

Konfigurasi Optimum pada Susunan Linear Antena MIMO Mikrostrip Polarisasi Sirkular

RINA PUDJI ASTUTI, TRASMA YUNITA, LINDA MEYLANI

Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, Indonesia
Email: rinapudjiastuti@telkomuniversity.ac.id

Received 31 Juli 2021 | *Revised* 24 Agustus 2021 | *Accepted* 16 September 2021

ABSTRAK

Untuk memastikan sistem antena MIMO memiliki kapasitas kanal yang diharapkan, maka rancangan antenanya harus memenuhi indikator kinerja optimum, yang ditentukan oleh karakteristik dari elemen penyusun dan konfigurasi susunan antena MIMO. Polarisasi antena merupakan aspek yang mempengaruhi mutual coupling antar elemen antena pada MIMO. Sebagai salah satu parameter penting, maka konfigurasi polarisasi elemen antena pada proses desain harus dikaji dengan baik. Pada paper ini sebagai kontribusi penelitian, dilakukan kajian secara mendalam mengenai susunan linear elemen mikrostrip dengan polarisasi sirkular untuk antena MIMO pada frekuensi sub-6 GHz. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi B dan C yang merupakan konfigurasi polarisasi silang yang memiliki rentang frekuensi 2,04 x dan 2,08 x lebih lebar dibandingkan konfigurasi A, yang memiliki rentang frekuensi terendah berdasarkan Envelope Cross Correlation (ECC), dan memiliki rentang frekuensi 3,9 x dan 3,87 x lebih lebar dibandingkan konfigurasi E yang memiliki rentang frekuensi terendah berdasarkan Diversity Gain (DG).

Kata kunci: MIMO, antena, polarisasi sirkular, konfigurasi.

ABSTRACT

To ensure MIMO antenna system has the expected channel capacity, antenna design needs to meet the requirement of MIMO antenna optimal performance indicators, that are determined by the characteristics of the constituent elements and the configuration of the MIMO antenna array. Antenna polarization is a feature that affects the mutual coupling between antenna elements in MIMO. Therefore, the configuration of antenna element polarization in the design process needs to be well studied. Our research contribution in this paper is an in-depth study of the linear arrangement of circularly polarized microstrip elements for MIMO antennas at sub-6 GHz frequencies. The simulation results show that B and C configuration as cross-polarizing configuration have 2,04 x and 2,08 x wider bandwidth than A configuration, that has narrowest bandwidth based on Envelope Cross Correlation (ECC), and have 3,9 x and 3,87 x wider bandwidth than E configuration, that having narrowest bandwidth based on Diversity Gain (DG).

Keywords: MIMO, antenna, circular polarization, configuration.

1. PENDAHULUAN

Kondisi kanal Multiple Input Multiple Output (MIMO) tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah antena dan jaraknya, namun juga dipengaruhi oleh karakteristik antena penyusun pada pengirim dan penerima. Kontribusi karakteristik antena pada kanal MIMO. Karakteristik antena terkait pada sistem MIMO kemudian akan memberikan pengaruh terhadap korelasi spasial antar antena **(Flaviis, dkk, 2008) (Liu, dkk, 2008) (Hui, 2009) (Gustafsson, dkk, 2014)**. Beberapa penelitian sebelumnya sudah mengkaji tentang pengaruh mutual impedansi dan pola radiasi antena terhadap kinerja antena MIMO. Interaksi antar antena yang digambarkan dengan impedansi gandeng kemudian juga dipengaruhi oleh karakteristik medan antena seperti polarisasi. Berdasarkan pertimbangan tersebut maka polarisasi juga memiliki pengaruh, akan tetapi studi tentang hal ini masih kurang **(Chen, dkk, 2016) (Chen, dkk, 2018) (Wallace, dkk, 2004) (Li, dkk, 2004) (Liu, dkk, 2010)**.

Studi tentang pengaruh polarisasi terhadap karakteristik antena MIMO kemudian menjadi kajian pada penelitian ini. Pengetahuan tentang pengaruh polarisasi tersebut kemudian digunakan sebagai acuan dalam menyusun konfigurasi polarisasi elemen pada antena MIMO **(Pramudita, dkk, 2018) (Pramudita, dkk, 2020)**. Konfigurasi atau penyusunan elemen antena secara optimum perlu menjadi pertimbangan dalam merancang suatu sistem antena MIMO sehingga memberikan dukungan capaian kapasitas kanal yang optimal. Telah ditunjukkan juga bahwa polarisasi elemen antena pada susunan memberikan pengaruh terhadap impedansi gandeng yang muncul **(Kraus, dkk, 2020) (Balanis, 2016)**. Sejumlah penelitian untuk menghasilkan impedansi gandeng yang rendah telah dilakukan. Struktur dinding 3 dimensi sebagai isolasi diusulkan untuk menekan level coupling **(Jiao, dkk, 2018)**. Struktur *electromagnetic band gap* (EBG) telah diusulkan juga sebagai suatu teknik untuk menekan level coupling **(Jiang, dkk, 2017)**. Metode decoupling berbasis saluran transmisi juga telah dikaji dan diusulkan untuk antena MIMO array **(Zhang, dkk, 2019)**. Penggunaan meander line pada groundplane berslot juga telah dibuktikan dapat mengurangi mutual coupling **(Li, dkk, 2018)**. Namun demikian sejumlah metode yang telah diusulkan sebelumnya memberikan peningkatan kompleksitas pada desain antena. Untuk memperoleh keuntungan dari diversitas antena maka polarisasi sirkular – *Circular Polarization* (CP) dipilih dibanding lainnya. Polarisasi sirkular terdiri atas *Left Hand Circular Polarization* (LHCP) dan *Right Hand Circular Polarization* (RHCP). Jenis polarisasi elemen-elemen antena MIMO memberikan pengaruh terhadap level coupling antar elemen pada antena MIMO. Studi terhadap polarisasi elemen antena berkaitan dengan level daya dan level coupling antar elemen. Level daya terima akan dipengaruhi oleh tingkat kesesuaian polarisasi dan level coupling akan memberikan pengaruh terhadap korelasi antar elemen antena. Pengaturan polarisasi berpotensi mempengaruhi kinerja antena MIMO. Hal ini telah banyak dikaji, antena dengan dua pasang slot berbentuk T-shaped pada Bowtie patch yang menghasilkan dual polarisasi dan menghasilkan isolasi yang tinggi **(B. Li, dkk, 2012)** dan antena planar menggunakan metasurface dan slot yang menghasilkan isolasi tinggi **(Zhu, dkk, 2014)**. Pada penelitian ini suatu studi kasus terhadap susunan linear antena mikrostrip untuk sistem MIMO digunakan dalam menyelidiki pengaruh konfigurasi polarisasi elemen antena terhadap parameter-parameter antena MIMO seperti *diversity gain* (DG), *envelope cross correlation* (ECC), *Maximum effective Gain* (MEG) dan *Total active reflection Coefficient* (TARC) **(Flaviis, dkk, 2008) (Cheh Lin, dkk, 2019)**. TARC memperhitungkan penyepadanan impedansi, mutual coupling dan efisiensi radiasi pada port catuan. Mutual coupling yang tinggi menyebabkan TARC yang lebih buruk **(X. Chen, dkk, 2018)**.

Pengetahuan tentang pengaruh penyusunan polarisasi yang diperoleh kemudian digunakan sebagai acuan dalam menentukan konfigurasi optimum dari elemen-elemen antena untuk

mendukung capaian kinerja antenna MIMO yang optimal berdasarkan sejumlah parameter kajian yang telah disebutkan sebelumnya. Studi simulasi dengan perangkat lunak komputasi numerik struktur elektromagnetik dilakukan untuk mendapatkan konfigurasi optimum yang dimaksud. Studi kasus pada susunan sumbu untuk antenna mikrostrip berpolarisasi sirkular dan dilakukan pada frekuensi sub-6 GHz. Analisis dilakukan dengan melakukan simulasi komputer menggunakan CST Studio dan Matlab. CST Studio untuk memberikan informasi tentang karakteristik antenna dan Matlab untuk melakukan perhitungan indikator kinerja dari antenna MIMO.

Pembahasan hasil studi yang dilakukan disusun sebagai berikut; pada bagian 1 disampaikan tentang latar belakang dan permasalahan yang diangkat pada penelitian. Kemudian pada bagian 2 dijelaskan metodologi penelitian dan rancangan susunan linear mikrostrip berpolarisasi sirkular untuk sistem MIMO. Pada bagian 3 dilakukan pembahasan terhadap hasil-hasil yang diperoleh dengan melakukan analisis berdasarkan indikator kinerja antenna MIMO yang telah disebutkan sebelumnya. Kemudian yang terakhir adalah simpulan dari studi yang dilakukan.

2. METODE PENELITIAN

Untuk melakukan penentuan konfigurasi polarisasi optimum pada antenna MIMO susunan linear, maka dilakukan studi kasus pada sistem antenna MIMO dengan elemen mikrostrip persegi yang bekerja pada frekuensi sub-6 GHz. Elemen antenna mikrostrip persegi yang digunakan memiliki polarisasi sirkular dengan pemotongan sudut sebagai metode pembangkitannya. Pengaturan letak titik catu digunakan sebagai metode untuk mengatur jenis polarisasi sirkularnya dengan pola RHCP atau LHCP. Antenna mikrostrip dimodelkan dengan bahan substrat RO4003 dengan ketebalan substrat 0.8 mm dan $\epsilon_r=3.38$. Elemen antenna mikrostrip yang digunakan memiliki dimensi dengan nilai w , a , h , dan f berturut-turut adalah 15 mm, 1.9 mm, 0.8 mm dan 3.9 mm, terdapat pada Gambar 1(a). Ukuran dari panjang dan lebar dari elemen antenna ditentukan berdasarkan perhitungan Persamaan (1) dan Persamaan (2) menurut **(Balanis, 2016)**, sedangkan pemotongan sudut antenna ditentukan berdasarkan Persamaan (3) menurut pembahasan pada **(Sainati, 1996)**.

$$w = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

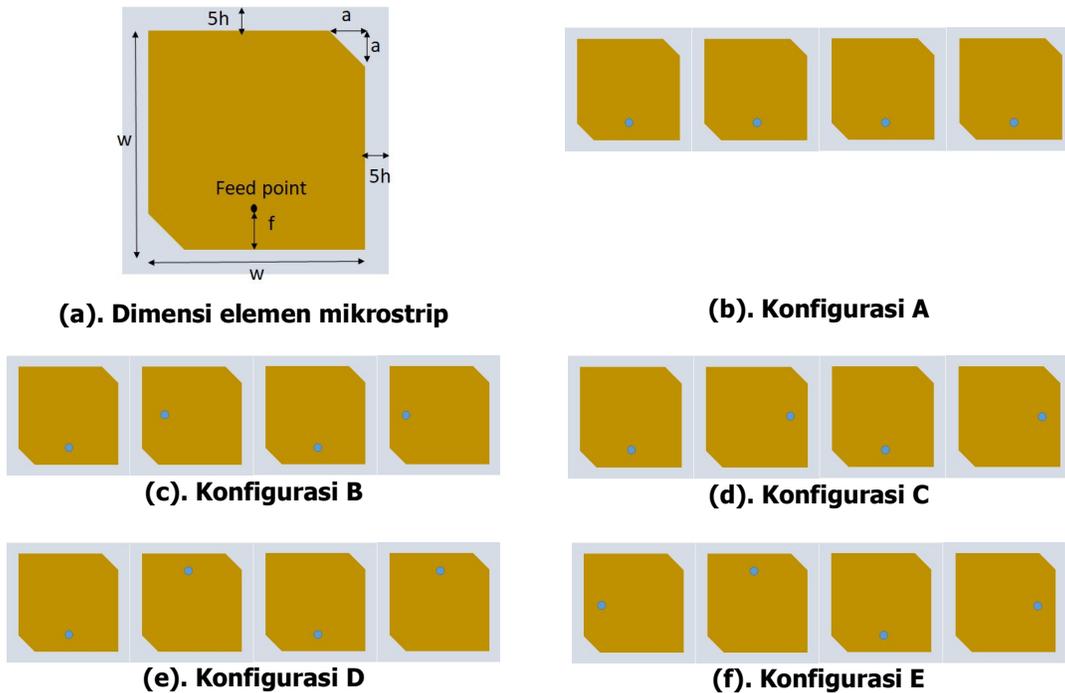
$$f = \frac{\cos^{-1}\left(\frac{50}{R_{in}}\right)}{\left(\frac{\pi}{w}\right)} \quad (2)$$

$$a = \sqrt{\frac{w}{2(f_r/BW)}} \quad (3)$$

Dengan w adalah lebar/panjang patch, v_0 adalah kecepatan rambat gelombang di udara, f_r adalah frekuensi kerja antenna, ϵ_r adalah permitivitas relatif substrat, R_{in} adalah impedansi input antenna, f adalah letak titik catu, a adalah panjang sisi yang di-*truncate*, dan BW adalah *bandwidth* antenna. Konfigurasi penyusunan antenna mikrostrip persegi pada antenna MIMO susunan linear sumbu ditentukan terhadap kemungkinan kombinasi letak dari titik catu pada masing-masing elemennya. Sejumlah konfigurasi yang kemudian diselidiki ditunjukkan pada Gambar 1. Beberapa macam kemungkinan konfigurasi susunan linear pada Gambar 1 mewakili kondisi susunan *co-polarized* dan beberapa mewakili kondisi susunan *cross-polarized*. Pengaturan arah polarisasi dari setiap elemen dilakukan dengan menentukan titik catu pada setiap elemen antenna. Terdapat 5 konfigurasi yang diujikan pada penelitian ini, konfigurasi A,

B, C, D, dan E, sesuai Gambar 1(b-f). Perbedaan dari 5 konfigurasi terletak pada posisi atau letak titik catu pada setiap elemen antena. Konfigurasi A merupakan susunan antena co-polarized atau polarisasi seragam. Sedangkan konfigurasi B-E merupakan susunan antena cross-polarized atau polarisasi silang dengan perbedaan letak titik catu sebesar 45° atau 90° .

Berdasarkan pengamatan terhadap sejumlah konfigurasi tersebut kemudian dilakukan analisis terhadap parameter kinerja antena MIMO yang dapat diperoleh. Berdasarkan hasil-hasilnya kemudian akan diperoleh gambaran pengaruh penyusunan terhadap masing-masing parameter dan kemudian dengan membandingkan capaian dari setiap konfigurasi maka dapat ditemukan pola penyusunan atau konfigurasi yang menghasilkan capaian parameter antena MIMO terbaik. Pengujian dengan melakukan simulasi numerik terhadap sejumlah konfigurasi pada Gambar 1. Simulasi numerik dilakukan dengan *CST Studio Suite*.



Gambar 1. (a) Dimensi Antena , (b-f) Konfigurasi Polarisasi Antena

Parameter kinerja antena MIMO yang diamati adalah *return loss* (RL), *mutual coupling* (MC), *envelope cross correlation* (ECC), diversity gain (DG), mean effective gain (MEG) dan total active reflection coefficient (TARC).

Korelasi antar antena memberikan gambaran korelasi antar sinyal yang dikirimkan (pada bagian pemancar) atau antar sinyal yang diterima (pada bagian penerima). *Envelope Cross Correlation* (ECC) digunakan sebagai ukuran korelasi antar antena. Korelasi yang diinginkan adalah sekecil mungkin. Batasan nilai ECC yang umum digunakan pada suatu desain antena MIMO adalah kurang dari 0,05 dan penghitungan ECC dilakukan berdasarkan data parameter S (Singh, dkk, 2013). Perhitungan ECC (ρ_{ij}) berdasar nilai parameter S dapat dilakukan berdasarkan Persamaan (4). S_{ii} dan S_{jj} adalah koefisien refleksi pada antena ke-i dan antena ke-j). S_{ij} dan S_{ji} adalah koefisien transmisi dari antena ke-j ke antena ke-i dan sebaliknya.

$$\rho_{ij} = \frac{|S_{ii}^* S_{ij} + S_{ji}^* S_{jj}|}{(1 - |S_{ii}|^2 - |S_{ji}|^2)(1 - |S_{ji}|^2 - |S_{jj}|^2)} \quad (4)$$

Diversity Gain (DG) menggambarkan kemampuan dalam menghadapi *multipath fading*. Nilai DG menggambarkan kemampuan meningkatkan atau mempertahankan sinyal terhadap *noise* ketika mengkombinasikan seluruh sinyal pada antenna dibanding pada satu antenna. Jika nilai DG semakin mendekati nilai maksimum (10 dB) maka kemampuan antenna akan semakin baik ditinjau dari DG. DG dapat dihitung berdasarkan Persamaan (5), dengan menggunakan ρ_{ij} atau ECC.

$$DG = 10 \sqrt{1 - |\rho_{ij}|^2} \quad (5)$$

Mean Effective Gain (MEG) menggambarkan rasio antara rata-rata daya terima pada antenna dengan total rata-rata daya yang sampai pada antenna. Hasil yang diharapkan adalah selisih absolut antar MEG kurang dari -3 dB. MEG dapat dihitung berdasarkan Persamaan (6) dengan N adalah jumlah elemen antenna.

$$MEG_i = 0.5 \left[1 - \sum_{j=1}^N |S_{ij}|^2 \right] \quad (6)$$

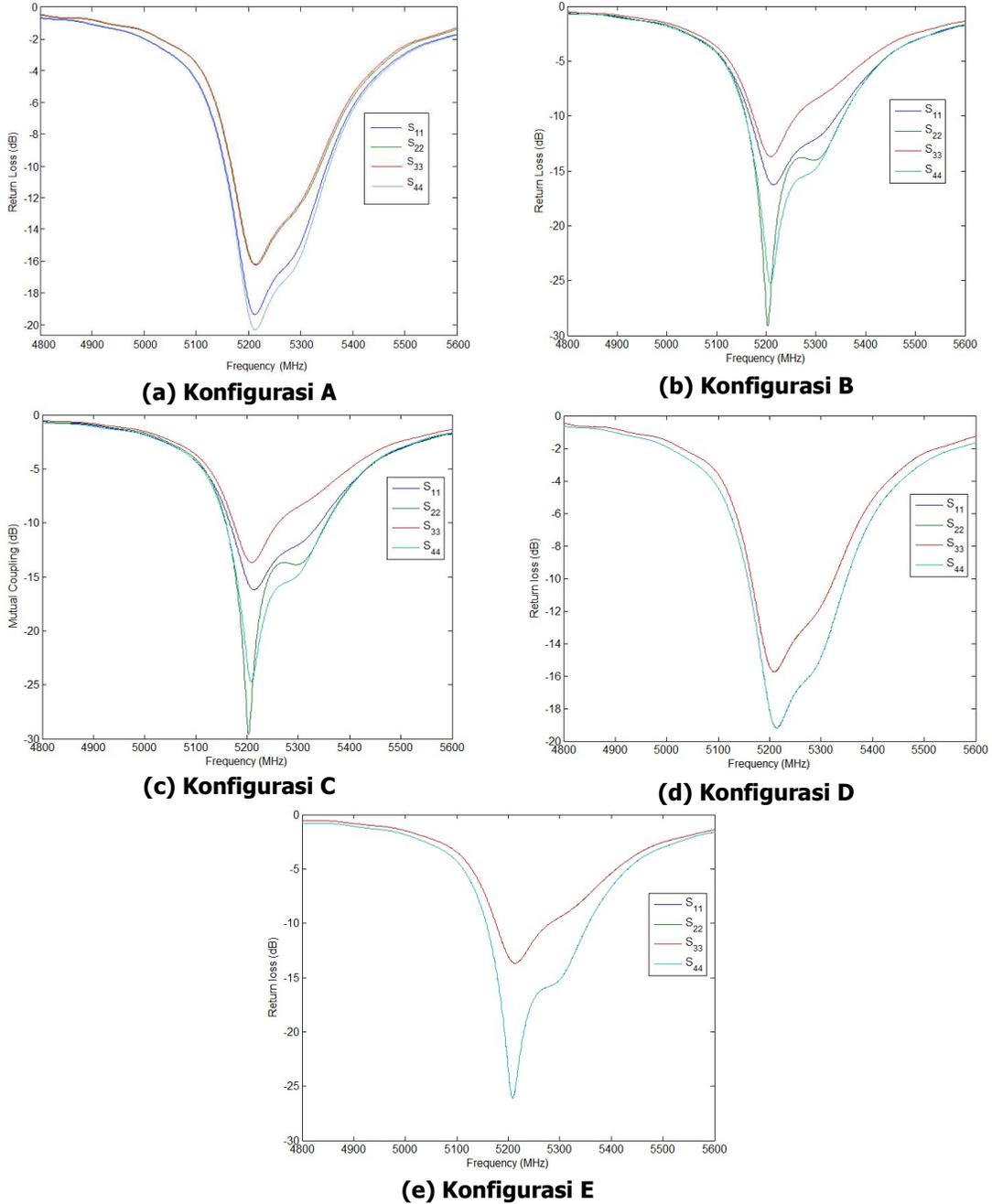
Total Active Reflection Coefficient (TARC) menggambarkan kondisi matching aktual pada multi-port dengan mempertimbangkan pengaruh pantulan balik dengan berbagai variasi fasa yang secara aktual dapat terjadi (0 sd 180 derajat). Diharapkan perubahan fasa yang terjadi tidak menimbulkan pengaruh signifikan pada kondisi matching. TARC dapat diperoleh dengan melakukan perhitungan menggunakan Persamaan (7) dengan θ adalah variasi fasa dengan rentang 0 sampai 180 derajat.

$$\Gamma_{Ai} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1, j \neq i}^N (|S_{ii} + S_{ij} e^{j\theta}|^2 + |S_{ji} + S_{jj} e^{j\theta}|^2)}}{\sqrt{N}} \quad (7)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Observasi pertama adalah melakukan pengamatan terhadap tingkat *matching* pada masing-masing *port* elemen MIMO pada setiap konfigurasi. Hasil simulasi nilai RL dari setiap konfigurasi elemen antenna MIMO ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2 disimpulkan bahwa setiap elemen antenna bekerja pada frekuensi 5,2 GHz. Untuk setiap skenario konfigurasi, nilai frekuensi tengah yang diperoleh sama tetapi dengan bandwidth yang berbeda-beda. Pengaturan konfigurasi penyusunan tidak memberikan pengaruh pada frekuensi terendah dari RL namun memberikan pengaruh pada nilainya. Nilai RL terendah diperoleh pada konfigurasi susunan B dan susunan C antenna MIMO *cross-polarized*. Akan tetapi, elemen ke-3 pada setiap konfigurasi terutama pada konfigurasi B dan C memiliki nilai RL yang lebih tinggi dibandingkan elemen lainnya, sehingga *bandwidth* yang diperoleh juga lebih sempit. Hal ini disebabkan oleh posisi titik catu elemen ke-3 yang berada di antara elemen ke-2 dan ke-4, sehingga pengaruh *mutual impedance* yang diterima cukup besar. Tetapi, secara umum konfigurasi dengan situasi polarisasi silang antar elemen berdekatan akan menghasilkan interaksi elektromagnetik yang rendah sehingga tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap level RL. Pengamatan selanjutnya dilakukan terhadap nilai *mutual coupling* antar elemen antenna pada setiap konfigurasi yang diuji. *Mutual coupling* diwakili oleh nilai S_{nm} dengan $n \neq m$. Hasil pengamatan terhadap nilai *Mutual Coupling* untuk setiap konfigurasi ditunjukkan oleh Gambar 3. Nilai maksimum dari *mutual coupling* untuk konfigurasi B dan C

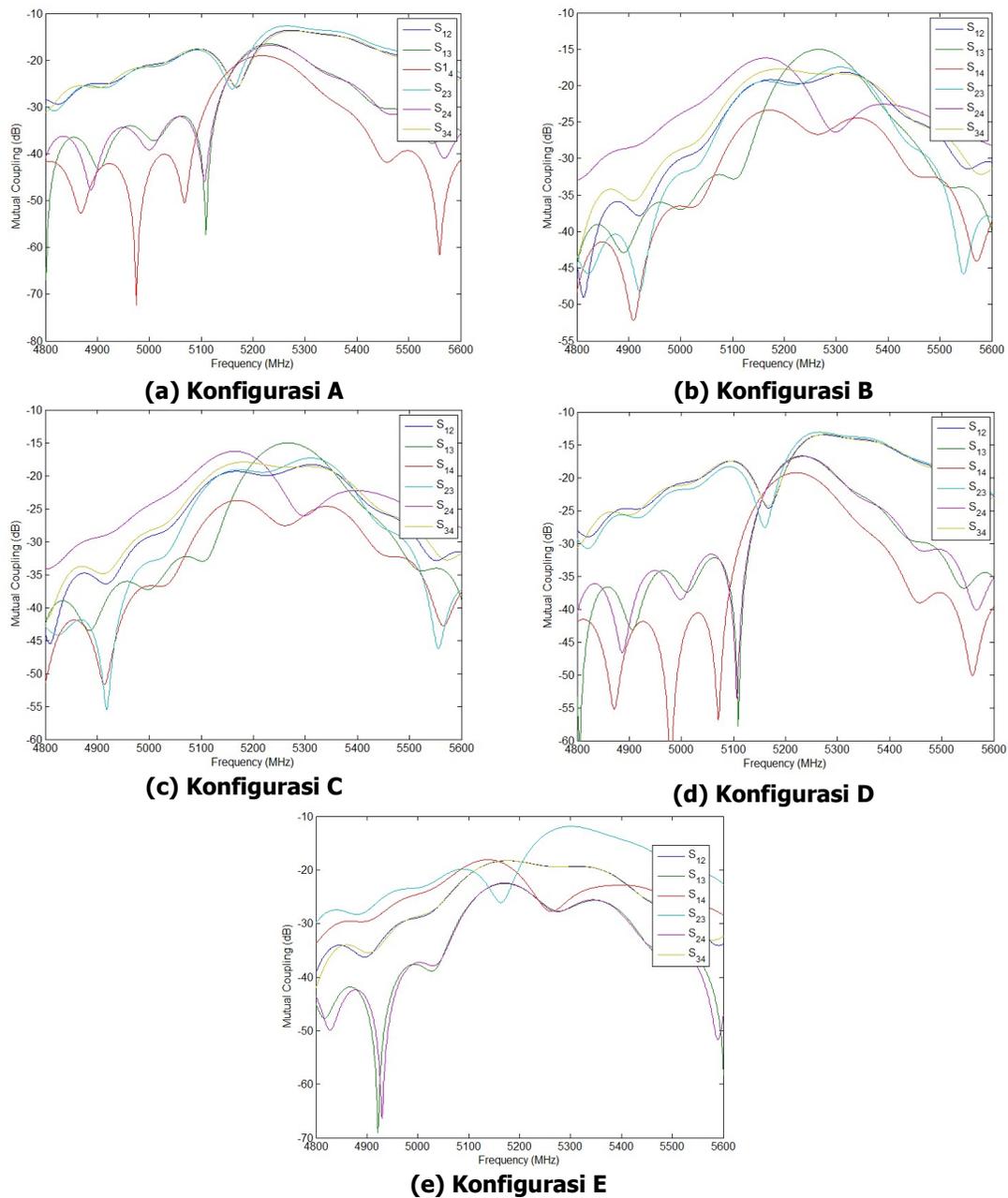
memiliki *magnitude* lebih rendah dibandingkan dengan konfigurasi yang lain, yaitu di -15 dB. Sedangkan untuk 3 konfigurasi lainnya nilai maksimumnya hampir mendekati -10 dB. Karena semakin rendah *mutual coupling* berarti semakin saling independen elemen antena pada MIMO.



Gambar 2. Nilai *return loss* antena MIMO dengan *co-polarized* (a) dan *cross polarized* (b), (c), (d), (e)

Hasil ini mengkonfirmasi bahwa penyusunan *cross-polarized* antar elemen berdekatan menghasilkan interaksi elektromagnetik yang lebih kecil dibanding *co-polarized* dan

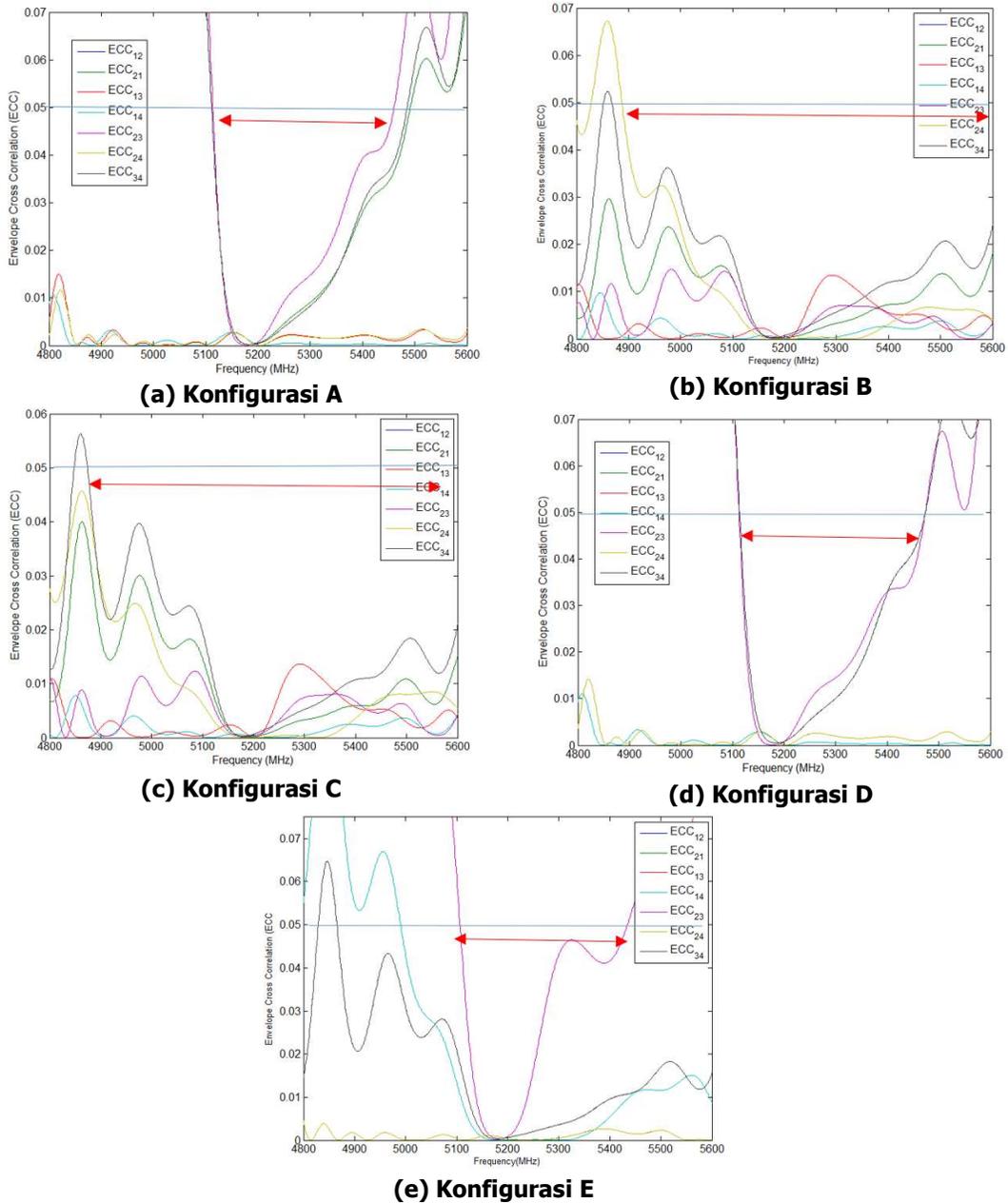
berpengaruh nilai *mutual coupling*. Susunan *cross-polarized* memberikan nilai *mutual coupling* yang lebih rendah dibandingkan *co-polarized*.



Gambar 3. Nilai *mutual coupling* antenna MIMO dengan *co-polarized* (a) dan *cross polarized* (b), (c), (d), (e)

A. Analisis *Envelope Cross Correlation (ECC)*

Nilai komparasi ECC untuk setiap konfigurasi ditunjukkan oleh Gambar 4. Konfigurasi A memiliki rentang frekuensi terkecil dibanding konfigurasi lainnya jika ditinjau dari nilai ECC. Konfigurasi A terdiri atas 4 antena dengan polarisasi sama yaitu LHCP. Polarisasi yang sama tersebut menyebabkan interaksi antar antena makin besar hal ini tergambar juga pada data mutual coupling. Dengan jarak antena yang sama konfigurasi ini memiliki level coupling antar elemen yang terbesar dibanding lainnya.



Gambar 4. Nilai ECC antena MIMO dengan *co-polarized* (a) dan *cross polarized* (b), (c), (d), (e)

Perbandingan nilai ECC dapat dilihat pada Tabel 1. Konfigurasi B dan C memiliki rentang frekuensi paling besar dibanding lainnya jika ditinjau dari nilai ECC. Konfigurasi B dan C terdiri atas 4 antena dengan *cross-polarized* LHCP dan RHCP untuk elemen berdekatan, B dan C berbeda pada peletakan *port*. *Cross-polarized* antar elemen berdekatan menyebabkan interaksi antar antena makin kecil, hal ini tergambar juga pada data *mutual coupling*. Dengan jarak antena yang sama konfigurasi ini memiliki level *coupling* antar elemen yang lebih rendah dibanding lainnya. Polarisasi silang mendukung nilai ECC optimum. Jarak antar *port* antena juga memberikan pengaruh, sehingga kondisi ini yang kemudian menghasilkan perbedaan rentang frekuensi ECC antara B dan C.

Tabel 1. Perbandingan Rentang Frekuensi pada Nilai ECC=0,05

	FL (MHz)	FH (MHz)	FH-FL (MHz)
A	5113	5460	347
B	4890	5600	710
C	4875	5600	725
D	5114	5474	360
E	5015	5425	410

B. Analisis *Diversity Gain* (DG)

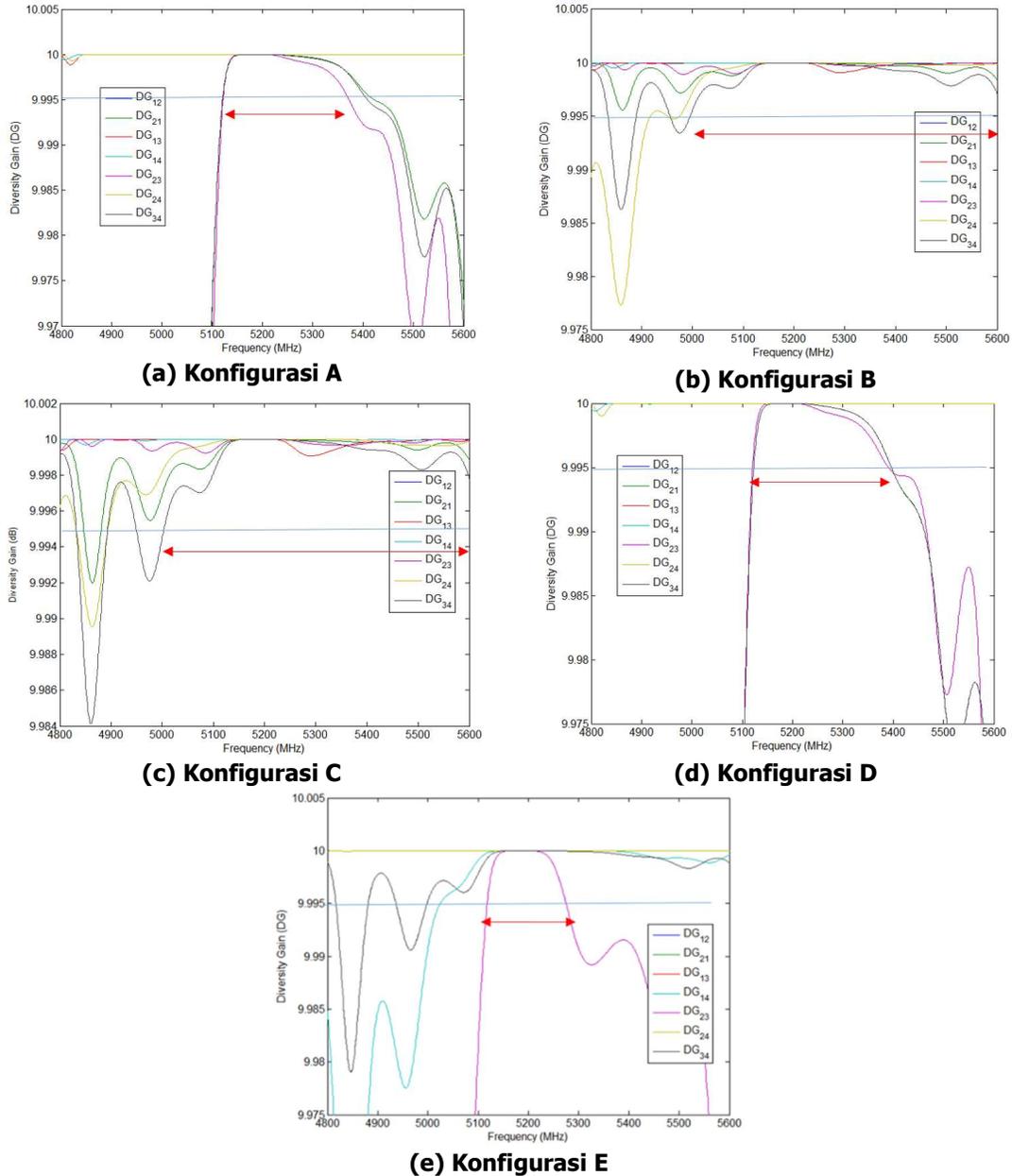
Konfigurasi B dan C memiliki rentang frekuensi terbesar untuk kondisi nilai DG mendekati maksimum dengan nilai batas sebesar 9,995 dB, jika dibanding dengan konfigurasi lainnya jika ditinjau dari nilai DG. Konfigurasi B dan C terdiri dari 4 antena dengan *cross-polarized* LHCP dan RHCP untuk elemen berdekatan. Polarisasi silang antar elemen yang berdekatan dapat meningkatkan diversitas gain dimana kemampuan sistem antena dalam memanfaatkan diversitas pada satu area semakin besar. Konfigurasi B memiliki nilai DG lebih besar dibandingkan C karena jarak *port* antar elemen berdekatan relatif sama, sehingga aspek diversitas ruang terwakili secara merata jika dibandingkan konfigurasi C. Hal ini terkonfirmasi pada konfigurasi E yang memiliki rentang nilai DG paling rendah, dimana jarak *port* antar elemen berdekatan tidak sama dibanding konfigurasi A dan D.

Selain susunan polarisasi elemen antena, jarak antar port elemen yang saling berdekatan juga memberikan pengaruh pada antena MIMO. Hal ini ditunjukkan melalui nilai DG. Nilai komparasi DG untuk setiap konfigurasi ditunjukkan oleh Gambar 5. Data perbandingan nilai DG dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Rentang Frekuensi terhadap pada Nilai DG=9,995dB

	FL (MHz)	FH (MHz)	FH-FL (MHz)
A	5120	5370	250
B	4995	5600	605
C	5000	5600	600
D	5123	5389	266
E	5120	5275	155

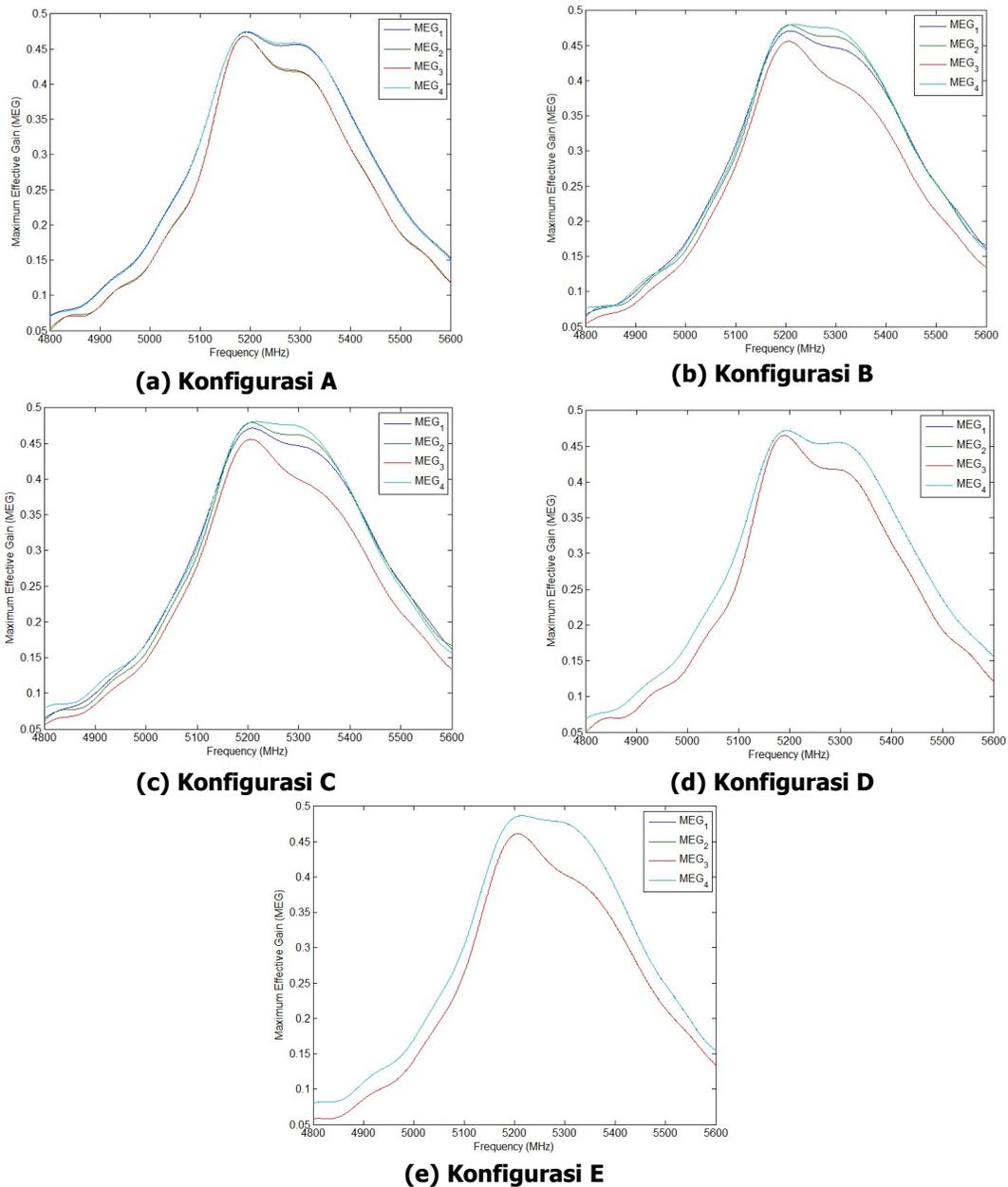
Konfigurasi Optimum pada Susunan Linear Antena MIMO Mikrostrip Polarisasi Sirkular



Gambar 5. Nilai DG antenna MIMO dengan *co-polarized* (a) dan *cross polarized* (b), (c), (d), (e)

C. Analisis *Mean Effective Gain* (MEG)

Seluruh konfigurasi menunjukkan bahwa variasi MEG (perbedaan MEG satu elemen dengan elemen lain) tidak melebihi 0,5 (-3 dB). Hal ini menggambarkan bahwa setiap konfigurasi dapat menerima daya mendekati total daya rata-rata yang sampai pada antenna. Berdasarkan hasil pengamatan MEG ini maka dapat disimpulkan bahwa aspek penyusunan polarisasi tidak memberikan pengaruh terhadap MEG. Nilai komparasi MEG untuk setiap jenis konfigurasi elemen antenna ditunjukkan oleh Gambar 6.

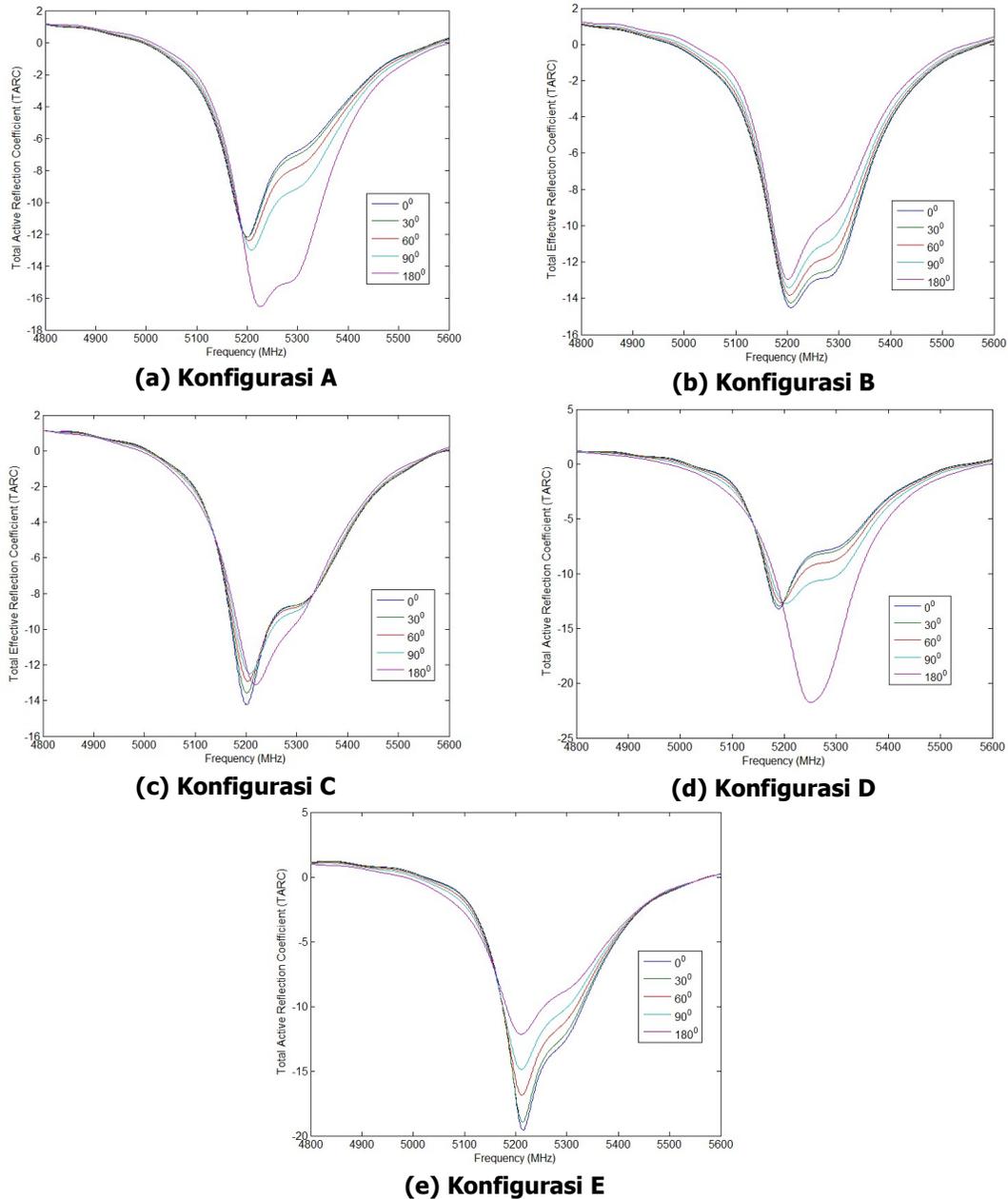


Gambar 6. Nilai MEG antenna MIMO dengan *co-polarized* (a), dan *cross polarized* (b), (c), (d), (e)

D. Analisis *Total Active Reflection Coefficient* (TARC)

Gambar 7 menunjukkan bahwa konfigurasi A, D, dan E mengalami perubahan koefisien refleksi pada beberapa variasi fasa. Variasi komponen pantulan balik memperburuk kondisi *matching* yang digambarkan dengan TARC yang nilainya dipengaruhi oleh fasa. Hal ini disebabkan oleh peningkatan interaksi antar elemen yang berdekatan yang dipengaruhi oleh susunan polarisasi.

Konfigurasi Optimum pada Susunan Linear Antena MIMO Mikrostrip Polarisasi Sirkular



Gambar 7. Nilai TARC antenna MIMO dengan *co-polarized* (a), dan *cross polarized* (b), (c), (d), (e)

4. KESIMPULAN

Pengujian pengaruh konfigurasi susunan antenna dengan polarisasi sirkular pada antenna MIMO telah dilakukan. Konfigurasi susunan elemen antenna berpolarisasi sirkular mempengaruhi parameter kinerja antenna MIMO. Namun demikian pengaruh pada nilai ECC, DG dan TARC lebih signifikan dibandingkan MEG. Penyusunan polarisasi antenna tidak berpengaruh signifikan pada nilai MEG. Konfigurasi dengan pola *cross-polarized* antar elemen berdekatan memberikan kinerja lebih baik dibandingkan dengan *co-polarized* jika ditinjau dari nilai ECC, DG, dan TARC, selain ditinjau dari aspek *mutual coupling*. Pada nilai ECC 0,05, konfigurasi B dan C

menghasilkan rentang frekuensi yang lebih besar dibandingkan konfigurasi lainnya, yaitu 710 MHz dan 725 MHz atau 2,04x dan 2,08x lebih lebar dibandingkan rentang frekuensi konfigurasi A, yang memiliki rentang frekuensi paling kecil. Pada nilai DG mendekati nilai batas 9,995 dB, konfigurasi B dan C juga menghasilkan rentang frekuensi lebih besar, yaitu 605 MHz dan 600 MHz atau 3,9x dan 3,87x lebih lebar dibandingkan rentang frekuensi pada konfigurasi E yang memiliki rentang frekuensi terendah. Peletakan *port* juga memberikan pengaruh pada nilai DG dan TARC. Jarak *port* yang seragam antar elemen yang berdekatan membuat nilai DG lebih mendekati nilai maksimum sedangkan jarak antara port yang lebih jauh memperkecil nilai TARC. Berdasarkan hasil yang diperoleh, konfigurasi optimum diperoleh dengan melakukan penyusunan elemen antena secara *cross-polarized* terhadap elemen yang berdekatan dan mempertimbangkan peletakan *port* dengan jarak yang seragam antar elemen yang berdekatan.

DAFTAR RUJUKAN

- Balanis, C. A. (2016): *Antenna Theory: Analysis & Design* 4th Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Cheh Lin, I. K., Jamaluddin, M. H., Awang, A., Selvaraju, R., Dahri, M. H., Yen, L. C., & Rahim, H. A. (2019). A Triple Band Hybrid MIMO Rectangular Dielectric Resonator Antenna for LTE Applications. *IEEE Access*, 7, 122900–122913.
- Chen, K. H., & Kiang, J. F. (2016). Effect of Mutual Coupling on the Channel Capacity of MIMO Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(1), 398–403.
- Chen, X., Zhang, S., & Li, Q. (2018). A Review of Mutual Coupling in MIMO Systems. *IEEE Access*, 6, 24706–24719.
- Flaviis, F. De, Jofre, L., Romeu, J., & Grau, A. (2008). *Multiantenna Systems for MIMO Communications*. USA: Morgan Claypool Publisher.
- Gustafsson, M., Aulin, J., Hogberg, M., Alm, M., & Sihlbom, B. (2014). Impact of Mutual Coupling on Capacity in Large MIMO Antenna Arrays. *8th European Conference on Antennas and Propagation 2014*, (pp. 2723–2727).
- Hui, H. T. (2009). Influence of Antenna Characteristics on MIMO Systems with Compact Monopole Arrays. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 8, 133–136.
- Jiang, X., Wang, H., & Jiang, T. (2017). A Low Mutual Coupling MIMO Antenna Using EBG Structures. *Progress In Electromagnetics Research Symposium 2017*, (pp. 660-663).
- Jiao, T., Jiang, T., & Li, Y. (2018). A Low Mutual Coupling MIMO Antenna Using 3-D Electromagnetic Isolation Wall Structures. *IEEE 6th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation 2017 - Proceeding*, (c), (pp. 1–2).
- John D Kraus, Marhefka, R. J., & Khan, A. S. (2020). *Antennas and Wave Propagation*. New Delhi: McGraw-Hill.
- Li, B., Yin, Y.-Z., Ding, Y., & Zhao, Y. (2012). Wideband Dual-Polarized Patch Antenna With

- Low Cross Polarization and High Isolation. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11, 427–430.
- Li, Q., Ding, C., Yang, R., Tan, M., Wu, G., Lei, X., Jiang, X., Fang, S., Huang, M., Gong, Y., & Wei, Y. (2018). Mutual Coupling Reduction between Patch Antennas Using Meander Line. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2018.
- Li, X., & Nie, Z. P. (2004). Mutual Coupling Effects on the Performance of MIMO Wireless Channels. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 3(1), 344–347.
- Liu, X., & Bialkowski, M. E. (2010). Effect of Antenna Mutual Coupling on MIMO Channel Estimation and Capacity. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2010.
- Liu, X., Bialkowski, M. E., & Wang, F. (2008). Investigation into the Effects of Spatial Correlation on MIMO Channel Estimation and Capacity. *2008 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WICOM 2008*, (pp. 1–4).
- Pramudita, A. A., Sholihin, & Ariananda, D. D. (2018). Array of Eight Circularly Polarized Microstrip Antennas for IEEE 802.11ac MIMO WLAN. *Proceedings - 2018 4th International Conference on Science and Technology, ICST 2018*, (pp. 4–9).
- Pramudita, A. A., Yunita, T., Alia, D., & Sholihin (2020). MIMO Antenna for IEEE 802.11ac with Cross-Polarized Circular Configuration of Printed Yagi Elements. *International Journal on Communications Antenna and Propagation*, 10(4).
- Sainati, R. A. (1996). *CAD of Microstrip Antennas for Wireless Applications*. London: The Artech House Antenna Library.
- Singh, H. S., Meruva, B., Pandey, G. K., Bharti, P. K., & Meshram, M. K. (2013). Low Mutual Coupling Between MIMO Antennas by Using Two Folded Shorting Strips. *Progress In Electromagnetics Research B*, 53, 205–221.
- Wallace, J. W., & Jensen, M. A. (2004). Mutual Coupling in MIMO Wireless Systems: A Rigorous Network Theory Analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 3(4), 1317–1325.
- Zhang, Y. M., Zhang, S., Li, J. L., & Pedersen, G. F. (2019). A Transmission-Line-Based Decoupling Method for MIMO Antenna Arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67(5), 3117–3131.
- Zhu, H. L., Cheung, S. W., Liu, X. H., & Yuk, T. I. (2014). Design of Polarization Reconfigurable Antenna Using Metasurface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(6), 2891–2898.