

Rancang Bangun Antena Mikrostrip MIMO 4 Elemen Untuk Komunikasi 5G Pada Frekuensi Band N40

Fannush Shofi Akbar*, Aulia Saharani

Jurusan Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknologi Elektro dan Industri Cerdas, Institut Teknologi Telkom Surabaya (ITTS) Surabaya, Indonesia

*fannush.akbar@ittelkom-sby.ac.id

Abstract— This study discusses the design of the MIMO microstrip antenna which is implemented in a 5G communication system that works on the N40 frequency band (2.3 – 2.4 GHz) with the center frequency of 2.35 GHz. The parameters that are unique of this antenna is focusing on the mutual coupling and correlation of MIMO antennas. The MIMO configuration was chosen because it can meet the high data transmission needs of 5G communication systems. The antenna is composed of a square patch with a microstrip insert feed-line technique. Then, the substrate uses FR-4 material, with a dielectric constant value of 4.3. After the design of a single element antenna that works according to the criteria is obtained, then the antenna is arranged into a configuration of 4 parallel elements, a 2×2 MIMO configuration with uniform polarization, and a 2×2 MIMO configuration with non-uniform polarization. After the design process, the antenna design is fabricated and then measured using a Vector Network Analyzer (VNA). The analysed antenna parameters are return loss, mutual coupling, Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), bandwidth, and radiation pattern. From the element measurement results, it is found that the return loss is -11.24 dB and the bandwidth is 70 MHz at the center frequency of 2.35 GHz. As for the analysis of mutual coupling between elements, the best results were obtained from the MIMO configuration of 2×2 non-uniform polarization with values < -20 dB for all elements. The antenna measurement results obtained indicate a similarity with the simulation results. This result is suitable for MIMO applications that require very low mutual coupling and correlation between elements.

Abstrak— Penelitian ini membahas desain antena mikrostrip MIMO yang diimplementasikan pada sistem komunikasi 5G yang bekerja pada frekuensi band N40 (2.3 – 2.4 GHz) dengan frekuensi tengah 2.35 GHz. Parameter yang menjadi keunikan dari antena ini berfokus pada *mutual coupling* dan korelasi dari antena MIMO. Konfigurasi MIMO dipilih karena dapat memenuhi kebutuhan data transmisi yang tinggi pada sistem komunikasi 5G. Antena tersebut tersusun atas *patch* yang berbentuk persegi dengan teknik pencatutan mikrostrip *insert feed-line*. Kemudian pada bagian *substrate* menggunakan material FR-4, dengan nilai konstanta dielektrik sebesar 4.3. Setelah desain antena elemen tunggal yang bekerja sesuai kriteria didapatkan, kemudian antena tersebut disusun ke dalam susunan MIMO 2×2 dengan polarisasi antar elemen yang tak seragam. Setelah proses perancangan, desain antena dicetak kemudian dilakukan pengukuran dengan menggunakan perangkat *Vector Network Analyzer (VNA)*. Parameter antena yang dianalisa yaitu *return loss*, *mutual coupling*, *Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)*, koefisien korelasi, *bandwidth*, dan pola radiasi. Dari hasil pengukuran elemen didapatkan *return loss* sebesar -11.24 dB dan *bandwidth* sebesar 80 MHz pada frekuensi tengah 2.35 GHz. Untuk analisa *mutual coupling* antar elemen, hasil terbaik yang didapatkan pada susunan MIMO 2×2 polarisasi tak seragam dengan nilai < -20 dB untuk semua elemen. Hasil pengukuran antena yang didapatkan tersebut menunjukkan adanya kesesuaian dengan hasil simulasi. Hasil ini sangat cocok sekali untuk aplikasi MIMO yang membutuhkan nilai *mutual coupling* dan korelasi antar elemen yang sangat rendah.

Kata Kunci— Antena; Mikrostrip; MIMO; 5G; Band N40

I. PENDAHULUAN

PROSES transmisi data dengan kecepatan tinggi menjadi salah satu layanan terpenting pada sistem komunikasi seluler 5G. Untuk memenuhi kebutuhan

Naskah diterima 8 Agustus 2022, diterima setelah revisi 11 Agustus 2022, terbit online 2 September 2022. Emitor merupakan jurnal Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta yang terakreditasi Sinta 4 dengan alamat Gedung H Lantai 2 UMS, Jalan Ahmad Yani Tromol Pos 1 Surakarta Indonesia 57165.

kecepatan data transmisi yang tinggi tersebut tentunya membutuhkan lebih banyak kanal yang disediakan agar tercapai tujuan *data rate* yang tinggi [1–4]. Salah satu teknologi yang digunakan pada sistem komunikasi 5G adalah menggunakan *microcell* yang ditempatkan pada area-area *blank-spot* yang tidak tercover oleh sinyal dari *Base Transceiver Station (BTS)* utama [5–8]. Ada beberapa metode yang dapat dilakukan dalam hal ini, seperti meningkatkan *gain* pada antena maupun

menggunakan teknologi antena *MIMO* (*Multiple Input Multiple Output*) yang telah diadopsi sebagai kunci komponen standar yang berfungsi untuk memastikan efisiensi dalam transmisi data dengan menggunakan jumlah kanal yang banyak [9–11]. Pada penelitian ini akan dilakukan perancangan, realisasi, dan pengukuran antena dengan konfigurasi *MIMO* pada aplikasi 5G frekuensi band N40. Antena yang telah dirancang tersebut nantinya akan digunakan sebagai antena *micro-cell* 5G. Jenis antena yang digunakan adalah mikrostrip *patch* persegi dengan pencatutan *inset-feeding*. Antena jenis mikrostrip digunakan karena memiliki ukuran dimensi yang kecil dan ringan serta mudah dalam pembuatan [12–16]. Dimana nantinya antena mikrostrip persegi tersebut akan disusun secara *MIMO* 2×2 dengan memperhatikan parameter *Mutual Coupling* dan korelasi dari tiap-tiap antena. Efek *mutual coupling* dapat menyebabkan perubahan pada parameter antena baik VSWR, pola radiasi yang diinginkan, dan *bandwidth* antena tersebut [17–19].

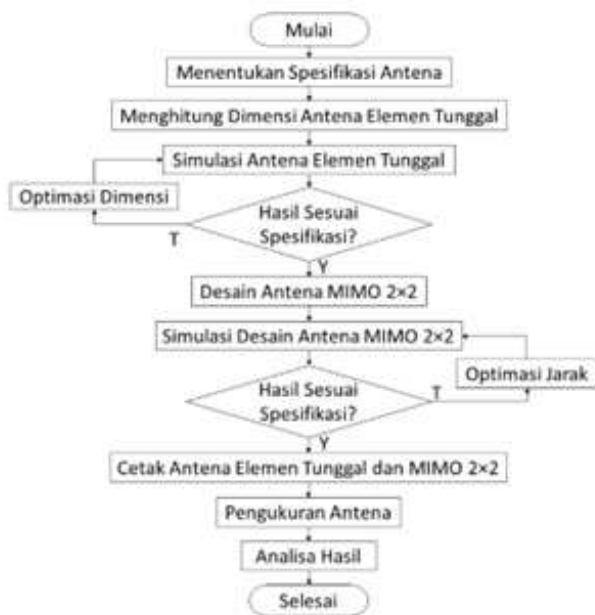
spesifikasi target, maka akan dilakukan optimasi dimensi antena pada proses simulasi, jika sudah sesuai maka lanjut menyusun elemen tunggal tersebut menjadi susunan *MIMO* 2×2 dengan polarisasi tak seragam. Antena *MIMO* 2×2 ini disimulasikan kembali dan dilakukan optimasi penggunaan jarak antar elemen agar *mutual coupling* dan korelasinya rendah. Setelah kinerja antena susunan *MIMO* 2×2 sudah sesuai, maka desain tersebut akan dicetak dan selanjutnya dilakukan pengukuran parameter-parameter kinerjanya. Langkah terakhir adalah melakukan analisis perbandingan hasil pengukuran dengan hasil simulasi.

i. Spesifikasi Antena Elemen

Pada penelitian ini, spesifikasi antena mikrostrip yang akan dirancang dapat dilihat pada Tabel 1, sedangkan material *substrate* yang akan digunakan adalah FR4 dengan nilai konstanta dielektrik $\epsilon_r = 4.3$ dengan ketebalan $h = 1.6$ mm.

Tabel 1: Spesifikasi Antena

Spesifikasi	Nilai
Frekuensi Tengah	2.35 GHz
VSWR	< 2
<i>Return Loss</i>	< -10 dB
<i>Mutual Coupling</i>	< -20 dB
Korelasi	< 0.2



Gambar 1: Alur Penelitian

II. METODE PENELITIAN

Alur penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. Dari gambar alur dapat dilihat bahwa penelitian dimulai dengan menentukan spesifikasi antena (Tabel 1), kemudian melakukan perhitungan dimensi antena *microstrip patch* persegi elemen tunggal, hasil perhitungan lalu disimulasikan pada *software* perancangan antena. Apabila hasil simulasi elemen tunggal masih belum sesuai

ii. Perhitungan Dimensi Antena Elemen

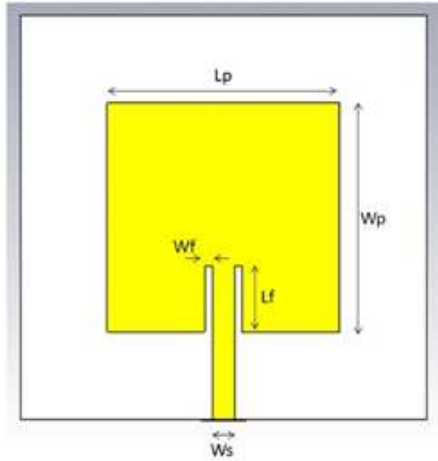
Desain antena mikrostrip *patch* persegi dengan pencatutan *inset-feeding* dapat dilihat pada Gambar 2. Pada gambar tersebut terdapat juga dimensi antena yang dapat dihitung berdasarkan persamaan pada [20]. Untuk menghitung lebar *patch* (W_p) dapat dihitung dengan Persamaan (1).

$$W_p = \frac{c}{2f \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (1)$$

dimana c adalah kecepatan cahaya (3×10^8 m/s), f adalah frekuensi kerja, dan ϵ_r adalah konstanta dielektrik bahan *substrate*.

Kemudian untuk mendapatkan panjang *patch* (L_p), terlebih dahulu mencari nilai konstanta dielektrik efektif (ϵ_{reff}) seperti pada Persamaan (2) berikut,

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12(h/W_p)}} \right] \quad (2)$$



Gambar 2: Desain Antena Mikrostrip *Patch* Persegi Dengan Pencatuan *Inset-Feeding*

dimana h adalah tebal *substrate*. Setelah itu menghitung ΔL dan L_{eff} menggunakan Persamaan (3) dan (4) berikut,

$$\Delta L = 0.412h \left[\frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W_p}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W_p}{h} + 0.8 \right)} \right] \quad (3)$$

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

Sehingga, panjang patch (L_p) dapat diperoleh dalam Persamaan (5) berikut:

$$L_p = L_{\text{eff}} - 2\Delta L \quad (5)$$

Selanjutnya untuk mendapatkan lebar saluran pencatu (W_s), tergantung dari impedansi karakteristik (Z_0) yang diinginkan dengan Persamaan (6) berikut,

$$W_s = \frac{2h}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{S_r - 1}{2\epsilon_r} \delta \right]$$

dengan $B = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$

$$\text{dan } \delta = \left(\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right)$$

Untuk kondisi $\frac{W_s}{h} < 1$ akan digunakan persamaan berikut untuk mencari ϵ_{reff} dan Z_0 ,

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12(h/W_s)}} + 0.04 \left(1 - \left(\frac{W_s}{h} \right)^2 \right) \right] \quad (7)$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \ln \left(\frac{8h}{W_s} + \frac{W_s}{4h} \right) \quad (8)$$

Sedangkan untuk kondisi $\frac{W_s}{h} > 1$ akan digunakan Persamaan (9) untuk mencari ϵ_{reff} dan Z_0 ,

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12(h/W_s)}} \right] \quad (9)$$

$$Z_0 = \frac{120\pi\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}}{\frac{W_s}{h} + 1.393 + \frac{2}{3} \ln \left(\frac{W_s}{h} + 1.44 \right)} \quad (10)$$

iii. Perancangan Antena Elemen Tunggal

Dimensi antena mikrostrip *patch* persegi dengan pencatuan *inset-feeding* yang dihitung menggunakan Persamaan (1)-(10) dapat dilihat pada Tabel 2. Desain ini kemudian disimulasikan menggunakan CST Microwaves Studio untuk melihat kinerja *return-loss*, VSWR dan pola radiasinya.

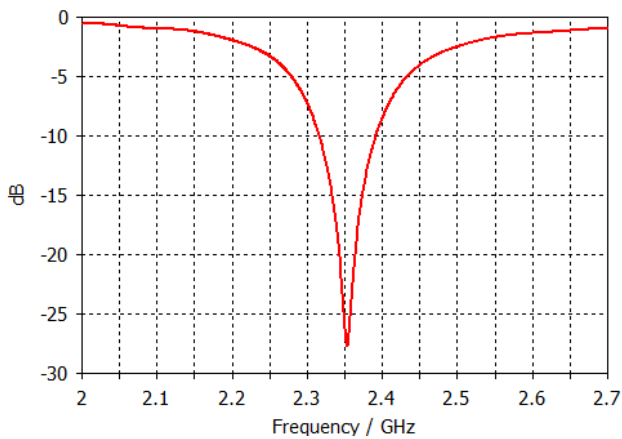
Tabel 2: Dimensi Antena Elemen Parameter Nilai

Parameter	Nilai
W_p	30.2 mm
L_p	30.2 mm
W_f	1 mm
L_f	9.5 mm
W_s	3.2 mm

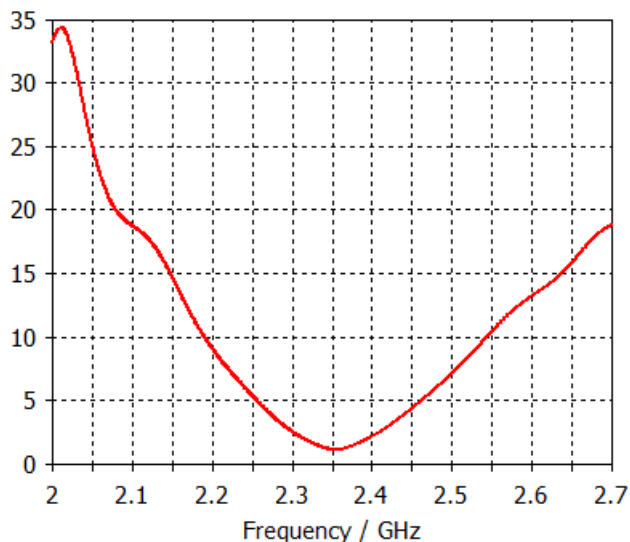
Gambar 3 menunjukkan hasil simulasi *return-loss* dimana terlihat bahwa desain ini bekerja dengan baik pada frekuensi kerja 2.35 GHz dengan nilai -25.8 dB. Selain itu, *bandwidth* yang didapatkan adalah sebesar 70 MHz, dari frekuensi 2.32 – 2.39 GHz. VSWR yang didapatkan adalah sebesar 1.1, lihat Gambar 4. Hasil simulasi pola radiasi Co- dan *Cross-polar* dapat dilihat pada Gambar 5. *Gain* maksimal yang didapatkan adalah sebesar 5.61 dBi, selain itu dari hasil ini juga dapat disimpulkan bahwa antena yang telah didesain memiliki polarisasi linier karena terdapat perbedaan nilai gain yang signifikan antara pola radiasi Co- dan *Cross-polar* pada sudut 0° . *Gain* sebesar 5.61 dBi pada pola radiasi *Co-polar*, sedangkan *Gain* sebesar -60 dBi pada pola radiasi *Cross-polar*.

Dari hasil perancangan ini dapat disimpulkan bahwa perancangan antena elemen tunggal menggunakan mikrostrip *patch* persegi dengan pencatuan *inset-feeding* sudah berhasil karena hasil simulasinya sudah

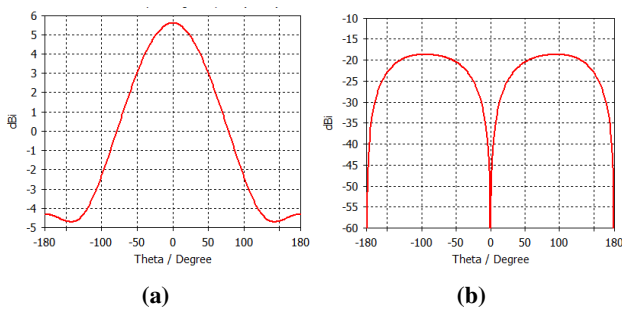
sesuai dengan spesifikasi target dan bekerja dengan baik pada frekuensi 2.35 GHz. Sehingga, antenna elemen tunggal ini selanjutnya akan disusun dalam susunan MIMO 2×2 .



Gambar 3: Hasil Simulasi *Return Loss* Antena Elemen Tunggal



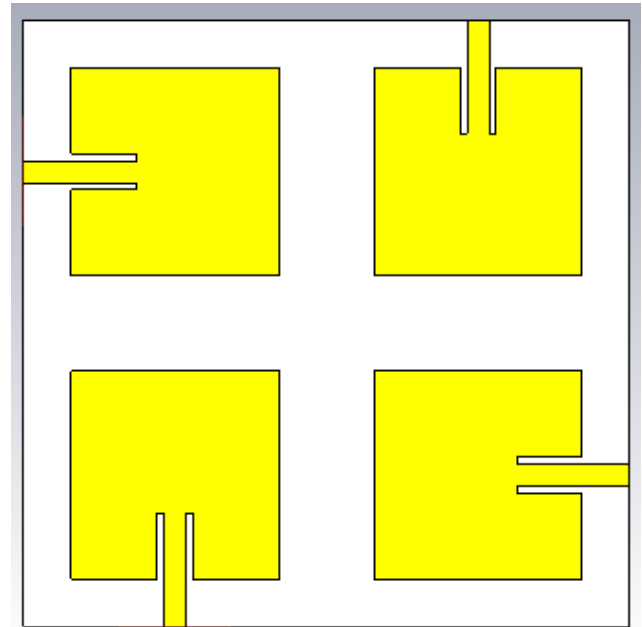
Gambar 4: Hasil Simulasi VSWR Antena Elemen Tunggal



Gambar 5: Hasil Simulasi Polaradiasi Antena Elemen Tunggal (a) *Co-Polar*, (b) *Cross-Polar*

iv. Perancangan Susunan Antena MIMO 2×2

Dalam perancangan MIMO, akan digunakan 4 antenna elemen disusun dalam konfigurasi MIMO 2×2 dimana antar elemen memiliki polarisasi tak seragam. Parameter analisisnya adalah *mutual coupling* dan korelasi dengan mempertimbangkan jarak antar. Gambar desain MIMO 2×2 dapat dilihat seperti pada Gambar 5.

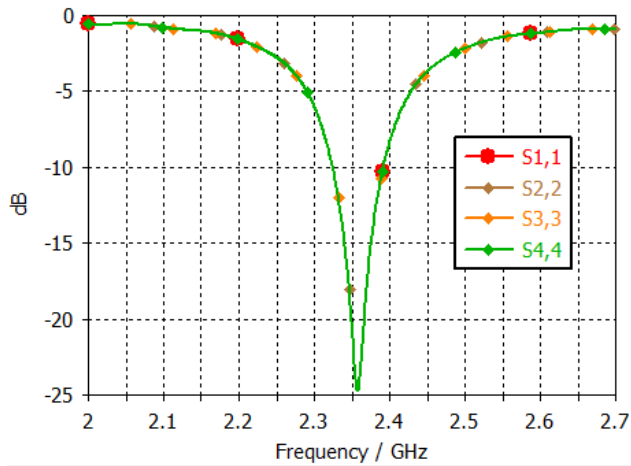


Gambar 6: Desain Antena Dengan Konfigurasi Susunan MIMO 2×2 dengan polarisasi tak seragam

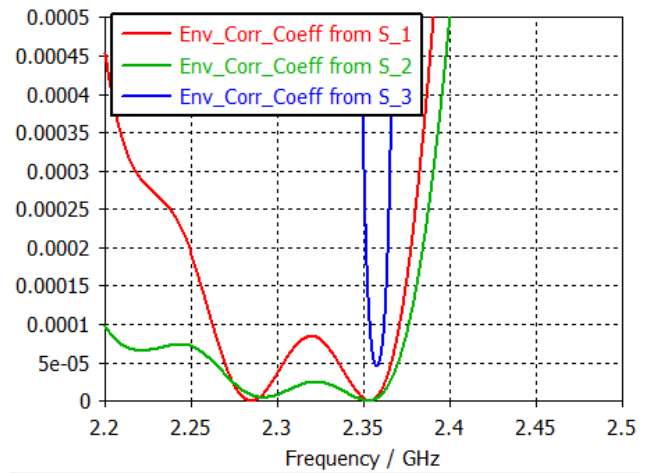
Desain pada Gambar 5 akan disimulasikan juga menggunakan CST Microwaves Studio. Hasil simulasi *return loss* masing-masing elemen, *mutual coupling* dan korelasi antar elemen antenna dapat dilihat pada Gambar (7)-(9). Dari hasil *return loss* elemen antenna MIMO 2×2 dapat dilihat bahwa semua elemen tetap mengalami kinerja yang baik pada frekuensi 2.35 GHz, yaitu -20.39 dB.

Hasil simulasi *mutual coupling* (Gambar 8) antar elemen juga menunjukkan kinerja yang sangat baik, dimana nilainya juga sudah sesuai target yaitu < -20 dB. Spesifikasi target untuk nilai korelasi antar elemen juga sudah tercapai seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9, yaitu < 0.2 . Nilai *mutual coupling* dan korelasi yang sangat kecil dibutuhkan karena masing-masing antenna elemen MIMO mewakili kanal yang berbeda dimana kanal tersebut harus mempunyai korelasi yang sangat rendah. Semakin rendah nilai korelasi, maka kinerja sistem MIMO akan semakin baik.

Proses selanjutnya adalah mencetak antenna elemen tunggal dan antenna susunan MIMO 2×2 kemudian dilakukan pengukuran untuk proses validasi hasil

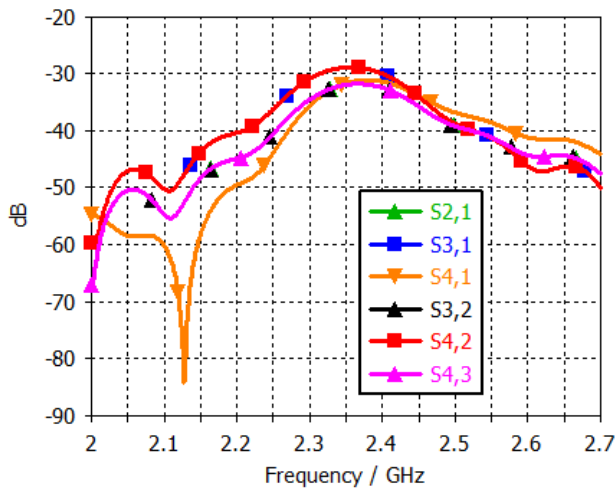


Gambar 7: Hasil Simulasi *Return Loss* Masing-Masing Antena Elemen MIMO 2 × 2



Gambar 9: Hasil Simulasi Korelasi Antar Antena Elemen MIMO 2 × 2

perancangan yang sudah berhasil dilakukan.



Gambar 8: Hasil Simulasi *Mutual Coupling* Antar Antena Elemen MIMO 2 × 2

III. HASIL PENELITIAN DAN DISKUSI

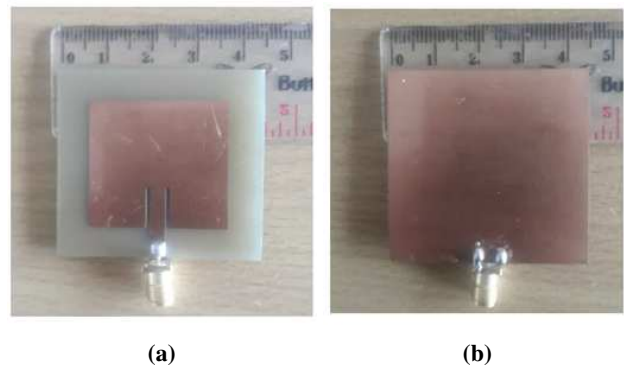
Pada bagian ini akan dibahas hasil pengukuran dari antena yang telah dicetak. Pengukuran yang dilakukan yaitu pada parameter *return loss* dan *mutual coupling* antar elemen. Pengukuran dilakukan menggunakan perangkat VNA. Kemudian dilakukan analisis perbandingan hasil pengukuran dan simulasi pada proses perancangan.

i. Hasil Antena Elemen Tunggal

Antena elemen tunggal yang telah dicetak dapat dilihat pada Gambar 10. Tampak depan antena pada Gambar 10(a) menunjukkan *patch* persegi dengan *inset-feeding*,

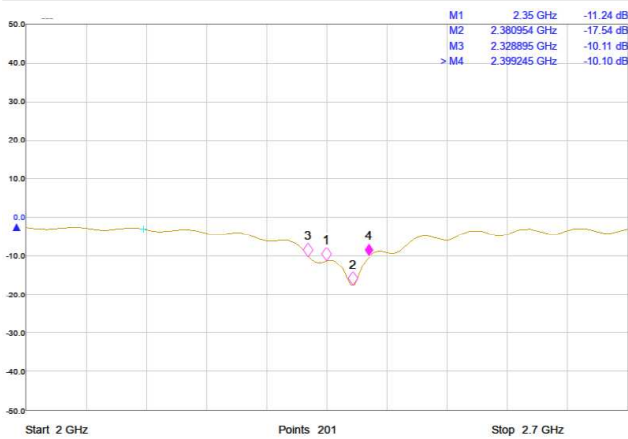
sedangkan tampak belakang pada Gambar 10b menunjukkan *ground-plane*. Antena mikrostrip *patch* persegi tersebut menggunakan konektor SMA-to-PCB yang terhubung dengan *feed-line* mikrostrip sebagai *input port*.

Hasil pengukuran *return-loss* (S_{11}) antena elemen tunggal ditunjukkan pada Gambar 11. Dapat dilihat bahwa nilai S_{11} yang didapatkan pada frekuensi 2.35 GHz adalah sebesar -11.24 dB, sedangkan nilai S_{11} terendah didapatkan pada frekuensi 2.38 GHz, yaitu -17.54 dB. Dari hasil pengukuran, *bandwidth* yang didapatkan adalah sebesar 80 MHz, dimulai dari 2.32 - 2.4 GHz.



Gambar 10: Antena Elemen Tunggal Yang Telah Dicitak (a) Tampak Depan (b) Tampak Belakang

Perbandingan hasil pengukuran dengan hasil simulasi ditampilkan pada Tabel 3. Dapat dilihat bahwa nilai S_{11} dari hasil pengukuran lebih tinggi 14.56 dB dibandingkan dengan hasil simulasi. Hasil pengukuran S_{11} tersebut masih dapat dikatakan baik karena masih di bawah batas maksimal yaitu -10 db. Selain itu, *bandwidth* yang didapatkan dari hasil pengukuran lebih lebar 10 MHz dibandingkan dengan hasil simulasi.

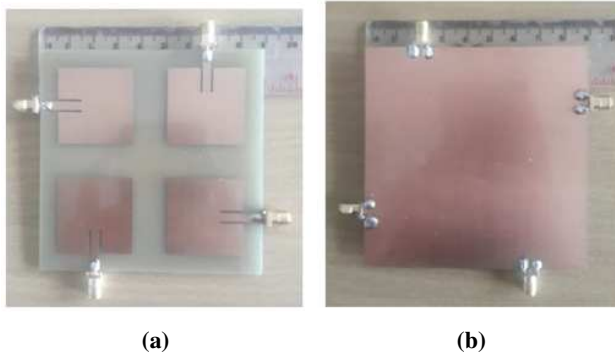


Gambar 11: Hasil Pengukuran *Return Loss* Antena Elemen Tunggal

Dari analisa ini dapat disimpulkan bahwa antenna yang dicetak bekerja baik pada frekuensi 2.35 GHz berdasarkan parameter *return-loss* (S_{11}).

Tabel 3: Perbandingan Hasil Simulasi dan Pengukuran Antena Elemen Tunggal

Parameter	Hasil	
	Simulasi	Pengukuran
S_{11} (at 2.35 GHz)	-25.8 dB	-11.24 dB
Bandwidth	70 MHz	80 MHz



Gambar 12: Antena Susunan MIMO 2×2 Yang Telah Dicetak (a) Tampak Depan (b) Tampak Belakang

ii. Hasil Susunan Antena MIMO 2×2

Selain antenna elemen tunggal yang dicetak, antenna yang telah disusun secara MIMO 2×2 juga dicetak dan ditunjukkan pada Gambar 12. Pada tampilan tampak depan Gambar 12(a) terlihat bahwa terdapat empat elemen antenna yang disusun dengan orientasi polarisasi yang berbeda, sehingga terdapat empat *input port* SMA-

to-PCB terletak di sisi yang berbeda satu dengan yang lain. Tampilan *ground-plane* dapat dilihat dari Gambar 12(b), tampak belakang antenna MIMO 2×2 yang telah dicetak.

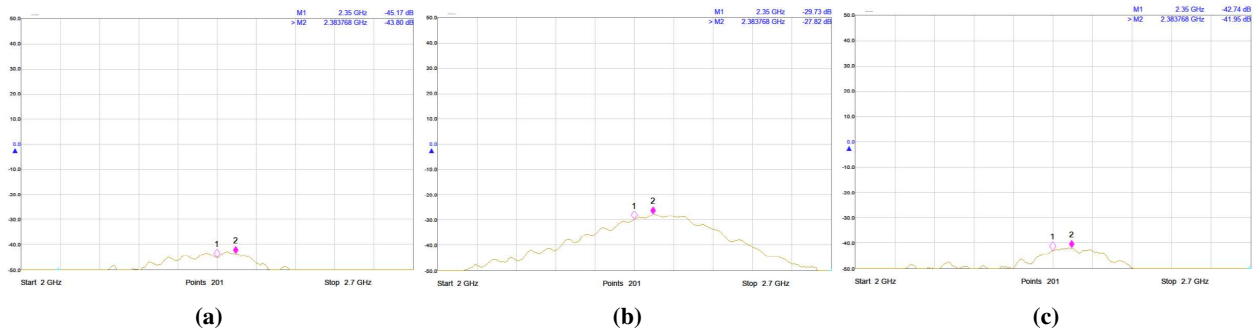
Hasil pengukuran *return-loss* untuk semua elemen antenna pada susunan MIMO 2×2 dapat dilihat pada Gambar 13. Hanya salah satu hasil pengukuran *return-loss* yang ditampilkan karena nilainya sama untuk semua elemen. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa nilai yang didapatkan adalah sebesar -9.66 dB pada frekuensi 2.35 GHz, sedangkan nilai terendah didapatkan pada frekuensi 2.38 GHz, yaitu -17.87 dB.



Gambar 13: Hasil Pengukuran *Return Loss* Antena Elemen MIMO 2×2

Pengukuran *mutual coupling* dilakukan dengan menggunakan elemen ke-1 sebagai referensi, sehingga pengukuran *mutual coupling* dilakukan untuk melihat efek pada elemen ke-2, ke-3, dan ke-4 terhadap elemen ke-1 (S_{21} , S_{31} , dan S_{41}). Hasil pengukurannya ditampilkan pada Gambar 14. Dari hasil pengukuran pada frekuensi 2.35 GHz, terlihat bahwa *mutual coupling* pada semua elemen bernilai < -20 dB, S_{21} sebesar -45.17 dB, S_{31} sebesar -29.73 dB, dan S_{41} sebesar -42.74 dB. Nilai ini artinya bahwa efek *mutual coupling* yang diterima pada masing-masing elemen nilainya sangat kecil sekali, dan sudah sesuai spesifikasi yang diinginkan.

Hasil pengukuran antenna susunan MIMO 2×2 yang telah didapatkan kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi dan ditampilkan pada Tabel 4. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa nilai S_{11} hasil pengukuran lebih tinggi 10.73 dB dibandingkan dengan hasil simulasi. Nilai S_{11} yang tinggi ini masih bisa diterima karena nilainya tidak jauh dari spesifikasi yang diinginkan. Hasil pengukuran untuk S_{21} , S_{31} , dan S_{41} nilainya lebih rendah sebesar 13.22 dB, 0.84 dB, dan 11.01 dB dibandingkan dengan hasil simulasi secara



Gambar 14: Hasil Simulasi *Mutual Coupling* Antar Antena Elemen MIMO 2×2 (a) S21 (b) S31 (c) S41

berurutan sehingga korelasi antar elemen antena pada susunan MIMO 2×2 sangat kecil sekali berdasarkan dari hasil pengukuran.

Tabel 4: Perbandingan Hasil Simulasi dan Pengukuran Antena Susunan MIMO 2×2

Parameter	Hasil	
	Simulasi	Pengukuran
S11	-20.39 dB	-9.66 dB
S21	-31.95 dB	-45.17 dB
S31	-28.89 dB	-29.73 dB
S41	-31.73 dB	-42.74 dB

IV. KESIMPULAN

Antena susunan MIMO 2×2 untuk aplikasi sistem komunikasi 5G telah dirancang, dicetak, dan diukur. Antena tersebut bekerja pada frekuensi band N40 (2.3-2.4 GHz) dengan frekuensi tengah 2.35 GHz. Elemen antena yang digunakan adalah antena *patch* yang berbentuk persegi dengan teknik pencatutan mikrostrip *insert feed-line*. Terdapat empat antena elemen yang digunakan pada konfigurasi MIMO 2×2 tersebut dengan susunan orientasi polarisasi yang berbeda. Antena ini dirancang menggunakan FR4 sebagai bahan *substrate*. Dari hasil perancangan simulasi dan pengukuran didapatkan bahwa antena elemen tunggal bekerja dengan baik pada frekuensi 2.35 GHz dengan nilai *return loss* sebesar -11.24 dB, *VSWR* 1.1, dan *bandwidth* sebesar 80 MHz. Untuk antena susunan MIMO 2×2 , nilai *mutual coupling* yang didapatkan nilainya < -20 dB. Nilai ini artinya efek dan korelasi antar elemen antena sangat kecil sekali. Nilai korelasi yang kecil ini sangat cocok sekali untuk aplikasi sistem komunikasi 5G yang menggunakan teknologi MIMO.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. N. Baryun dan K. Ben Hamed, "Evaluating data speed for 5g mobile technologies using queuing models," in *2021 IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology (AGERS)*, 2021, pp. 155–159.
- [2] F. Kurtz, C. Bektas, N. Dorsch, dan C. Wietfeld, "Network slicing for critical communications in shared 5g infrastructures - an empirical evaluation," in *2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft)*, 2018, pp. 393–399.
- [3] S. Jung, J. Kim, dan J.-H. Kim, "Intelligent active queue management for stabilized qos guarantees in 5g mobile networks," *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 4293–4302, 2021.
- [4] J. Prados-Garzon, J. J. Ramos-Munoz, P. Ameigeiras, P. Andres-Maldonado, dan J. M. Lopez-Soler, "Modeling and dimensioning of a virtualized mme for 5g mobile networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 5, pp. 4383–4395, 2017.
- [5] S. Ajose dan A. Ibhaze, "Improvement of gsm coverage using microcell," vol. 4, pp. 233 – 244, 01 2012.
- [6] S. Lippuner, B. Weber, M. Salomon, M. Korb, dan Q. Huang, "Ec-gsm-iot network synchronization with support for large frequency offsets," in *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2018, pp. 1–6.
- [7] H. K. Hoomod, I. Al-Mejibli, dan A. IssaJabboory, "Optimizing som for cell towers distribution," in *2017 Annual Conference on New Trends in Information Communications Technology Applications (NTICT)*, 2017, pp. 138–143.
- [8] A. Bhandari, Adil, J. Shrestha, R. D. Ntwalingwa, R. Hegde, dan S. Kumar, "Performance and improvement of gsm and 4g networking in development countries," in *2019 Third International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, 2019, pp. 273–278.
- [9] H. El Misilmani dan A. El-Hajj, "Massive mimo design for 5g networks: An overview on alternative antenna configurations and channel model challenges," in *2017 International Conference on High Performance Computing Simulation (HPCS)*, 2017, pp. 288–294.
- [10] E. G. Larsson, "Massive mimo for 5g: Overview and the road ahead," in *2017 51st Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, 2017, pp. 1–1.

- [11] F. W. Ardianto, N. M. A., dan B. Syihabuddin, "Analisis simulasi antena mimo 4 4 susunan persegi dan sirkular pada frekuensi 15 ghz," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi (JNTETI)*, 2018.
- [12] B. Tütüncü, "Microstrip antenna for 5g communication: Design and performance analysis," in *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, 2020, pp. 1–4.
- [13] D. Alvarez Outerelo, A. V. Alejos, M. Garcia Sanchez, dan M. Vera Isasa, "Microstrip antenna for 5g broadband communications: Overview of design issues," in *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 2015, pp. 2443–2444.
- [14] A. F. Kaeib, N. M. Shebani, dan A. R. Zarek, "Design and analysis of a slotted microstrip antenna for 5g communication networks at 28 ghz," in *2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 2019, pp. 648–653.
- [15] R. Przesmycki, M. Bugaj, dan L. Nowosielski, "Broadband microstrip antenna for 5g wireless systems operating at 28 ghz," *Electronics*, vol. 10, no. 1, 2021.
- [16] D. Imran, M. M. Farooqi, M. I. Khattak, Z. Ullah, M. I. Khan, M. A. Khattak, dan H. Dar, "Millimeter wave microstrip patch antenna for 5g mobile communication," in *2018 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, 2018, pp. 1–6.
- [17] I. E. Lamri, A. Mansoul, M. F. Nakmouche, dan M. Belattar, "Design of novel uwb 4-element mimo microstrip patch antenna for sub-6 ghz 5g applications," in *2021 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 2021, pp. 7–11.
- [18] G. Naga Jyothi Sree dan S. Nelaturi, "Design and experimental verification of fractal based mimo antenna for lower sub 6-ghz 5g applications," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 137, p. 153797, 2021.
- [19] K. Vasu Babu, S. Das, G. N. J. Sree, S. K. Patel, M. Pardha Saradhi, dan M. Tagore, "Design and development of miniaturized mimo antenna using parasitic elements and machine learning (ml) technique for lower sub 6 ghz 5g applications," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 153, p. 154281, 2022.
- [20] Y. Antar, "Microstrip antenna design handbook [book review]," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 45, no. 2, pp. 86–86, 2003.