sistem MIMO, pengaruh efek *mutual coupling* diusahakan seminimal mungkin karena mempengaruhi performa setiap antena [8]. Untuk mendapatkan nilai isolasi dapat menggunakan rumus pada (1).

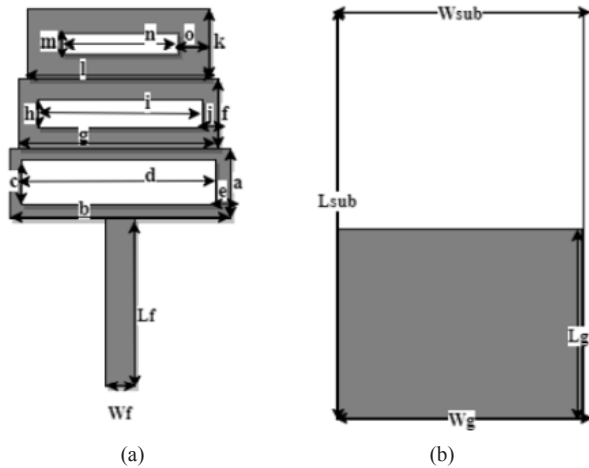
$$Isolasi = -10 \log_{10} |S_{21}|^2. \quad (1)$$

Jarak antar elemen sangat diperlukan pada antena MIMO untuk meminimalkan terjadinya efek *mutual coupling* pada elemen yang berdekatan. Efek ini terjadi karena munculnya tegangan di satu elemen dari elemen lain akibat letak elemen yang terlalu dekat sehingga berdampak pada kinerja antena [9]. Adapun batas kondisi minimal nilai *mutual coupling* yang sering digunakan adalah kurang dari -20dB, ketika kondisi *mutual coupling* tidak terpenuhi maka akan terjadi interferensi antar elemen antena sehingga menurunkan performansi antena MIMO.

III. METODE

A. Desain Antena

Gambar 1 memperlihatkan bentuk *patch* antena mikrostrip yang dioptimasi sebelum dan sesudah proses miniaturisasi. Antena ini memiliki desain yang terdiri dari 3 *rectangular patch* yang ditumpuk menjadi satu, dengan dimensi 3×2 cm. Kemudian dilakukan miniaturisasi menggunakan teknik *slotting*, miniaturisasi bertujuan agar antena memiliki dimensi lebih kecil. Pada penelitian ini dilakukan teknik *slotting* dengan memotong bagian tengah dari setiap 3 *rectangular patch* yang ditumpuk menjadi satu tanpa mengurangi dimensi keseluruhan dari antena yaitu 3×2 cm, selain digunakan untuk mereduksi dimensi antena teknik *slotting* juga dapat meningkatkan nilai *return loss*. Pada antena ini juga diterapkan teknik DGS (*Defected Ground Structure*), yaitu teknik memodifikasi bentuk *Groundplane*. Teknik DGS yang diterapkan pada antena mikrostrip ini dengan memotong bagian *groundplane* membentuk struktur *monopole* yang bertujuan untuk meningkatkan *bandwidth*.



Gambar 2. Dimensi antenna (a) tampak depan dan (b) tampak belakang

Tabel 1. Parameter hasil simulasi antenna satu elemen

Parameter	Hasil Simulasi
Frekuensi Kerja	3.5 GHz
Return Loss	-36.7 dB
VSWR	1.02
Bandwidth	1800 MHz
Directivity	3.244 dBi
Relized Gain	1.823 dBi

B. Desain Antena Satu Elemen

Satu elemen antenna *monopole* memiliki dimensi 2x3 cm terlihat seperti pada Gambar 2 dengan setiap dimensi pada antenna: $L_f = 15,5$ mm, $W_f = 2$ mm, $L_g = 14$ mm, $W_g = 20$ mm, $L_{sub} = 30$ mm, $W_{sub} = 20$ mm, $a = 3,5$ mm, $b = 16$ mm, $c = 2,5$ mm, $d = 15$ mm, $e = 0,5$ mm, $f = 3$ mm, $g = 14$ mm, $h = 1,5$ mm, $i = 12$ mm, $j = 1$ mm, $k = 3$ mm, $l = 12$ mm, $m = 0,5$ mm, $n = 9$ mm, $o = 1,5$ mm.

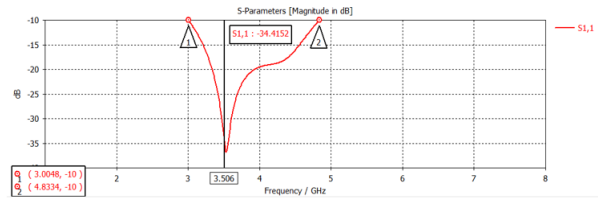
Antena disimulasikan pada Substrate Fr-4 dengan nilai permitivitas relatif sebesar 4,4. Parameter antenna hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4, didapatkan nilai return loss sebesar -34,4152 dB pada frequency resonansinya, bandwidth sebesar 1800 MHz, gain sebesar 1,823 dBi dan pola radiasi yang dihasilkan adalah omnidireksional. Rangkuman parameter antenna elemen tunggal bisa dilihat pada Tabel 1.

C. Desain Antena Empat Elemen MIMO

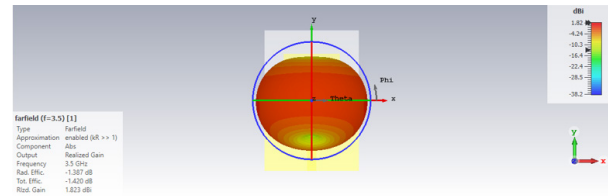
Antena *monopole* satu elemen kemudian disusun menjadi 4 elemen MIMO yang diletakkan pada bidang yang mewakili area perangkat 7 inch (16 x 9 cm). Kemudian antenna elemen tunggal tersebut diletakkan masing-masing pada pojok dari bidang tersebut.

1. Kajian Penempatan Port

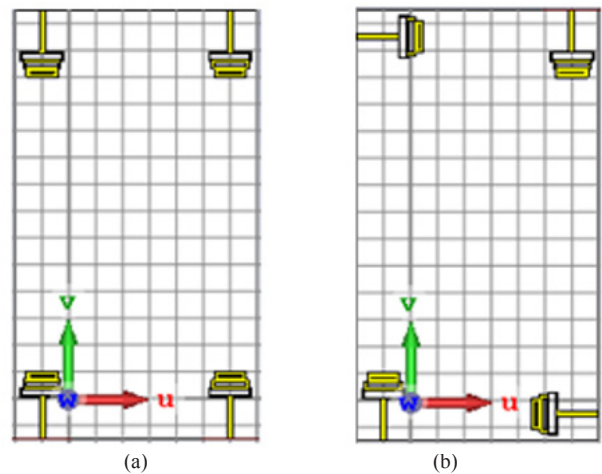
Dalam kajian penempatan port empat elemen antenna MIMO. Terdapat dua konfigurasi peletakan port, dimana konfigurasi satu: dua port diletakkan dengan arah yang sama



Gambar 3. Grafik return loss antenna satu elemen



Gambar 4. Simulasi gain dan pola radiasi antenna satu elemen

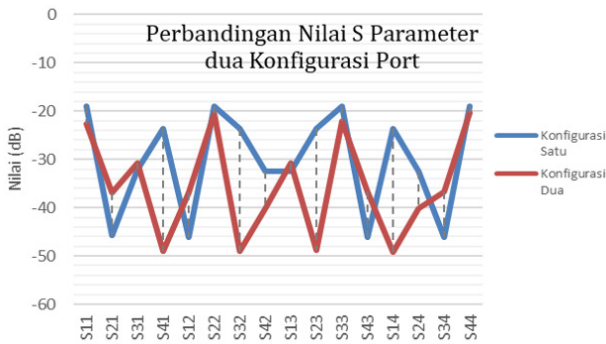


Gambar 5. Konfigurasi port (a) satu dan (b) dua

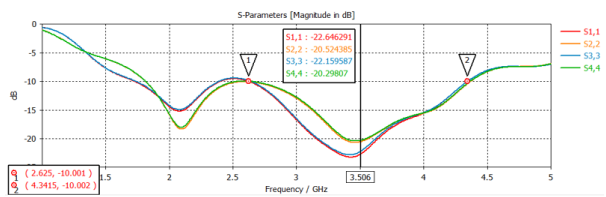
tetapi berlawanan arah dengan dua port yang lainnya seperti ditunjukkan pada Gambar 5 (a) sedangkan konfigurasi dua: masing-masing port diletakkan pada empat sisi yang berbeda seperti ditunjukkan pada Gambar 5 (b).

Dari kedua konfigurasi, akan dicari skenario peletakan port yang terbaik yang memberikan nilai *mutual coupling* paling kecil. Nilai *mutual coupling* pada konfigurasi port 1 yaitu S11 sebesar -18,91 dB, S21 sebesar -45,69 dB, S31 sebesar -32,04 dB, S41 sebesar -23,6 dB, S12 sebesar -46,16 dB, S22 sebesar -18,9 dB, S32 sebesar -23,68 dB, S42 sebesar -32,37 dB, S13 sebesar -32,37 dB, S23 sebesar -23,68 dB, S33 sebesar -18,9 dB, S43 sebesar -46,16 dB, S14 sebesar -23,68 dB, S24 sebesar -32,37 dB, S34 sebesar -46,16 dB, S44 sebesar -18,9 dB. Untuk nilai *mutual coupling* pada konfigurasi port 2 yaitu S11 sebesar -22,7 dB, S21 sebesar -36,81 dB, S31 sebesar -30,73 dB, S41 sebesar -48,97 dB, S12 sebesar -36,8 dB, S22 sebesar -20,52 dB, S32 sebesar -48,94 dB, S42 sebesar -40,14 dB, S13 sebesar -30,73 dB, S23 sebesar -48,89 dB, S33 sebesar -22,15 dB, S43 sebesar -36,64 dB, S14 sebesar -49,12 dB, S24 sebesar -40,14 dB, S34 sebesar -36,61 dB, S44 sebesar -20,29 dB. Perbandingan nilai mutual coupling antara konfigurasi port 1 dan 2 dapat dilihat pada Gambar 6.

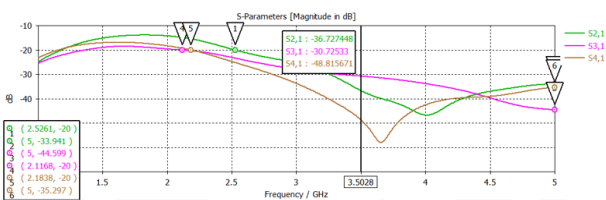
Gambar 6 menunjukkan bahwa konfigurasi dua dalam



Gambar 6. Grafik perbandingan nilai S parameter pada dua konfigurasi port di 3,5 GHz



Gambar 7. Grafik return loss pada antenna MIMO



Gambar 8. Grafik pengaruh mutual coupling elemen satu terhadap elemen dua, tiga, dan empat

peletakan port antenna MIMO 4 elemen memberikan nilai isolasi yang lebih baik dibandingkan dengan konfigurasi 1. Hal ini menunjukkan bahwa menempatkan port pada arah yang sama dan berdekatan, akan memberikan mutual coupling yang semakin besar. Hal ini dikarenakan pengaruh radiasi dari antenna yang bersebelahan semakin besar. Berdasarkan hasil kajian tersebut, maka dalam desain antenna MIMO 4 elemen ini. Konfigurasi port dua dipilih sebagai posisi peletakan port antenna.

Gambar 6 Grafik perbandingan nilai S parameter pada dua konfigurasi port di 3,5 GHz

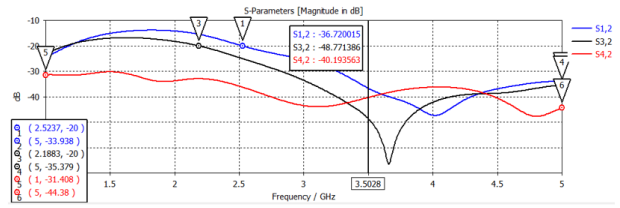
2. Parameter Antena MIMO Konfigurasi Port 2

- Return Loss

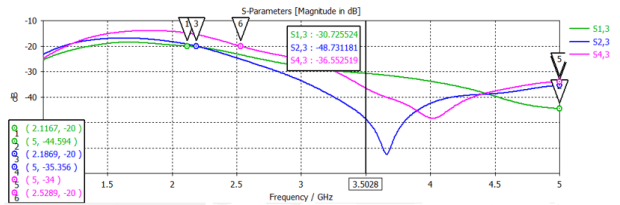
Dari hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 7, didapatkan nilai return loss pada elemen satu, elemen 2, elemen 3, dan elemen 4 berturut-turut adalah sebesar -22,70 dB, -20,55 dB, -22,16 dB, dan -20,29 dB. Berdasarkan data tersebut, menunjukkan bahwa nilai return loss antenna MIMO sudah sesuai spesifikasi.

- Mutual Coupling

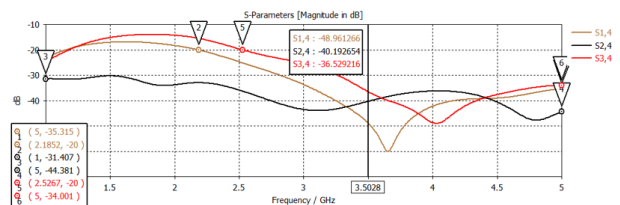
Dari hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 8, Gambar 9, Gambar 10, dan Gambar 11 didapatkan nilai Mutual Coupling pada antenna MIMO empat elemen yang dirancang mendapatkan nilai kurang dari -20 dB. Berdasarkan data tersebut, desain antenna ini telah memenuhi spesifikasi.



Gambar 9. Grafik pengaruh mutual coupling elemen dua terhadap elemen satu, tiga, dan empat



Gambar 10. Grafik pengaruh mutual coupling elemen tiga terhadap elemen satu, dua, dan empat



Gambar 11. Grafik pengaruh mutual coupling elemen empat terhadap elemen satu, dua, dan tiga

- Bandwidth

Nilai bandwidth hasil simulasi ditentukan berdasarkan grafik return loss yang ditunjukkan pada Gambar 7. Nilai absolute bandwidth yang diperoleh pada elemen pertama, kedua, ketiga, dan keempat berturut-turut adalah sebesar 1700 MHz, 2500 MHz, 1700 MHz, dan 1700 MHz. Sedangkan untuk nilai fractional bandwidth yang diperoleh pada elemen pertama, kedua, ketiga, dan keempat berturut-turut adalah sebesar 49%, 81%, 49%, dan 49%. Nilai bandwidth ini telah memenuhi kebutuhan 5G.

- Gain dan Polaradiasi

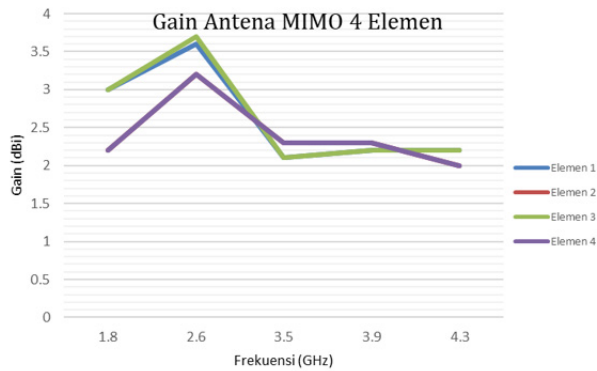
Gambar 12 memperlihatkan grafik gain terhadap frekuensi pada elemen satu, dua, tiga, dan empat. Pada grafik terlihat bahwa nilai gain pada beberapa titik frekuensi cukup stabil dengan nilai gain antara 2 hingga 3,5 dBi.

Tabel 2 memperlihatkan perubahan Pola radiasi antenna MIMO 4 elemen yang dilihat di beberapa sample frequency. Pada tabel tersebut terlihat ada sedikit perubahan polaradiasi tetapi tidak terlalu signifikan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Realisasi Antena

Antena MIMO 4 elemen dengan konfigurasi port dua difabrikasi pada substrate Epoxy FR-4 dengan dimensi 16x9 cm. Konektor SMA sebanyak 4 buah digunakan untuk masing-masing elemen. Foto hasil realisasi antenna

Gambar 12. Grafik *Gain* hasil simulasi 4 Elemen MIMO

Tabel 2. Simulasi 3D pola radiasi 4 elemen MIMO

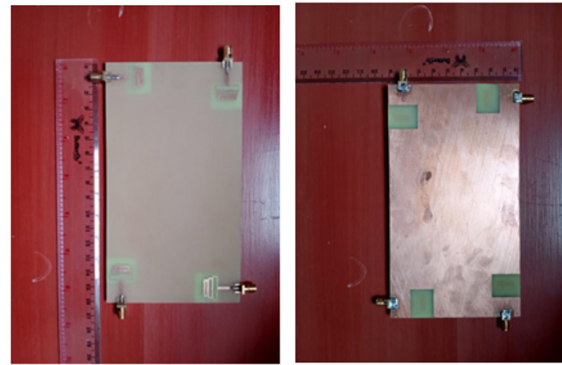
Frek (GHz)	Elemen 1	Elemen 2	Elemen 3	Elemen 4
1.8				
2.6				
3.5				
3.9				
4.3				

tersebut bisa dilihat pada Gambar 13.

B. Prosedur Pengukuran

Proses pengukuran dilakukan pada lingkungan yang bebas dari *noise* dan pantulan atau interferensi benda-benda sekelilingnya. pengukuran *return loss* dan *bandwidth* dilakukan menggunakan perangkat *network analyzer*. Adapun prosedur yang dilakukan sebagai berikut:

- Hubungkan antenna dengan kabel probe yang sudah tersedia pada port pertama *network Analyzer*.
- Atur rentang frekuensi kerja antenna dengan frekuensi start 2,5 GHz dan frekuensi stop 4,5 GHz, Sehingga diperoleh frekuensi tengah 3,5 GHz.
- Untuk melakukan pengukuran S11 tekan “Log Mag” pada layar *network analyzer*.



Gambar 13. Fabrikasi antenna (a) tampak depan (b) tampak belakang

Gambar 13. Fabrikasi antenna (a) tampak depan (b) tampak belakang

- Lalu tekan marker untuk memberi tanda atau mengetahui nilai *return loss* pada frekuensi yang diinginkan.
- Setelah hasil pengukuran diperoleh simpan file dalam bentuk .csv.

Proses pengukuran gain dilakukan menggunakan satu antenna referensi, *spectrum analyzer* dan signal generator. Antenna yang ingin diukur diarahkan pada sudut dengan daya terima paling baik kemudian diambil sampel sebanyak sepuluh kali lalu dirata-ratakan.

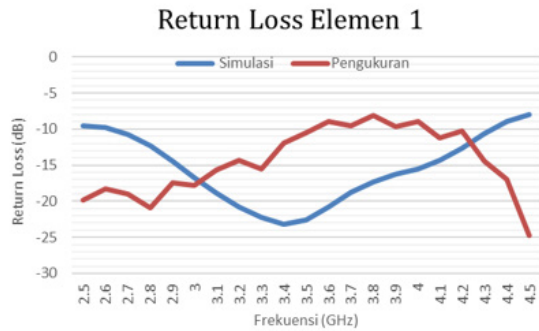
C. Hasil Pengukuran *Return Loss* dan *Bandwidth* Antenna MIMO 4 Elemen

Gambar 14 menunjukkan perbandingan *return loss* pada antenna MIMO 4 elemen hasil pengukuran dengan simulasi. Dari pengukuran antenna tersebut, diperoleh nilai *return loss* pada *frequency* 3,5 GHz untuk elemen satu, dua, tiga, dan empat berturut-turut sebesar -10,513 dB, -10,215 dB, -17,229 dB, dan -14 dB. Nilai ini memang sedikit bergeser dari hasil simulasi. Antara hasil simulasi dengan hasil pengukuran *Return Loss* pada elemen satu mengalami penurunan sebesar 53.7% setelah pengukuran, pada elemen dua mengalami penurunan sebesar 50.2% setelah pengukuran, pada elemen tiga mengalami penurunan sebesar 22.3% setelah pengukuran, pada elemen empat mengalami penurunan sebesar 31% setelah pengukuran.

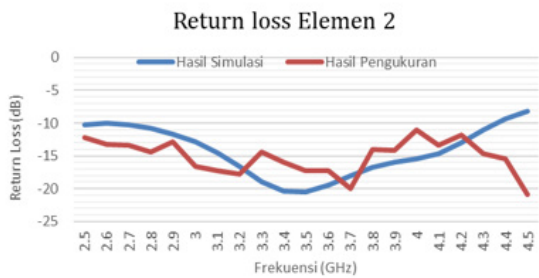
Bandwidth yang didapatkan berdasarkan hasil pengukuran pada elemen satu adalah 1500 MHz atau 54%, pada elemen dua adalah 2800 MHz atau 84%, pada elemen tiga adalah 1600 MHz atau 43%, dan pada elemen empat adalah 2800 MHz atau 82%. Antara hasil simulasi dengan hasil pengukuran *Bandwidth* pada elemen satu terjadi peningkatan sebesar 5% setelah pengukuran. pada elemen dua terjadi peningkatan sebesar 3% setelah pengukuran. pada elemen tiga terjadi penurunan sebesar 6% setelah pengukuran. pada elemen empat terjadi peningkatan sebesar 33% setelah pengukuran.

D. Hasil Pengukuran *Mutual Coupling*

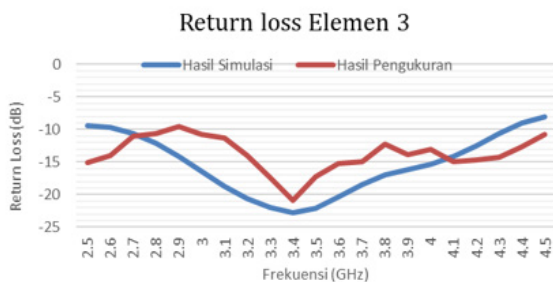
Hasil pengukuran *mutual coupling* pada antenna MIMO



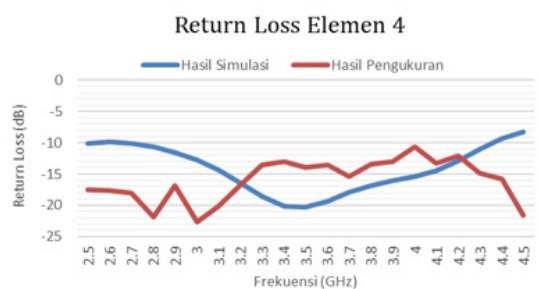
(a)



(b)



(c)

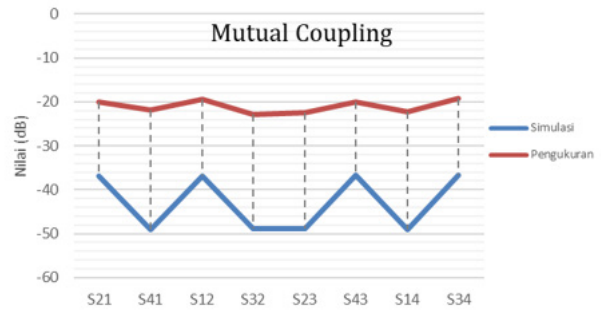


(d)

Gambar 14. Perbandingan *return loss* pengukuran dan simulasi pada elemen (a) satu, (b) dua, (c) tiga, dan (d) empat

empat ditunjukkan pada Gambar 15 dimana terlihat adanya kenaikan nilai *mutual coupling* jika dibandingkan dengan hasil simulasi.

Antara hasil simulasi dengan hasil pengukuran parameter *Mutual Coupling* pada S21 mengalami penurunan sebesar 47% setelah pengukuran, pada S41 mengalami penurunan sebesar 55,4% setelah pengukuran, pada S12 mengalami penurunan sebesar 45,9% setelah



Gambar 15. Perbandingan *mutual coupling* hasil pengukuran dengan hasil simulasi pada frekuensi 3,5 GHz

Tabel 3. Hasil pengukuran *gain* antena MIMO 4 elemen pada frekuensi 3,5 GHz

Simulasi (dBi)	Pengukuran (dBi)
2,33	2,45

pengukuran, pada S32 mengalami penurunan sebesar 54,1 % setelah pengukuran, pada S23 mengalami penurunan sebesar 53,2 % setelah pengukuran, pada S43 mengalami penurunan sebesar 47,5% setelah pengukuran, pada S14 mengalami penurunan sebesar 52,9% setelah pengukuran, pada S34 mengalami penurunan sebesar 45,3 % setelah pengukuran.

E. Hasil Pengukuran Gain

Tabel 3 menunjukkan hasil perbandingan nilai *gain* simulasi dan pengukuran antena MIMO 4 elemen pada *frequency* 3,5 GHz. Didapat Nilai *gain* yang diperoleh pada saat pengukuran sebesar 2,45 dBi, sedangkan nilai *gain* diperoleh pada saat simulasi sebesar 2,33 dBi, adapun selisih antara hasil simulasi dengan hasil pengukuran sebesar 0,12 dBi atau mengalami peningkatan sekitar 5,1 % setelah pengukuran.

V. KESIMPULAN

Desain Antena MIMO 4 elemen berbasis mikrostrip *monopole* dengan slot telah disimulasikan dan diukur. Antena dapat bekerja dengan baik pada frekuensi tengah 3,5 GHz. *Bandwidth* antena pada batas *return loss* -10 dB pada elemen satu, dua, tiga, dan empat berturut-turut adalah 1500 MHz atau 54%, 2800 MHz atau 84%, 1600 MHz atau 43%, dan 2800 MHz atau 82%. *Mutual Coupling* keempat elemen antena dari hasil pengukuran didapat kurang dari -19,254 dB, *Gain* antena didapat sebesar 2,45 dBi. Meskipun ada perbedaan hasil pengukuran dengan simulasi, tetapi baik dari simulasi dan pengukuran antena masih memenuhi spesifikasi untuk aplikasi 5G sesuai yang diharapkan.

REFERENSI

[1] Alexey A., and Alexander M. Ssorin V., "Compact MIMO

- Microstrip Antennas for USB Dongle Operating,” *International Journal of Antennas and Propagation*, pp. 1-12, 2012.
- [2] T. Li., & S. Yan. Yang L., “Highly Compact MIMO Antenna System for LTE/ISM Applications,” *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation*, 2015.
- [3] M. Usman., M. T. Chughtai.,& J. Nasir. Al-saif H., “Compact Ultra-Wide Band MIMO Antenna System for Lower 5G Bands,” *Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018.
- [4] Jones A. S. K., Levy O. N., and & Budi S., “Perancangan Antena MIMO 2×2 Array Rectangular Patch dengan U-Slot untuk Aplikasi 5G.,” *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, pp. Vol.6, No.1, Page: 94-95., 2017.
- [5] Sholeh M. and Y. Rahayu, “Perancangan Antena MIMO Array 37 GHz Untuk Jaringan Komunikasi 5G.,” *Jom FTEKNIK*, vol. 2, Desember 2018.
- [6] Rizky A., Koesmarjianto., and Waluyo., “Perancangan Antena MIMO Mikrostrip 4x4 Patch Circular Pada Frekuensi 2.4 GHz Untuk Aplikasi WLAN 802.11n.,” *Jurnal Jaringan Telekomunikasi*, pp. Vol. 7, No. 2, Page: 23-24., 2018.
- [7] M. M. Roza E., “Sistem Mimo dan Aplikasi Penggunaannya,” *Rekayasa Teknologi*, 2013.
- [8] Amrin Sianipar, “Perancangan dan Realisasi Antena Mikrostrip MIMO Bowtie 4x4 dengan Corner Reflektor 90° pada Frekuensi 1,8 GHz untuk Aplikasi LTE Melalui Teknik Pencatutan Mikrostrip Line,” Universitas Komputer, Bandung, Indonesia, Thesis 2018.
- [9] W. A. Fajar, Nachwan M. A., and & Budi S., “Analisis Simulasi Antena MIMO 4 4 Susunan Persegi dan,” *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. Vol.7, No.2, Mei 2018.
- [10] Maulana Caca and et al., *Teknik Antena dan Propagasi: Laboratorium Antena & Wireless Communication*. [Modul Praktikum]., 2018.