

Desain Antena Mikrostrip Patch Array 28 GHz Dengan CST Microwave Studio

Ibnu Hajar¹, Tito Yuwono²

Fakultas Teknik Elektro, Universitas Islam Indonesia
Jl Kaliurang KM 14.5 Yogyakarta, Indonesia

ibnudoth@gmail.com

tito@uii.ac.id

Abstrak— Teknologi 5G sedang dikembangkan untuk dapat mengatasi kebutuhan komunikasi yang semakin padat. Perkembangan teknologi 5G tentunya membutuhkan berbagai perangkat guna mendukung dan memfasilitasi teknologi 5G tersebut. Salah satu perangkat inti untuk sistem 5G adalah antena yang merupakan perangkat untuk memancarkan dan menerima gelombang elektromagnetik. Sistem 5G menggunakan frekuensi *milimeter wave* sebagai spektrum frekuensinya. Pada tugas akhir ini dilakukan desain antena mikrostrip *patch array* yang dapat bekerja pada frekuensi 28 GHz untuk mendukung perkembangan sistem 5G yang sedang dilakukan. Juga sebagai referensi dalam mendesain antena *finite array* dengan CST Microwave Studio. Metode penelitian yang digunakan yaitu dengan melakukan simulasi menggunakan Antenna Magus dan Computer Simulation Studio Software. Dasar elemen antena menggunakan desain *rectangular inset-fed microstrip patch* sebagai elemen utama pada antena dengan total elemen secara keseluruhan berjumlah 100 elemen. Proses perancangan, desain dan pengujian dilakukan dengan menggunakan *antenna magus* dan CST Microwave Studio. Material dari antena yaitu Rogers RO4003C dengan ketebalan 350 μm dan nilai permitivitas 3,38. Pemilihan material berdasarkan frekuensi dan *bandwidth* yang ditargetkan serta spesifikasi antena agar dapat beroperasi dengan baik pada frekuensi kerja yang diharapkan. Berdasarkan hasil yang sudah di peroleh, penelitian ini berhasil mendapatkan spesifikasi parameter dari antena yang diharapkan sesuai dengan frekuensi kerjanya yaitu *S-parameters* dengan nilai rata-rata masing-masing elemen -14 dB, *bandwidth* dengan rata-rata 450 Mhz, dan VSWR dengan rata-rata 1,48.

Kata kunci—28 Ghz, *milimeter waves*, *array*, *finite array*.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi telekomunikasi telah berkembang pesat diiringi oleh kebutuhan pengguna yang semakin menuntut sistem komunikasi yang handal sebagai penunjang kelancaran aktivitas sehari-hari maupun dalam hal pekerjaan. Pada titik ini teknologi sistem telekomunikasi telah berkembang sampai pada tahap 4th Generation (4G). Perkembangan dan transisi antara satu teknologi jaringan dari satu generasi ke generasi berikutnya dimaksudkan dengan tujuan untuk menutupi kekurangan dan mengembangkan teknologi dari generasi pendahulunya, sebagai contoh transisi dari 2nd Generation (2G) ke 3rd Generation (3G) dimaksudkan untuk memungkinkan adanya fungsi transmisi data melalui jaringan internet pada perangkat *mobile station (MS)*. Implementasi teknologi 5G di Indonesia masih dalam tahap

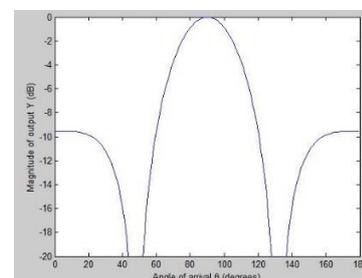
perancangan yang sudah dilakukan oleh berbagai kalangan ilmuwan Indonesia yang tergabung dalam *Indonesia 5G Forum*. *Indonesia 5G Forum* terbentuk untuk mendukung pemerintah Indonesia dalam menyiapkan Indonesia untuk menyambut teknologi 5G. Pemerintah Indonesia telah menyiapkan spektrum frekuensi 28 GHz untuk teknologi 5G di Indonesia dengan lebar pita sebanyak 2000 MHz [10].

Pada tugas akhir ini telah dilakukan desain antena mikrostrip *patch array* yang dapat beroperasi pada frekuensi 28 GHz menggunakan *Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio*. Frekuensi tersebut merupakan frekuensi *milimeter wave* yang digunakan untuk *KA-Bands* dan komunikasi pada 5G.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Antena Array

Antena adalah perangkat logam yang digunakan untuk mengirim atau menerima gelombang radio [6]. Ada banyak jenis tipe antena beberapa diantaranya yaitu antena *wire*, antena *aperture*, antena mikrostrip, antena *array*, antena *horn*, antena *reflector*, dan antena lensa. Antena *array* merupakan satu set antena yang terdiri dari kumpulan N antena, dimana $N \geq 2$. Performa dari antena *array* dapat dilihat dari semakin banyaknya jumlah elemen yang terdapat pada antena *array*.



Gambar 1. Sudut kedatangan pada antena *array* [6].

Pada gambar 1 di atas menunjukkan bahwa antena *array* memproses sinyal lebih baik pada sudut tertentu jika dibandingkan dengan jenis antena lain. Jika melihat pada grafik tersebut pada sudut 90° antena *array* bekerja sangat maksimal, akan tetapi pada sudut 45° dan sudut 135° antena tidak dapat merefleksikan sinyal atau *zero output power*. Hal ini merupakan kelemahan sekaligus sebagai kelebihan yang ada

pada antena *array*, dengan memanfaatkan kondisi tersebut melalui pengaturan geometri antena secara tepat maka didapatkan desain antena yang dapat mengabaikan energi yang datang pada sudut yang tidak diinginkan dan memaksimalkan energi pada sudut yang dikehendaki.

B. Antena Mikrostrip Patch

Antena mikrostrip *patch* yaitu antena yang terdiri dari tiga bagian utama yaitu *patch*, *substrate*, dan *ground plane* [2]. Bagian *patch* merupakan bagian yang berfungsi untuk memancarkan gelombang radio terletak dibagian terluar atas antena. Bahan utama dari *patch* berupa konduktor yaitu tembaga. Bentuk *patch* sendiri ada bermacam-macam yaitu *rectangular*, *circular ring*, dan *u-slot*. Sedangkan *substrate* merupakan bagian yang berfungsi menyalurkan gelombang elektromagnetik dari catuan. Karakteristik dari *substrate* sangat berpengaruh pada performa antena, sedangkan ketebalan dari *substrate* mempengaruhi *bandwidth* pada antena. Bagian terakhir yaitu *ground plane* merupakan *ground* dari antena. Untuk melakukan desain pada antena mikrostrip *patch* terdapat beberapa persamaan dasar yang digunakan. Persamaan yang digunakan untuk mencari panjang dan lebar dimensi pada elemen *patch* yaitu [9] :

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

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_{r+1}}{2} + \frac{\epsilon_{r-1}}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{w}\right)}} \right] \quad (2)$$

$$L = \frac{c}{2f_o \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.824h \left(\frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8\right)} \right) \quad (3)$$

Dimana :

C = 3×10^8 m/s (Kecepatan Cahaya) (m/s)

Fo = Frekuensi Inti (GHz)

ϵ_R = Permittivitas

ϵ_{eff} = Permittivitas efektif

h = Ketebalan Substrate (mm)

W = Lebar (mm)

L = Panjang (mm)

Sedangkan untuk *ground plane* dianjurkan memiliki ukuran enam kali lebih besar dari ketebalan *substrate* [6]. Sehingga didapatkan persamaan untuk *plane ground* sebagai berikut:

$$L_g = 6h + L \quad (4)$$

$$W_g = 6h + W \quad (5)$$

C. Milimeter Wave

Milimeter Wave (*mmWave*) adalah *wavelength* yang spektrumnya antara 30 GHz dan 300 GHz [7]. *MmWave* juga dinamakan *extremely high frequency (EHF)* atau *very high frequency (VHF)* oleh *International Telecommunications*

Union (ITU). Panjang gelombangnya berkisar dari 10 mm sampai dengan 1 mm. *MmWave* menjanjikan kapasitas data yang jauh lebih besar dibandingkan dengan teknologi yang kita gunakan sekarang. Penelitian yang banyak dilakukan pada rentang frekuensi *milimeter wave* yaitu pada frekuensi 28 GHz.

D. Parameter antena

Parameter-parameter penting dari antena yang akan dijadikan acuan dalam pengujian antara lain:

1. *Scattering Parameters* disingkat *S-parameters* merupakan relasi antara input dan output antara masing-masing *port* atau *terminals* pada sistem elektrik.
2. *Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)* yang masih memiliki keterkaitan antara *reflection coefficient*. VSWR merupakan fungsi dari *reflection coefficient*.
3. *Bandwidth* yaitu rentang frekuensi dimana antena dapat beroperasi dengan memancarkan atau menerima energi dengan baik [8].

III. METODE PENELITIAN

A. Alat Dan Bahan

Alat dan bahan yang dibutuhkan berupa perangkat komputer dengan spesifikasi multimedia yang mumpuni sebagai alat simulasi untuk membantu proses simulasi dilakukan dengan cepat dan akurat dan perangkat lunak yaitu *Antenna Magus* dan *Computer Simulation Technology Studio (CST)* untuk desain dan kalkulasi pada antena.

B. Perancangan Antena

Tabel 1 Spesifikasi antena

No	Parameter	Keterangan
1	Frekuensi	28 GHz
2	Dielektrik konstan	3,38
3	Ketebalan <i>Substrate</i> (h)	0,243 mm
4	VSWR	≤ 2
5	<i>Bandwidth</i>	± 500 MHz

Pada tabel 1 di atas frekuensi operasi yang diinginkan adalah 28 GHz dengan bahan *substrate* yaitu *Rogers RO4003C* yang nilai dielektrik konstantnya/permittivitas adalah 3,38, dengan tebal 0,243 mm, dan nilai VSWR ditargetkan kurang dari 2.

C. Perancangan Dimensi Antena

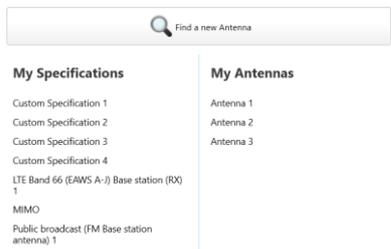
Hal pertama yang dilakukan yaitu melakukan perhitungan dimensi dari elemen *patch* antena berupa panjang dan lebar elemennya menggunakan persamaan 1, 2, dan 3 dan diperoleh hasil panjang *patch* dengan nilai 2,913 mm dan lebar 3,620 mm. selanjutnya dilakukan perhitungan dimensi *ground plane* pada elemen *patch* tersebut menggunakan persamaan 4, dan 5 dan diperoleh hasil dengan nilai panjang *ground* 2,915 mm serta lebar *ground* 3,622 mm. hasil dari perhitungan dengan persamaan dimensi awal antena ditampilkan pada tabel 2 di bawah.

Tabel 2 Dimensi awal antenna patch

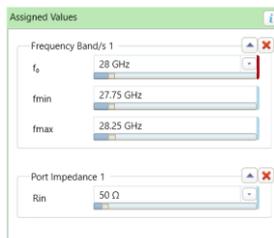
No	Parameter	Keterangan
1	Patch length (L)	2,913 mm
2	Patch Width (W)	3,620 mm
3	Ground Patch length (L)	2,915 mm
4	Ground Patch Width (W)	3,622 mm

Dari hasil perhitungan persamaan yang telah dilakukan didapatkan nilai dimensi panjang dan lebar dari elemen *patch* serta *ground plane* elemen antenna yang akan disimulasikan, selanjutnya dilakukan proses desain dimensi antenna secara keseluruhan pada *antenna magus*.

Setelah didapatkan dimensi elemen antenna melalui persamaan 1-5 selanjutnya pada *antenna magus* langkah awal dalam mendesain antenna mikrostrip *patch array* yaitu menentukan frekuensi antenna yang digunakan pada antenna magus yaitu pada frekuensi 28 GHz dengan f_{min} 27,75 GHz dan f_{max} 28,25 GHz. Pada tampilan awal *antenna magus* dilakukan masukan spesifikasi dengan seleksi pada “*my specification*” dengan berbagai pilihan, penulis menggunakan MIMO, seperti tampak pada gambar 2 dan 3 di bawah ini.

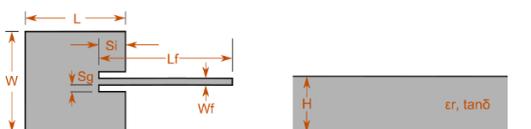


Gambar 2. Tampilan awal Antenna Magus



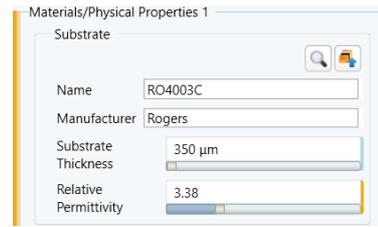
Gambar 3. Masukan frekuensi

Pada gambar 3 f_0 adalah *centre frequency* dengan nilai 28 GHz, f_{min} 27,75 GHz, f_{max} 28,25 GHz, dan R_{in} sebagai *port impedance* 50 ohm. Setelah berhasil melakukan masukan frekuensi, dilanjutkan dengan pemilihan model antenna. Pada *antenna magus* telah tersedia berbagai macam tipe antenna yang dapat diambil sebagai referensi desain dasar antenna mikrostrip *patch array*. Jenis antenna yang paling sesuai berdasarkan spesifikasi yang ditargetkan yaitu *rectangular inset-fed microstrip patch antenna* seperti tampak pada gambar 4 di bawah.



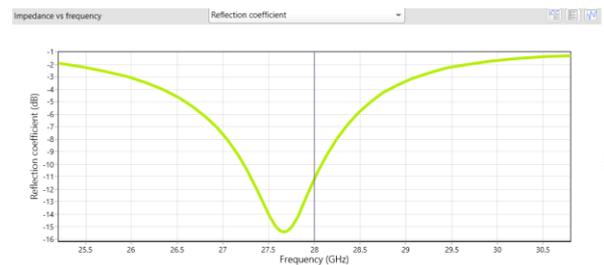
Gambar 4. Model antenna

Selanjutnya yaitu pemilihan material yang merupakan hal yang sangat berpengaruh dalam mencapai performa antenna yang diinginkan.



Gambar 5. Material antenna

Pada gambar 5 di atas terdapat nama dari jenis material beserta manufaktur pembuatnya, ketebalan *substrate*, beserta nilai pemitivitasnya. Setelah pemilihan material selesai langkah selanjutnya yaitu menguji performa dimensi antenna tersebut pada *antenna magus* sekali lagi untuk melihat spesifikasinya apakah sesuai dengan yang diharapkan sebelum dilakukan simulasi pada *CST*.



Gambar 6. Material antenna

Dari gambar 6 di atas dapat dilihat bahwa desain antenna masih kurang memenuhi spesifikasi yang diharapkan. Frekuensi kerja antenna berada pada 27,67 GHz dengan *S-parameters* -15,46 dB, dan *bandwidth* sebesar 858,9 MHz, yang mana belum memenuhi spesifikasi kerja yang diharapkan. Untuk itu perlu dilakukan modifikasi atau *tweak* pada dimensi antenna.

Perbandingan parameter *tweak* sebelum dan setelah diubah ditampilkan pada gambar 7 di bawah ini.



Gambar 7. Parameter *tweak* sebelum dan sesudah

Dari berbagai *tweak* yang sudah dilakukan didapatkan hasil optimal yang nantinya diharapkan bekerja sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan ketika dijalankan simulasi pada *CST Studio*. Berikut dimensi akhir satu elemen antenna yang sudah dioptimasi ditampilkan pada tabel 3 di bawah ini.

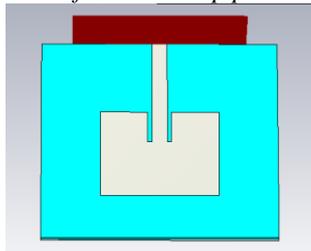
Tabel 3 Dimensi akhir antenna satu elemen setelah dioptimasi

No	Parameter Desain	Dimensi
1	Patch length (L)	2.77325846199 mm
2	W (Patch Width (W))	3.61751731487246 mm
3	Feed line width (W_f)	0.470048812753309 mm
4	Feed line length (W_f)	3.27711322550016 mm
5	Substrate height (H)	0.243 mm
6	Relative permittivity (ϵ_r)	3.38
7	Loss tangent of the substrate medium ($\tan\delta$)	0
8	Feed inset from edge of patch (S_i)	0.991065001276978 mm
9	Spacing between feed line and patch (S_g)	0.126727325110592 mm

IV. HASIL DAN ANALISIS

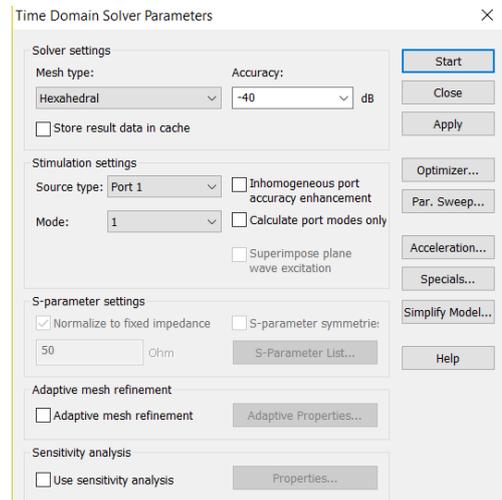
A. Desain Satu Elemen Pada CST

Hasil desain dari *antenna magus* dapat diproses langsung pada *CST Studio*, proses simulasi pada *CST* lebih rumit dan terdapat berbagai macam *solver*. Pada simulasi ini digunakan *time domain solver* agar kalkulasi yang dilakukan lebih cepat dan tetap akurat. Tampak pada gambar 8 di bawah tampilan desain *rectangular inset-fed mikrostrip patch antenna*



Gambar 8. Desain *Rectangular Inset-fed mikrostrip Patch Antenna*

Berikutnya dilakukan eksekusi pada *setup solver*, maka muncul jendela baru yang berfungsi untuk melakukan konfirmasi dan konfigurasi berbagai parameter simulasi seperti tampak pada gambar 9 di bawah ini.

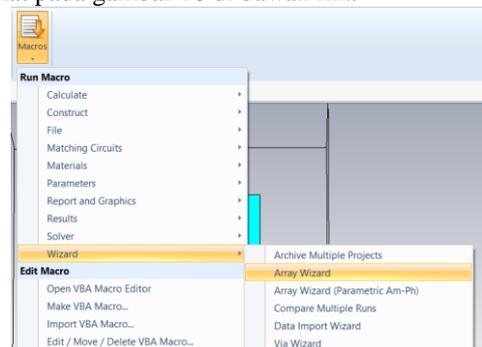


Gambar 9. Tampilan menu *time domain solver*

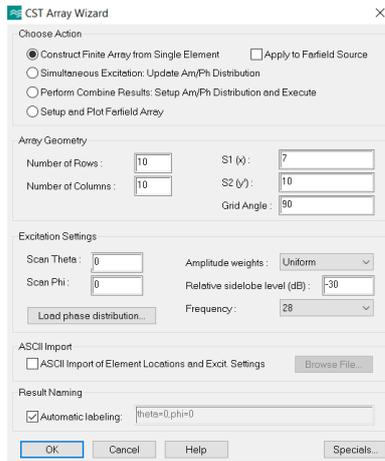
Tampak pada gambar 9 di atas *source type* diseleksi pada *port 1* dan mode 1 dikarenakan antenna *patch* yang didesain hanya memiliki 1 *port*, pada pemilihan *source type* dapat juga dilakukan mode *selection* yaitu fungsi untuk menjalankan simulasi pada mode *excitation signal* dengan melakukan seleksi pada *port* mode 1 atau *port* mode 2. Pada *port* mode 1 simulasi dijalankan dengan menggunakan *waveguide port* yang sudah ada pada desain antenna, sedangkan mode *excitation* dijalankan untuk melihat bagaimana pengaruh antenna untuk mendapatkan nilai maksimal *Signal to Noise Ratio (SNR)* jika diberikan suplai *power* yang cukup besar.

B. Pengujian Antena Array 100 Elemen

Langkah selanjutnya dilanjutkan dengan mengubah satu elemen antenna tersebut menjadi antenna *array* 100 elemen. *CST Studio* menyediakan fitur *array wizard* yang dapat mengubah satu elemen antenna menjadi antenna jenis *finite array* yang terdapat pada menu *macros* pada menu *CST*. Fungsi tersebut dapat dilihat pada gambar 10 di bawah ini..

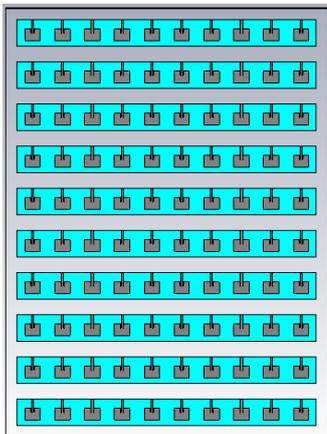


Gambar 10. *Tool array wizard* pada *CST studio*



Gambar 11. Konfigurasi array wizard

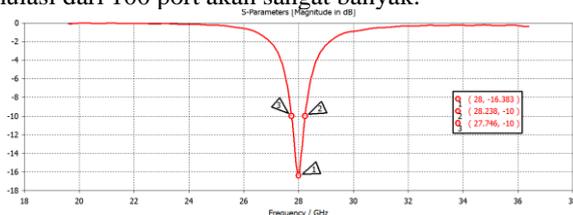
Pada gambar 11 adalah menu konfigurasi *array wizard*. Pada bagian *choose action* dilakukan seleksi pada *construct finite array from single element*, selanjutnya pada kolom *geometry rows* diisi nilai 10 dan *columns* juga nilai 10 untuk antenna dengan total 100 elemen sedangkan *S1 (x)* diberi nilai 7 yang artinya jarak sumbu x antara masing-masing elemen berjarak 7 mm dan sumbu y yaitu *S2 (y)* dengan nilai 10 dengan jarak 10 mm pada sumbu y. Selanjutnya eksekusi dengan klik *ok*. Beberapa saat kemudian satu elemen antenna berubah menjadi antenna *array* dengan jumlah total elemen sebanyak 100 elemen sebagaimana tampak pada gambar 12 di bawah



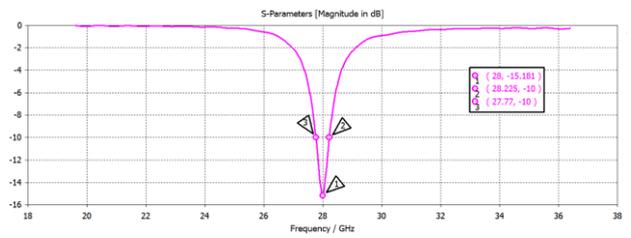
Gambar 12. Array 100 elemen

C. Hasil Simulasi Antena Array 100 elemen

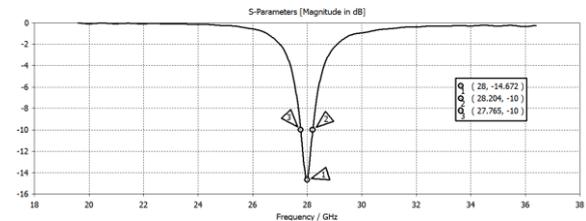
Hasil simulasi ditampilkan sebagian mengingat total hasil simulasi dari 100 port akan sangat banyak.



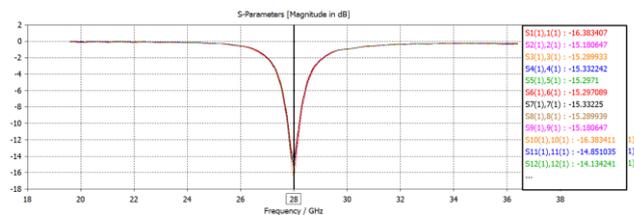
Gambar 13. S11 array 100 elemen



Gambar 14. S22 array 100 elemen



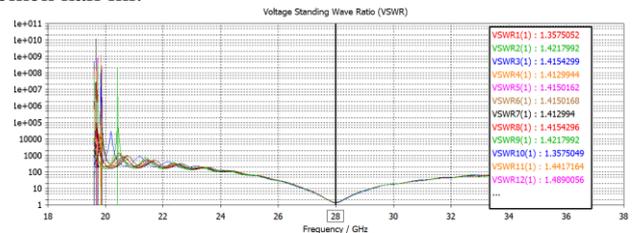
Gambar 15. S100100 array 100 elemen



Gambar 16. S-parameters seluruh elemen antenna array 100 elemen

Pada gambar 13 sampai dengan 15 di atas adalah hasil dari simulasi yang menampilkan *S-parameters* elemen antenna ke 1,2 dan 100 tampak dari ketiga hasil sudah memenuhi spesifikasi *S-parameters* yang diinginkan begitu juga dengan *bandwidth* setiap elemennya. *S11* yaitu hasil simulasi elemen antenna ke-1 dengan *S-parameters* -16,383 dB dan perolehan *bandwidth* sebesar 492 MHz, lalu *S22* yaitu elemen antenna ke-2 dengan nilai *S-parameters* -15,180 dB dengan *bandwidth* sebesar 455 MHz. dan *S100100* yaitu elemen antenna ke-100, *S-parameters* dengan nilai -14,67 dB dengan *bandwidth* sebesar 439 MHz..

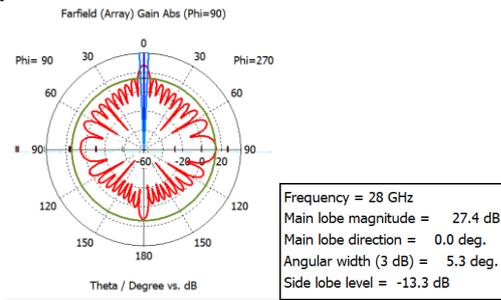
Sedangkan gambar 16 adalah hasil dari *S-parameters* seluruh elemen antenna. Seluruh elemen antenna ke-1 sampai elemen antenna ke-100 diperoleh *S-parameters* yang sesuai harapan dan tidak ada gangguan yang berarti antara antenna satu dengan yang lainnya akibat adanya *coupling* antar elemen. Efek *coupling* antar elemen dapat diatasi dengan mengatur jarak sumbu *x* dan *y* antar elemen pada desain array 100 elemen kali ini.



Gambar 17. VSWR seluruh port antenna array

Pada gambar 17 di atas adalah nilai VSWR dari setiap elemen antenna, nilai VSWR yang tertampil pada grafik menunjukkan bahwa elemen antenna 1 sampai dengan 12

memiliki nilai kurang dari 2 dan lebih besar dari 1 dengan nilai rata-rata setiap elemennya adalah 1,48. Dapat dikatakan bahwa *power reflection* pada antenna sebesar 3,75 % dan *power* transiernya sebesar 96,25 %.



Gambar 18. Farfield polar massive MIMO

Gambar 18 merupakan tampilan hasil dari *gain* antenna *array* elemen 1, diperoleh gain sebesar 27,4 dB, *beamwidth*-nya yaitu 5,3 derajat dan pola radiasi *unidirectional* sebagaimana yang tertampil pada gambar 14.

V. KESIMPULAN

Perancangan antenna mikrostrip *patch array* 100 elemen yang bekerja pada frekuensi 28 GHz telah selesai dan berhasil dilakukan. Antena dapat bekerja dengan baik pada frekuensi 28 GHz berdasarkan hasil dari simulasi yang sudah dilakukan. Didapatkan beberapa poin yang dapat dijadikan kesimpulan dalam desain antenna mikrostrip *patch array* diantaranya :

1. Untuk merumuskan dan mendesain rancangan elemen *patch* antenna dilakukan dengan menggunakan persamaan *patch* yang selanjutnya diterapkan pada proses desain awal antenna menggunakan *antenna magus*.
2. Langkah-langkah dalam mendesain antenna mikrostrip *patch array* pada *CST Microwave* yaitu dengan membuat dan mengoptimasikan desain satu elemen *patch* terlebih dahulu pada *CST Microwave* untuk selanjutnya dilakukan konversi menjadi antenna *array* dengan menggunakan *CST array wizard* dan menentukan berapa elemen yang diinginkan.
3. Pengujian hasil simulasi dilakukan dengan menggunakan *CST solver* yaitu *time domain solver* untuk mendapatkan nilai *S-parameters*, *VSWR*, *bandwidth*, dan *gain* yang dihasilkan oleh antenna.
4. Nilai *S-parameters* dari setiap antenna rata-rata berada di bawah -14 dB dengan *gain* masing-masing berkisar di 28 dB dan masing-masing *beamwidth* pada sudut 5.3 derajat dan *bandwidth* dari masing-masing antenna kurang lebih 450 MHz.
5. *VSWR* rata-rata dari seluruh elemen antenna yaitu 1.48, sehingga dapat dikatakan bahwa *power reflection* pada antenna sebesar 3,75 % dan *power* transiernya sebesar 96,25 %.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Warren and C. Dewar, "Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile," *GSMA intelligence*, pp. 17–20, Dec. 2014
- [2] I. Singh and V.S. Tripathi, "ISSN:2229-6093," *Microstrip Patch Antenna and its Applications: a Survey*, vol. 2, no. 5.
- [3] "Design and analysis of microstrip slot array antenna ..." [Online]. Available: http://www.bing.com/cr?IG=077B151DBD4D4284A4588B1E4254E41B&CID=328CC45D202767623BF1CF8F216866C1&rd=1&h=_UthMAQC0ybmGE37RF9EiP3AFXkAF6cd1R19v3NAU4I&v=1&r=http://193.226.7.140/lejpt/A25/072_083.pdf&p=DevEx,5059.1. [Accessed: 15-Apr-2018].
- [4] M. E. Bakkali, Y. E. Gholb, I. Tabakh, A. Mounsef, and N. E. A. E. Idrissi, "A 28 GHz Rectangular Patch Antenna with Parasitic Element for Small Satellite Applications," *Proceedings of the 2nd International Conference on Computing and Wireless Communication Systems - ICCWCS17, 2017*
- [5] N. M. Nor, M. H. Jamaluddin, M. R. Kamarudin, and S. Z. N. Z. Ambia, "Design of Planar Dielectric Resonator Antenna Array at 28 GHz," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 5, no. 3, p. 622, Jan. 2017.
- [6] P. Bevelacqua, "Antenna Arrays (Phased Arrays)," *Antenna Arrays*. [Online]. Available: <http://www.antenna-theory.com/arrays/main.php#arrays>. [Accessed: 31-Jan-2018].
- [7] L. Frenzel, "Millimeter Waves Will Expand The Wireless Future," *Electronic Design*, 30-May2017.[Online].Available:<http://www.electronicdesign.com/communications/millimeter-waves-will-expand-wireless-future>. [Accessed: 15-Apr-2018].
- [8] P. Bevelacqua, "Welcome to Antenna-Theory.com!," *The Antenna Theory Website*. [Online]. Available: <http://www.antenna-theory.com/>. [Accessed: 07-Mar-2018].
- [9] "Microstrip Patch Antenna Calculator," *Microstrip Patch Antenna Calculator - everything RF*. [Online]. Available: <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/microstrip-patch-antenna-calculator>. [Accessed: 15-Apr-2018].
- [10] B. Agung, "Menerka Implementasi 5G di Indonesia," *CNN Indonesia*. [Online]. Available: <https://www.cnnindonesia.com/teknologi/20170404091017-213-204769/menerka-implementasi-5g-di-indonesia>. [Accessed: 07-Mar-2018].