

PENURUNAN MUTUAL COUPLING ANTENA MIMO MENGGUNAKAN PERIODIK DEFECTED GROUND STRUCTURE U-SHAPE

Liska Ammai¹, Levy Olivia Nur², Radial Anwar³

^{1, 2}Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

³Fakultas Ilmu Terapan, Universitas Telkom

¹ammaliska@student.telkomuniversity.ac.id, ²levyolivia@telkomuniversity.ac.id ,

³radialanwar@tass.telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Pada penelitian ini, peningkatan performansi antena mikrostrip MIMO dilakukan dengan menggunakan efek mutual coupling, maka dengan pencacatan bidang groundplane, atau yang biasa disebut dengan metode defected ground structure (DGS). Bentuk DGS yang digunakan adalah U-shape dan terbukti dapat mengurangi efek mutual coupling pada antena MIMO mencapai -22,833 dB dibandingkan dengan antena konvensional. Dengan menggunakan hingga 2 periodik, U-shape juga berhasil diperoleh pengurangan dimensi antena mencapai 29,89% dibandingkan dengan dimensi antena MIMO konvensional. Hal ini tentunya terbukti membuat metode DGS sesuai untuk digunakan pada antena dengan dimensi yang kecil dan mutual coupling yang baik pada massive MIMO pada aplikasi di perangkat portable.

Kata Kunci: defected ground structure (DGS); antena mikrostrip; U-shape; mutual coupling

Abstract

In this research work. The performance of microstrip MIMO antenna is improved by mutual coupling by defecting the field of the groundplane, also commonly referred as defected ground structure (DGS) method. The shape of DGS used is U-shape and has been proved to reducing the mutual coupling effect on the MIMO antenna, reaching up to -22,833 dB compared to conventional antenna. By using 2 periodic U-shapes, also managed to obtain a reduction of antenna dimensions reaching 29,894% compared to conventional MIMO antenna dimensions. It is proven that the DGS method suitable for use on antennas with small dimensions and the massive MIMO because it is suitable to reduce the mutual coupling effect on applications for portable devices.

Key Words: defected ground structure (DGS); microstrip antenna; U-shape; mutual coupling;

1. Pendahuluan

Dalam teknologi *microwave*, antena mikrostrip banyak digunakan pada akses radio untuk *mobile and wireless communication, satellite, radar* dan *millimeter wave communication*. Salah satu teknologi antena terbaru adalah *Multiple Input Multiple Output (MIMO)*. Teknologi ini telah menjadi bagian yang krusial pada sistem komunikasi nirkabel generasi ke-4 (4G). Fitur yang paling signifikan dari teknologi MIMO adalah dapat meningkatkan kapasitas saluran tanpa menambah *bandwidth* maupun peningkatan daya transmisi. Namun, terdapat kelemahan pada antena MIMO yaitu dibutuhkan *isolation port* antar *patch* yang tinggi dan ukuran yang tidak sederhana untuk aplikasi di perangkat *portable*.

Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan pada antena mikrostrip MIMO ini.

Salah satunya yaitu metode *Defected Ground Structure (DGS)* yang cukup populer karena dianggap strukturnya yang mudah untuk dibuat [1]. DGS adalah salah satu metode yang digunakan pada antena mikrostrip dengan merusak struktur pada bagian *groundplane* antena. Bentuk struktur yang digunakan baik satu bentuk ataupun beberapa bentuk pada *groundplane* tetap dianggap sebagai DGS [1]. Pada saat ini, DGS digunakan untuk berbagai macam aplikasi termasuk pada antena mikrostrip untuk meningkatkan *bandwidth* antena [2]-[3] untuk mendapatkan nilai *mutual coupling* yang baik pada antena *array* dan MIMO [4]-[5] untuk memperkecil dimensi ukuran antena mikrostrip [6]-[7].

Pada penelitian ini, dilakukan analisis perbandingan bentuk DGS pada antena mikrostrip konvensional dengan antena DGS bentuk *U-shape*.

Antena konvensional dan antena DGS akan memiliki frekuensi kerja yang sama dan bentuk *patch* yang sama. Dalam perancangannya, *patch* yang digunakan adalah *rectangular*, sedangkan frekuensinya adalah 3650 MHz yaitu menggunakan frekuensi dari aplikasi WiMAX serta nilai standar lain untuk parameter kerja antena mikrostrip secara umum.

2. Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Sistem MIMO digunakan pada komunikasi seluler, khususnya dimulai dari generasi 4G. Hal ini dikarenakan MIMO sangat membantu mengurangi terjadinya multipath fading, di mana fading tersebut bisa terjadi karena sinyal melalui rute-rute yang berbeda serta mengalami pemantulan maupun *blocking* oleh *obstacle* yang dilalui [5]. Dalam menyusun antena MIMO, perlu diperhatikan apakah akan disusun memanjang atau susunan lainnya. Antar antena juga harus diberikan jarak sepanjang d baik secara vertikal maupun horizontal agar meminimalkan isolasi dan tidak terjadi kebocoran data dari satu antena ke antena yang lainnya.

3. Antena Mikrostrip

Berdasarkan *IEEE Standard Definitions of Terms of Antenna*, antena diartikan sebagai sebuah alat yang dapat memancarkan dan menerima gelombang radio [6]. Dalam kata lain, antena merupakan sebuah perangkat transisi yang menghubungkan antara ruang bebas dengan pemandu gelombang. Struktur antena terdiri dari tiga lapisan yaitu paling bawah adalah *groundplane*, lalu ditengah adalah *substrat* dan lapisan paling atas adalah *patch*. Sementara itu, kekurangan dari antena mikrostrip yaitu memiliki *gain* yang lebih kecil, *bandwidth* yang sempit, serta radiasi yang berlebihan pada pencatutan [8]. Berdasarkan uraian tersebut, maka penulis menentukan pilihan pada penggunaan antena mikrostrip sebagai antena yang digunakan dikarenakan memiliki bentuk yang relatif kecil dan dapat dimodifikasi serta mampu bekerja pada frekuensi tinggi.

4. Defected Ground Structure

Defected Ground Structure (DGS) adalah suatu cara menekan gelombang permukaan dengan cara menghilangkan (*etch*) sebagian bidang *ground*. DGS merujuk pada geometri ukuran yang disebut unit sel yang merupakan satu bentuk bangun yang diletakkan pada *groundplane* dari *microwave printed circuit board* (M-PCB) yang bertujuan agar menghentikan gelombang elektromagnetik pada *layer substrat* sepanjang frekuensi operasi dari antena. Perbedaan bentuk dan ukuran DGS pada frekuensi operasi akan memberi perbedaan pada bentuk rangkaian penggantinya sesuai dengan daerah yang *defected* [9].

4.1 Satu Sel DGS

Satu sel DGS adalah satu geometri DGS yang mudah dan sederhana pada bidang *groundplane*. Geometri DGS yang termasuk bentuk yang sederhana adalah persegi dumbbell [4], [10], bentuk *U-shape* [11] dan lain-lain. Terdapat pula bentuk yang lebih kompleks yaitu *complementary split ring resonator* [5]. Bentuk DGS di implementasikan pada filter, pada antena mikrostrip, dan pada aplikasi *microwave* lainnya.

4.2 Periodik DGS

Pengulangan dari satu unit DGS yang terdapat pada bidang *groundplane* dapat membantu mendapatkan karakteristik stopband yang lebih baik. Dengan demikian, bentuk DGS yang mengalami pengulangan dari satu unit DGS dapat disebut sebagai periodik DGS. Untuk mendapatkan performansi yang lebih baik seperti *bandwidth* dan menekan *ripples* dapat menggunakan struktur DGS berbentuk *non-periodic*. Bentuk periodik DGS dapat disusun secara arah vertikal ataupun horizontal misalnya pada multi rings with slot [6], [12]. Hal ini dimaksudkan untuk dapat meningkatkan faktor *slow-wave* pada mikrostrip line dan bentuk waveguide lainnya, hal ini efektif untuk mendapatkan miniaturisasi ukuran antena.

5. Perancangan Antena

Untuk merancang suatu antena, diperlukan suatu spesifikasi khusus yang sudah disiapkan sehingga dapat memudahkan proses perancangan dan menjadi acuan dalam pembuatan suatu antena. Jenis antena yang dirancang adalah antena mikrostrip dengan *patch* berbentuk *rectangular*. Spesifikasi antena terdapat pada Tabel 1 ditetapkan berdasarkan tujuan perancangan ini yaitu untuk membandingkan nilai *mutual coupling* menggunakan metode *defected ground structure* pada antena MIMO. Adapun spesifikasi yang diharapkan dapat tercapai adalah sebagai berikut:

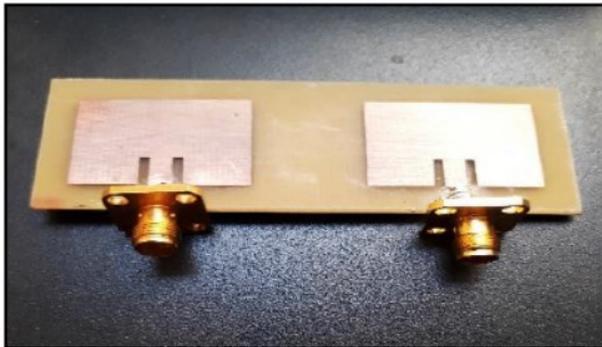
Tabel 1. Spesifikasi Antena Di Rancang

Frekuensi resonansi	3,65 GHz
Impedansi	50 W
VSWR	2
Mutual coupling	20 dB

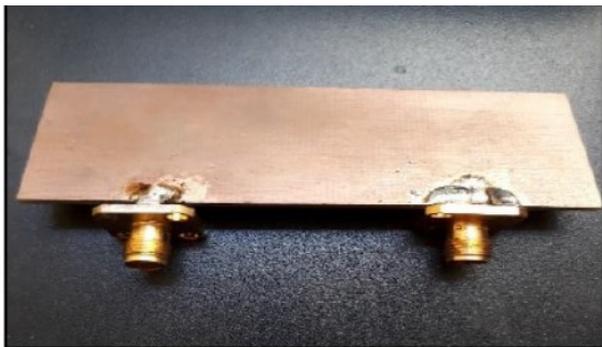
5.1 Pabrikasi Antena MIMO Konvensional

Setelah setiap variabel dari antena didapat melalui perhitungan, variabel-variabel tersebut kemudian diterapkan untuk merancang antena menggunakan *software* HFSS 15.0. Simulasi dilakukan untuk menguji

apakah antenna yang berdasarkan hasil perhitungan mencapai spesifikasi yang diinginkan. Apabila belum tercapai, perlu dilakukan optimisasi ukuran dari beberapa variabel antenna. Desain pertama adalah antenna konvensional MIMO 2x2 *patch rectangular*, yaitu antenna sebelum *defected ground structure* diletakkan pada bidang *groundplane*. Selanjutnya dilakukan pabrikan antenna konvensional seperti yang terlihat pada Gambar 1. Antenna konvensional hasil pabrikan ini menggunakan *epoxy FR-4* dan *cooper* sebagai bahannya. Terlihat pada Gambar 2 bahwa bagian belakang antenna adalah *groundplane* yang penuh tanpa tercacati bentuk DGS apapun.



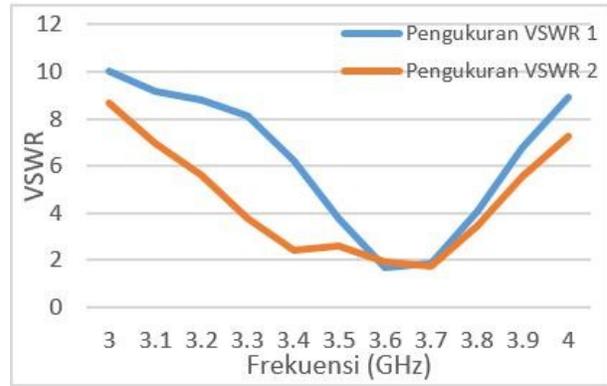
Gambar 1. Antena MIMO konvensional tampak depan (a)



Gambar 2. Antena MIMO konvensional tampak bawah (b)

5.2 Hasil Pengukuran MIMO Konvensional

Bentuk antenna konvensional MIMO 2x2 dapat dilihat pada Gambar 1 dan untuk nilai maksimum dari jarak pisah *patch* peradiasi yang digunakan adalah 14 [7]. Hasil pengukuran dari antenna hasil pabrikan dapat dilihat pada Gambar 3 yang menyajikan grafik nilai VSWR. Dari grafik tersebut dapat terlihat bahwa antenna hasil pabrikan telah berada pada puncak frekuensi

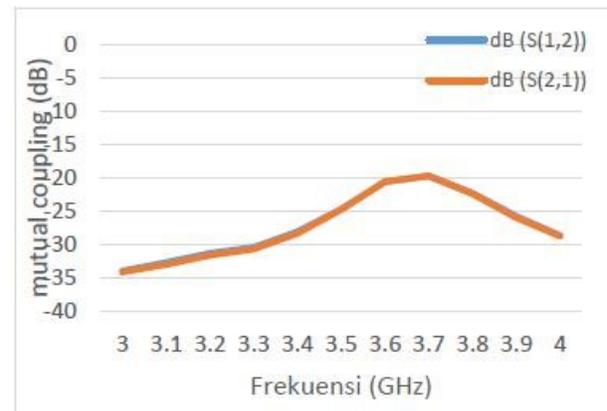


Gambar 3. Grafik perbandingan pengukuran VSWR MIMO konvensional

resonansi yang diharapkan yaitu 3,65 GHz dengan nilai VSWR adalah 1,325 dan 1,382 pada tiap *port*. Untuk parameter *mutual coupling*, hasil pengukuran antenna pabrikan disajikan pada Gambar 4. Berdasarkan hasil pengukuran nilai *mutual coupling* antenna pabrikan, didapatkan nilai sebesar -19,521 dB pada port 1 dan -19,543 dB pada *port* 2 dengan jarak 14 . Grafik hasil pengukurannya disajikan pada Gambar 4.

6. Desain DGS U-Shape

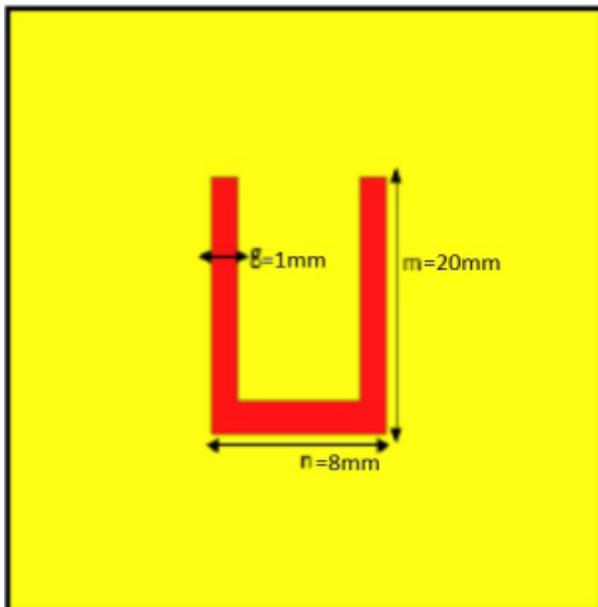
Setelah mendapatkan antenna konvensional, kemudian langkah selanjutnya adalah mendesain DGS *U-shape* pada *groundplane* antenna. Penelitian ini menyajikan analisis pengaruh periodik DGS dengan cara memvariasikan nilai variabel, sehingga didapatkan



Gambar 4. Grafik perbandingan pengukuran mutual coupling MIMO konvensional

karakteristik dari bentuk DGS pada penurunan efek *mutual coupling*. Gambar 5 6 adalah bentuk desain periodik DGS *U-shape* yang digunakan. Nilai yang menjadi referensi adalah variabel *n* yang merupakan

lebar sisi *U-shape* adalah 18 mm, variabel *g* yaitu lebar gap *U-shape* sebesar 4 mm dan variabel *m* adalah tinggi *U-shape* sebesar 20 mm [11]. Sebelumnya telah dilakukan simulasi dengan memvariasikan dimensi *U-shape* untuk setiap kondisi unit sel DGS dan juga periodik DGS dimana masing-masing hasilnya disajikan pada [12]. Setiap nilai dari variabel pada Gambar 56 divariasikan dengan mengecilkan dan memperbesar nilainya. Ukuran dimensi DGS dibatasi agar tidak melebihi dimensi *groundplane*. Desain dengan penurunan puncak frekuensi paling besar adalah dengan menggunakan nilai masing-masing variabelnya yaitu *n* sebesar 8 mm, *m* sebesar 10 mm dan *g* adalah 1 mm. Nilai parameter telah memenuhi standar sehingga desain inilah yang kemudian dipilih untuk dilakukan iterasi dan digunakan pada antenna MIMO.

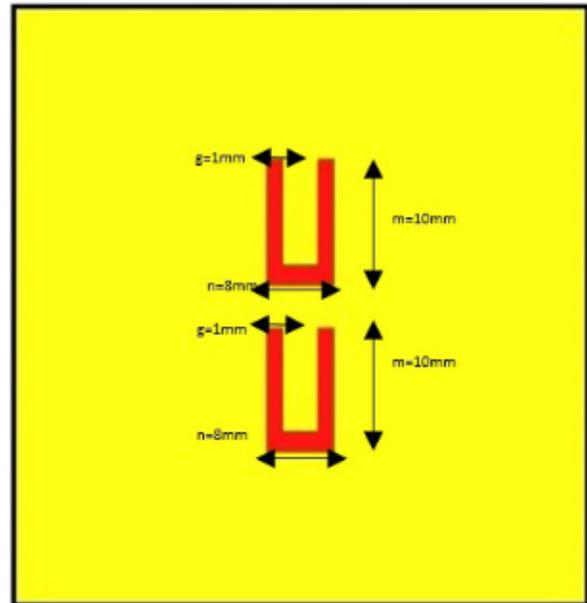


Gambar 5. Desain sel dan periodik DGS *U-shape* (a)

6.1 Desain Antena Periodik DGS *U-Shape*

Pada simulasi dimensi optimasi, diperoleh hasil yang paling maksimal adalah dengan menggunakan periodik dua *defected ground structure U-shapes*. Dimensi dari *U-shape* yang digunakan diambil dari dimensi hasil optimasi dimana setiap nilai variabel pada *U-shape* sebelumnya telah di variasikan dengan memperkecil dan memperbesar nilainya. Ketika sebelumnya telah didapatkan dimensi antenna MIMO konvensional yang telah memenuhi persyaratan dan kemudian didapatkan dimensi DGS *U-shape* yang paling optimum selanjutnya adalah mendesain 2 DGS *U-shapes* pada bagian *groundplane* antenna MIMO seperti terlihat pada Gambar 78.

Pada sistem antenna MIMO dimensi antenna sangat bergantung pada jarak pisah antar patch peradasi. Jarak

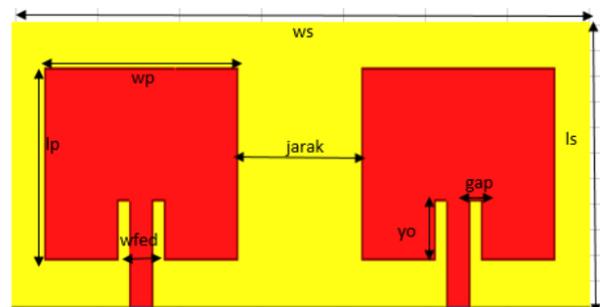


Gambar 6. Desain sel dan periodik DGS *U-shape* (b)

pisah ini dipengaruhi oleh nilai dari *mutual coupling* pada semua port antenna. Semakin jauh jarak pisahnya, maka dimensi antenna MIMO akan semakin besar dan begitupun sebaliknya. Dilain sisi, efek *mutual coupling* akan semakin tidak bagus jika *patch* peradiasi semakin dekat karena antenna akan dengan mudah dapat saling mempengaruhi satu sama lainnya.

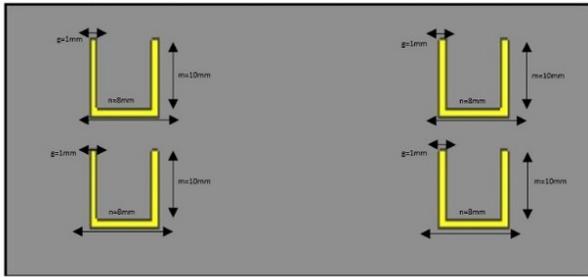
Pada penelitian ini, disajikan data hasil perubahan jarak pisah *patch* peradiasi dari jarak 12 hingga 110 pada antenna DGS *U-shape* untuk melihat berapa jarak pisah maksimum antar *patch* peradasi yang dapat digunakan. Hasil simulasinya dapat dilihat pada Gambar 9.

Nilai standar dari *mutual coupling* pada antenna MIMO adalah -20 dB dimana pada nilai inilah jarak pisah paling maksimum untuk masing-masing *patch* peradiasi. Seperti yang terlihat pada Gambar 9 bahwa



Gambar 7. Desain DGS *U shape* pada antenna MIMO tampak depan (a)

untuk jarak 14 nilai *mutual coupling* mencapai sebesar -22,833 dB sedangkan ketika mencoba untuk



Gambar 8. Desain DGS U-shape pada antenna MIMO tampak belakang (b)



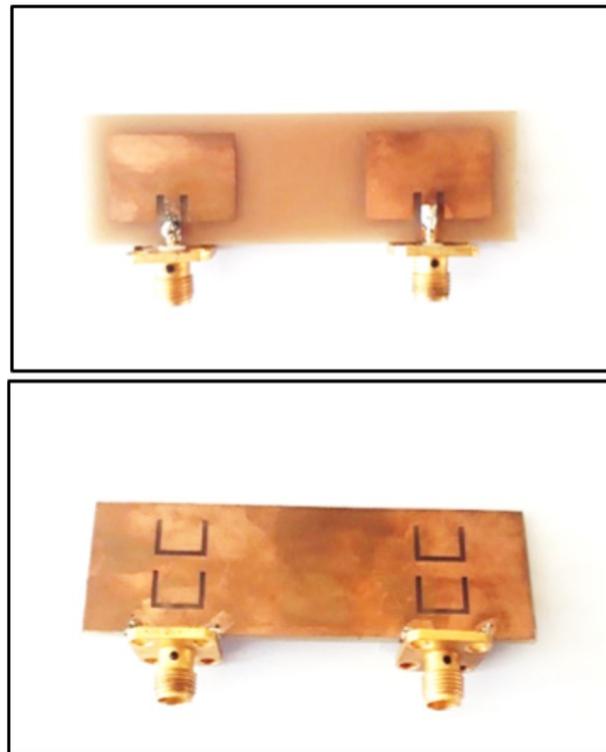
Gambar 9. Mutual coupling DGS MIMO

mendekatkan jarak pisah patch peradasi hingga 15 nilainya telah mencapai angka sebesar $-19,904 \text{ dB}$ dimana nilai ini sudah tidak memenuhi persyaratan untuk nilai standar *mutual coupling*. Berdasarkan hasil simulasi antenna MIMO konvensional dan antenna DGS, diperoleh jarak pisah maksimum dimana nilai *mutual coupling* masih memenuhi persyaratan yaitu pada 14. Nilai *mutual coupling* hasil pabrikasi antenna konvensional pada jarak tersebut adalah sebesar $-19,521 \text{ dB}$ dan $-19,543 \text{ dB}$ sedangkan untuk simulasi antenna MIMO *U-shape* nilai *mutual coupling* pada jarak yang sama mencapai $-22,833 \text{ dB}$. Pada hasil ini terlihat bahwa untuk simulasi menggunakan software simulator, antenna menggunakan DGS dapat memberikan nilai *mutual coupling* yang lebih baik daripada antenna konvensional tanpa *defected ground structure*. Pada kedua kondisi ini, antenna berada pada frekuensi resonansi yang sama yaitu 3,65 GHz. Selanjutnya, dilakukan pabrikasi antenna MIMO *U-shape* untuk melihat hasil pengukuran menggunakan alat ukur.

6.2 Pabrikasi Antena DGS U-Shape

Sama halnya pada desain sebelumnya yaitu pada antenna konvensional, untuk antenna menggunakan DGS,

setelah dilakukan desain pada *software* simulator selanjutnya akan diamati juga dari pengukuran antenna hasil pabrikasi. Antena DGS U-shape yang dicetak adalah yang merupakan hasil paling optimal dengan kondisi jarak pisah *patch* yang sama yaitu 14 dengan dua periodik *U-shapes* setelah sebelumnya pada Gambar 9 disajikan pengaruh jarak pisahnya. Antena yang dicetak menggunakan bahan *epoxy* FR-4 sebagai substrak dan cooper pada bagian *patch* dan *groundplane*. Antena yang telah dicetak kemudian diukur untuk melihat nilai parameter dalam antenna seperti pada antenna konvensional sebelumnya. Antena DGS *U-shape* hasil pabrikasi terlihat pada Gambar 10.

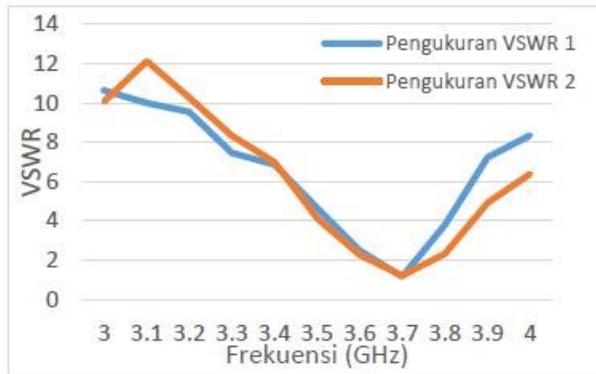


Gambar 10. Antena DGS U shape pabrikasi tampak depan (atas) dan tampak belakang (bawah)

7. Hasil Pengukuran DGS U-Shape

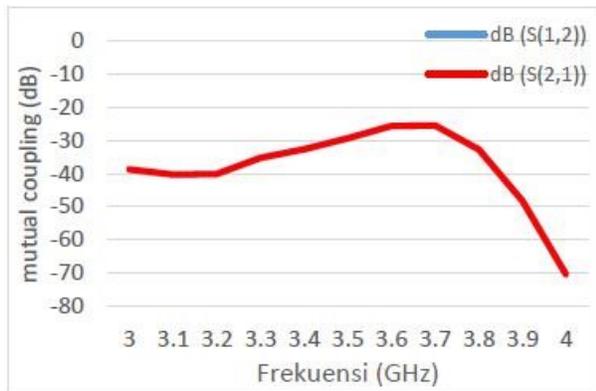
Antena DGS yang telah dipabrikasi selanjutnya diukur menggunakan *Network Analyzer* untuk melihat beberapa parameter kerja antenna seperti frekuensi puncak resonansi, nilai *VSWR* dan *mutual coupling*. Selanjutnya nilai hasil pengukuran setiap parameter ini akan diperbandingkan dengan hasil pengukuran antenna MIMO konvensional.

Grafik hasil pengukuran yang pertama adalah pada parameter frekuensi resonansi dan *VSWR* yang disajikan pada grafik Gambar 11. Perbandingan nilai *VSWR* antenna untuk masing masing *port* 1 dan 2. Terlihat pada



Gambar 11. Grafik pengukuran VSWR U-shape MIMO

Gambar 11 bahwa antenna MIMO DGS U-shape hasil pabrikan telah berada pada puncak frekuensi 3,65 GHz dengan nilai VSWR pada port 1 adalah 1,67 dan 1,60 pada port 2. Nilai ini telah memenuhi persyaratan yaitu dibawah 12. Sedangkan untuk nilai parameter *mutual coupling* grafiknya disajikan pada Gambar 12. Grafiknya terdiri dari perbandingan nilai *mutual coupling* antara antenna port 1 dan antenna port 2 hasil pengukuran. Terlihat pada Gambar 11 bahwa antenna MIMO DGS



Gambar 12. Grafik pengukuran mutual coupling U-shape MIMO

U-shape pada simulasi dan pabrikan dengan jarak pisah *patch* peradiasi adalah 14 menghasilkan nilai yang masing masing garis menunjukkan angka yang masih memenuhi nilai standar pada frekuensi yang diharapkan yaitu 3,65 GHz. Pada pengukuran antenna hasil pabrikan yaitu sebesar -22,833 dB. Hal ini menunjukkan bahwa pada pengukuran, antenna telah memenuhi spesifikasi yang diinginkan yaitu pada jarak pisah paling kecil dengan nilai *mutual coupling* lebih kecil sama dengan -20 dB. Untuk parameter kerja antenna lainnya, seperti puncak frekuensi kerja yang sama, nilai VSWR maupun

coupling antenna konvensional dan hasil pabrikan telah memenuhi persyaratan.

8. Analisis Pengaruh Mutual Coupling Pada Antena DGS

U-shape tersusun sedemikian rupa pada bagian belakang *groundplane* antenna dan berada diantara pusat dari masing-masing *patch* peradiasi. Konfigurasi dengan menggunakan dua *U-shapes* ini memastikan penekanan dari medan listrik terpolarisasi vertikal (gelombang ruang) antara dua *patch*. Koefisien transmisi antara dua *patch* peradiasi ditentukan untuk mengukur efek *mutual coupling*. Karena substrat tidak terlalu tebal, membuat bidang ruang gelombang pada substrat dengan medan listrik vertikal di atas *groundplane* ketika ini terjadi membuat distribusi arus permukaan pada *groundplane* salah satu antenna sementara antenna lainnya tetap pada impedansi awalnya yaitu 50 W.

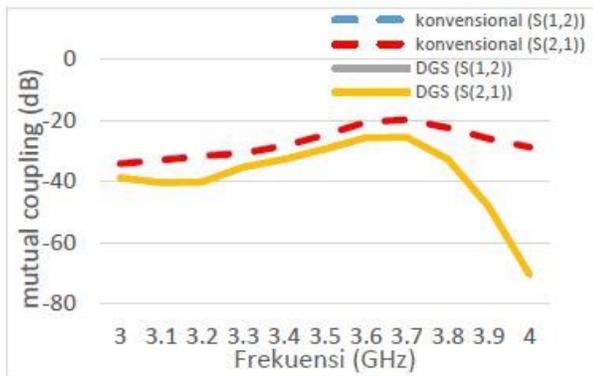
Pengurangan efek *mutual coupling* menjadi lebih baik dimungkinkan karena kemampuan *U-shape* yang tersusun vertikal secara periodik untuk secara efisien mampu menekan gelombang listrik ke *groundplane* antenna, yang pada akhirnya secara bergiliran akan mengurangi arus permukaan di *patch* antenna peradiasi

Untuk melihat dengan jelas pengaruh DGS yang dapat memberikan efek penurunan *mutual coupling* pada antenna MIMO, disajikan Gambar 13, yang memperlihatkan nilai *mutual coupling* antenna konvensional dengan antenna DGS *U-shape* hasil pabrikan yang memiliki frekuensi kerja yang sama yaitu pada 3,65 GHz. Semua antenna memiliki nilai yang sama untuk *mutual coupling* pada port 1 dan port 2 pada semua jenis antenna.

Terlihat pada Gambar 13 bahwa dengan menggunakan DGS pada antenna MIMO dapat memberikan efek yang baik pada *mutual coupling* antenna. Dengan DGS ini, antenna pada jarak pisah yang sama dan dimensi yang lebih kecil dapat memiliki performansi kerja yang jauh lebih baik daripada antenna konvensional.

9. Kesimpulan

Antenna MIMO menggunakan metode DGS terbukti dapat meningkatkan performansi antenna. Parameter *mutual coupling* pada antenna DGS memiliki nilai yang lebih baik mencapai nilai sebesar -25,019 dB pada jarak pisah 14 antara dua *patch* peradiasi. Selain memberikan efek yang baik pada *mutual coupling*, dengan menggunakan metode DGS ini dimensi antenna yang lebih rendah, juga menawarkan yakni penurunan sebesar 29,894% dari dimensi antenna konvensional. Hal ini tentunya terbukti membuat metode DGS cocok untuk digunakan pada antenna dengan dimensi yang kecil dan *mutual coupling* yang baik pada *massive* MIMO untuk aplikasi perangkat *portable*.



Gambar 13. Grafik perbandingan mutual coupling konvensional dan U-shape MIMO

Daftar Pustaka

- [1] M. K. Khandelwal, B. K. Kanaujia, and S. Kumar, "Defected ground structure: fundamentals, analysis, and applications in modern wireless trends," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2017, 2017.
- [2] C. Aanandan, A. Abbosh, M. Abdallah, M. Abou-Khousa, G. Addamo, A. Ahmadi, O. Ahmed, L. Ahumada, A. Akbarzadeh, J. Akkermans *et al.*, "2008 index ieee antennas and wireless propagation letters vol. 7," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, p. 811, 2008.
- [3] D. S. Marotkar and P. Zade, "Bandwidth enhancement of microstrip patch antenna using defected ground structure," in *2016 International conference on electrical, electronics, and optimization techniques (ICEEOT)*. IEEE, 2016, pp. 1712–1716.
- [4] S. S. Khade and S. Badjate, "Square shape mimo antenna with defected ground structure," in *2018 4th International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT)*. IEEE, 2018, pp. 1–5.
- [5] M. M. Bait-Suwailam, O. F. Siddiqui, and O. M. Ramahi, "Mutual coupling reduction between microstrip patch antennas using slotted-complementary split-ring resonators," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 876–878, 2010.
- [6] L. Ammai, R. Anwar, and D. A. Nurmantris, "Analysis on multi rings defected ground structure for microstrip antenna miniaturization," in *2017 International Conference on Engineering Technology and Technopreneurship (ICE2T)*. IEEE, 2017, pp. 1–4.
- [7] L. AMMAI, "Miniaturisasi antena mikrostrip menggunakan defected ground structure pada frekuensi fixed wimax 3.65 ghz," 2017.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2015.
- [9] M. Sabran, S. Rahim, M. Yusof, A. Eteng, M. Nor, and I. Ibrahim, "Miniaturized proximity coupled antenna with slot ring as defected ground structure," in *2014 IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA)*. IEEE, 2014, pp. 81–85.
- [10] M. I. Ahmed, A. Sebak, E. A. Abdallah, and H. Elhennawy, "Mutual coupling reduction using defected ground structure (dgs) for array applications," in *2012 15 International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*. IEEE, 2012, pp. 1–5.
- [11] K. Wei, J.-Y. Li, L. Wang, Z.-J. Xing, and R. Xu, "Mutual coupling reduction of microstrip antenna array by periodic defected ground structures," in *2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*. IEEE, 2016, pp. 389–390.
- [12] R. Anshari, L. O. Nur, and B. Syihabuddin, "Analisis antena mikrostrip mimo 8×8 dengan patch berbentuk segitiga pada frekuensi 15 ghz," *eProceedings of Engineering*, vol. 6, no. 2, 2019.