

PERANCANGAN ANTENA MIKROSTRIP CIRCULAR DUAL-BAND 28 DAN 38 GHz DENGAN METAMATERIAL CRLH (COMPOSITE RIGHT LEFT HANDED) UNTUK JARINGAN KOMUNIKASI 5G

Firman Robiansyah, Yusnita Rahayu

Jurusan Teknik Elektro, Teknik Elektro Universitas Riau, Universitas Riau
Kampus Binawidya Km 12,5 Simpang Baru Panam, Pekanbaru 28293

Email: Firman.m.robiansyah@student.unri.ac.id

ABSTRACT

In recent years, the development of fifth generation (5G) communication technology has become an interesting issue. It is a new communication that improve network efficiency, capacity data rate and lower power consumption. In this paper, a circular metamaterial composite right left handed microstrip antenna is designed. The antenna is simulated by using CST microwave studio operated at 28/38 GHz. The substrate used is RT Duroid 5880. From the simulation result, the return loss of -36.932 dB and -32.977 dB are obtained for 28 GHz and 38 GHz bandwidth of 7.68 GHz and 6.41 GHz and gain-of 4.91 dB and 5.2 dB.

Keyword: Metamaterial CRLH, Microstrip antenna, 5G antenna.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komunikasi beberapa tahun belakang ini telah menjadi isu yang menarik tentang generasi ke lima (5G) untuk kemudian menjadi sebuah standar telekomunikasi yang baru. Seperti telah kita ketahui tentang Long-term Evolution (LTE) yang menjadi bagian dari generasi ke empat (4G), perkembangan generasi ke empat ini telah mencapai titik kesempurnaan. Pada tahun 2013 tepatnya bulan Mei, pengujian pertama kali teknologi Generasi lanjutan dari 4G yaitu Jaringan 5G oleh salah satu vendor perangkat device seluler yaitu Samsung.

Federal Communication Commission (FCC) mengusulkan aturan baru (FCC 15-138) untuk frekuensi broadband wireless dari 28 GHz, 37 GHz, 38 GHz dari 64-71 GHz band yang merupakan pita frekuensi yang ditargetkan para peneliti untuk aplikasi 5G mendatang (Gampala, 2016). Sedangkan menurut Peraturan Menteri Komunikasi dan Informatika pita frekuensi 28 dan 38 GHz dialokasikan untuk keperluan Dinas Tetap dan Dinas Bergerak dengan catatan kaki INS30 (KOMINFO. 2014).

Komunikasi generasi kelima (5G) pada saat ini mulai dikembangkan untuk meningkatkan kualitas komunikasi, khususnya meningkatkan kualitas dalam area berukuran kecil. Saat ini, para peneliti sedang mengerjakan standar nirkabel generasi kelima (5G) dengan tingkat data yang luar biasa. Pada jaringan 5G, peningkatan kapasitas saluran bisa mencapai 1000 kali lipat dari 4G, di mana tingkat kemajuan *edge* akan 100 kali perwaktu. Persyaratan ini diharapkan dapat dipenuhi dengan memanfaatkan teknologi baru utama *MIMO* (Al-Tarifi dkk, 2016).

Penelitian tentang antena *MIMO* yang bekerja pada frekuensi gelombang milimeter telah dilakukan oleh Rahayu, Y. dan Mustofa, I. R. yang berjudul “*Design of 2x2 MIMO Microstrip Antenna Rectangular Patch Array for 5G Wireless Communication Network*” pada tahun 2017 dengan hasil *return loss* -44,77 dB dan *gain* 18,5 dBi. Selanjutnya, Penelitian antena dilakukan oleh Rahayu, Y., Fitria L., Hakiki, Y., Kurniawan, A. dalam penelitiannya yang berjudul “*A New 2x4 Array Design of Dual-Band Millimeter-Wave Antenna for 5G Applications*” pada tahun 2018 dengan hasil nilai *return loss* -19,75 dB, *VSWR* $\leq 1,5$, *Bandwidth* 1,19 GHz pada frekuensi 28 GHz sedangkan pada frekuensi 38 GHz didapatkan hasil

return loss -19,55 dB, $VSWR \leq 1,5$, Bandwidth 1,42 GHz.

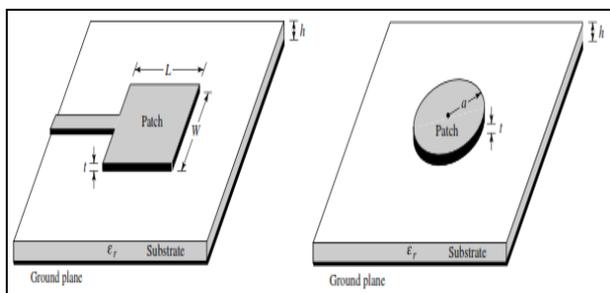
Salah satu teknik lain adalah dengan menggunakan metamaterial. Metamaterial merupakan suatu material buatan yang memiliki permitivitas dan permeabilitas negatif, dan tidak dapat ditemukan di alam. Antena berbasis metamaterial memiliki beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan antena mikrostrip, antara lain dimensi yang lebih kecil dan gain yang lebih tinggi.

Pada penelitian ini akan dirancang sebuah antena mikrostrip circular metamaterial CRLH, yang berkerja pada frekuensi 28 dan 38 GHz dengan menggunakan software CST Microwave Studio, sehingga nantinya dapat digunakan untuk aplikasi jaringan komunikasi nirkabel 5G.

Landasan Teori

Antena Mikrostrip

Antena mikrostrip menjadi sangat populer pada tahun 1970-an terutama untuk aplikasi ruang angkasa. Untuk sekarang mereka digunakan untuk aplikasi pemerintah dan komersial. Antena ini terdiri dari patch dan ground logam pada substrat. patch logam dapat mengambil banyak konfigurasi yang berbeda, patch persegi panjang dan melingkar, ditunjukkan pada Gambar 1, adalah yang paling populer digunakan karena kemudahan analisis dan fabrikasi, dan karakteristik radiasi yang menarik, terutama radiasi yang rendah pada polarisasi silang (balanis, 2016).



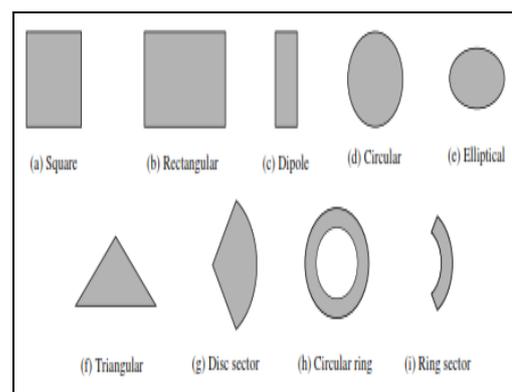
Gambar 1 Struktur Antena Mikrostrip (a) Rectangular (b) Circular (Balanis, 2016)

Elemen peradiasi (*patch*) merupakan sebuah lempengan bahan konduktor tipis yang akan beresonansi sesuai dengan frekuensi kerjanya. Bentuk *patch* sangat bervariasi sesuai dengan

rancangan yang diinginkan. Bentuk- bentuk yang umum dan sederhana dari patch adalah :

- Antena mikrostrip *patch* persegi panjang (*rectangular*)
- Antena mikrostrip *patch* persegi (*square*)
- Antena mikrostrip *patch* lingkaran (*circular*)

Selain bentuk segiempat, segitiga dan lingkaran, terdapat bentuk-bentuk lain yang dapat digunakan sebagai *patch* antena mikrostrip seperti ditunjukkan pada Gambar 2 (balanis, 2016) :



Gambar 2 Beberapa jenis Patch Antena Mikrostrip (Balanis, 2016)

Parameter Antena

Performansi dari suatu antena dapat dilihat dari parameter antena itu sendiri. Ada banyak parameter dari antena. Berikut ini akan dijelaskan beberapa parameter tersebut.

Voltage Standing Wave Rasio (VSWR)

Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) adalah kemampuan suatu antena untuk bekerja pada frekuensi yang diinginkan. Pengukuran VSWR berhubungan dengan pengukuran koefisien refleksi dari antena tersebut. Perbandingan level tegangan yang kembali ke pemancar (V^-) dan yang datang menuju beban (V^+) ke sumbernya lazim disebut koefisien pantul atau koefisien refleksi (Darmawan, 2016).

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

dimana:

Z_1 = impedansi beban (*load*)

Z_2 = impedansi saluran *lossless*.

Return Loss

Return Loss adalah perbandingan antara amplitudo dari gelombang yang direfleksikan terhadap amplitudo gelombang yang dikirimkan. *Return loss* dapat terjadi akibat adanya diskontinuitas diantara saluran transmisi dengan impedansi masukan beban (antena), sehingga tidak semua daya yang diradiasikan melainkan ada yang dipantulkan kembali (Wibowo, 2017)..

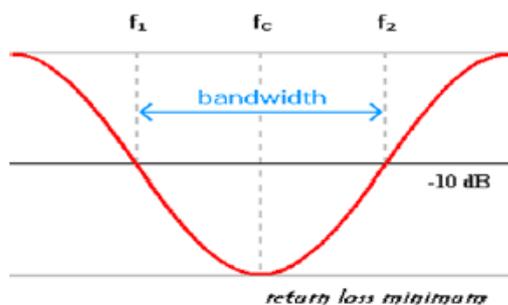
Persamaan dari *Return loss* adalah:

$$\text{return loss} = 20 \log_{10} |\Gamma| \quad (2)$$

Nilai *return loss* yang baik adalah dibawah -9,54 dB, karena pada saat kondisi tersebut saluran transmisi dalam keadaan matching dimana gelombang yang direfleksikan lebih kecil dibandingkan dengan gelombang yang dikirimkan. Nilai dari parameter ini menjadi salah satu acuan untuk melihat apakah antenna sudah dapat bekerja pada frekuensi yang diharapkan atau tidak.

Bandwidth

Bandwidth atau lebar pita frekuensi gambar 3 suatu antenna didefinisikan sebagai besar rentang frekuensi kerja dari suatu antenna, di mana kinerja antenna yang berhubungan dengan beberapa karakteristik (seperti impedansi masukan, pola, *beamwidth*, polarisasi, *gain*, efisiensi, VSWR, *return loss*.) memenuhi spesifikasi standar. Nilai *bandwidth* dapat diketahui apabila nilai frekuensi bawah dan frekuensi atas dari suatu antenna sudah diketahui. Frekuensi bawah adalah nilai frekuensi awal dari frekuensi kerja antenna, sedangkan frekuensi atas merupakan nilai frekuensi akhir dari frekuensi kerja antenna. (Herudin, 2012).



Gambar 3 Rentang frekuensi yang menjadi *bandwidth*

(Sumber : (Herudin, 2012))

Persamaan untuk mencari *Bandwidth* sebagai berikut:

$$BW = \frac{f_2 - f_1}{f_c} \times 100 \% \quad (3)$$

Keterangan:

f_2 = frekuensi tertinggi (Hz)

f_1 = frekuensi terendah (Hz)

f_c = frekuensi tengah (Hz)

Penguatan (*Gain*)

Ada dua jenis parameter penguatan (*Gain*) yaitu *absolute gain* dan *relative gain*. *Absolute gain* pada sebuah antenna didefinisikan sebagai perbandingan antara intensitas pada arah tertentu dengan intensitas radiasi yang diperoleh jika daya yang diterima oleh antenna teradiasi secara isotropik. Intensitas radiasi yang berhubungan dengan daya yang diradiasikan secara tropik sama dengan daya yang diterima oleh antenna (P_{in}) dibagi 4π . *Absolute gain* ini dapat dihitung dengan rumus (Darmawan, 2016):

$$\text{gain} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (4)$$

Selain penguatan absolute, ada juga penguatan relatif. Penguatan relatif didefinisikan sebagai perbandingan antara perolehan daya pada sebuah arah dengan perolehan daya pada antenna referensi pada arah yang direferensikan juga. Daya masukan harus sama di antara kedua antenna itu. Akan tetapi antenna referensi merupakan sumber isotropik yang *lossless*. Secara umum dapat dihubungkan sebagai berikut (Darmawan, 2016):

$$G = d \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in} \text{ losles}} \quad (5)$$

Keterangan :

$U(\theta, \phi)$ = Perolehan daya pada arah tertentu

P_{in} = Daya yang diterima oleh antenna

$P_{in} (\text{losless})$ = Daya yang diterima oleh antenna isotropik

Antena Mikrostrip Patch Circular

Antena mikrostrip *circular* adalah antenna dengan bentuk pada patch, ground atau kedua nya yang memiliki bentuk lingkaran. Mode yang didukung oleh antenna mikrostrip *circular* untuk tinggi substratnya yang kecil ($h \ll \lambda$) adalah TM^z dimana z diambil tegak lurus terhadap *patch*. Pada

antena mikrostrip persegi panjang dapat dilakukan karakterisasi pada dimensi panjang dan lebarnya, namun pada antenna mikrostrip lingkaran hanya dapat dilakukan perubahan pada nilai radiusnya. Namun itu dapat mengubah nilai absolut dari frekuensi resonansi masing-masing. (balanis, 2005) Persamaan-persamaan yang digunakan untuk perhitungan dimensi antenna (Balanis, 2016)

Menentukan karakteristik antenna (F_c):

$$F_c = \frac{FH + FL}{2} \quad (6)$$

Menentukan fungsi logaritmik peradiasi.

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{F_c \sqrt{\epsilon_r}} \quad (7)$$

Menentukan jari-jari elemen peradiasi.

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

Menentukan B dari nilai impedansi 50 Ω .

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (9)$$

Menentukan lebar saluran pencatu.

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

Teknik Pencatuan Mikrostrip Line Feeding

Pada tugas akhir ini digunakan metode *microstrip line feeding*. Metode ini tersusun dari dua konduktor, yaitu sebuah *strip* dengan lebar w dan bidang pentanahan (*Ground Plane*), keduanya dipisahkan oleh suatu substrat yang memiliki permitivitas relatif (ϵ_r) dengan tinggi (h). Parameter utama yang penting untuk diketahui pada suatu saluran transmisi adalah impedansi karakteristiknya (Z_0). Impedansi karakteristik (Z_0) dari saluran *microstrip* ditentukan oleh lebar strip (w) dan tinggi substrat (h).

Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung Panjang dan lebar saluran mikrostrip diberikan oleh persamaan 10 dan 11 di bawah ini (Saleh, 2015):

$$W = \frac{2h}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\frac{\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r}}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (10)$$

Dengan ϵ_r adalah konstanta dielektrik relatif dan:

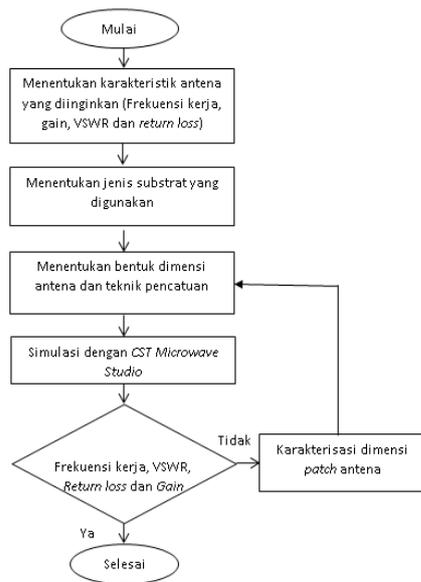
$$B = \frac{60\epsilon_r^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (11)$$

Massive MIMO

M-MIMO (*Massive Multiple Input Multiple Output*) merupakan suatu sistem penyusunan antenna dimana jumlah antenna *transmitter* dan antenna *receiver* terdiri lebih dari satu antenna (jumlah yang sangat banyak). Penyusunan antenna secara *massive* ini bertujuan untuk memenuhi kebutuhan *user* yang setiap tahunnya mengalami kenaikan dari sisi jumlah. Konsep *multi-user* MIMO sudah ada sejak beberapa tahun belakangan ini, tapi menerapkan dan menyebar banyak antenna pada *base station* merupakan suatu hal yang relatif baru. Dengan menerapkan banyak antenna pada *base station*, proses transmisi bisa lebih terfokuskan pada terminal yang dituju. Semakin banyak antenna yang dipakai, semakin dapat terfokuskan gelombang yang ditransmisikan (Santoso dkk, 2017)

BAHAN DAN METODE

Dalam perancangan Antena *Metamaterial CRLH* diperlukan diagram alir yang berisi tahapan-tahapan untuk membantu dalam proses perancangan. Gambar 4 dibawah ini merupakan gambar dari diagram alir perancangan antenna mikrostrip secara umum.



Gambar 4. Diagram Alir Perancangan Antena Mikrostrip

Menentukan Karakteristik Antena

Adapun tahapan awal dari perancangan antenna adalah menentukan karakteristik antenna yang diharapkan, yaitu frekuensi kerja antenna terhadap *impedance Bandwidth*, *return loss*, *VSWR*, dan *gain*. Adapun parameter antenna 5G yang diinginkan seperti terlihat pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter antenna yang diinginkan

Parameter	Karakterisasi Antena
Frekuensi Kerja	28/38 GHz
Return Loss	< -10 dB
Bandwidth	> 500 MHz
Voltage Standing	≤ 2
Wave Rasio	
Gain	≤10 dBi

Menentukan Jenis Substrat yang digunakan

Adapun jenis substrat yang digunakan pada penelitian ini adalah substrat *RT Duroid 5880* yang memiliki ketebalan sebesar 1.575 mm dengan spesifikasi yang ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi substrat yang digunakan

Jenis Substrat	<i>RT Duroid 5880</i>
Konstanta Dielektrik Relatif (ϵ_r)	2,2
Dielectric Loss Tangent ($\tan \delta$)	0,0009
Ketebalan Substrat (h)	1.575 mm

Perancangan Dimensi Patch Lingkaran

Pada penelitian ini akan dirancang sebuah antenna mikrostrip dengan frekuensi kerja 28 dan 38 GHz. Pada perancangan awal dari dimensi antenna yaitu menggunakan perhitungan (12) dan (13) dimensi *patch* lingkaran terdiri atas dimensi radius circular (α)

Menentukan lebar patch (α) :

$$w = \frac{8.789 \times 10^9}{28 \times 10^9 \sqrt{2.2}} = 0,212 \text{ mm} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{0.212}{\left\{ 1 + \frac{2 \times 1.575}{3.14 \times 2.2 \times 0.212} \left[\ln \left(\frac{3.14 \times 0.212}{2 \times 1.575} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} = 2.5 \text{ mm} \quad (13)$$

Dari perhitungan tersebut yang berdasarkan spesifikasi substrat yang akan digunakan, diperoleh *radius circular* sebesar 2.5mm.

Perancangan Saluran Pencatu 50 Ω

Pada saat perancangan antenna mikrostrip elemen tunggal pada *CST Microwave Studio* perlu adanya impedansi masukan (Z_{in}) sebesar 50 Ω dimana pencatu akan dihubungkan dengan konektor *impedance* 50 Ω tersebut. Nilai tersebut bisa didapatkan dengan mengatur lebar dari saluran pencatu. Untuk mendapatkan besar lebar dari saluran pencatu yang menghasilkan nilai impedansi 50 Ω dapat dicari dengan menggunakan perhitungan (13) dan (14).

$$B = \frac{60 \times 3.14^2}{50 \times \sqrt{2.2}} = 7,98 \quad (13)$$

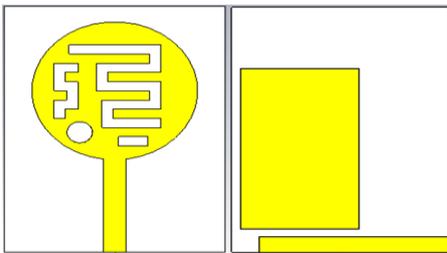
$$w = \frac{2 \times 1.575}{3.14} \times \left\{ \frac{7,98 - 1 - \ln((2 \times 7,98) - 1) + \frac{2,2 - 1}{2 \times 2,2}}{\left[\ln(7,98 - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{2,2} \right]} \right\} = 4.82 \text{ mm} \quad (14)$$

Dengan memasukkan karakteristik impedansi yang diinginkan dan parameter-parameter substrat yang digunakan ke dalam rumus di atas, maka dari hasil perhitungan untuk menghasilkan nilai impedansi 50 Ω dengan menggunakan nilai parameter substrat yang digunakan dalam

perancangan ini, dibutuhkan lebar saluran pencatu sebesar 4.82 mm. Sedangkan untuk panjang saluran pencatu (l_f) diharapkan diperoleh nilai yang optimal melalui iterasi. Untuk perancangan awal digunakan panjang pencatu sebesar 1,87 mm.

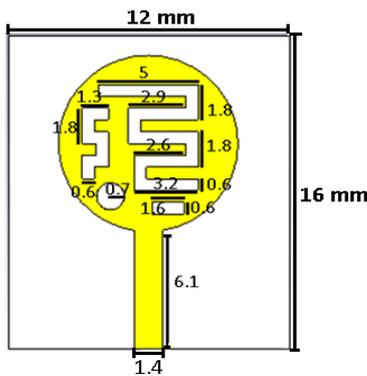
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perancangan Antena Metamaterial CRLH



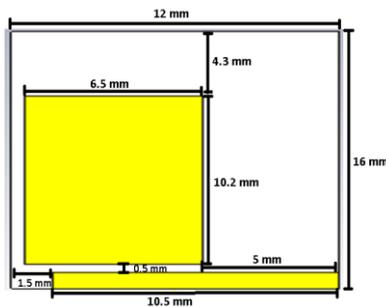
Gambar 5. Antena Metamaterial CRLH

Pada gambar 5 rancangan dari antenna Metamaterial CRLH



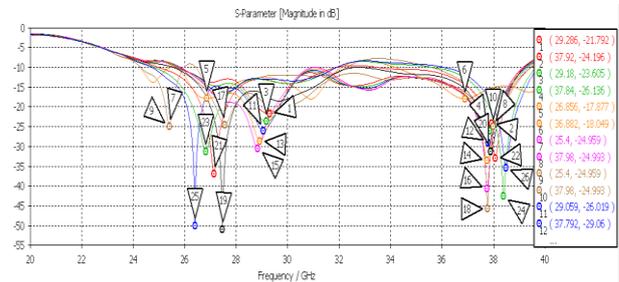
Gambar 6. Desain Ukuran Patch Antena Metamaterial CRLH

Pada gambar di atas terdapat ukuran desain dan Patch yang berbentuk circular dengan penambahan metode CRLH.



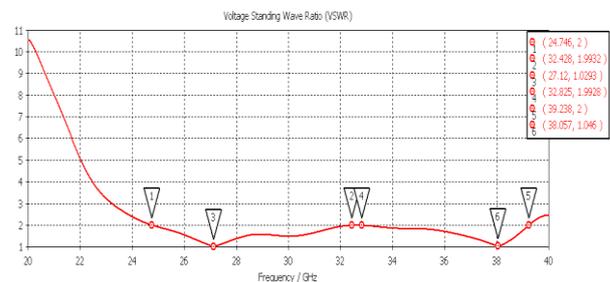
Gambar 7. Desain Ukuran Ground Antena Metamaterial CRLH

Pada perancangan ini metode Metamaterial CRLH akan diterapkan pada bidang patch dengan pemotongan pada gambar (6) dan (7) dan dilanjutkan dengan *return loss*, *VSWR*, *Gain* dan *pola radiasi*



Gambar 8. Nilai Return Loss Antena Metamaterial CRLH

Dari gambar 8 dapat dilihat bahwa frekuensi kerja yang didapat adalah 28 dan 38 GHz dengan nilai *return loss* yang diperoleh sebesar -36.932 dB dan -32.977 dB. Hasil ini sudah sangat sesuai dengan frekuensi yang diharapkan yaitu pada range 28/38 GHz dan *return loss* yang didapat juga sudah sesuai dengan parameter yakni ≤ -10 dB dan *return loss*-nya sudah sangat baik, dapat dilihat bahwa frekuensi yang bekerja ditandai oleh penanda/marker 21 dan 22. Dapat disimpulkan frekuensi yang telah didapatkan sudah sesuai parameter yang diinginkan pada karakterisasi ini nilai *return loss* yang didapatkan juga sudah sesuai dengan parameter yang diinginkan.



Gambar 9. Nilai VSWR Hasil Antena MIMO 2x2

Dapat dilihat pada gambar 9 bahwa nilai *VSWR* yang diperoleh pada frekuensi 28 GHz adalah 1.0293 dengan rentang frekuensi 24.746-32.428 GHz dan frekuensi 38 adalah 1.046 dengan rentang frekuensi 32.825-39.238 GHz. Dari data-data yang telah dipaparkan di atas diketahui bahwa pada rentang frekuensi bahwa rancangan antenna Metamaterial CRLH mampu bekerja pada nilai

$VSWR \leq 2$. Nilai ini telah memenuhi kebutuhan yang ingin dicapai, yaitu pada nilai $VSWR \leq 2$ atau $return Loss \leq -10$ dB.

Adapun *Bandwidth* yang dicapai pada nilai $VSWR \leq 2$ frekuensi 28 dan 38GHz adalah :

$$Bandwidth = \frac{f_2 - f_1}{f_c} \times 100 \%$$

$$Bandwidth = \frac{32.42 - 24.74}{28} \times 100\%$$

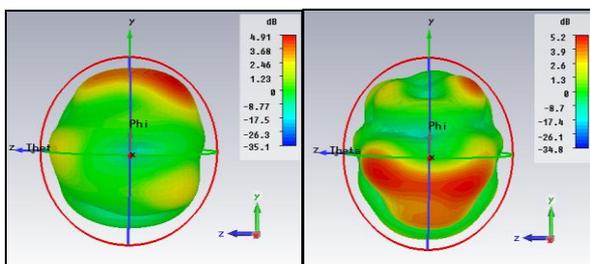
$$Bandwidth = 27.42\% (7.68GHz)$$

$$Bandwidth = \frac{39.23 - 32.82}{38} \times 100\%$$

$$Bandwidth = 16.86\% (6.41GHz)$$

Dari hasil perhitungan di atas diperoleh bahwa *Bandwidth* antenna Metamaterial CRLH pada $VSWR \leq 2$ memiliki *Bandwidth* yang lebih besar jika dibandingkan dengan *Bandwidth* yang telah ditetapkan secara teori. Dengan demikian, *Bandwidth* antenna Metamaterial CRLH dengan pencatuan *microstrip line* mencapai nilai yang optimal.

Nilai *gain* yang didapatkan dari hasil simulasi setelah proses optimasi adalah sebesar 4.91 dB dan 5.2 dB pada frekuensi 28 dan 38 GHz. Nilai *gain* yang didapatkan sudah parameter untuk perancangan sesuai yakni ≤ 10 dB. Gambar 10 menunjukkan *gain* hasil simulasi antenna Metamaterial CRLH.



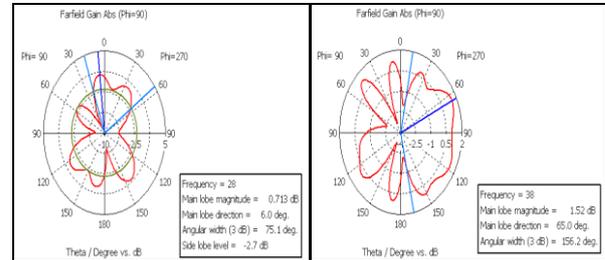
a)

b)

Gambar 10. A) Nilai *Gain* Frekuensi 28, B) Nilai *Gain* Frekuensi 38

Berdasarkan data yang diperoleh dari pengujian, Pada gambar 11 yang merupakan

diagram pola radiasi dari hasil simulasi antenna Metamaterial CRLH di frekuensi 28 dan 38 GHz bentuk pola radiasi yang didapat dari hasil pengujian adalah *omnidirectional*. Hal ini berarti bahwa antenna memiliki intensitas radiasi maksimum lebih dari dua arah.



a)

b)

Gambar 11. GHz. Hasil Pola Radiasi Antena Metamaterial a) Frekuensi 28 b) frekuensi 38 CRLH

KESIMPULAN

Berdasarkan analisa sementara dan penelitian yang pernah dilakukan oleh peneliti sebelumnya, penelitian ini dapat disimpulkan akan dapat :

1. Antena mikrostrip Metamaterial CRLH, yang bekerja pada frekuensi 28 dan 38 GHz dengan *return loss* sebesar -36.932 dB dan -32.977 dB dan memiliki nilai *impedance Bandwidth* pada $VSWR \leq 2$ sebesar 7.68 GHz (27.42%) dan 6.41 GHz (16.86%). Dengan demikian, antenna telah memenuhi kebutuhan *Bandwidth* yang ditargetkan yaitu pada $Bandwidth \geq 500$ MHz.
2. Gain antenna Metamaterial CRLH dari hasil simulasi sebesar sebesar 4.91 dB dan 5.2 dB pada frekuensi 28 dan 38 GHz. Gain ini sudah sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan ≤ 10 dB.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Tarifi M. A, Faouri Y, S and Sharawi M. S. 2016. A Printed 16 Ports Massive MIMO Antenna System with Directive Port Beams. Electrical Engineering Department, King Fahd University for Petroleum and Minerals (KFUPM), Dhahran, Saudi Arabia

- Abdullah K. Alqallaf, Rabie K. Dib, & Muhammad F. Karim. 2016. Switchable Multiband Monopole CRLH Antenna. National University of Singapore, Singapore.
- A.H Pratama, E. Setijadi, & P.H Mukti. 2014. Design and Optimization of Ultra Antenna Planar Performance Wideband Based on Metamaterial Using Substrate FR-4. Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).Indonesia.
- Balanis, C. A. 2015. Antenna Theory Analysis And Design 3th Edition. Microstrip and Mobile Communications Antennas. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Balanis, C. A. 2016. Antenna Theory Analysis And Design 4th Edition. Microstrip and Mobile Communications Antennas. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Herudin. 2012. Perancangan Antena Mikrostrip Frekuensi 2,6 GHz untuk Aplikasi LTE (Long Term Evolution). Jurusan Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Cilegon, Indonesia.
- Mahmoud A. Abdalla, Ahmed A. Ibrahim, & Mohammed H. Abd El-Azeem, 2015. Phase Enhancement for Multi-Resonance Compact Metamaterial Antennas. Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 60.
- Nancy Ardelina, Eko Setijadi, & Prasetyono Hari Mukti. 2014. Design of Dual Band Based Antenna Metamaterial at Frequency 2.3 / 3.3 GHz. Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).
- O. M. Haraz, M. M. M. Ali, S. Alshebeili, A-R Sebak. 2015. Design of a 28/38 GHz Dual-Band Printed Slot Antenna for the Future 5G Mobile Communication Networks. 32nd National Radio Science Conference NRSC 2015, 6th of October city, Egypt.
- Rahayu, Y., Mustofa, I. R. (2017). Design of 2x2 MIMO Microstrip Antenna Rectangular Patch Array for 5G Wireless Communication Network. PIERS.
- Rahayu, Y., et al. (2018). A New 2x4 Array Design of Dual-Band Millimeter-Wave Antenna for 5G Applications. IEEE Access.
- Sidauruk H. F, Rambe A. H. 2014. Analisa Penentuan Ukuran Slot Pada Karakteristik Antena Mikrostrip Patch Segiempat Dengan Pencatu Aperture Coupled. Konsentrasi Teknik Telekomunikasi, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara.
- Santoso R, Astuti R. P, Nugroho B. S, 2017. Perancangan Dan Analisis Antena Massive MIMO Mikrostrip Dengan Pencatuan Proximity Feed Berpolarisasi Cross Linier Untuk Komunikasi 5G (28 Ghz) Fakultas Teknik Elektro, Teknik Telekomunikasi, Universitas Telkom.