

ANTENA MICROSTRIP MIMO 8×8 ARRAY 2 PATCH RECTANGULAR H-SLOT UNTUK RADIO AKSES 5G FREKUENSI 15 GHZ

Adhie Surya Ruswanditya¹, Heroe Wijanto², Yuyu Wahyu³

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

³Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia

¹adhiesr@gmail.com, ²heroe.wijanto@telkomuniversity.ac.id, ³yuyuwahyusr@gmail.com

Abstrak

Perkembangan teknologi komunikasi selalu meningkat setiap waktu. Namun, sumber daya frekuensi yang digunakan terbatas untuk beberapa aplikasi seperti komunikasi seluler 5G. Hal ini memerlukan alokasi frekuensi lain, salah satunya menggunakan frekuensi tinggi pada 15 GHz. Penggunaan frekuensi tinggi dalam aplikasi nirkabel perlu dipertimbangkan karena hal tersebut rentan mengalami *fading* yang tinggi. Agar mengatasi *fading* yang tinggi membutuhkan sistem antenna MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Penelitian jurnal ini berisikan perancangan antenna MIMO dengan 8 elemen. Setiap elemen adalah antenna *microstrip array 2 patch rectangular* dengan slot berbentuk H dan catuan *insert feed*. Bahan dielektrik yang digunakan pada antenna *microstrip* adalah Duroid Rogers 5880 yang memiliki permitivitas relatif sebesar 2,2 dengan ketebalan 1,575 mm serta bahan konduktor yang digunakan adalah tembaga dengan ketebalan 35 μm untuk bahan peradiasi maupun *ground-plane*. Realisasi antenna hasil pengukuran mendapatkan $\text{VSWR} \geq 1,5$ dan $\text{Return Loss} \leq -14$ dB pada rentang frekuensi 14,5-15,25 GHz. Nilai *gain* sebesar 9,614 dB dengan polarisasi elips dan linier serta pola radiasi *unidirectional*.

Kata Kunci: Antena, H-slot, 15 GHz, *microstrip*, MIMO

Abstract

The development of communication technology is always increasing every time. However, the frequency resources used is limited for various applications such as 5G mobile communications. This requires the allocation of other frequencies, one of which uses high frequencies at 15 GHz. High frequency usage in wireless applications needs to be considered because of the high fading for long range communication. To resolve it requires MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) antenna system. In this research journal contains the design of MIMO antenna with 8 elements. Each element contains a rectangular array 2 patch microstrip antenna with an H-shaped slot and insert feed insertion. The dielectric material used in microstrip antennas is Duroid Rogers 5880 which has a relative gain of 2.2 with a thickness of 1.575 mm and the conductor material used is copper with a thickness of 35 μm for radiator and ground-plane. Realized antenna measurement results get $\text{VSWR} \leq 1.5$ and $\text{Return Loss} \leq -14$ dB in the frequency range 14.5-15.25 GHz. The gain value is 9.614 dB with ellipse and linear polarization, and unidirectional radiation pattern.

Keywords: Antenna, H-Slot, 15 GHz, *microstrip*, MIMO

1. Pendahuluan

Besar trafik yang dihasilkan pada sistem komunikasi seluler meningkat signifikan dengan bertambahnya konten-konten telepon genggam pintar. Hal ini membutuhkan peningkatan performa akses jaringan untuk komunikasi seluler dengan cara mengembangkan teknologi yang ada. Setelah penerapan 4G yang dapat diaplikasikan pada masyarakat luas, kini penelitian yang berkembang pada jaringan komunikasi akses radio 5G. Beberapa penelitian dilakukan untuk komunikasi akses radio 5G salah satunya yakni penggunaan penggunaan *millimeter wave* yang berada pada rentang frekuensi diatas 6 GHz [1, 2, 3]. Alokasi frekuensi kerja yang ditawarkan untuk komunikasi akses radio komunikasi 5G salah satunya pada frekuensi 15 GHz [4, 5]. Pada penelitian sebelumnya menggunakan antenna 4

elemen dan 8 elemen dengan pencatuan *coaxial probe*, dan mengharuskan antenna tersebut memiliki *bandwidth* hingga 750 MHz [4].

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang antenna *microstrip* MIMO 8×8 dengan array 2 *patch* berbentuk rektanguler dengan slot-H untuk aplikasi akses radio 5G pada frekuensi 15 GHz. Perancangan antenna ini perlu mengetahui parameter yang ingin tercapai yakni VSWR dibawah 1,5 pada rentang 14,5-15,25 GHz, pola radiasi unidireksional, *gain* diatas 9 dB. Penelitian ini melakukan perancangan dengan array 2 *patch* pada setiap elemen MIMO untuk meningkatkan *gain* serta menambahkan slot-H dan pencatu *insert feed* untuk menambah *bandwidth* [6].

MIMO sudah diterapkan sistem komunikasi seluler teknologi 4G. Sistem MIMO merupakan suatu sistem komunikasi yang memanfaatkan banyak elemen antenna yang berperan sebagai pemancar

maupun penerima. Sistem MIMO dapat mengatasi *multipath fading* pada komunikasi nirkabel. Penyebab *multipath fading* yakni redaman dari lintasan beberapa sinyal yang memiliki fasa yang berbeda akibat mobilitas pengguna dan beberapa objek yang dapat membelokkan atau memantulkan lintasan antara *base station* dan *user*. Serta dengan sistem MIMO dapat meningkatkan *throughput* [7].

Dalam sistem komunikasi seluler, akses radio merupakan antarmuka antara *base station* dan *user equipment* yang berkomunikasi dengan memanfaatkan gelombang elektromagnetik sebagai medium. Saat ini akses radio pada beberapa teknologi seluler menggunakan frekuensi 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2300 MHz, dll sehingga jangkauannya cukup luas dan memiliki redaman yang relatif rendah. Namun perencanaan alokasi sistem komunikasi seluler pada frekuensi tersebut sudah banyak digunakan sehingga membutuhkan alokasi frekuensi lain.

2. Antena Microstrip

Antena adalah suatu transformator yang berfungsi untuk mengubah gelombang terbimbing menjadi gelombang bebas dan sebaliknya. Salah satu jenis antena yang digunakan adalah antena *microstrip*. Elemen-elemen antena *microstrip* yakni terdiri dari *patch* sebagai konduktor yang meradiasikan gelombang elektromagnetik, *grounplane* yang berperan sebagai *reflector* pada antena *microstrip*, dan substrat sebagai bahan dielektrik yang memiliki nilai permitifitas relatif. Permitifitas relatif dari substrat mempengaruhi dimensi *patch* yang bekerja pada frekuensi tertentu. Salah satu keuntungan dari antena *microstrip* adalah fabrikasi mudah karena dimensi *patch* dapat dibentuk sesuai kebutuhan [8]. Susunan antena *microstrip* yang terdiri dari tiga elemen dapat dilihat seperti Gambar 1.

Untuk menentukan dimensi *patch* antena *microstrip* menggunakan persamaan-persamaan berikut [8]:

$$W = \frac{c}{2f_o \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{W} \right)}} \right) \quad (2)$$

$$\Delta L = 0.421h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

$$l = \frac{c}{2f_o \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (4)$$

Dimana:

W = Lebar *Patch* (mm)

c = Kecepatan Cahaya dalam Ruang Hampa
(3×10^8 m/s)

ϵ_r = Konstanta Dielektrik Substrat (F/m)

f_o = Frekuensi Osilasi (Hz)

Saluran transmisi merupakan elemen perantara antara pencatu dan *patch* antena *microstrip*. Salah satu jenis saluran transmisi antena *microstrip* yakni saluran *microstrip*. Untuk menentukan nilai impedansi dan permitivitas efektif bahan menggunakan persamaan berikut [9].

$$W = \frac{2h}{\pi} \left\{ \begin{array}{l} B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \\ \left[\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \end{array} \right\} \quad (5)$$

Untuk $\frac{W}{h} \leq 1$:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} + 0,04 \left(1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right) \quad (6)$$

$$Z_o = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \ln \left[\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right] \quad (7)$$

Untuk $\frac{W}{h} \geq 1$:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$Z_o = \frac{120\pi \sqrt{\epsilon_{reff}}}{\frac{W}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{W}{h} + 1,444 \right)} \quad (9)$$

Dimana:

h = Ketebalan bahan dielektrik (mm)

W = Lebar saluran *microstrip* (mm)

Untuk menghitung dimensi saluran transmisi dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut:

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_o \sqrt{\epsilon_r}} \quad (10)$$

$$W = \frac{2h}{\pi} \left\{ \begin{array}{l} B - 1 - \ln(2b - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \\ \left[\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \end{array} \right\} \quad (11)$$

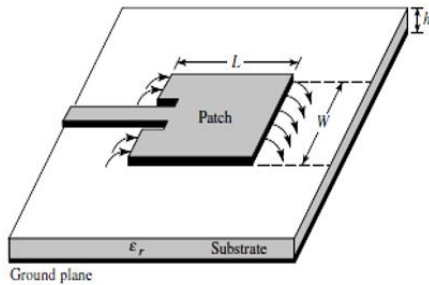
$$Lf = \frac{\lambda}{4 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (12)$$

Sedangkan untuk menentukan jarak antar *patch* pada antenna array menggunakan persamaan berikut:

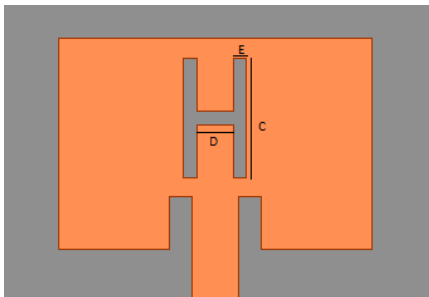
$$D_{array} = \frac{\lambda}{4} \quad (13)$$

3. Antena H-Slot Patch Rectangular

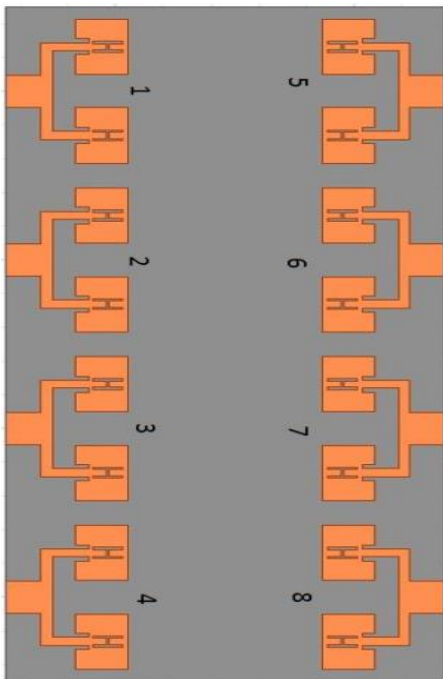
Kekurangan dari antenna *microstrip* yakni memiliki *bandwidth* yang kecil. Salah satu cara untuk mengatasi hal tersebut yakni penambahan slot pada *patch* antenna. Slot antenna terdapat berbagai macam bentuk, salah satunya slot berbentuk H. Penelitian ini



Gambar 1. Antena *Microstrip*



Gambar 2. H-Slot pada *Patch* Antena *Microstrip*



Gambar 3. Rancangan Antena MIMO 8x8

melakukan pemilihan H-slot karena bentuknya yang sederhana. Antena yang memiliki slot menyebabkan terjadinya *coupling* induktif. Semakin besar efek *coupling* induktif maka berdampak pada *Q-factor* yang berkurang [6]. Hal tersebut yang mempengaruhi *bandwidth* yang semakin lebar. Perhitungan dimensi dari H-slot menggunakan persamaan-persamaan berikut [6].

$$E = \frac{\lambda_0}{60} \quad (14)$$

$$\frac{C_1}{W} \geq 0,3 \quad (15)$$

$$D = \frac{c}{f_{low} \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2(L - 2\Delta L - E) \quad (16)$$

E menyatakan lebar slot, *C* menyatakan panjang vertikal yang membentuk “|”, dan *D* menyatakan panjang horizontal yang membentuk “—” seperti yang tertera pada Gambar 2.

4. Spesifikasi dan Perancangan Antena

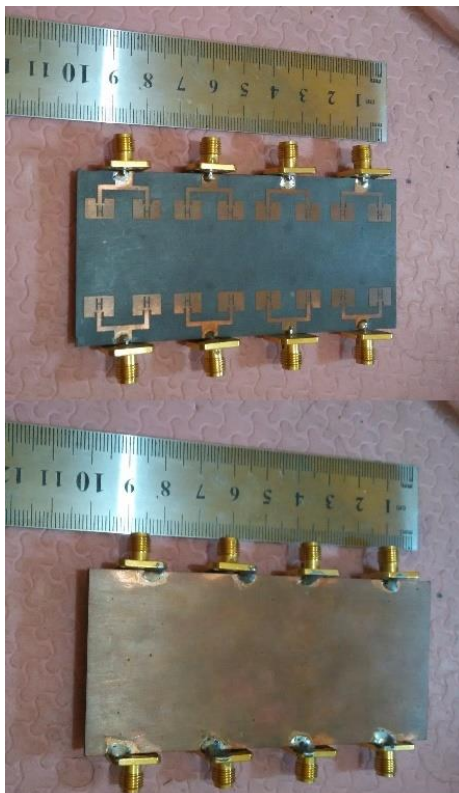
Dalam penelitian ini menentukan spesifikasi merupakan bagian dari tujuan perancangan antenna, yakni membuat antenna *microstrip* MIMO 8x8 untuk aplikasi akses radio komunikasi 5G. Berikut beberapa target parameter spesifikasi antenna:

- Frekuensi tengah : 14,9 GHz
- Rentang frekuensi : 14,5 GHz-15,25 GHz
- *Bandwidth* efektif : 750 MHz
- VSWR : ≤ 1.5
- *Return loss* : ≤ -14 dB
- Impedansi : 50 Ω
- *Mutual coupling* : ≤ -20 dB
- Gain : ≥ 9 dB
- Pola radiasi : Unidireksional

Perancangan ini membutuhkan pertimbangan parameter saat melakukan pemilihan bahan substrat. Ketebalan dan konstanta dielektrik akan mempengaruhi dimensi antenna *microstrip*. Semakin tebal substrat, *bandwidth* akan semakin lebar, dan sebaliknya. Hal tersebut berlaku juga pada konstanta dielektrik. Semakin besar nilai konstanta dielektrik, dimensi keseluruhan antenna akan semakin kecil, dan sebaliknya [10]. Oleh karena itu pemilihan bahan substrat merupakan hal yang penting dalam perancangan antenna, serta mempertimbangkan dimensi, performa, aplikasi dan meninjau ketersediaan bahan. Dalam penelitian ini agar dimensi antenna tidak terlalu kecil dengan frekuensi kerja yang tinggi serta *bandwidth*, maka bahan substrat yang digunakan dalam perancangan antenna ini adalah Rogers 5880 yang memiliki permitivitas relatif sebesar 2,2. Ketebalan bahan susbstrat sebesar 1,575 mm. Sedangkan bahan konduktor untuk *patch* dan *groundplane* menggunakan material tembaga dengan ketebalan 35 μm . Perancangan antenna ini

Tabel 1. Variabel Dimensi Antena MIMO 8×8 dengan Slot-H

Variabel	Nilai (mm)	Keterangan
D _{array}	4,98	Jarak antar <i>patch</i>
L _{line50}	3,64	Panjang saltran 50 Ω
W _{line50}	4,8	Lebar saltran 50 Ω
L _{line100}	3,64	Panjang saltran 100 Ω
W _{line100}	1,2	Lebar saltran 100 Ω
L _p	5,52	Panjang <i>patch</i>
W _p	8,16	Lebar <i>patch</i>
C _{slot}	3,12	Panjang vertikal celah
D _{slot}	0,96	Panjang horizontal celah
E _{slot}	0,34	Lebar celah
D _h	20,4	Jarak antena berhadapan
D _s	3,7	Jarak antena sejajar



Gambar 4. Realisasi Antena MIMO 8×8 Tampak Atas (atas) dan Tampak Bawah (bawah)

menggunakan *simulator* HFSS 15. Hasil rancangan tertera pada Gambar 3 yakni antena *microstrip* yakni antena *microstrip* MIMO yang memiliki 8 elemen dan setiap elemen berupa array 2 *patch*

Ukuran rancangan antena relatif kecil yakni sebesar 10 cm × 4,3 cm. Setiap *patch* antena diberi slot berbentuk H yang bertujuan untuk melebarkan *bandwidth* antena. Antena ini terdapat 2 penguat saluran *microstrip*, yakni saluran *microstrip* utama yang memiliki nilai impedansi 50 Ω, dan saluran *microstrip* cabang yang memiliki impedansi 100 Ω. Hal tersebut bertujuan agar distribusi arus sama pada setiap *patch*. *Patch* antena ini dicatu dengan *insert-feed* yang bertujuan untuk meningkatkan *matching impedance*, dan melebarkan *bandwidth* antena. Antena tersebut disusun secara bersejajar 4 elemen yang saling berhadapan. Variabel dimensi dari antena MIMO 8×8 tertera pada Tabel 1.

5. Realisasi Antena

Setelah melakukan perancangan menggunakan *simulator*, selanjutnya melakukan realisasikan antena. Bahan material antena realisasi sama dengan saat perancangan. Antena realisasi ditambahkan konektor SMA 50 Ω dengan mensolder timah agar antena dapat dicatu. Hasil realisasi antena tertera pada Gambar 4.

6. Pengukuran Realisasi

6.1. Plot VSWR dan Return Loss

VSWR merupakan perbandingan tegangan maksimum dan minimum yang disebabkan oleh ketidaksesuaian impedansi antena dengan impedansi saluran transmisi. Nilai VSWR yang baik yakni nilainya yang mendekati 1. Sedangkan *return loss* adalah redaman yang terjadi karena ketidaksesuaian nilai impedansinya antara impedansi antena dan impedansi saluran. Nilai *Return Loss* yang baik yakni nilainya seminimum mungkin [8, 9]. Pengukuran VSWR dan Antena menggunakan VNA (*Vector Network Analyzer*).

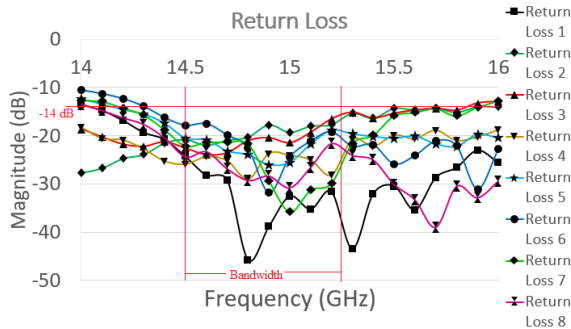
Hasil pengukuran VSWR antena MIMO 8×8 setiap elemen tertera pada Gambar 5. Antena ini memiliki VSWR dibawah 1,5 pada rentang frekuensi 14,5 GHz-15,5 GHz setiap elemen MIMO, serta hasil pengukuran *return loss* elemen-elemen pada antena MIMO 8×8 tertera pada Gambar 6, yakni pada rentang frekuensi 14,5 GHz – 15,25 GHz nilainya dibawah -14 dB. Maka dapat disimpulkan antena ini mencapai target spesifikasi perancangan.

6.2. Mutual Coupling

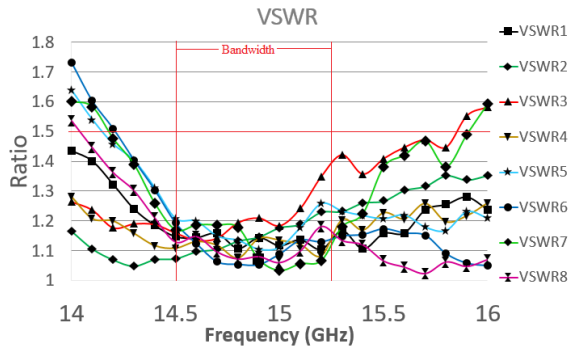
Mutual Coupling bagian dari S-parameter, yakni menganalisis besar tegangan antar port [9]. Terdapat banyak istilah untuk S-parameter bergantung pada perangkat RF yang ditinjau. *Mutual Coupling* sering digunakan untuk mengetahui parameter antena dengan sistem MIMO. Parameter ini menunjukkan seberapa besar daya yang mengalir dari port antena sumber ke port antena yang ditinjau. Semakin kecil besar *mutual coupling* pada suatu antena MIMO, maka semakin kecil korelasi antar elemen yang mempengaruhi performa antena. Pengukuran *mutual coupling* menggunakan VNA. Agar lebih singkat peninjauan *mutual coupling* hanya sebatas pada port 1 dan port 2. Berdasarkan Tabel 2, nilai *mutual coupling* dibawah -20 dB yang menunjukkan bahwa performa antena mencapai target parameter spesifikasi.

6.3. Gain

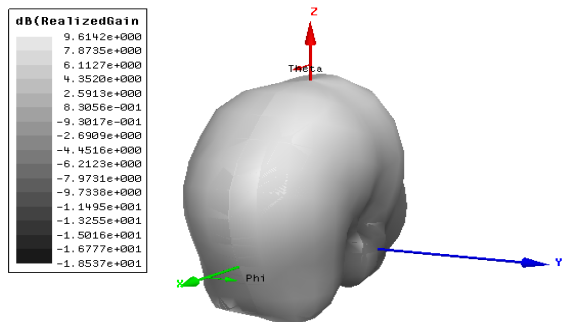
Gain pada antena didefinisikan suatu perbandingan intensitas daya pancar antena dengan antena referensi terhadap titik tertentu



Gambar 5. Plot Pengukuran VSWR



Gambar 6. Plot Pengukuran Return Loss



Gambar 7. Gain Antena

Tabel 2. Hasil Pengukuran Mutual Coupling

Parameter	Mutual Coupling (dB)	Parameter	Mutual Coupling (dB)
S (1,2)	-21,311	S (2,1)	-21,491
S (1,3)	-41,764	S (2,3)	-31,766
S (1,4)	-33,367	S (2,4)	-34,857
S (1,5)	-40,110	S (2,5)	-30,349
S (1,6)	-32,173	S (2,6)	-32,664
S (1,7)	-30,950	S (2,7)	-42,367
S (1,8)	-40,028	S (2,8)	-65,072

Tabel 3. Nilai Axial Ratio Antena MIMO 8x8

Elemen	Axial Ratio (dB)
Antena 1	7,59
Antena 2	9,72
Antena 3	12,6
Antena 4	8
Antena 5	8,98
Antena 6	9,92
Antena 7	10,22
Antena 8	8,39

Gain berkaitan dengan direktivitas antena, yakni mengenai keterarahan antena meradiasikan gelombang elektromagnetik. Semakin tinggi gain maka keterarahan antena meradiasikan gelombang

elektromagnetik semakin sempit. Gain memiliki keterkaitan dengan EIRP (*Equivalent Isotropic Radiated Power*) yang mengartikan bahwa daya yang diterima oleh receiver akan bergantung kepada gain antena. EIRP merupakan seberapa besar daya yang dipancarkan oleh transmitter dengan mengetahui nilai daya pancar dan nilai Gain Pengukuran gain antena menggunakan antena referensi yang dicatu dengan signal generator dan hasil realisasi antena MIMO 8x8 AUT (*Antenna Under Test*) dicatu dengan spectrum analyzer. Pengukuran Gain pada frekuensi 14,9 GHz.

Hasil pengukuran Gain antena MIMO 8x8 dapat dilihat pada Gambar 7, yakni memiliki nilai sebesar 9,614 dB. Maka dapat disimpulkan parameter gain antena mencapai target spesifikasi yakni memiliki nilai diatas 9 dB.

6.4. Pola Radiasi

Pola radiasi merupakan salah satu parameter pada perancangan antena. Pola radiasi antena yakni mempresentasikan bentuk pancaran gelombang elektromagnetik secara azimuth dan elevasi. Pengukuran pola radiasi sama dengan pengukuran Gain yang melibatkan alat-alat seperti spectrum analyzer, signal generator, AUT dan antena referensi. Hasil pengukuran antena realisasi pola radiasi dari masing-masing antena dapat dilihat pada Gambar 9. Setiap elemen antena realisasi memiliki pola radiasi unidireksional, namun terdapat cuping belakang yang disebabkan oleh kecilnya dimensi grounplane yang dipengaruhi dimensi antena. Dengan pola tersebut maka kesimpulannya adalah antena tersebut memiliki pola radiasi yang sesuai target spesifikasi yakni unidireksional.

6.5. Polarisasi

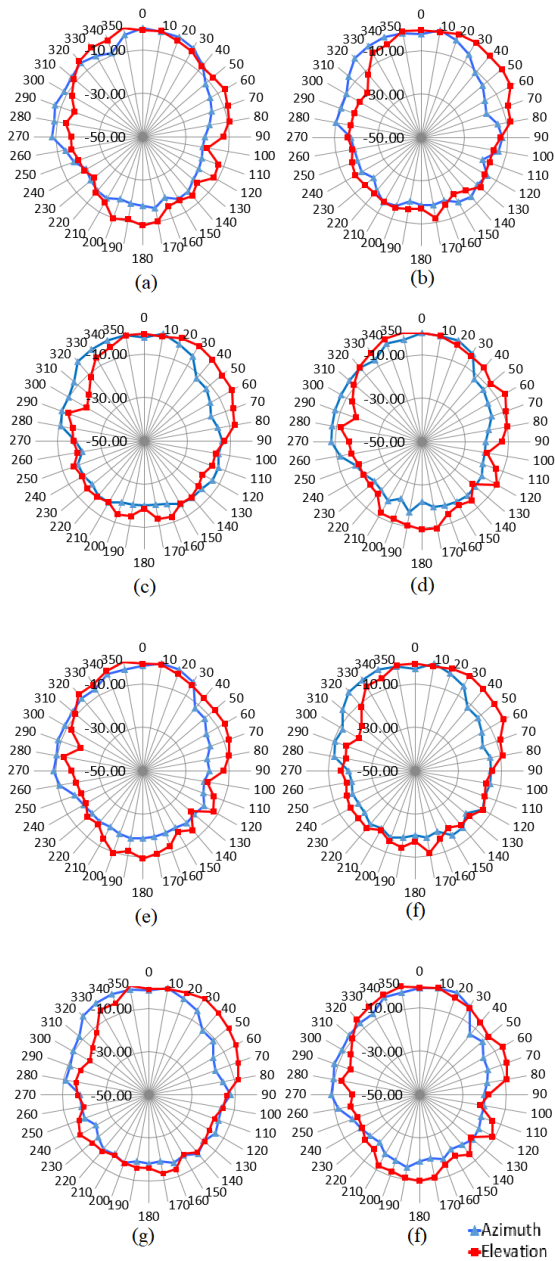
Pengukuran polarisasi sama dengan pengukuran Gain dan polarisasi yang melibatkan alat-alat seperti spectrum analyzer, signal generator, AUT dan antena referensi. Definisi dari polarisasi sendiri adalah karakteristik propagasi gelombang elektromagnetik pada suatu medium yang terdiri dari tiga bentuk yakni sirkular, elips, dan linier.

Berdasarkan hasil pengukuran realisasi antena. axial ratio pada Gambar 9 dan Tabel 3, hasil pengukuran nilai axial ratio maksimal pada sebesar 12,6 dB dan minimum sebesar 7,59 dB sehingga dapat disimpulkan bahwa antena berpolarisasi elips karena memiliki nilai Axial Ratio antara 3 dB dan 40 dB.

7. Kesimpulan

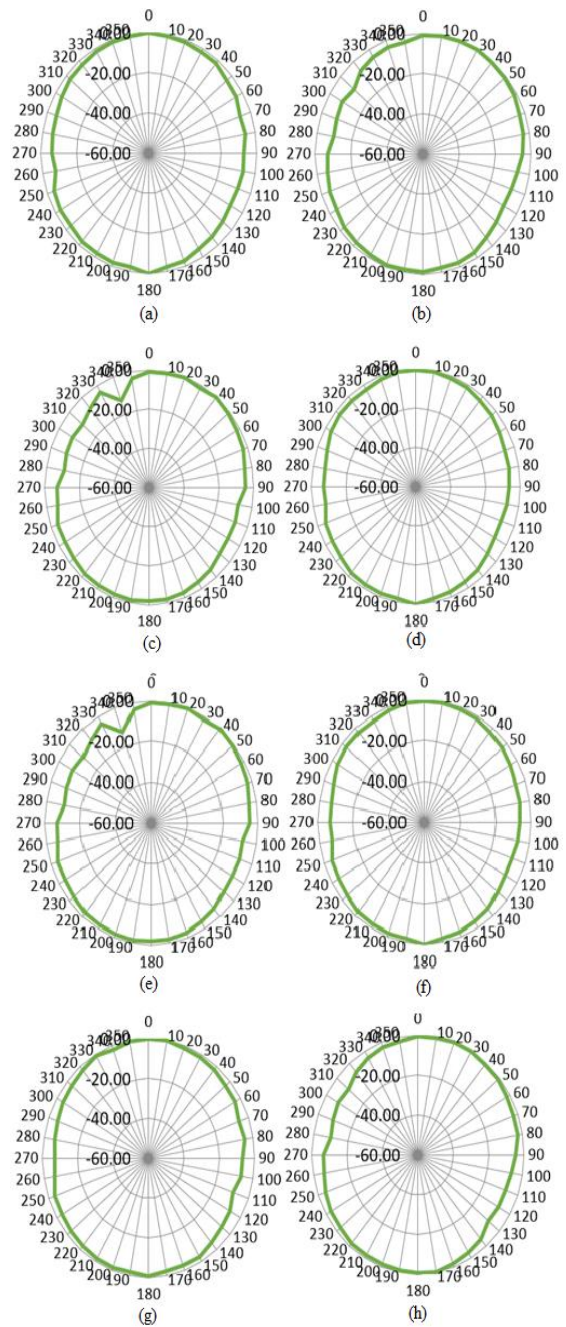
Berdasarkan hasil pengukuran diatas, maka kesimpulan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Dimensi realisasi antena MIMO 8x8 sebesar 10 cmx4,3 cm.



Gambar 8. Pengukuran Pola Radiasi Antena 1 (a), Antena 2 (b), Antena 3 (c), dan Antena 4 (d), Antena 5 (e), Antena 6 (f), Antena 7 (g), dan Antena 8 (h).

- Perancangan *array 2 patch*, pencatutan *insert-feed* antena, dan penambahan *slot-H* pada antena dapat melebarkan *bandwidth* hingga 1 GHz yang dapat *ditinjau* dari performa *VSWR* antena
1. Nilai *return loss* dari antena realisasi dibawah -14 dB pada rentang rentang frekuensi 14,5 GHz-15,25 GHz.
 2. Hasil rancangan antena memiliki *VSWR* dibawah 1.5 pada rentang frekuensi 14,5 GHz-15,25 GHz.
 3. *Mutual coupling* masing masing port memiliki nilai dibawah -20 dB dengan nilai maksimum -21,311 dB antara port 1 ke port 2.



Gambar 9. pengukuran Axial Ratio Antena 1 (a), Antena 2 (b), Antena 3 (c), dan Antena 4 (d), Antena 5 (e), Antena 6 (f), Antena 7 (g), dan Antena 8 (h).

5. Gain antena realisasi hasil pengukuran memiliki nilai diatas 9 dB yakni sebesar 9,614 dB pada frekuensi 14,9 GHz.
6. Pola radiasi hasil rancangan antena yakni unidireksional.

Daftar Pustaka:

[1] Patrick Marsch, "5G Radio Access Network Architecture: Design Guidelines and Key Considerations," *Ericsson Research*, vol. I, no. 1, pp. 24-32, 2016.

- [2] RAKESH KUMAR JHA, and AKHIL GUPTA, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," *IEEE Access*, vol. 3, no. 1, pp. 1206-1232, 2015.
- [3] 4G Americas, 5G Spectrum Recommendations, Washington: 4G Americas, 2015.
- [4] Kiichi Tateishi, "Indoor Experiment on 5G Radio Access Using Beam Tracking at 15 GHz Band," *IEEE PIRCIN*, vol. 1, no. 9, pp. 1-7, 2016.
- [5] Daisuke Kurita, Kiichi Tateishi, dkk, "Indoor and Outdoor Experiment on 5G Radio Access Using Distributed MIMO and Beamforming in 15 GHz Frequency Band," *IEEE*, vol. I, no. 2, pp. 1-6, 2016.
- [6] P. Daud, D. Mahmudin, A.A. Fathnan, I.Syamsu, T.T.Estu, and Y.N.Wijayanto , "Inset-Fed U-Slotted Patch Antenna Array for 10GHz Radio-Over-Fiber Applications," *IEEE-ICSE2016*, vol. 1, no. 1, pp. 117-120, 2016.
- [7] R. & Schwarz, Introduction to MIMO, München : Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG , 2009.
- [8] C. A. Balanis, Antennna Theory Analysis and Design 3rd Edition, New Jersey: Wiley-Interscience, 2005.
- [9] D. Pozar, Microwave Engineering, Massachusetts: John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [10] K. J. A. Sinaga, Perancangan dan Realisasi Antena MIMO 4×4 Arrya Rectangular Patch dengan U-Slot untuk Aplikasi 15 GHZ, Bandung: Repository Telkom University, 2017