

PERANCANGAN DAN ANALISIS ANTENA MIKROSTRIP MIMO MODIFIED SHAPE BOW-TIE PADA FREKUENSI 28 GHz

UNIVERSITAS TELKOM

DESIGN AND ANALYSIS MODIFIED SHAPE BOW-TIE
MIMO MICROSTRIP ANTENNA ON 28 GHz FREQUENCY
TELKOM UNIVERSITY

Ersyach Irham Sunny¹, Rina Pudji Astuti², Bambang Setia Nugroho³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹ersyachirsun@student.telkomuniversity.ac.id, ²rinapudjiastuti@telkomuniversity.ac.id,

³bambangsetianugroho@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Perkembangan teknologi di industri telekomunikasi sangatlah cepat dan berbanding lurus dengan kebutuhan konsumen. Konsumen selalu menuntut untuk pemenuhan akan kebutuhan pertukaran informasi yang cepat dan tersedianya layanan selama 24 jam non-stop. Teknologi 4G dianggap masih belum dapat memenuhi kebutuhan pelanggan, oleh karena itu disiapkan teknologi 5G. Di masa yang akan datang teknologi 5G yang sedang disiapkan ini ditujukan untuk melengkapi teknologi 4G bukan untuk menggantikannya. Teknologi 5G saat ini masih belum mempunyai standarisasi yang mengatur secara baku dalam penerapannya. Maka dari itu, para akademisi dan peneliti masih bebas melakukan eksperimen penelitian dan riset yang terkait dengan 5G.

Teknologi 5G dirancang untuk dapat memenuhi beberapa tujuan diantaranya adalah meningkatkan volume data, meningkatkan jumlah pelanggan yang terhubung, meningkatkan kecepatan akses data, meningkatkan efisiensi daya, dan mengurangi terjadinya delay. Salah satu solusi untuk mencapai tujuan tersebut adalah dengan menggunakan teknologi MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Pada studi sebelumnya, telah dibuat sebuah delapan susunan antenna yang dapat bekerja pada frekuensi 28 GHz sampai dengan 38 GHz dengan bentuk *patch leaf-shaped bow-tie* dengan pola radasi unidireksional.

Pada tugas akhir ini dilakukan perancangan, simulasi, dan analisis sebuah antenna mikrostrip MIMO yang dapat bekerja pada sistem 5G untuk aplikasi perangkat seluler yang memiliki bentuk *patch modified shape bow-tie* pada frekuensi 28 GHz dengan pola radiasi unidireksional, polarisasi linear, dan $bandwidth \geq 2$ GHz, yang selanjutnya dibuat menjadi sebuah susunan delapan antenna yang diletakkan pada sebuah PCB yang diasumsikan sebagai motherboard dari perangkat seluler.

Kata kunci : Antena Mikrostrip *Modified Shaped Bow-Tie*, MIMO, 5G

Abstract

Technological developments in the telecommunication industries is very fast and is directly proportional with the needs of consumers. Consumers are always demanding for the fulfillment of the need for rapid exchange of information and the availability of services for 24 hours non-stop. 4G technology is considered still can't meet customer needs, therefore 5G technology being prepared. In the future, 5G technology is being prepared to complement 4G technology not to replace it. The current 5G technology still does not have standardization set by default in its application. Therefore, academics and researchers are still free to conduct research and research experiments related to 5G.

The 5G technology is designed to meet multiple objectives including increasing the volume of data, increasing the number of connected subscribers, increasing data access speed, improving power efficiency, and reducing delay. One solution to achieve that goal is to use MIMO technology (*Multiple Input Multiple Output*). In the previous study, an eight array antenna were made to work at frequency of 28 GHz up to 38 GHz with a leaf-shaped bow-tie patch with unidirectional radiation pattern.

In this final project, designing, simulating and analyzing a MIMO microstrip antenna that can work on 5G system for mobile device application that has patch modified shape bow-tie shape at 28 GHz frequency with unidirectional radiation pattern, linear polarization, and $bandwidth \geq 2$ GHz, which is subsequently made into an array of eight antennas placed on a PCB assumed as mobile device motherboard.

Keyword: Modified Shape Bow-Tie Microstrip Antenna, MIMO, 5G

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi di dunia telekomunikasi sangatlah cepat dan berbanding lurus dengan kebutuhan konsumen. Konsumen selalu menuntut untuk pemenuhan akan kebutuhan pertukaran informasi yang cepat dan tersedianya layanan selama 24 jam *non-stop*. Teknologi 4G dianggap masih belum dapat memenuhi kebutuhan pelanggan, maka disiapkan teknologi 5G. Teknologi 5G disiapkan untuk melengkapi teknologi 4G bukan untuk menggantikannya. Teknologi 5G saat ini masih belum mempunyai standarisasi yang mengatur secara baku dalam penerapannya. Maka dari itu, para akademisi dan peneliti masih bebas melakukan eksperimen penelitian dan riset yang terkait dengan 5G

Banyak komponen yang dapat menunjang penerapan teknologi 5G, salah satu komponen penunjangnya adalah antena. Antena yang akan digunakan adalah jenis antena mikrostrip MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Sistem MIMO adalah sistem yang menggunakan banyak antena baik pada *transmitter* maupun *receiver* untuk mengatasi kelemahan pada sistem komunikasi *wireless* konvensional diantaranya adalah *large scale fading* dan *small scale fading* termasuk di dalamnya *multipath fading* serta interferensi dari sinyal lain. Pada sistem komunikasi bergerak, *multipath fading* terjadi karena adanya orientasi *user* yang berubah dan adanya *obstacle* pada lintasan kanal propagasi.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Naser Ojaroudi Parchin, Ming Shen, dan Gert Frolund Pedersen, terdapat desain antena mikrostrip dengan elemen bernama *leaf-shaped bow-tie* dengan frekuensi kerja 28 GHz dan 38 GHz yang memiliki 8 elemen peradiasi yang menghasilkan nilai $S_{11} < -25$ dB dengan *fractional bandwidth* masing-masing > 11 % pada frekuensi kerjanya.

Peneliti telah menetapkan beberapa kandidat frekuensi yang akan digunakan dalam teknologi 5G, yaitu 28 GHz, 38 GHz, 44 GHz, 60 GHz, dan 70 GHz. Namun, untuk selanjutnya diperkirakan frekuensi 28 GHz dan 38 GHz adalah kandidat terkuat frekuensi *carrier* yang akan digunakan dalam komunikasi seluler 5G^[4]. Selanjutnya, dibutuhkan desain antena yang memiliki karakteristik *wideband* bahkan mencapai *ultra wideband* agar dapat meningkatkan kapasitas kanal. Selain itu, dalam penerapannya antena ini harus dapat menjangkau ke segala arah dan tidak terpengaruh oleh orientasi pengguna.

Oleh karena itu, pada penelitian ini penulis menentukan bahwa akan merancang sebuah antena mikrostrip dengan elemen bernama *modified shape bow-tie* yang disusun secara linear *array* dengan 8 elemen yang memiliki rentang frekuensi antara 27 GHz sampai dengan 29 GHz dengan frekuensi tengah 28 GHz, yang memiliki pola radiasi quasi-isotropis agar memiliki daya pancar yang hampir sama pada setiap arah bidang. Antena ini akan dipasang pada kedua sisi telepon seluler dalam modus *multi-user* MIMO yaitu di sisi atas dan sisi bawah perangkat seluler yang bertujuan agar mengurangi dampak dari *multipath fading* akibat perubahan orientasi pengguna dalam menggenggam perangkat seluler

2. Dasar Teori

2.1 Teknologi 5G

Teknologi 5G merupakan istilah yang digunakan untuk merujuk pada generasi kelima dari teknologi telekomunikasi seluler. Kemajuan atau perkembangan dalam telekomunikasi seluler diukur dalam “generasi” tersebut berada. Dengan meningkatnya jumlah perangkat yang terhubung secara pesat akan menimbulkan beberapa tantangan baru yang akan dijawab dengan meningkatkan kapasitas dan dengan meningkatkan efisiensi energi, biaya dan pemanfaatan spektrum serta menyediakan skalabilitas yang lebih baik untuk menangani meningkatnya jumlah perangkat yang terhubung^[2]: 1) 1000 kali peningkatan volume data per wilayah 210 sampai 100 kali peningkatan jumlah perangkat yang tersambung 2) 10 sampai 100 kali peningkatan kecepatan data pengguna 3) 10 kali perpanjangan masa hidup baterai untuk perangkat daya rendah *Massive Machine Communication* (MMC) 4) 5 kali pengurangan delay End-to-End (E2E)

2.2 Antena MIMO

Penggunaan dari beberapa buah antena pada sisi pengirim dan sisi penerima pada sistem komunikasi *wireless* dikenal sebagai sebagai MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Sistem ini menggunakan M antena sebagai pemancar dan N antena sebagai penerima. Sehingga, memiliki sistem penulisan $M \times N$. Dengan demikian MIMO 4×4 memiliki arti bahwa jumlah antena pada sisi penerima dan sisi pengirim berjumlah empat buah^[4].

2.3 Antena Mikrostrip

Mikrostrip sendiri terdiri dari 2 buah suku kata yaitu *micro* (sangat kecil) dan *strip* (bilah / potongan). Sehingga antena mikrostrip dapat didefinisikan sebagai sebuah antena yang memiliki ukuran sangat kecil yang berbentuk seperti bilah / potongan^[6]. Antena mikrostrip terdiri dari 3 bilah bagian yaitu patch yaitu patch

pada salah satu sisi substrat dielektrik yang berfungsi sebagai peradiasi, substrat dielektrik yang memiliki tinggi (h) diantara $0.003\lambda_0 - 0.05\lambda_0$, dan groundplane dengan bahan konduktor sebagai pemantul sempurna^[5].

2.3 Array Antena

Pada antena *array* terdiri dari beberapa elemen antena yang dikelompokkan membentuk susunan antena. Seperti pada antena array pada umumnya, bagian *patch* yang disusun menjadi beberapa elemen. Elemen tunggal antena dapat berbentuk planar, wire, apertures, maupun jenis antena lain. Untuk meningkatkan kinerja antena mikrostrip, beberapa antena tunggal yang terhubung dan diatur dalam struktur teratur untuk membentuk satu antena. *Array* antena mampu menghasilkan pola radiasi yang dikombinasikan. Selain itu, memiliki karakteristik dimana antena elemen tunggal tidak memilikinya.

3. Perancangan

3.1 Spesifikasi Antena

Spesifikasi antena yang akan dibuat ditentukan oleh fungsi dari antena yang akan dibuat. Antena mikrostrip yang dirancang ini akan memiliki spesifikasi yang ditujukan untuk antena yang dipakai pada perangkat seluler yang dapat berfungsi sebagai *transmitter* maupun *receiver*. Berdasarkan cara kerja antena yang dipasang pada perangkat seluler dan kriteria teknologi 5G untuk perangkat tersebut, penulis berniat untuk membuat sebuah antena mikrostrip MIMO yang memiliki pola radiasi omnidirectional dengan *bandwidth* ≥ 2 GHz.

Spesifikasi dari antena yang dibuat dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Antena

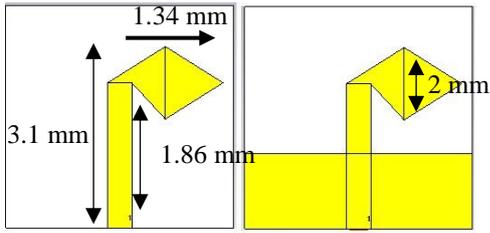
| No | Parameter | Keterangan |
|----|------------------------|-----------------|
| 1 | Frekuensi | 28 GHz |
| 2 | Pola Radiasi | Omnidireksional |
| 3 | Polarisasi | Linear |
| 4 | <i>Gain</i> | ≥ 0 dB |
| 5 | VSWR | ≤ 1.6 |
| 6 | <i>Bandwidth</i> | ≥ 2 GHz |
| 7 | <i>Return Loss</i> | ≤ -20 dB |
| 8 | <i>Mutual Coupling</i> | ≤ -20 dB |

3.2 Perancangan Dimensi Antena

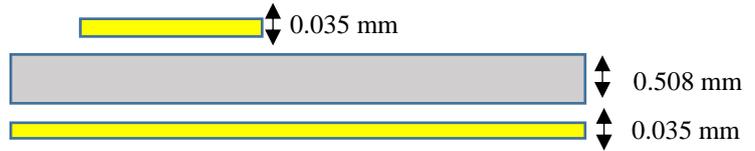
Dimensi ukuran yang terdapat dalam antena mikrostrip yang dirancang ini menggunakan rumus eksak yang telah dijabarkan pada bagian dasar teori. Dimensi yang akan diukur meliputi ukuran *patch*, ukuran catuan, dan jarak antar antena. Selanjutnya, antena akan disusun agar dapat memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Tabel 2 berisikan dimensi awal antena yang diperoleh dengan menggunakan rumus.

Tabel 2. Dimensi Awal Antena

| No | Parameter | Nilai (mm) |
|----|---------------------------|------------|
| 1 | Panjang <i>Patch</i> | 2 mm |
| 2 | Lebar <i>Patch</i> | 1.34 mm |
| 3 | Panjang Saluran Transmisi | 3.1 mm |
| 4 | Lebar Saluran Transmisi | 0.67 mm |
| 5 | Panjang Substrat | 3.72 mm |
| 6 | Lebar Substrat | 5.89 mm |
| 7 | Tinggi <i>Groundplane</i> | 1.86 mm |
| 8 | Jarak Antar Antena | 5.36 mm |

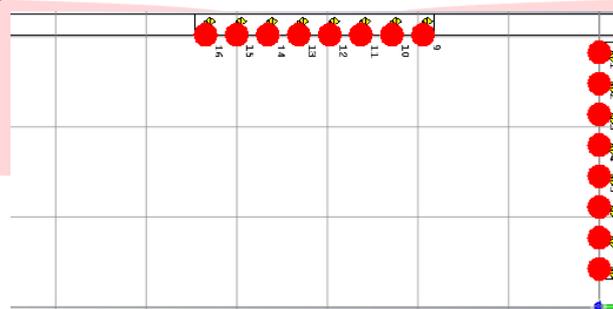


Gambar 2. Tampak Depan dan Belakang



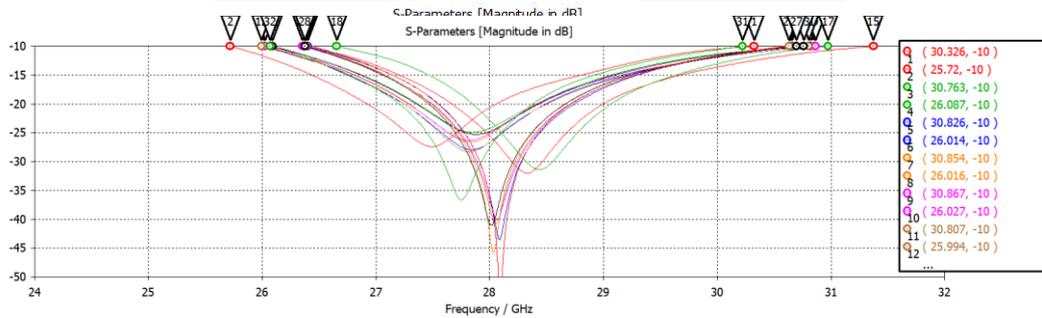
Gambar 3. Tampak Samping

Gambar 4 merupakan antenna konfigurasi pada PCB yang telah disusun dan melalui tahap optimasi di setiap tahap penyusunannya

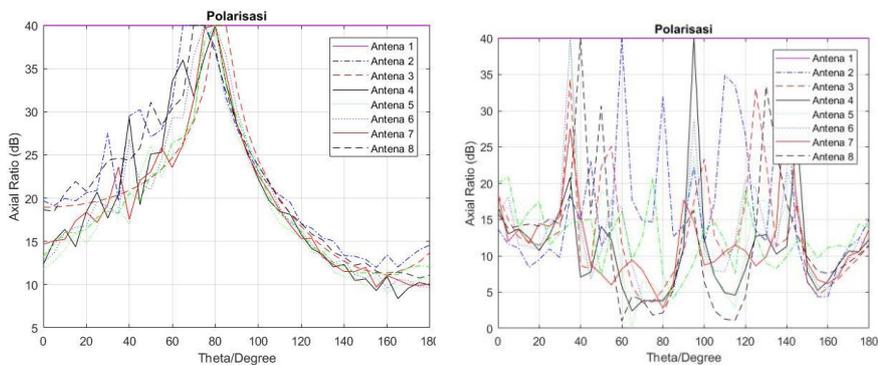


Gambar 4. Simulasi 64 Antena

Gambar 5 dan Gambar 6 merupakan parameter yang diperoleh setelah antenna konfigurasi melalui penyusunan dan perubahan dimensi.



Gambar 5. S-Parameter antenna



Gambar 6. Nilai axial ratio 16 Antena

Berdasarkan grafik, pada Gambar 5, S-Parameter dari setiap antenna dibawah -20 dB dan *bandwidth* dari antenna rata-rata adalah 4.516 GHz. Gambar 6 merupakan grafik *axial ratio* ketika 16 antenna, *axial ratio* di *main lobe* bernilai 40 dB atau berpolarisasi linier. Setelah dilakukan optimasi, dimensi dari antenna yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Dimensi Akhir Antena

| No | Parameter | Nilai (mm) |
|----|---------------------------|------------|
| 1 | Panjang <i>Patch</i> | 1.82 mm |
| 2 | Lebar <i>Patch</i> | 1.48 mm |
| 3 | Panjang Saluran Transmisi | 3 mm |
| 4 | Lebar Saluran Transmisi | 0.5 mm |
| 5 | Panjang Substrat | 4.7 mm |
| 6 | Lebar Substrat | 4.6 mm |
| 7 | Tinggi <i>Groundplane</i> | 1.7 mm |
| 8 | Jarak Antar Antena | 7.2 mm |

4. Analisis

Dalam tugas akhir ini dilakukan beberapa analisis yaitu pengaruh ukuran dimensi dan susunan antenna dengan nilai *bandwidth* dan *return loss*, analisis pengaruh ukuran dimensi antenna terhadap pola radiasi yang dihasilkan oleh satu elemen antenna, dan terakhir adalah analisis antenna yang telah dikonfigurasi dengan PCB perangkat seluler

4.1 Pengaruh Dimensi dan Susunan Antena terhadap *Bandwidth* dan *Return Loss*

Pada analisis yang pertama dilakukan dua perubahan variabel dimensi yaitu tinggi *groundplane* dan tinggi saluran transmisi serta penambahan, ukuran yang dijadikan analisis pengukuran diambil secara acak dengan asumsi dimensi variabel lain adalah tetap. Hasil percobaan tercantum secara berurutan pada Tabel 4, Tabel 5, dan Tabel 6

Tabel 4. Data Hasil Percobaan Analisis Dimensi Tinggi *Groundplane*

| Tinggi <i>Groundplane</i> | <i>Return Loss</i> | <i>Bandwidth</i> | Frekuensi Tengah |
|---------------------------|--------------------|------------------|------------------|
| 1.75 mm | -33.25 dB | 2.888 GHz | 28.024 GHz |
| 1.65 mm | -39.676 dB | 2.964 GHz | 28 GHz |
| 1.55 mm | -60.00 dB | 3.067 GHz | 28 GHz |
| 1.45 mm | -38.426 dB | 3.178 GHz | 28.01 GHz |
| 1.35 mm | -32.033 dB | 3.323 GHz | 28.04 GHz |

Tabel 5. Data Hasil Percobaan Analisis Dimensi Tinggi Saluran Transmisi

| Tinggi Saluran Transmisi | <i>Return Loss</i> | <i>Bandwidth</i> | Frekuensi Tengah |
|--------------------------|--------------------|------------------|------------------|
| 3.5 mm | -8.813 dB | 2.556 GHz | 28.024 GHz |
| 3.2 mm | -16.77 dB | 3.228 GHz | 27.28 GHz |
| 3 mm | -60.00 dB | 3.067 GHz | 28 GHz |
| 2.8 mm | -13.87 dB | 3.178 GHz | 28.88 GHz |
| 2.5 mm | -5.71 dB | 2.919 GHz | 30.5 GHz |

Tabel 6. Perbandingan Parameter *Return Loss* dan *Bandwidth* Antar Susunan Antena

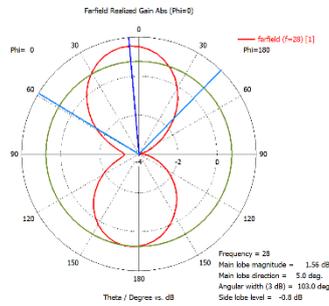
| Susunan Antena | <i>Return Loss</i> | <i>Bandwidth</i> (GHz) |
|-----------------|--------------------|------------------------|
| Satu antenna | -60 | 3.067 |
| Dua antenna | -23.49 | 3.982 |
| Empat antenna | -25.9 | 4.036 |
| Delapan antenna | -26.69 | 4.165 |

Berdasarkan ketiga percobaan yang dilakukan dengan hasil yang diperoleh, penambahan maupun pengurangan ukuran variabel dimensi antenna akan mempengaruhi nilai dari *return loss* dan *bandwidth* serta juga mempengaruhi frekuensi tengah dari antenna tersebut.

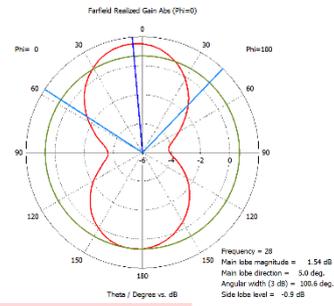
4.2 Pengaruh Dimensi *Groundplane* terhadap Pola Radiasi

Percobaan ini dilakukan untuk melihat pengaruh ukuran dimensi tinggi *groundplane* terhadap bentuk pola radiasi yang dipancarkan, dan melihat apakah ada kemungkinan antenna ini memiliki pola radiasi omnidireksional. Ukuran yang dianalisis diambil secara acak dengan dua ukuran ditambah ukuran asli dan dua ukuran dikurangi ukuran asli.

Ketika ukuran dimensi *groundplane* ditambah menjadi 1.6 mm dan 1.7 mm diperoleh nilai gain sebesar 4.65 dB dan 4.5 dB dengan bentuk pola radiasi yang secara berurutan terdapat pada Gambar 7 dan Gambar 8

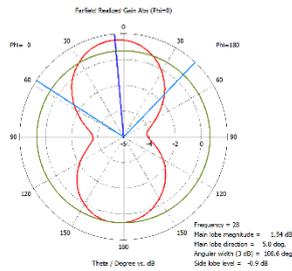


Gambar 7. Pola Radiasi ketika 1.6 mm

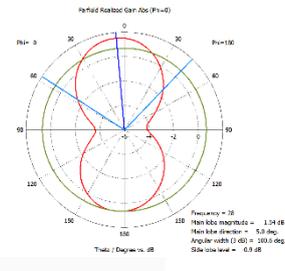


Gambar 8. Pola Radiasi ketika 1.7 mm

Ketika ukuran dimensi *groundplane* ditambah menjadi 1.5 mm dan 1.4 mm diperoleh nilai gain sebesar 4.77 dB dan 4.84 dB dengan bentuk pola radiasi yang secara berurutan terdapat pada Gambar 9 dan Gambar 10



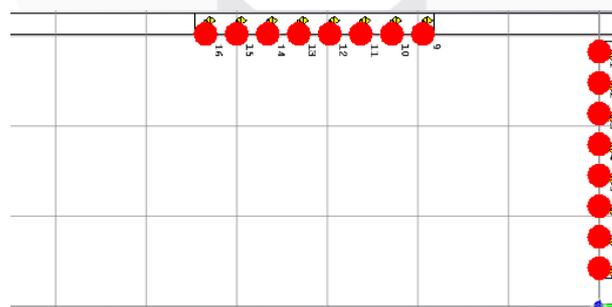
Gambar 9. Pola Radiasi ketika 1.5 mm



Gambar 10. Pola Radiasi ketika 1.4 mm

Berdasarkan hasil yang diperoleh, pola radiasi yang dihasilkan adalah tetap unidireksional dengan pengecualian semakin berkurang ukuran dimensi variabel tinggi *groundplane* akan semakin mendekati bentuk pola radiasi omnidireksional.

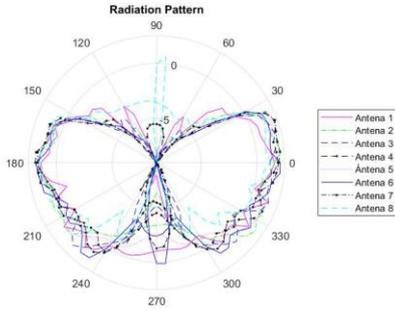
4.3 Analisis Antena Konfigurasi



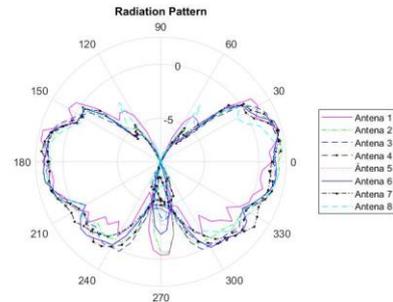
Gambar 11. Bentuk Antena Konfigurasi Konfigurasi

Pada analisis yang terakhir dilakukan ini akan dilakukan analisis menyeluruh terkait dengan antenna konfigurasi. Yang menjadi bahasan utama adalah pola radiasi, polarisasi, dan koefisien korelasi.

Pola radiasi yang dimiliki oleh antenna konfigurasi ini adalah unidireksional karena memiliki nilai gain > 0 dB untuk setiap antenanya. Pola radiasi enam belas antenna tersebut dapat dilihat pada Gambar 12 dan Gambar 13 dengan dibagi per sisi.

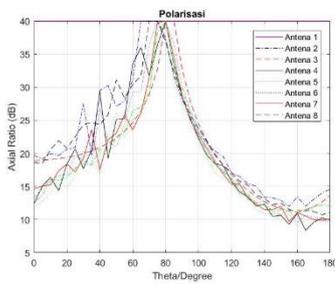


Gambar 12. Pola Radiasi Antena Sisi Atas

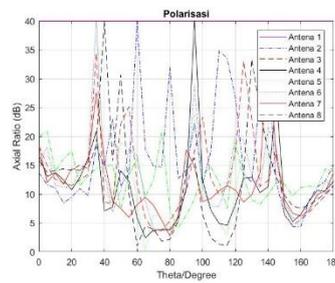


Gambar 13. Pola Radiasi Antena Sisi Samping

Selanjutnya untuk polarisasi yang dibentuk adalah linear untuk keenambelas antenna karena nilai *magnitude main lobe* nilai axial rasionya adalah 40 dB. Grafik *axial ratio* dari antenna konfigurasi ini terdapat dalam Gambar 14 dan Gambar 15, dimana dipisahkan berdasarkan sisi antenna itu berada.

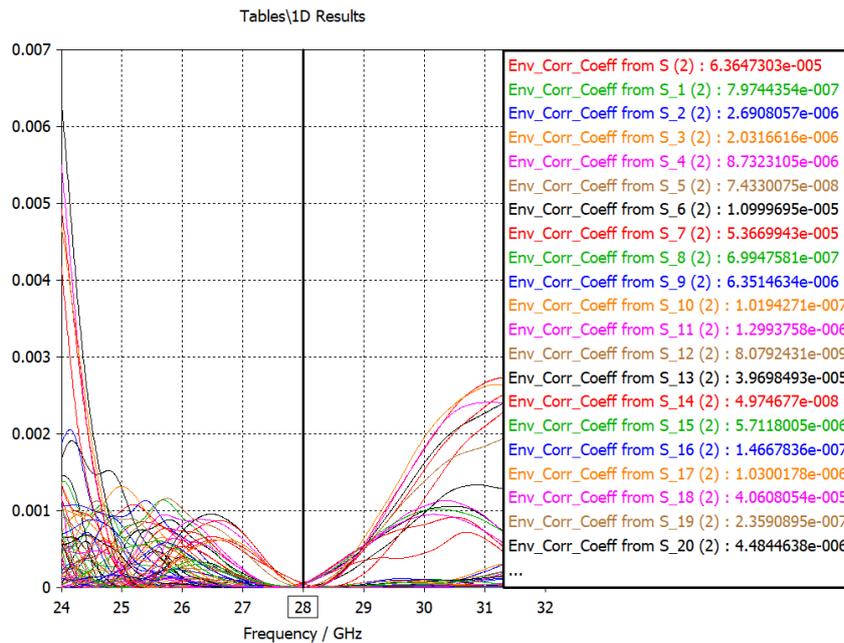


Gambar 14. Polarisasi Antena Sisi Atas



Gambar 15. Polarisasi Antena Sisi Samping

Besar dan kecilnya nilai koefisien korelasi mempengaruhi performa antenna tersebut. Berdasarkan Gambar 16 secara keseluruhan konfigurasi antenna ini memiliki nilai koefisien korelasi yang telah melewati batas minimum nilai yang disarankan yaitu 10^{-3} . Nilai terkecil yang dihasilkan adalah 8.079×10^{-9} dan nilai terkecil yang didapat berada pada 1.1×10^{-5}



Gambar 16. Koefisien Korelasi Antena Konfigurasi

5. Kesimpulan

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan, terdapat beberapa poin yang dapat dijadikan kesimpulan

1. Nilai *return loss* yang telah terpenuhi sesuai dengan keinginan penulis dari satu antenna hingga *array antenna* dibawah -20 dB
2. Target capaian *bandwidth* dari antenna sudah mencapai ≥ 2 GHz, baik untuk satu antenna maupun untuk *array antenna*.
3. *Mutual coupling* pada antenna nilainya dipengaruhi oleh jarak antar antenna. Semakin dekat jarak antar antenna nilai yang dimiliki akan semakin besar, semakin jauh letak antar antenna nilainya akan semakin kecil. *Mutual coupling* yang dimiliki tiap susunan antenna sudah memenuhi keinginan penulis yaitu bernilai ≤ -20 dB.
4. Nilai *bandwidth* dan *return loss* dipengaruhi oleh dimensi tinggi *groundplane* dan tinggi saluran transmisi, selain itu *bandwidth* yang dimiliki juga dipengaruhi oleh susunan antenna. Semakin banyak elemen antenna akan semakin bertambah nilai *bandwidth*nya.
5. Pola radiasi yang dipancarkan oleh setiap elemen antenna adalah unidireksional, karena nilai *gain* yang dimiliki oleh setiap antenna > 0 dB.
6. Pola radiasi yang dimiliki dipengaruhi oleh ukuran variabel dimensi tinggi *groundplanenya*. Semakin rendah ukurannya semakin mendekati pola radiasi omnidireksional, begitu pun sebaliknya semakin tinggi ukurannya akan semakin unidireksional pola radiasinya
7. Polarisasi yang dihasilkan oleh setiap susuna antenna adalah linear, karena *magnitude main lobe* nilai *axial rationya* adalah 40 dB.
8. Nilai koefisien korelasi yang dimiliki antar antenna sudah sesuai target capaian $\geq 10^{-3}$ dan dapat dikatakan bahwa antenna memiliki performansi yang bagus karena tidak saling mempengaruhi antar antenna yang satu dengan yang lain.

Daftar Pustaka

- [1] N. O. Parchin, M. Shen and G. F. Pedersen, "End-fire phased array 5G antenna design using leaf-shaped bow-tie elements for 28/38 GHz MIMO applications," *2016 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*, Nanjing, 2016, pp. 1-4.
- [2] A. Gupta and R. K. Jha, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," in *IEEE Access*, vol. 3, no. , pp. 1206-1232, 2015.
- [3] Osseiran, A., et al.: Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project. *IEEE Commun. Mag.* 52(5), 26 (2014).
- [4] Ezio Biglieri, Robert Calderbank, Anthony Constantinides, Andrea Goldsmith, Arogyaswami Paulraj, and H. Vincent Poor, "MIMO Wireless Communications", Cambridge.
- [5] David M. Pozar, Daniel H. Schaubert, "Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays", John Wiley & Son, inc, 1995.
- [6] J.R. James and P.S. Hall. , "Handbook of Microstrip Antennas", London: United Kingdom, 1989.
- [7] Kraus, John D. And Marhefka, Ronald J. "Third edition Antennas for All Applications"
- [8] Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Inder Bahl, Apisak Ittipoboon, "Microstrip Antenna Design Handbook", Artech House, inc, Norwood, 2001. asa
- [9] Balanis, Constantine A. 2005. "Antena Theory Analisis and Desain 3rd Edition". United Stated: Wiley InterScience.
- [10] M.K.A. Rahim, M.Z.A. Abdul Aziz, C.S. Goh, "Bow-tie Microstrip Antenna Design," in *IEEE, Wireless Communication Centre, Faculty of Electrical Engineering, University Teknologi Malaysia*, 2005.