

Perancangan Antena MIMO 2×2 Array Rectangular Patch dengan U-Slot untuk Aplikasi 5G

Kevin Jones A.S.¹, Levy Olivia N.², Budi Syihabuddin³

Abstract—The development of 5G wireless communications is targeted to increase the data rate compared to the 4G. Considering the operation frequency under 6 GHz that has been used in many applications, the operating frequencies above 6 GHz will be the most potential frequency to be used in 5G wireless communication technologies. One potential operating frequency above 6 GHz is 15 GHz. The benefits of using frequency 15 GHz for 5G wireless communications are low rain and air attenuations. Moreover, the 15 GHz wireless technology has less complexity than other higher frequencies, such as 28 GHz and 60 GHz. This paper designs two microstrip antennas using a 1×2 array of rectangular patch with U-Slot, which is then arranged as MIMO two element system. The U-slot is added to improve bandwidth of the antenna, while the 1×2 array improves gain more than 9 dB. The MIMO two-element antenna decreases fading effect caused by channel and increases data rate. The designed antenna has 1 GHz bandwidth from 14.4 to 15.4 GHz, with the minimum return loss of -18.69 dB, and the minimum VSWR of 1.26. The isolation coefficient is -32 dB in the frequency range. As for polarization, the axial ratio is 51.07 dB at -90° , and the gain is 9.20 dBi with unidirectional radiation pattern.

Intisari—Generasi komunikasi nirkabel kelima menargetkan peningkatan laju data yang lebih tinggi dari generasi sebelumnya. Dengan mempertimbangkan frekuensi di bawah 6 GHz yang telah banyak digunakan untuk layanan-layanan yang telah ada, maka frekuensi di atas 6 GHz dianggap lebih berpeluang untuk dijadikan frekuensi layanan 5G, salah satunya adalah frekuensi 15 GHz. Keuntungan menggunakan frekuensi 15 GHz adalah memiliki redaman hujan dan redaman udara yang lebih kecil serta kompleksitas sistem yang lebih rendah dibandingkan frekuensi kandidat lain seperti 28 GHz dan 60 GHz. Dalam makalah ini dilakukan perancangan antena mikrostrip menggunakan patch persegi dengan slot berbentuk U yang dibuat menjadi antena larik 1×2 , kemudian disusun menjadi antena MIMO dua elemen. Penambahan slot bertujuan untuk meningkatkan lebar-pita kerja dari antena, antena larik 1×2 untuk mencapai gain lebih besar dari 9 dB, serta susunan antena MIMO untuk mengurangi dampak pudaran akibat kanal dan meningkatkan laju data kirim. Hasil yang didapatkan adalah rancangan antena dengan lebar-pita 1 GHz dan rentang frekuensi kerja 14,4 – 15,4 GHz. Return loss minimum yang didapat sebesar -18,69 dB. Untuk parameter isolasi didapat nilai -32 dB pada rentang frekuensi yang diharapkan. Sementara itu, nilai axial ratio mencapai 51,07 dB. Gain yang dicapai sebesar 9,20 dBi dengan pola radiasi unidirectional.

Kata Kunci— MIMO, Antena Larik, Mikrostrip, 5G, 15 GHz, U-Slot.

^{1,2,3} Fakultas Teknik Elektro Universitas Telkom, Jalan Telekomunikasi No. 1, Dayeuhkolot, Bandung, 40257. INDONESIA. (tlp: 0222-7564-108; fax: 0222-7564-108; e-mail: kevinjones@students.telkomuniversity.ac.id, {levyolivia, budisyihab}@telkomuniversity.ac.id)

I. LATAR BELAKANG

Pengembangan komunikasi nirkabel mulai diarahkan ke komunikasi 5G. Berbagai solusi dan inovasi ditawarkan untuk menjadi teknologi utama komunikasi 5G, yang salah satu arah pengembangan dari teknologi tersebut adalah menggunakan gelombang yang berada pada rentang frekuensi di atas 6 GHz. Salah satu alasan penggunaan frekuensi di atas 6 GHz adalah kanal yang tersedia sudah terbatas dan telah digunakan untuk komunikasi lain, seperti GSM, radar, dan LTE [1]. Berbagai alokasi frekuensi kerja ditawarkan sebagai frekuensi utama komunikasi 5G, salah satunya adalah frekuensi 15 GHz.

Frekuensi kerja 15 GHz diajukan oleh NTT DoCoMo dan Ericson sebagai salah satu frekuensi dalam rancangan komunikasi 5G [2]. Beberapa keunggulan frekuensi 15 GHz dibandingkan dengan kandidat frekuensi lain yang lebih tinggi adalah redaman hujan dan redaman udara bebas yang lebih kecil, serta memiliki sistem komunikasi lebih sederhana dibandingkan kandidat frekuensi lainnya, seperti 28 GHz dan 60 GHz [3].

Penggunaan antena jamak, dalam hal ini *Multiple Input Multiple Output* (MIMO), memiliki peran penting dalam teknologi 5G, karena keterbatasan fisik dari antena yang kecil. Redaman lintasan antara pengirim dan penerima tidak berubah sebagai fungsi dari frekuensi, asalkan luasan efektif dari antena pengirim dan penerima juga tidak berubah. Pada arah pengembangan antena jamak untuk teknologi 5G, dilakukan pengembangan untuk perubahan *beam antenna* yang dapat berubah terhadap lingkungan, seperti pergerakan pengguna layanan, peningkatan jangkauan, serta peningkatan laju data kirim [4]. Makalah ini membahas tentang antena MIMO pada frekuensi 15 GHz dengan menggunakan dua buah antena.

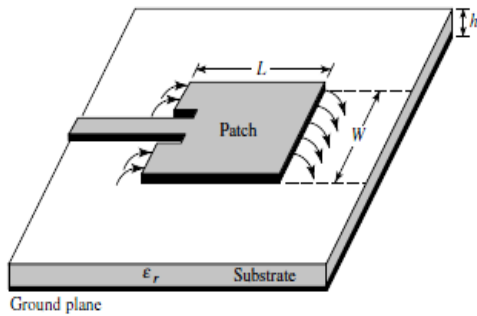
Telah diteliti sebelumnya, antena dengan bentuk patch persegi hanya mampu mencapai lebar-pita hingga 100 MHz [5]. Untuk itu, pada penerapannya diperlukan metode peningkatan lebar-pita. Untuk sistem komunikasi pada 15 GHz, sebelumnya telah dirancang antena grid yang memiliki lebar-pita sesuai dengan lebar frekuensi pada 15 GHz, tetapi memiliki bentuk yang rumit dan dimensi yang lebih besar [6]. Untuk mencapai ketentuan lebar-pita pada 15 GHz, dirancang antena mikrostrip dengan patch persegi yang diberi slot berbentuk U dan disusun 1×2 [7], [8]. Kemudian dilakukan pengembangan dengan menggunakan antena MIMO dua elemen untuk mengurangi pudaran serta meningkatkan laju data kirim pada pemancar.

Makalah ini tersusun atas lima bagian. Bagian pertama tentang pendahuluan, bagian kedua membahas tentang antena mikrostrip, sedangkan bagian ketiga membahas tentang perancangan antena patch persegi, baik antena MIMO tanpa slot maupun menggunakan slot dengan catuan *T-junction*.

Bagian keempat merupakan analisis dari unjuk kerja perancangan dan bagian kelima berisi tentang kesimpulan.

II. ANTENA MIKROSTRIP

Antena adalah perangkat yang berfungsi untuk mengirim dan menerima gelombang elektromagnetik. Salah satu jenis antena yang umum adalah mikrostrip. Antena mikrostrip terdiri atas *patch* sebagai peradiasi gelombang elektromagnetik, pada sisi lainnya terdapat *ground plane*, dan di antara keduanya terdapat substrat dielektrik, seperti terlihat pada Gbr. 1 [9].



Gbr. 1 Struktur antena mikrostrip.

Untuk menentukan dimensi antena mikrostrip, secara umum digunakan (1) sampai dengan (9) [9].

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \tag{1}$$

dengan

- W : tebal *patch* (m)
- c : kecepatan cahaya di ruang bebas ($3 \cdot 10^8$ m/s)
- f_r : frekuensi kerja antena yang diinginkan (Hz)
- ϵ_r : permitivitas relatif substrat.

Sedangkan untuk menentukan panjang *patch* (L) diperlukan parameter ΔL yang merupakan pertambahan panjang dari L akibat adanya *fringing effect*. Pertambahan panjang ΔL tersebut dirumuskan menggunakan (2) dan (3) [10].

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \tag{2}$$

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_r}} - 2\Delta L \tag{3}$$

dengan nilai dari ϵ_{reff} dapat dihitung menggunakan (4)[9].

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \right] \tag{4}$$

dengan

- h : tebal substrat (mm)

ϵ_{reff} : permitivitas efektif substrat

μ_0 : permeabilitas ruang hampa.

Untuk catuan ke *patch*, digunakan metode *inset microstrip feed*. Metode *inset feed* umumnya dipilih pada perancangan antena larik karena lebih sesuai untuk diterapkan dibandingkan metode *coaxial feed* yang harus melubangi *patch* dan sulit dalam pembagian daya. Metode *inset feed* juga mampu memberikan *gain* dan lebar-pita yang lebih besar dibanding *coaxial feed* [11]. Persamaan (5) dan (6) dapat digunakan untuk menentukan panjang (L_f) dan lebar (W_f) *inset feed* [9].

$$L_f = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \frac{1}{4} \tag{5}$$

$$W_f = \frac{2h}{\pi} \left\{ \frac{B - 1 - \ln(2B - 1)}{\epsilon_r - 1} + \frac{0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r}}{2\epsilon_r} \right\} \tag{6}$$

Persamaan (7) dan (8) digunakan untuk menghitung nilai B , dengan Z_0 adalah nilai impedans saluran catu [10].

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \tag{7}$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left[\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right] \tag{8}$$

Setelah menentukan lebar dan panjang antena, untuk merancang antena MIMO yang tersusun lebih dari satu elemen, dibutuhkan perhitungan seperti pada (9) untuk memisahkan atau memberi jarak antara dua elemen. Jarak antar elemen ini, d , sebanding dengan panjang gelombang (λ) yang digunakan.

$$d = \frac{\lambda}{2} \tag{9}$$

Jarak antar antena diperlukan agar tidak terjadi *mutual coupling* atau munculnya tegangan di satu antena akibat arus antena yang berdekatan. Akan tetapi, jarak antar antena juga dapat diminimalkan untuk mengurangi ukuran antena, dengan syarat tetap memenuhi kondisi *mutual coupling* di bawah -20 dB.

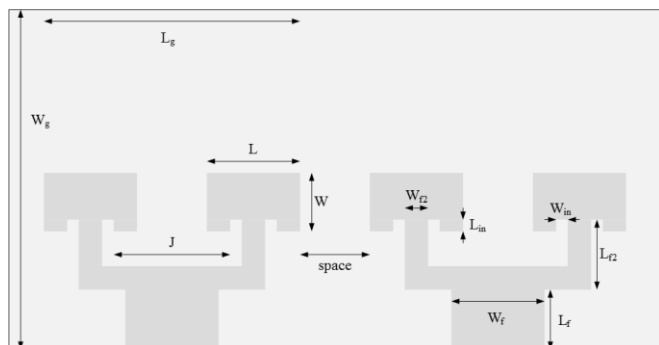
III. PERANCANGAN ANTENA

Antena yang dirancang adalah antena dengan bentuk *patch* persegi yang kemudian disusun menjadi dua elemen dengan menggunakan *T-junction* sebagai pembagi daya dari *port* catuan ke masing-masing antena. Masing-masing elemen antena dicatu menggunakan teknik *inset fed*. Spesifikasi antena yang dicapai adalah frekuensi kerja berada pada 14,9 GHz dengan rentang frekuensi mulai dari 14,4 hingga 15,4 GHz. Spesifikasi antena dan parameter yang ditargetkan tertera pada Tabel I.

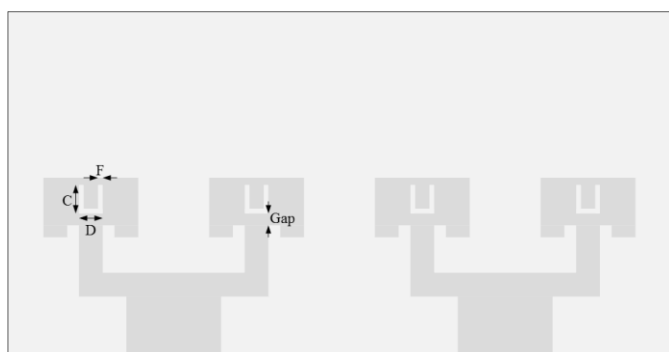
Persamaan (1) sampai (12) digunakan untuk menghitung ukuran antenna, mulai dari lebar dan panjang *ground plane*, panjang dan lebar *patch*, serta lebar dan panjang *fed*. Kemudian, hasil perhitungan yang merupakan rancangan awal disimulasikan untuk dianalisis unjuk kerja antenna yang dirancang. Parameter utama yang akan analisis adalah *return loss*, pola radiasi, *axial ratio*, dan *gain*. Apabila parameter belum memenuhi kriteria, dilakukan optimasi dengan cara memperbesar atau memperkecil ukuran antenna sehingga didapatkan nilai parameter antenna yang sesuai, dan perhitungan ulang apabila ditemukan kesalahan pada perhitungan ukuran.

TABEL I
SPESIFIKASI ANTENA

Parameter	Spesifikasi
Frekuensi Kerja	14,9 GHz
Rentang Frekuensi	14,4 GHz – 15,4 GHz
Return Loss	≤ -15 dB
Polarisasi	Linier
Pola Radiasi	Unidirectional
Koefisien Isolasi	≤ -20 dB



Gbr. 2 Perancangan antenna MIMO dua elemen tanpa slot.



Gbr. 3 Perancangan antenna MIMO dua elemen dengan slot.

Bahan yang digunakan dalam antenna mikrostrip ini adalah tembaga pada *patch* dan *groundplane* dengan ketebalan 0,035 mm. Tembaga digunakan karena umum ditemukan serta konduktivitasnya sudah cukup baik. Sementara itu, untuk bahan pada substrat digunakan Duroid 5880. Duroid 5880 memiliki permitivitas (ϵ_r) sebesar 2,2 dan tebal yang

digunakan adalah 1,575 mm [12]. Duroid 5880 dipilih karena memiliki permitivitas dielektrik yang baik serta mampu digunakan pada perangkat berfrekuensi tinggi.

TABEL II
DIMENSI ANTENA MIMO DUA ELEMEN

Variabel	Deskripsi	Ukuran (mm)
Wg	Lebar <i>Groundplane</i> Satu Elemen	22
Lg	Panjang <i>Groundplane</i> Satu Elemen	22
W	Lebar <i>Patch</i>	5,71
L	Panjang <i>Patch</i>	7,9
H	Tebal Substrat	1,575
T	Tebal <i>Patch</i> dan <i>Groundplane</i>	0,035
Wf	Lebar <i>Feeder</i> Utama	4,89
Lf	Panjang <i>Feeder</i> Utama	3,27
J	Lebar <i>Divider</i> Pada Masing-Masing Antena	14,57
Wf ₂	Lebar <i>Feeder</i> Sekunder	1,48
Lf ₂	Panjang <i>Feeder</i> Sekunder	3,89
Win	Lebar <i>Gap</i> Pada <i>Patch</i>	0,5
Lin	Panjang <i>Gap</i> Pada <i>Patch</i>	1,6
Space	Jarak Antar Antena	7,57
F	Lebar <i>Slot</i>	0,43
C	Panjang <i>Slot</i> Vertikal	2,93
D	Panjang <i>Slot</i> Horizontal	1,28
Gap	Jarak dari <i>Feeder</i> ke <i>Slot</i>	0,58

Rancangan antenna pertama yang disimulasikan adalah antenna larik 1×2 dengan *patch* persegi tanpa diberikan *slot* pada bagian tengah *patch*, yang kemudian dikembangkan menjadi antenna MIMO dengan dua elemen. Desain awal ini dirancang untuk melihat dampak dari *slot* pada lebar-pita antenna. Dimensi perancangan ditunjukkan pada Tabel II dan Gbr. 2. Kemudian, simulasi dilakukan untuk antenna larik 1×2 dengan menggunakan *slot* pada bagian *patch*. *Slot* bertujuan memberikan pelebaran lebar-pita dengan meningkatkan kopling induktif dan mengurangi faktor Q antenna [13]. Untuk menentukan lebar dan panjang *slot* pada *patch* dapat digunakan (10) sampai (12) [7]. Desain antenna dengan menggunakan *slot* dapat ditunjukkan pada Gbr. 3 dan Tabel II. F adalah variabel yang menentukan lebar lengan *slot*, C adalah variabel yang menentukan panjang *slot* secara vertikal, dan D adalah variabel yang menentukan panjang *slot* horizontal. Tabel II menyajikan dimensi antenna hasil optimasi.

$$F = \frac{\lambda}{60} \quad (10)$$

$$\frac{C}{W} \geq 0,3 \quad (11)$$

$$D = \frac{c}{f_{low} \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2(L + \Delta L - F) \quad (12)$$

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (13)$$

Sebelum disimulasikan, antenna diberi batasan simulasi berupa ruang hampa untuk mengkondisikan antenna seperti pada kondisi nyata. Ruang hampa tersebut diberi ukuran sesuai dengan persamaan medan jauh, seperti pada (13).

IV. ANALISIS

Pada bagian ini dianalisis hasil perancangan dan simulasi setelah didapatkan dimensi dan disimulasikan. Beberapa parameter yang diamati meliputi nilai *return loss* antenna, isolasi antar antenna pertama dan kedua (parameter S_{12} dan S_{21}), *axial ratio* untuk mengetahui polarisasi antenna, serta polarisasi antenna secara dua dimensi dan tiga dimensi untuk mengetahui pola radiasi antenna. Parameter-parameter tersebut disajikan pada Gbr. 4 sampai Gbr. 13, untuk antenna tanpa *slot* dan antenna yang menggunakan *slot*.

Gbr. 4 menunjukkan hasil *return loss* untuk antenna tanpa *slot* dan antenna menggunakan *slot*. Dari kurva tersebut, didapatkan nilai *return loss* S_{11} untuk antenna tanpa menggunakan *slot* mencapai nilai di bawah -15 dB pada frekuensi 14,5 GHz dan mencapai nilai di bawah -15 dB terakhir pada frekuensi 15,2 GHz. Sementara itu, pada S_{22} didapat nilai di bawah -15 dB pertama pada frekuensi 14,6 GHz dan nilai -15 dB terakhir pada frekuensi 15,2 GHz.

Nilai *return loss* S_{11} minimum terjadi pada frekuensi 14,9 GHz dengan nilai -16,89 dB, sementara pada S_{22} didapatkan nilai minimum pada frekuensi 14,9 GHz dengan nilai -16,26 dB. Hal ini menandakan antenna telah bekerja pada frekuensi tengah yang diinginkan, tetapi belum mencapai frekuensi atas dan bawah yang diharapkan, yaitu pada rentang 14,4 – 15,4 GHz.

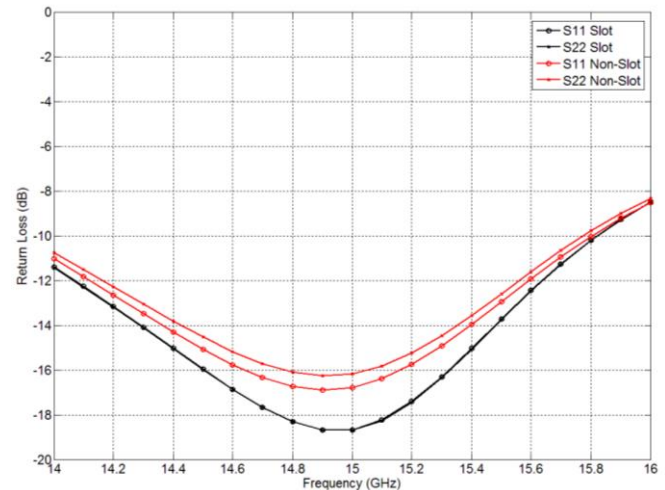
Untuk nilai *return loss* pada antenna dengan menggunakan *slot*, didapatkan nilai *return loss* S_{11} mencapai nilai kurang dari -15 dB pada frekuensi 14,4 GHz dan mencapai nilai di bawah -15 dB terakhir pada frekuensi 15,4 GHz. Sementara itu, pada S_{22} didapat nilai di bawah -15 dB pertama pada frekuensi 14,4 GHz dengan nilai -15,05 dB dan nilai -15 dB terakhir pada frekuensi 15,4 GHz dengan nilai -15,07 dB.

Nilai *return loss* S_{11} minimum terjadi pada frekuensi 14,9 GHz dengan nilai -18,69 dB, sementara pada S_{22} didapatkan nilai minimum pada frekuensi 14,9 GHz dengan nilai -18,69 dB. Hal ini menandakan antenna telah bekerja pada frekuensi tengah yang diinginkan serta telah mencapai rentang frekuensi yang diinginkan, yakni dari 14,4 - 15,4 GHz, serta memenuhi kondisi lebar-pita dan *return loss* yang diinginkan.

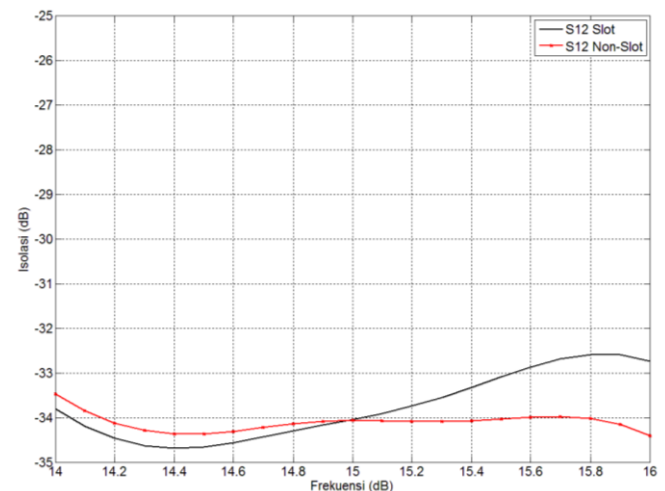
Dari kurva pada Gbr. 5, dari hasil simulasi didapatkan bahwa nilai koefisien isolasi pada *port* 1 dan 2 identik, baik

untuk antenna tanpa *slot* maupun antenna dengan menggunakan *slot*, sehingga Gbr. 5 hanya menampilkan nilai S_{12} saja. Nilai koefisien isolasi terbesar untuk antenna tanpa *slot* terjadi pada frekuensi 14 GHz dengan nilai -33,47 dB. Meski demikian, koefisien isolasi pada rentang 14,4 – 15,4 GHz memiliki nilai di bawah -34 dB dan tetap memenuhi kondisi di bawah -20 dB.

Pada antenna yang menggunakan *slot*, nilai koefisien isolasi terbesar terjadi pada frekuensi 15,8 GHz dengan nilai -32,59 dB. Meski demikian, koefisien isolasi pada rentang 14,4 GHz hingga 15,4 GHz rata-rata memiliki nilai di bawah -33 dB dan tetap memenuhi kondisi di bawah -20 dB. Dari grafik tersebut, dapat dikatakan bahwa *slot* pada antenna dapat meningkatkan nilai koefisien isolasi.

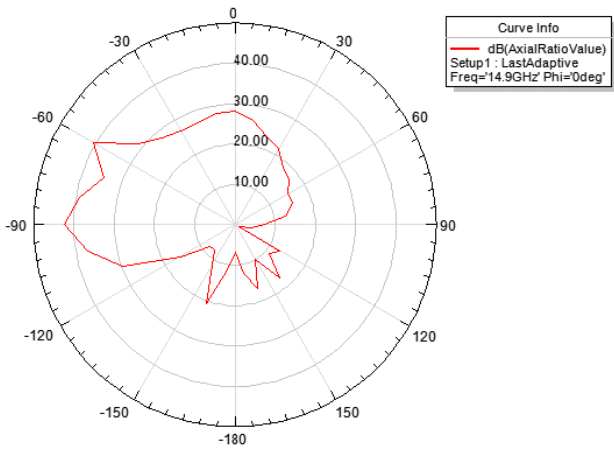


Gbr. 4 Nilai *return loss* antenna tanpa *slot* dan dengan *slot*.

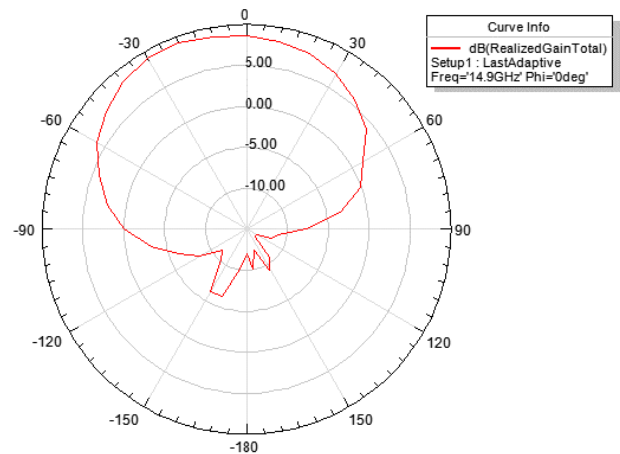


Gbr. 5 Nilai koefisien isolasi antenna tanpa *slot* dan dengan *slot*.

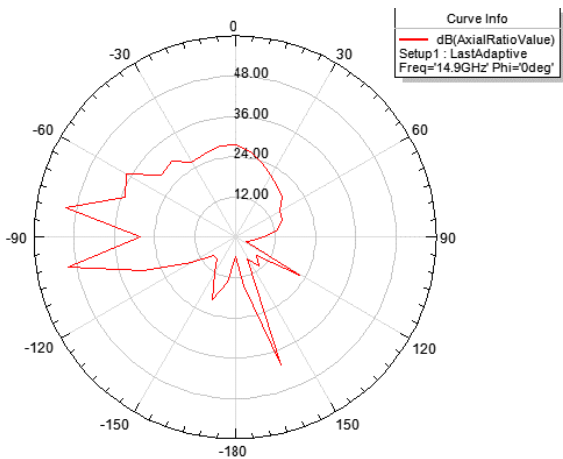
Dari Gbr. 6 dan Gbr. 7, didapatkan nilai *axial ratio* untuk antenna tanpa *slot* dan dengan menggunakan *slot*. Pada kondisi $\phi=0$, polarisasi maksimum untuk antenna tanpa *slot* sebesar 42,29 dB dan antenna dengan menggunakan *slot* sebesar 51,07 dB, dengan mengarah ke sudut -60° sampai -120° . Dengan demikian, baik antenna tanpa *slot* maupun menggunakan *slot* bekerja dengan polarisasi linier. Penggunaan *slot* sendiri dapat meningkatkan nilai *axial ratio*.



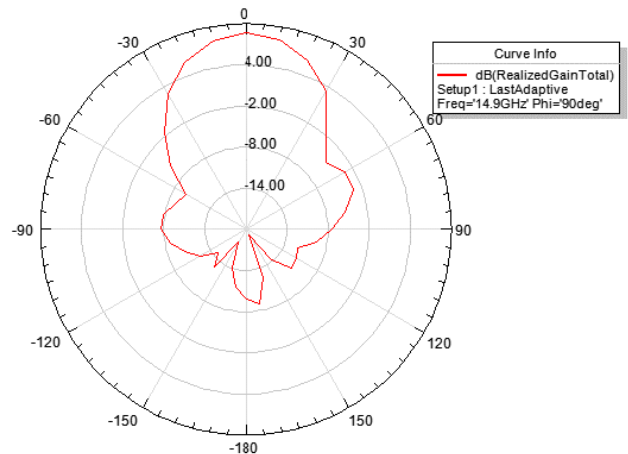
Gbr. 6 Axial ratio antenna tanpa slot.



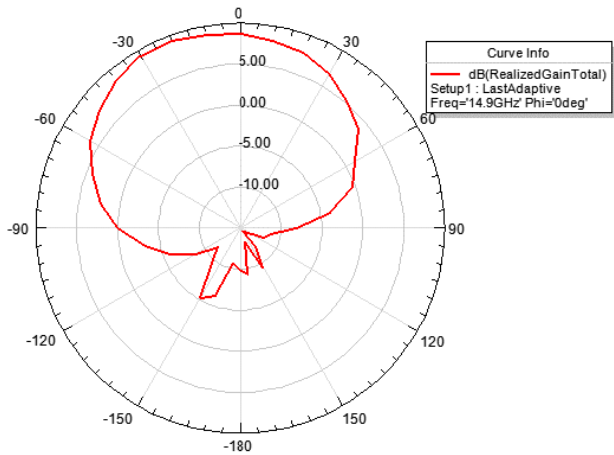
Gbr. 9 Azimuth slot.



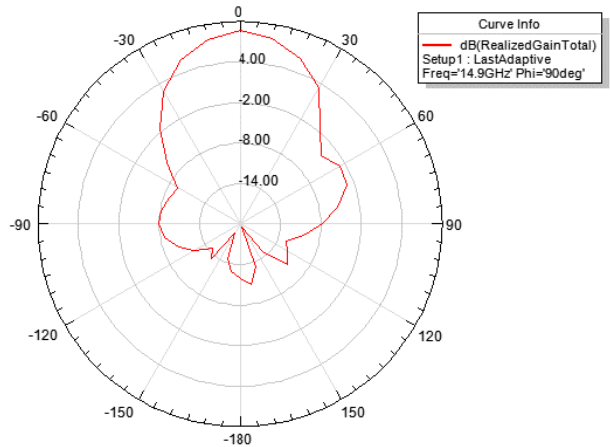
Gbr. 7 Axial ratio pada antenna dengan slot.



Gbr. 10 Elevasi non-slot.



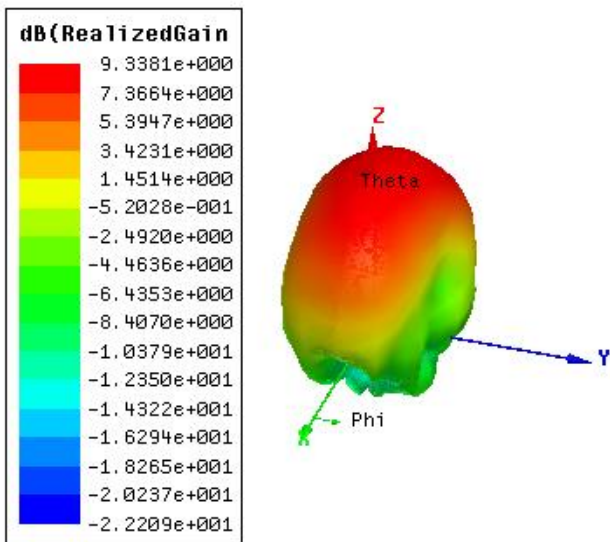
Gbr. 8 Azimuth non-slot.



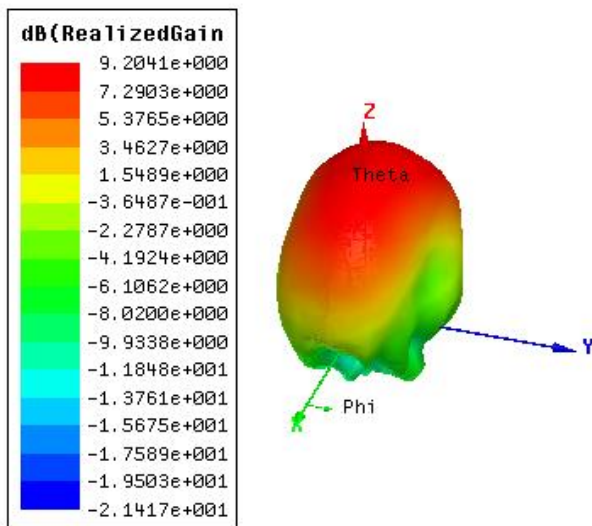
Gbr. 11 Elevasi slot.

Gbr. 8 sampai Gbr. 11 adalah pola radiasi antenna pada arah azimuth dan elevasi untuk antenna tanpa slot dan dengan slot. Pada arah azimuth, kedua antenna memiliki arah pancar maksimum pada sudut -30° , sedangkan pada arah elevasi, kedua antenna memiliki arah pancar maksimum pada sudut 0° . Dari arah pancar tersebut, dapat disimpulkan bahwa antenna tanpa slot maupun menggunakan slot memiliki arah pancar unidirectional.

Untuk gain antenna, pada antenna tanpa slot diperoleh gain sebesar 9,34 dB, dan pada antenna menggunakan slot sebesar 9,20 dB. Dengan demikian, terjadi penurunan gain pada antenna yang diberikan slot sebesar 0,13 dB. Gbr. 12 dan Gbr. 13 adalah pola radiasi tiga dimensi antenna dan gain yang didapatkan dari perancangan.



Gbr. 12 Pola radiasi tiga dimensi antenna tanpa slot.



Gbr. 13 Pola radiasi tiga dimensi antenna menggunakan slot.

TABEL III

PERBANDINGAN HASIL ANTENA TANPA SLOT DAN DENGAN SLOT

Parameter	Tanpa Slot	Dengan Slot
Lebar-pita	700 MHz	1000 MHz
Return Loss	-18,69 dB	-18,66 dB
Minimum Isolation Coefficient	-33,47 dB	-32 dB
Maximum Peak Gain	9,34 dB	9,20 dB
Axial Ratio	42,29 dB	51,07 dB

Perbandingan hasil parameter antenna pada frekuensi 14,9 GHz dengan slot dan tanpa slot disampaikan pada Tabel III. Perancangan antenna dengan memberikan slot berbentuk U pada patch berdampak pada meningkatnya lebar-pita hingga 300 MHz dan menurunnya return loss pada antenna serta

meningkatkan koefisien isolasi. Dengan memberikan jarak antar antenna, antenna telah memiliki koefisien isolasi yang baik sehingga tidak dibutuhkan adanya metode lain untuk menurunkan koefisien isolasi. Antenna telah bekerja pada frekuensi yang diharapkan yaitu 14,4 – 15,4 GHz dengan gain ≥ 9 dB dan pola radiasi unidirectional.

V. KESIMPULAN

Telah dirancang antenna MIMO dua elemen yang dapat bekerja di frekuensi 15 GHz. Antenna memiliki bentuk patch persegi dengan slot berbentuk U dan disusun 1x2, yang kemudian disusun menjadi susunan antenna MIMO dua elemen. Antenna berhasil memenuhi parameter yang ingin dicapai. Pada parameter return loss dicapai nilai minimum -18,69 dB dan pada parameter isolasi didapat nilai -32 dB pada rentang frekuensi yang diharapkan. Gain yang dicapai sebesar 9,20 dB dengan pola radiasi unidirectional. Polarisasi yang didapat adalah linier dengan maximum axial ratio sebesar 51,07 dB. Pemberian slot berbentuk U berhasil meningkatkan lebar-pita antenna dari yang semula sekitar 700 MHz menjadi 1000 MHz pada rentang frekuensi 14,4 – 15,4 GHz. Namun, dengan pemberian slot, nilai isolasi naik sebesar 1,47 dB.

REFERENSI

- [1] 4G Americas, "5G Spectrum Recommendations", 4G Americas, Amerika Serikat, 2015.
- [2] Tateishi, Kiichi et al, "Field Experiments on 5G Radio Access Using 15-GHz Band in Outdoor Small Cell Environment", *IEEE PIMRC*, vol. 26, hal 851-855, 2015.
- [3] Cheng, Wei-Chung, et al, "15GHz Propagation Channel Measurement at a University Campus for the 5G Spectrum", *Microwave Conference (APMIC)*, Desember, 2015.
- [4] Ericsson, "5G Radio Access", White Paper, Februari, 2015.
- [5] T. Firmansyah, S. Purnomo, F. Fatonah, T. Nugroho, "Antena Mikrostrip Rectangular Patch 1575,42 MHz dengan Polarisasi Circular untuk Receiver GPS", *JNTETI*, vol. 4, no. 4, November, 2015.
- [6] Sani Yahya, Muhammad dan S.K.A Rahim, "15GHz Grid Array Antenna For 5G Mobile Communications Systems", *Microwave And Optical Technology Letters* vol. 57, no. 12, hal. 2977-2980, Dec. 2016.
- [7] P. Daud, I. Syamsu, D. Mahmudin, T.T. Estu, A.A. Fathnan, Y.N. Wijayanto, "Inset Fed U-Slotted Patch Antenna Array for 10 GHz Radio-Over-Fiber Applications", *IEEE-ICSE 2016*, hal. 117-120, 2016.
- [8] P. Daud, S. Hardiati, D. Mahmudin, T.T. Estu, A.A. Fathnan, Y.N. Wijayanto, and N. Armi, "1x2 Array of U-Slotted Rectangular Patch Antennas for High-Speed LTE Mobile Networks," *International Conference on Engineering and Technology for Sustainable Development (IET4SD)*, Yogyakarta, 11-12 Nov. 2015.
- [9] I. Singh and V. S. Tripathi, "Microstrip Patch Antenna and its Applications : a Survey," *Int. J. Comp. Tech. Appl.*, vol. 2, no. 5, hal. 1595-1599, 2011.
- [10] C. a. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. Arizona: A JOHN WILEY & SONS, INC, 2012.
- [11] M.Ramesh dan K.B.Yip, "Design Inset Fed Microstrip Patch Antennas", *Microwaves and RF*, 2003.
- [12] "RT/Duroid 5870/5880 data sheet," Rogers Corporation, Chandler, USA.
- [13] V.P Patil, "Enhancement of Bandwidth of Rectangular Patch Using Two Square Slot Techniques", *International Journal of Engineering Sciences and Emerging Technologies*, Oct. 2012.