



Perancangan Antena Mikrostrip *Rectangular Array* untuk Teknologi 5G pada Frekuensi 28 GHz

Nurina Leila Yusup, Eka Setia Nugraha*, Petrus Kerowe Goran

*Program Studi Teknik Telekomunikasi, Institut Teknologi Telkom Purwokerto
Jl. DI Panjaitan No. 128 Purwokerto, 53147*

*Email Penulis Koresponden: eka_nugraha@ittelkom-pwt.ac.id

Abstrak :

Teknologi 5G memanfaatkan spektrum *millimeter wave* untuk menyediakan kapasitas, kecepatan data, dan cakupan yang luas untuk koneksi secara menyeluruh. 3GPP release 15 menyatakan teknologi *beamforming* dapat memenuhi karakteristik jaringan 5G karena dapat meningkatkan 5G *broadcast* dan *traffic beam coverage*. *Beamforming* merupakan proses penggabungan sinyal pada elemen *array* untuk membentuk sinar radiasi (*beam radiation*) dan menyelaraskan fasa sinyal untuk membentuk *beam* pada arah tertentu. *Butler matrix* adalah salah satu teknik yang digunakan pada *beamforming* yang bertujuan untuk mendapatkan beda fasa pada setiap elemen dari antena yang dirancang, sehingga arah radiasi yang dihasilkan dapat fokus pada arah yang dibutuhkan. Pada penelitian ini dirancang antena mikrostrip *rectangular array* dengan pemodelan MIMO 4x4 dan metode *butler matrix*. Perancangan *butler matrix* 4x4 menggunakan 2 skenario perancangan, kemudian menentukan skenario terbaik untuk digabungkan dengan antena mikrostrip *array* MIMO 4x4. Hasil simulasi didapatkan *return loss* pada pada elemen 1, elemen 2, elemen 3 dan elemen 4 sebesar -14,504 dB, -6,71 dB, -6,79 dB dan -15,129 dB. VSWR sebesar 1,46; 2,716; 2,687 dan 1,424. *Gain* sebesar 11,1 dBi; 10,8 dBi; 10,8 dBi dan 11 dBi. Pola radiasi secara *unidirectional* dengan arah radiasi antena yang berbeda-beda, dilihat dari sudut pandang elevasi arah pancar utama pada sudut 0,0°; 8,0°; -8,0°; dan -22,0°. Hal ini membuktikan bahwa penggunaan *butler matrix* 4x4 pada perancangan antena mikrostrip *array* MIMO 4x4 dapat meningkatkan nilai *gain* dan mendapatkan pola radiasi antena yang terarah dengan arah radiasi yang berbeda-beda.

This is an open access article under the [CC BY-NC](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) license



Kata Kunci:

Teknologi 5G;
Beamforming;
MIMO;
Butler Matrix;

Riwayat Artikel:

Diserahkan 26 Januari 2021
Direvisi 1 Mei 2021
Diterima 7 Juni 2021
Dipublikasi 21 Agustus 2021

DOI:

10.22441/incomtech.v11i2.10814

1. PENDAHULUAN

Layanan 5G membutuhkan jaringan dengan kapasitas 1000 kali lebih besar dan 10-100 kali lebih cepat [1]. Untuk memenuhi persyaratan kecepatan data, jaringan 5G harus memiliki 3 lapisan struktur, yaitu *ultra experience layer* yang memanfaatkan *ultra wide bandwidth* dari *spectrum millimeter wave*, *high capacity layers* yang dapat mendukung teknologi *massive MIMO*, dan *ubiquitous coverage layers* yang dapat mengimplementasikan lebar dan cakupan radio untuk koneksi secara universal. Untuk memenuhi karakteristik teknologi 5G diatas, maka sebuah antenna harus mendukung teknologi *beamforming*. 3GPP release 15 menyatakan bahwa *beamforming* digunakan untuk meningkatkan 5G *broadcast* dan *traffic beam coverage*. Untuk menghasilkan *beamforming beams*, pada antenna 5G diperlukan minimal dua antenna *array* pada masing-masing *band*, yang berarti antenna tersebut mendukung konfigurasi 4T4R. Ketepatan *beamforming* ditentukan oleh *single-array beam vector* dan perbedaan fasa *array* ($\Delta\phi$). *Single-array beam vector* ditentukan oleh desain antenna, sedangkan perbedaan fasa *array* ($\Delta\phi$) ditentukan oleh topologi antenna *array* [1]. *Beamforming* mengacu pada proses penggabungan sinyal pada elemen *array* untuk membentuk sinar radiasi (*beam radiation*) yang terarah. Selain itu juga digunakan untuk menyelaraskan fasa sinyal yang masuk dari elemen *array* sehingga membentuk *beam* pada arah tertentu [2].

Penelitian yang dilakukan [3,4] menunjukkan bahwa jaringan *beamforming* dapat dilakukan dengan menggunakan teknik *butler matrix*. *Butler matrix* memiliki standar perancangan yang terdiri dari beberapa komponen yaitu 3 dB *directional coupler*, *crossover* dan *phase shifter*. *Matrix* ini memiliki N *input port* dan N *output* sehingga sinyal yang berbeda dapat ditransmisikan menggunakan N antenna Mikrostrip yang berbeda. Suatu sistem *butler matrix* dengan empat *beam* terpisah memiliki sudut fasa ideal antar *port* yang berbeda yaitu sebesar -135° , -45° , $+45^\circ$, $+135^\circ$. Penggunaan *butler matrix* pada antenna *array* 16 elemen dengan frekuensi 28,5 GHz menghasilkan arah radiasi utama sebesar -42° , -13° , 13° , dan 42° secara berturut-turut pada *port* 3,1,4 dan 2 [3]. Penelitian lain oleh [5], juga menyatakan bahwa penggunaan *butler matrix* pada susunan antenna *array* dapat memberikan keuntungan diantara memiliki bentuk yang sederhana dan memiliki kemampuan dalam *switched-beam antenna*. Pada penelitian tersebut dirancang jaringan *butler matrix* 4x4 dengan *phase feeding* pada elemen *array* -135° , -45° , $+45^\circ$, $+135^\circ$. Jaringan *butler matrix* 4x4 untuk frekuensi gelombang milimeter terdiri dari beberapa komponen penyusun diantaranya 4 *couplers*, 2 *crossover*, dan 4 *phase delay*. Hasil penelitian nilai fasa ketika *input* pada *port* 1 yaitu $251,58^\circ$ antara *port* 5 dan 6; $242,58^\circ$ antara *port* 6 dan 7; $248,98^\circ$ antara *port* 7 dan 8 [5]. Frekuensi 28 GHz merupakan salah satu kandidat 5G. Penelitian yang dilakukan oleh [6] menyatakan bahwa penggunaan frekuensi tinggi dapat menghasilkan *bandwidth* yang lebar, akan tetapi dapat menimbulkan *multipath fading* karena terjadinya pemantulan (*scattering*) sehingga untuk mengatasi hal tersebut digunakan antenna dengan susunan *Multiple Input Multiple Output* (MIMO). Selain itu penggunaan frekuensi tinggi dapat memperkecil dimensi antenna, karena pada teknologi 5G dibutuhkan antenna dengan integrasi yang mudah [6].

Pada penelitian ini dilakukan perancangan antenna mikrostrip *rectangular array* dengan pemodelan MIMO 4x4 dan menggunakan metode *butler matrix* 4x4 untuk teknologi 5G pada frekuensi 28 GHz. Perancangan antenna menggunakan bahan

substrat yaitu *rogers RT duroid 5880* dengan permitivitas bahan 2,2 dan ketebalan bahan 0,254 mm. Proses perancangan antenna akan disimulasikan menggunakan *software* simulator CST Suite Studio 2019. Penggunaan antenna mikrostrip dengan *patch* berbentuk persegi dikarenakan antenna tersebut memiliki ukuran yang tipis, mudah diintegrasikan, dan dapat bekerja pada frekuensi tinggi. Perancangan antenna secara *array* bertujuan untuk meningkatkan *gain* dan direktivitas antenna. Pemodelan MIMO 4x4 untuk meningkatkan laju data kirim. Sedangkan metode *butler matrix* 4x4 sebagai pembeda fasa pada setiap elemen antenna. Parameter yang akan diuji adalah *return loss* ≤ -10 dB, *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR) ≤ 2 , (*bandwidth* antenna 1 GHz, *gain* ≥ 9 dBi, pola radiasi *unidirectional* dan beda fasa antara *output port* sebesar $-135^\circ, -45^\circ, +45^\circ, +135^\circ$).

2. METODE

2.1 Spesifikasi Perancangan Antena

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur terkait perancangan antenna mikrostrip *rectangular array* 1x2 dengan pemodelan MIMO 4x4 dan metode *butler matrix* 4x4 yang bekerja pada frekuensi 28 GHz dengan rentang frekuensi kerja 27,5 GHz - 28,35 GHz yang dapat diaplikasikan pada jaringan 5G. Dalam melakukan perancangan ditentukan spesifikasi perancangan meliputi bahan antenna yang akan digunakan pada substrat dan parameter kerja yang akan diamati seperti pada Tabel 1 dan Tabel 2. Selanjutnya yaitu perhitungan dimensi antenna berdasarkan spesifikasi bahan substrat dan bahan *patch* yang digunakan, kemudian data perhitungan tersebut dilakukan simulasi dengan menggunakan *software* simulasi CST Suite Studio 2019. Perancangan antenna dilakukan dalam 3 tahapan yaitu perancangan antenna *single patch*, dilanjutkan dengan perancangan antenna *array* 1x2 dan yang terakhir perancangan antenna MIMO 4x4. Hasil simulasi tersebut disesuaikan dengan spesifikasi antenna yang telah ditentukan dan dilakukan analisis.

Tabel 1 Spesifikasi Parameter Antena

Parameter	Spesifikasi
VSWR	≤ 2
<i>Return Loss</i>	≤ -10 dB
<i>Bandwidth</i>	1 GHz
<i>Mutual Coupling</i>	≤ -20 dB
Koefisien Korelasi	$\leq 0,3$
<i>Gain</i>	≥ 9 dB
Pola Radiasi	<i>Unidirectional</i>
Beda <i>Phasa</i>	$-135^\circ, -45^\circ, +45^\circ, +135^\circ$

Tabel 2 Spesifikasi Bahan Antena

Material	Spesifikasi	
	Permitivitas Relatif (ϵ_r)	Ketebalan (h)
<i>Copper (tembaga)</i>	1	0,035 mm
<i>Rogers RT Duroid 5880</i>	2,2	0,254 mm

2.2 Spesifikasi Perancangan Saluran *Butler Matrix* 4×4

Perancangan saluran *butler matrix* 4×4 dilakukan ketika antenna mikrostrip *rectangular array* 1×2 dengan pemodelan MIMO 4×4 selesai dilakukan. Dalam melakukan perancangan saluran ditentukan spesifikasi parameter seperti pada [Tabel 3](#) dan bahan yang digunakan untuk merancang saluran sama seperti bahan yang digunakan pada perancangan antenna.

Tabel 3 Spesifikasi Parameter Saluran *Butler Matrix* 4×4

Parameter	Spesifikasi
VSWR	≤ 2
<i>Return Loss</i>	≤ -10 dB
<i>Isolation Loss</i>	≤ -10 dB
<i>Insertion Loss</i>	≥ -10 dB

Selain spesifikasi parameter saluran *butler matrix* 4×4, dibutuhkan juga spesifikasi elemen penyusun saluran *butler matrix* 4×4 yang meliputi *90° hybrid coupler*, *crossover*, dan *45° phase shifter* ([Tabel 4](#)).

Tabel 4 Spesifikasi Elemen Penyusun Saluran *Butler Matrix* 4×4

Elemen <i>Butler Matrix</i>	Parameter	Spesifikasi
<i>Hybrid Coupler</i>	VSWR	≤ 2
	<i>Return Loss</i>	≤ -10 dB
	<i>Isolation Loss</i>	≤ -10 dB
	<i>Insertion Loss</i>	± 3 dB
	Beda fasa	$\pm 90^\circ$
<i>Crossover</i>	VSWR	≤ 2
	<i>Return Loss</i>	≤ -10 dB
	<i>Isolation Loss</i>	≤ -10 dB
	<i>Insertion Loss</i>	≤ 0 dB
<i>Phase Shifter</i>	VSWR	≤ 2
	<i>Return Loss</i>	≤ -10 dB
	<i>Insertion Loss</i>	≤ -0 dB
	Beda fasa	$\pm 45^\circ$

Setelah mengetahui spesifikasi parameter yang digunakan, selanjutnya yaitu perhitungan dimensi saluran berdasarkan spesifikasi bahan yang digunakan, kemudian data perhitungan tersebut dilakukan simulasi dengan menggunakan *software* simulasi CST *Suite Studio* 2019. Hasil simulasi tersebut disesuaikan dengan spesifikasi antenna yang telah ditentukan dan dilakukan analisis.

3. DASAR TEORI

3.1 Antena Mikrostrip *Rectangular Patch*

Salah satu bentuk *patch* yang banyak digunakan adalah segiempat (*rectangular patch*). *Patch* berbentuk segiempat memiliki keuntungan diantaranya mudah dalam pembuatannya karena dapat disimulasikan dengan *software* dan memiliki bentuk yang sederhana. Antena mikrostrip *rectangular patch* tersusun atas lebar (W) dan panjang (L) pada sisi dielektrik substrat dengan ketebalan (h) dan konstanta dielektrik (ϵ_r) [7].

Untuk mencari dimensi panjang (L) dan lebar (W) digunakan persamaan (1) sebagai berikut :

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

Pada persamaan (1), ϵ_r adalah konstanta dielektrik, c adalah kecepatan cahaya pada ruang hampa (3×10^8 m/s), dan f adalah frekuensi resonansi (Hz). Untuk menentukan panjang *patch* (L) diperlukan parameter ΔL yang merupakan pertambahan panjang dari L akibat adanya *fringing effect* yaitu efek pada elemen peradiasi antena mikrostrip terlihat lebih besar dari dimensi fisiknya.

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

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

$$L_{eff} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (4)$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (5)$$

Pada persamaan (5), h adalah tebal dari substrat, ϵ_{reff} adalah konstanta dielektrik *relative*, dan L_{eff} adalah panjang *patch* efektif [8]. Sedangkan untuk mendapatkan dimensi panjang *ground plane* (L_g) dan lebar *ground plane* (W_g) digunakan persamaan (6) dan (7) sebagai berikut [9]:

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

$$W_g = W + 6h \quad (7)$$

3.2 Antena Mikrostrip Array

Antena *array* terdiri dari susunan beberapa antena yang identik. Sinyal dari antena tersebut digabung atau diproses guna meningkatkan performansi dari suatu antena. Tujuan dari pembuatan antena secara *array* yaitu untuk meningkatkan *gain* antena, meningkatkan *directivity antenna*, mengarahkan daya pancar menuju sektor yang diinginkan, menentukan arah kedatangan sinyal, dan memaksimalkan nilai *Signal to Interference Plus Noise Ratio* (SINR) [7].

3.3 Antena MIMO

Penggunaan antena MIMO memiliki peranan penting dalam teknologi 5G, karena antena yang dihasilkan memiliki dimensi yang kecil. Pengembangan antena MIMO untuk teknologi 5G, dilakukan pada perubahan arah *beam* antena yang dapat berubah sesuai kondisi lingkungannya, seperti pergerakan *user*, peningkatan jangkauan, serta peningkatan laju data kirim [10]. Terdapat dua parameter penting pada antena MIMO yang perlu diperhatikan, pertama efek *mutual coupling* yang terjadi karena munculnya tegangan pada salah satu elemen antena yang diakibatkan letak elemen yang terlalu dekat sehingga dapat mempengaruhi kinerja antena, kondisi *mutual coupling* umumnya ≤ -20 dB [11]. Parameter kedua yaitu, koefisien korelasi (ρ) merupakan parameter penting untuk mengukur interferensi sinyal antar saluran. Koefisien korelasi antena MIMO dinyatakan dalam pendekatan parameter S dengan nilai kurang dari 0,3 [11].

3.4 Butler Matrix 4x4

Butler matrix merupakan rangkaian *microwave* yang memiliki N *port* masukan dan N *port* keluaran, untuk mengubah *input* pada satu *port* menjadi beberapa *port* diperlukan pembagi daya dari satu *port* ke N *port* [12]. Sehingga N sinyal yang berbeda dapat ditransmisikan menggunakan N antena mikrostrip yang berbeda [13]. Komponen *butler matrix* menggunakan beberapa parameter uji diantaranya adalah *isolation loss* dan *insertion loss*. *Isolation loss* merupakan perbedaan level sinyal dalam dB antara *input port* dan *port isolated* ketika kedua *port* tersebut

matched load dengan kondisi ≤ -10 dB. Sedangkan *insertion loss* merupakan kondisi hilangnya daya sinyal yang diakibatkan adanya penyisipan perangkat dalam saluran transmisi dan dinyatakan dalam satuan *decibel* (dB) [14].

Butler matrix terdiri dari tiga komponen utama, antara lain 3 dB *quadrature couplers*, *crossover*, dan 45° *phase shifter*. Ketiga komponen tersebut dapat diimplementasikan menggunakan *microstrip line*, karena mudah dalam fabrikasi dan biaya sedikit. Pada sistem dapat menghasilkan *narrow beams* pada arah yang berbeda dengan *gain* yang lebih tinggi karena dibuat pada substrat yang sama [13].

1. 3 dB Quadrature Coupler

Hybrid coupler atau 3 dB *quadrature coupler* memiliki kemampuan untuk menghasilkan fasa sinyal 90° pada *output port*. Bagian ini terdiri dari garis utama yang digabungkan dengan dengan garis sekunder yang memiliki karakteristik seperempat dari panjang gelombang ($\lambda/4$). Ketika sinyal masuk pada *port 1*, maka sinyal pada dua saluran *output 2* dan 3 memiliki amplitudo yang sama tetapi memiliki perbedaan fasa 90° satu dengan yang lainnya. Z_p dan Z_s menunjukkan impedansi karakteristik pada masing-masing garis seri dan hunt, begitupun dengan panjang gelombang. $Z_s = Z_o/\sqrt{2}$ dan $Z_p = Z_o$, dimana Z_o adalah impedansi karakteristik dari sistem *feeding* [15].

2. Crossover

Crossover merupakan jaringan yang terdiri dari empat *port* simetris, dimana dua *input port* dan dua *output port*. *Crossover* yang dirancang secara sempurna, semua *port* yang berdekatan dengan *coupler* harus diisolasi satu sama lain secara sempurna. *Port 1* yang diumpangkan dengan sinyal *output port 2* dan 4 harus bernilai nol, sama seperti *port 4* yang diumpangkan dengan sinyal *port 1* dan 3 juga harus bernilai nol [15].

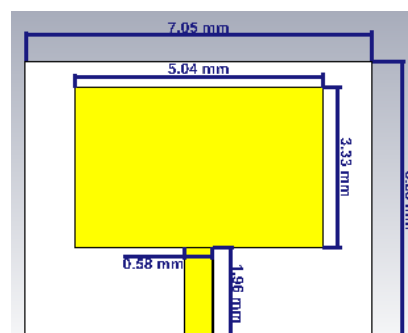
3. 45° Phase Shifter

Phase shifter digunakan untuk memberikan pergeseran fasa pada sinyal [15]. Pada penelitian ini digunakan *phase shifter* dengan pergeseran fasa 45°.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

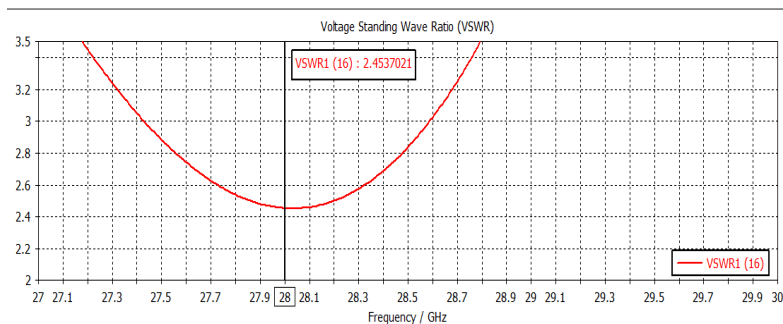
4.1 Antena Mikrostrip Single Patch

Dari persamaan (1) sampai (7) dilakukan perancangan antena mikrostrip *single patch* dengan menggunakan *software* simulasi CST 2019. Dari hasil simulasi tersebut parameter antena yang diperlukan belum memenuhi spesifikasi yang diinginkan sehingga perlu dilakukan optimasi, sehingga didapatkan simulasi seperti Gambar 1.

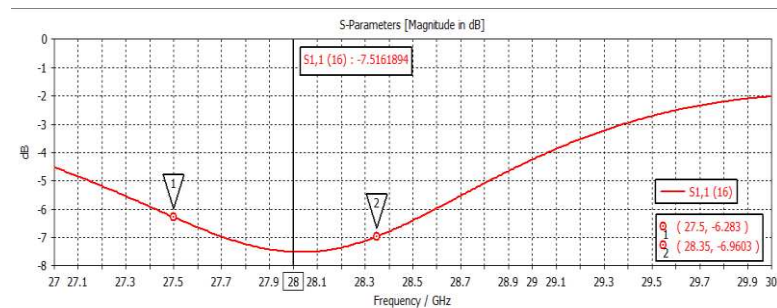


Gambar 1. Antena Mikrostrip Single Patch

Hasil optimasi pada antenna mikrostrip *single patch* didapatkan parameter VSWR sebesar 2,453 pada frekuensi 28 GHz, meskipun nilai VSWR yang didapat setelah dilakukan optimasi masih lebih dari 2 akan tetapi nilai tersebut sudah mendekati VSWR=2 (Gambar 2). Nilai *return loss* yang ditunjukkan pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa pada frekuensi rendah 27,5 GHz sebesar -6,283 dB; pada frekuensi tengah 28 GHz sebesar -7,516 dB; dan pada frekuensi tinggi 28,35 GHz sebesar -6,9603 dB. Untuk nilai *bandwith* belum mencapai batas -10 dB, sehingga pada rentang 27,5 GHz-28,35 GHz didapatkan nilai *bandwidth* sebesar 0,85 GHz.

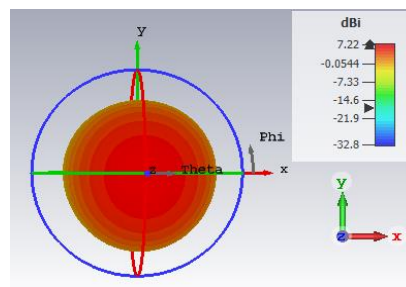


Gambar 2. VSWR Antena Mikrostrip Single Patch

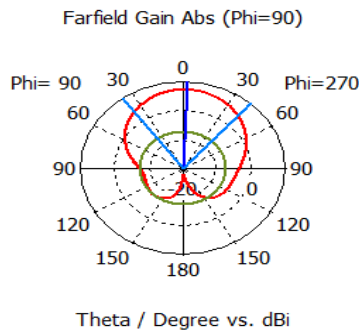


Gambar 3. Return Loss Antena Mikrostrip Single Patch

Gain yang dihasilkan oleh antenna *single patch* setelah dilakukan optimasi cukup besar yaitu 7,22 dBi (Gambar 4). Nilai tersebut belum memenuhi spesifikasi *gain* yang diharapkan yaitu ≥ 9 dBi. Pola radiasi antenna mikrostrip *single patch* dilihat dari elevasi adalah *unidirectional*, dimana pola pancarnya mengarah pada arah tertentu (Gambar 5).



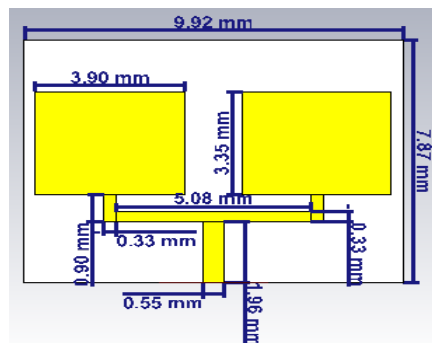
Gambar 4. Gain Antena Mikrostrip Single Patch



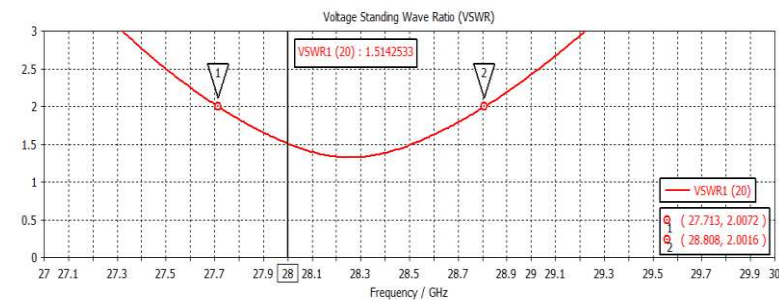
Gambar 5. Pola Radiasi Antena Mikrostrip *Single Patch*

4.2 Antena Mikrostrip *Array 1x2*

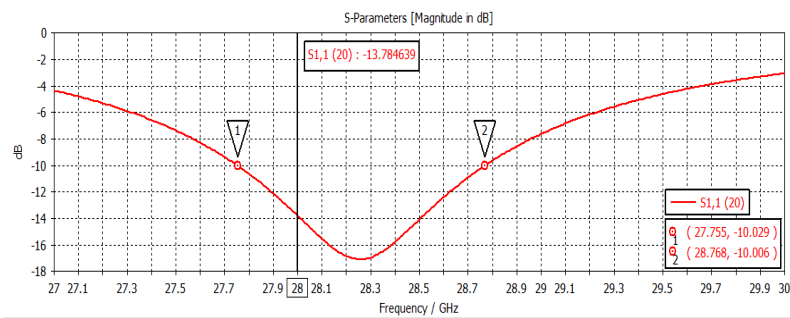
Perancangan antena mikrostrip *array* menggunakan *software* CST 2019 seperti pada Gambar 6. Dari hasil perancangan tersebut didapatkan nilai VSWR yang ditunjukkan pada Gambar 7 dan nilai parameter *return loss* yang ditunjukkan pada Gambar 8. Nilai VSWR pada frekuensi 28 GHz sebesar 1,514; 2,0016 pada frekuensi tinggi 28,808 GHz dan 2,0072 pada frekuensi rendah 27,713 GHz dengan batas VSWR=2. *Bandwidth* yang didapatkan untuk perancangan antena *array 1x2* jika dilihat dari kurva VSWR dengan batas VSWR=2 sebesar 1,095 GHz dan telah memenuhi spesifikasi nilai *bandwidth*=1 GHz. Parameter *return loss* dari perancangan antena mikrostrip *array 1x2* pada frekuensi 28 GHz sebesar -13,784 dB, frekuensi tinggi 28,765 GHz sebesar -10,006 dB dan frekuensi rendah 27,755 GHz sebesar -10,029dB.



Gambar 6. Antena Mikrostrip *Array 1x*

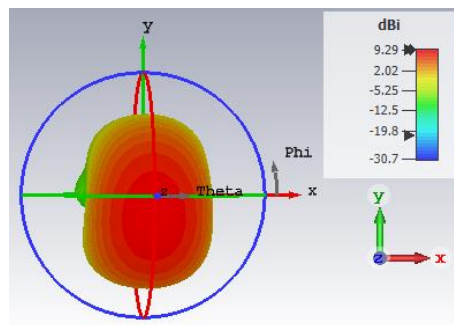


Gambar 7. VSWR Antena Mikrostrip *Array 1x2*

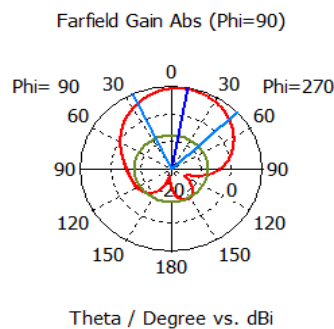


Gambar 8. Return Loss Antena Mikrostrip Array 1x2

Gambar 9 menunjukkan *gain* antena mikrostrip *array* 1x2. Parameter *gain* antena mikrostrip *array* 1x2 yaitu 9,29 dBi, dengan pola radiasi antena *unidirectional* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Hal tersebut sudah memenuhi spesifikasi perancangan.



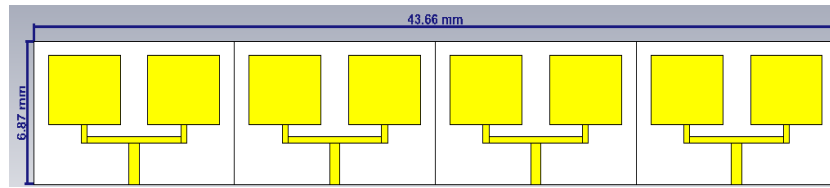
Gambar 9. Gain Antena Mikrostrip Array 1x2



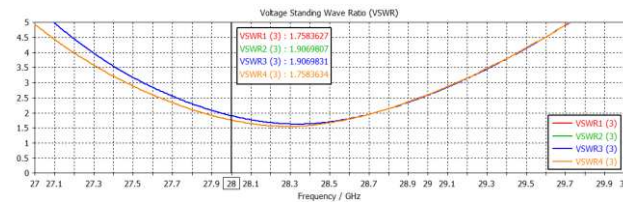
Gambar 10. Pola Radiasi Antena Mikrostrip Array 1x2

4.3 Antena Mikrostrip MIMO 4x4

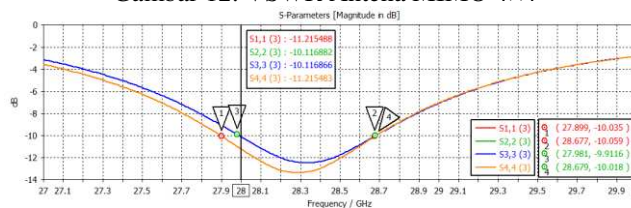
Dengan menggunakan perangkat lunak CST 2019 dilakukan perancangan antena MIMO 4x4 seperti Gambar 11. Dari perancangan tersebut didapatkan nilai VSWR sebesar 1,758; 1,906; 1,906; dan 1,758 (Gambar 12). Hasil tersebut telah memenuhi spesifikasi parameter VSWR dibawah 2 dB pada frekuensi 28 GHz. Selain itu didapatkan juga nilai *return loss* (S11, S22, S33, S44) secara berurutan sebesar -11,215 dB; -10,116 dB; -10,116 dB dan -11,215 dB pada frekuensi 28 GHz (Gambar 13). Dengan batas -10 dB dilihat dari kurva *return loss*, nilai *bandwidth* pada antena 1 dan 4 sebesar 0,778 GHz, sedangkan pada antena 2 dan 3 didapatkan *bandwidth* sebesar 0,698 GHz.



Gambar 11. Antena MIMO 4x4



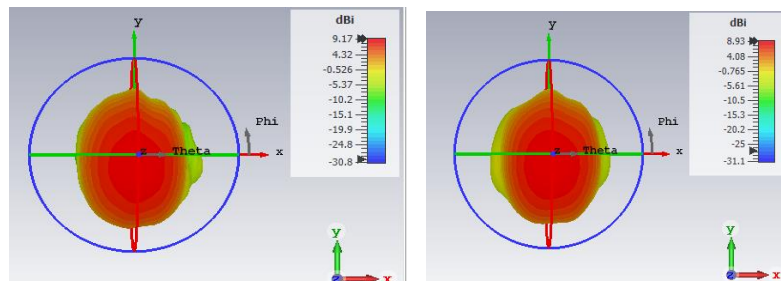
Gambar 12. VSWR Antena MIMO 4x4



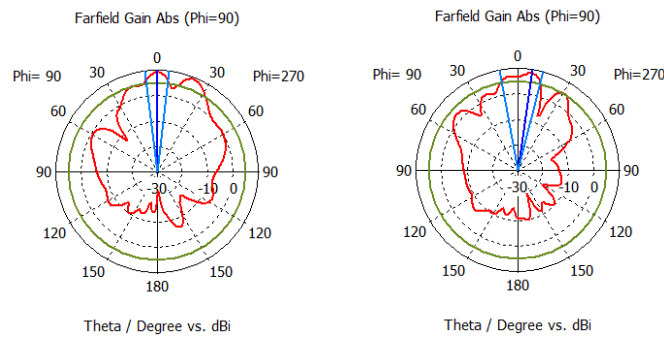
Gambar 13. Return Loss Antena MIMO 4x4

Hubungan antara antena yang satu dengan yang lainnya dipengaruhi oleh nilai d yang merupakan jarak antar *patch* antena merupakan efek *mutual coupling*. *Mutual coupling* yang terjadi pada antena MIMO 4x4 dengan nilai ≤ -20 dB terdapat pada S13 dan S42 sebesar -30,022 dB; S24 dan S31 sebesar -29,999; S14 dan S41 sebesar -37,889 dB. Sedangkan interferensi sinyal yang terjadi pada antena MIMO 4x4 merupakan nilai koefisien korelasi (ρ). Korelasi antara antena 1 dan 2 sebesar 0,021; korelasi antara antena 2 dan 3 sebesar 0,016; korelasi antara antena 3 dan 4 sebesar 0,021 sedangkan korelasi antara antena 4 dan 1 sebesar 0,0004961. Nilai rata-rata koefisien korelasi (ρ) pada antena MIMO 4x4 yaitu $\leq 0,3$.

Dari perancangan MIMO 4x4 didapatkan hasil simulasi parameter *gain* sebesar 9,17 dBi pada antena 1&4, pada antena 2&3 sebesar 8,93 dBi (Gambar 14). Sedangkan pola radiasi yang dihasilkan pada antena MIMO 4x4 yaitu *unidirectional*, dengan arah pancar utama pada antena 1&4 sebesar $8,0^\circ$ dan arah pancar utama pada antena 2&3 sebesar $7,0^\circ$ (Gambar 15).



Gambar 14. Gain Antena MIMO 4x4



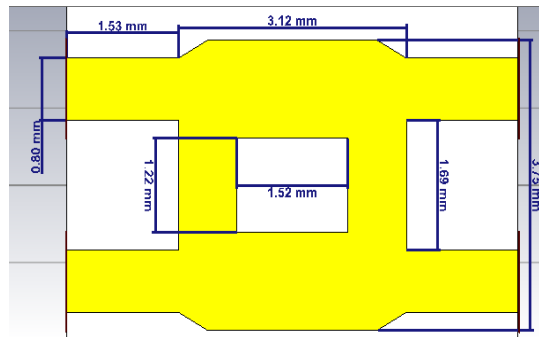
Gambar 15. Pola Radiasi Antena MIMO 4x4

4.4 Perancangan Komponen *Butler Matrix*

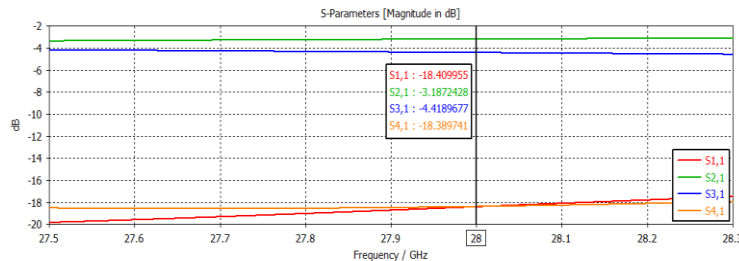
Butler matrix terdiri dari tiga komponen yaitu 90° hybrid coupler, crossover dan 45° phase shifter.

1. 90° Hybrid Coupler

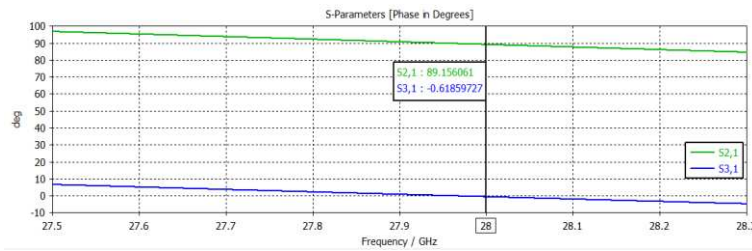
Berdasarkan perancangan *hybrid coupler* 90° pada Gambar 16, diketahui nilai S-parameter dan fasa pada *output port* pada frekuensi 28 GHz. Seperti pada Gambar 17 hasil simulasi nilai *return loss* (S1,1) dan *isolation loss* (S4,1) sudah memenuhi spesifikasi ≤ -10 dB. Sedangkan nilai *insertion loss* (S2,1) dan (S3,1) telah mendekati -3 dB. Perbedaan fasa antara *port 2* dengan *port 3* ditunjukkan pada Gambar 18. Nilainya mendekati 90° dan telah memenuhi spesifikasi.



Gambar 16. Hybrid Coupler atau 3 dB Quadrature Coupler



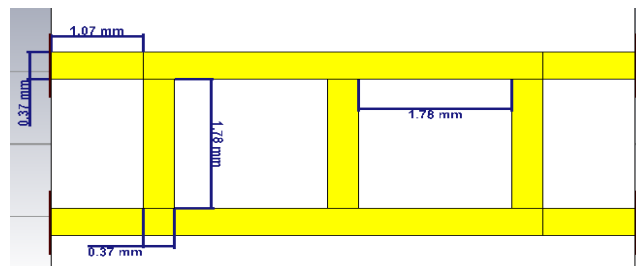
Gambar 17. S-Parameter Hybrid Coupler 90°



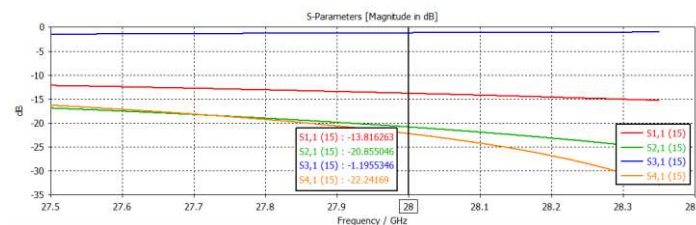
Gambar 18. Fasa Keluaran Hybrid Coupler 90°

2. Crossover

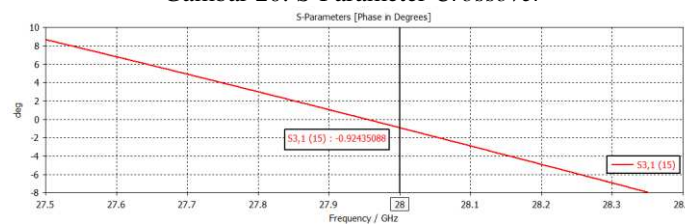
Hasil simulasi *crossover* pada Gambar 19 dapat dilihat pada Gambar 20 dan Gambar 21. Dapat dilihat bahwa nilai *return loss* (S1,1) dan *isolation loss* (S2,1 dan S4,1) diperoleh nilai ≤ -10 dB. Sedangkan nilai *insertion loss* (S3,1) mendekati 0 dB yang berarti fasa pada *output port* 3 sudah mendekati 0° sehingga tidak terjadi pergeseran fasa.



Gambar 19. Crossover



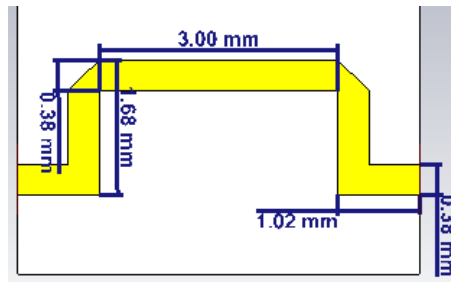
Gambar 20. S-Parameter Crossover



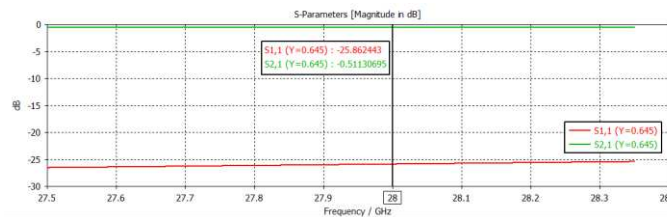
Gambar 21. Fasa keluaran Crossover

3. 45° Phase Shifter

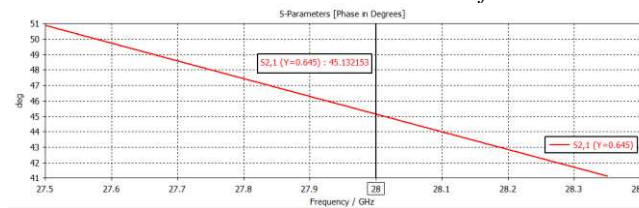
Pada penelitian ini digunakan *phase shifter* dengan pergeseran fasa 45°. Dari hasil simulasi pada Gambar 22 diperoleh nilai *return loss* (S1,1) ≤ -10 dB (Gambar 23). Sedangkan nilai *insertion loss* (S2,1) mendekati nilai 0 dB dengan perbedaan fasa antara *port* keluaran $\pm 45^\circ$ (Gambar 24). Sehingga perancangan *phase shifter* 45° sudah memenuhi spesifikasi.



Gambar 22. 45° Phase Shifter



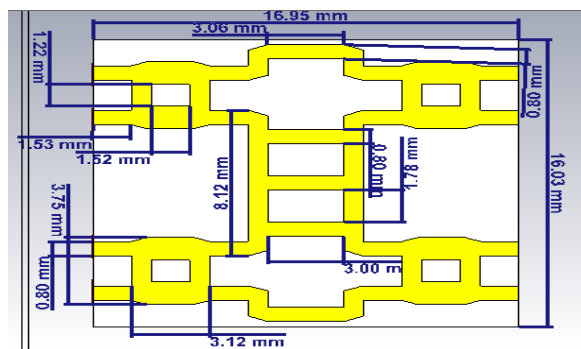
Gambar 23. S-Parameter Phase Shifter 45°



Gambar 24. Fasa Keluaran Phase Shifter 45°

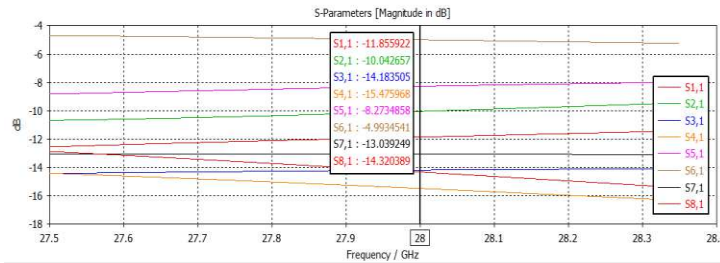
4.5 Butler Matrix 4x4

Susunan *butler matrix* 4x4 pada umumnya terdiri dari 2 komponen *hybrid coupler* 90°, 2 *crossover*, dan 2 *phase shifter* 45°. Pada penelitian ini hanya menggunakan satu komponen *crossover* dengan menghilangkan satu komponen lainnya pada sisi *output port*. Hal tersebut dapat memperkecil dimensi dan mengurangi rugi-rugi yang terjadi. Dengan menggunakan satu komponen *crossover* menyebabkan urutan *port* pada sisi *output* menjadi berubah, dimana *port* 6 berubah menjadi *port* 7 dan begitu sebaliknya, seperti pada Gambar 25.



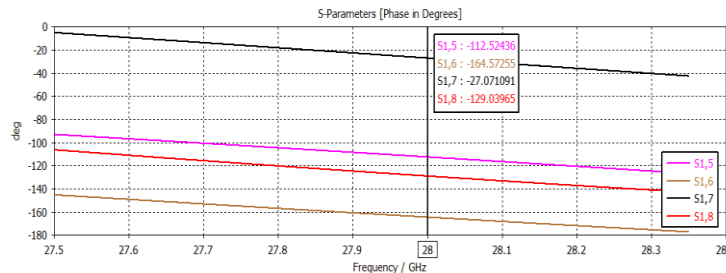
Gambar 25. Butler Matrix 4x4

Dari hasil simulasi pada frekuensi 28 GHz (Gambar 26) diperoleh nilai *return loss* (S1,1) dan nilai *isolation loss* (S2,1; S3,1; S4,1) kurang dari -10 dB. Sedangkan nilai *insertion loss* (S5,1; S6,1; S7,1; S8,1) belum memenuhi spesifikasi ideal pada -6 dB, akan tetapi dari hasil simulasi sudah memenuhi spesifikasi perancangan ≥ -10 dB.

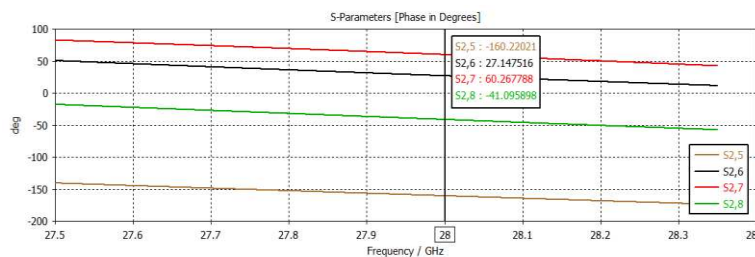


Gambar 26. Return Loss, Isolation Loss dan Insertion Loss Butler Matrix 4x4

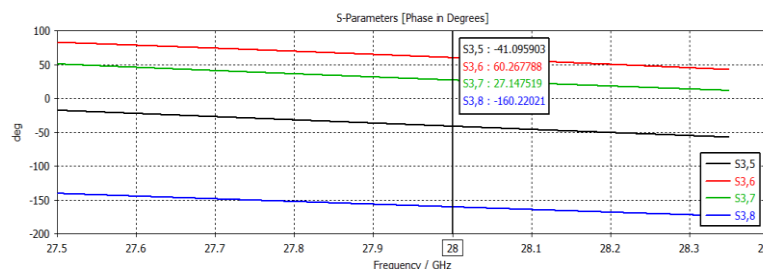
Perbedaan fasa antara *port* keluaran (*port* 5,6,7 dan 8) terhadap *port* masukan (*port* 1,2,3 dan 4) secara berurutan ditunjukkan pada Gambar 27, Gambar 28, Gambar 29 dan Gambar 30. Didapatkan bahwa perbedaan fasa belum memenuhi $\pm 135^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 135^\circ$, $\pm 45^\circ$. Akan tetapi masukan *port* 1,2,3 dan 4 dengan keluaran *port* 7 dan 6 memiliki perbedaan fasa $+135^\circ$, $+45^\circ$, -45° , -135° yang nilai tersebut mendekati beda fasa yang diharapkan. Nilai fasa keluaran *butler matrix* 4x4 dapat dilihat pada Tabel 5 sedangkan beda fasa masing-masing *port* ditunjukkan pada Tabel 6.



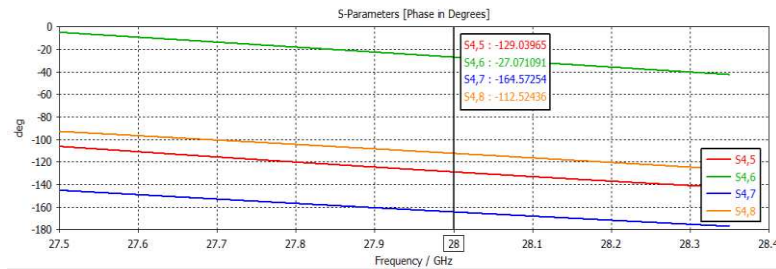
Gambar 27. Fasa Masukan Port 1



Gambar 28. Fasa Masukan Port 2



Gambar 29. Fasa Masukan Port 3



Gambar 30. Fasa Masukan Port 4

Tabel 5. Fasa Keluaran Butler Matrix 4x4

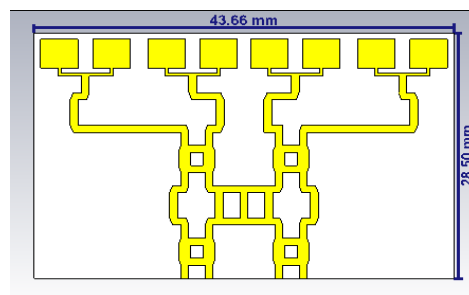
Output Input	5(deg)	6 (deg)	7 (deg)	8 (deg)
Port 1	-112,52	-164,57	-27,07	-129,03
Port 2	-160,72	27,14	60,26	-41,09
Port 3	-41,09	60,26	27,14	-160,22
Port 4	-129,03	-27,07	-164,57	-112,52

Tabel 6. Beda Fasa Masing-Masing Port Butler Matrix 4x4

Output Input	5-7 (deg)	7-6 (deg)	6-8 (deg)
Port 1	-85,45	138,5	-36,54
Port 2	-220,48	33,12	68,23
Port 3	-68,23	-33,12	220,48
Port 4	36,54	-138,5	85,45

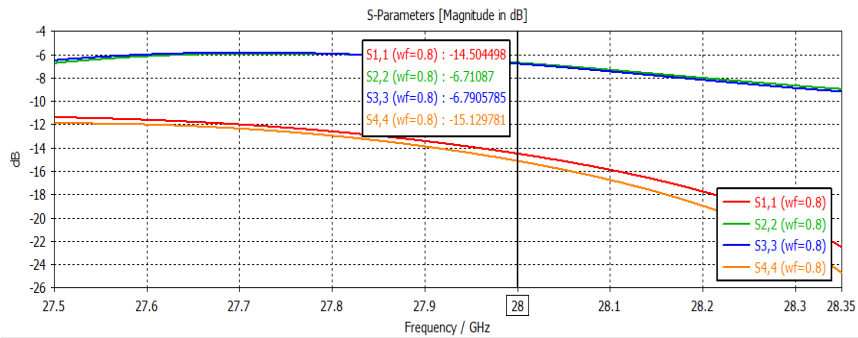
4.6 Antena MIMO 4x4 dengan Butler Matrix 4x4

Untuk mendapatkan karakteristik *beamforming* maka antena 5G harus dapat memancarkan sinar radiasi (*beam radiation*) pada arah tertentu. Hal tersebut dapat dicapai dengan minimal menggunakan 2 antena *array* dan menggunakan teknik *butler matrix* untuk mendapatkan fasa pada antena. Perancangan ini dilakukan dengan menggabungkan antena mikrostrip MIMO 4x4 dengan *butler matrix* 4x4, seperti Gambar 31.

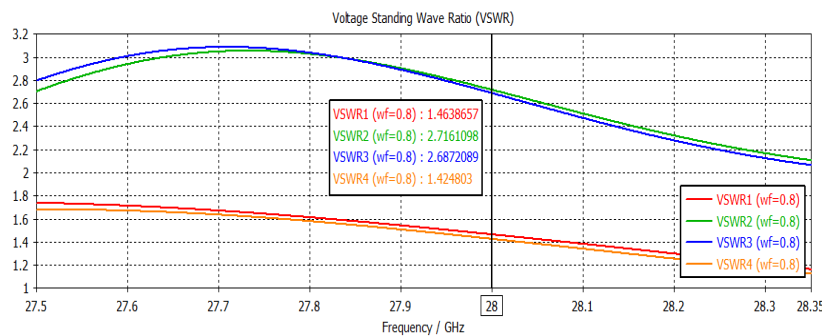


Gambar 31. Antena Mikrostrip MIMO 4x4 dengan Butler Matrix 4x4

Hasil simulasi antena mikrostrip MIMO 4x4 dengan *butler matrix* ditunjukkan pada Gambar 32 dan Gambar 33. Dari hasil simulasi yang memenuhi nilai *return loss* ≤ -10 dB juga hanya pada antena 1 dan 4. Sedangkan nilai $VSWR \leq 2$ hanya pada antena 1 dan 4, sedangkan pada antena 2 dan 3 nilai $VSWR \geq 2$. Hal ini dapat disimpulkan bahwa pada antena 2 dan 3 terjadi ketidaksesuaian antara impedansi dan elemen antena, sehingga hasil simulasi yang dicapai belum sesuai dengan spesifikasi parameter.



Gambar 32. Return Loss Antena Mikrostrip MIMO 4x4 dengan Butler Matrix 4x4

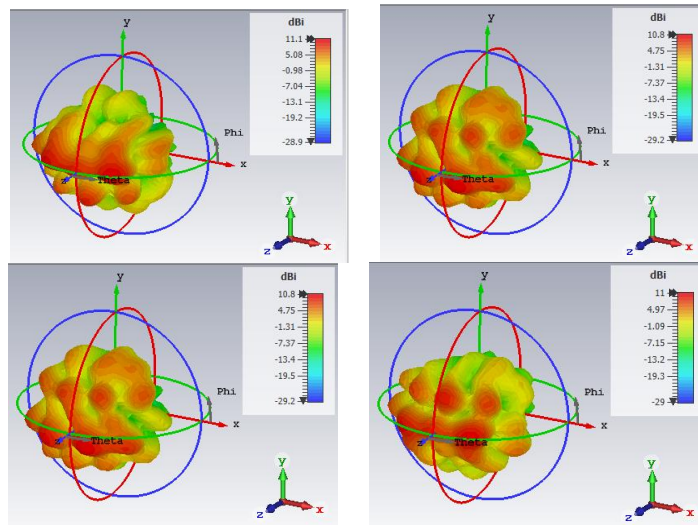


Gambar 33. VSWR Antena Mikrostrip MIMO 4x4 dengan Butler Matrix 4x4

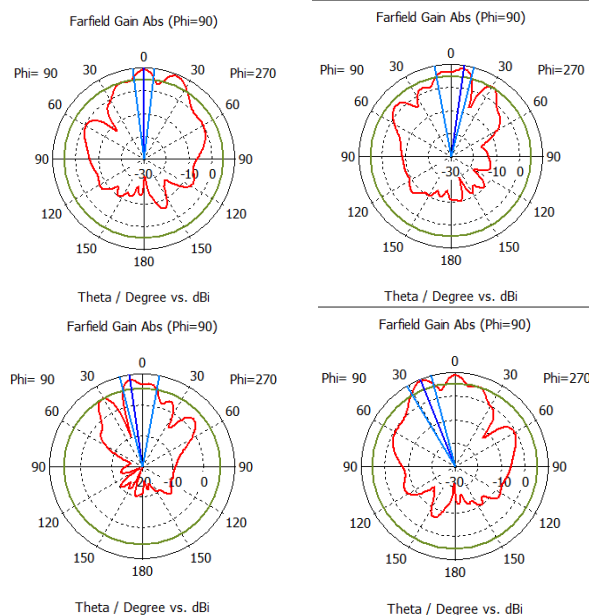
Jika dilihat dari Gambar 31 dan Gambar 32 antenna MIMO 4x4 tanpa butler matrix 4x4 memiliki nilai return loss yang lebih baik. Sedangkan antenna MIMO 4x4 dengan butler matrix 4x4 pada antenna 2 dan 3 nilai return loss yang dihasilkan masih ≥ -10 dB, yang artinya antara impedansi pada antenna maupun saluran terjadi ketidaksesuaian. Dari gambar 12 dan gambar 33 dapat disimpulkan bahwa antenna MIMO 4x4 tanpa butler matrix 4x4 memiliki nilai VSWR yang lebih bagus dibandingkan dengan menggunakan butler matrix 4x4.

Efek mutual coupling yang terjadi pada antenna MIMO 4x4 dengan butler matrix 4x4 tidak memenuhi nilai ≤ -20 dB. Sedangkan pada antenna MIMO 4x4 tanpa butler matrix 4x4 yang memenuhi nilai mutual coupling ≤ -20 dB yaitu pada $S_{1,3}=S_{4,2}$ sebesar $-30,022$ dB; $S_{1,4}=S_{4,1}$ sebesar $-37,889$ dB dan $S_{2,4}=S_{3,1}$ sebesar $-29,999$ dB; yang artinya pada kondisi ini dapat menekan efek mutual coupling yang terjadi pada antenna. Koefisien korelasi juga salah satu parameter penting pada antenna MIMO, korelasi tidak boleh lebih dari 0,3 atau $\leq 0,3$. Hal tersebut untuk mengurangi terjadinya error yang disebabkan oleh kedua antenna yang saling berdekatan saat transmisi sedang berlangsung. Hasil simulasi antenna MIMO 4x4 tanpa maupun dengan butler matrix 4x4 menghasilkan koefisien korelasi antara antenna yang berdekatan yaitu $\leq 0,3$.

Hasil simulasi antenna MIMO 4x4 dengan butler matrix 4x4 dapat dilihat pada Gambar 34 dan Gambar 35. Parameter gain yang dihasilkan dari juga memenuhi spesifikasi $gain \geq 9$ dBi seperti Gambar 34. Nilai gain tersebut lebih tinggi dari pada antenna MIMO 4x4 tanpa butler matrix 4x4 yang menghasilkan $gain = 9$ dBi, seperti Gambar 14.



Gambar 34. Gain Antena Mikrostrip MIMO 4x4 dengan Butler Matrix 4x4



Gambar 35. Pola Radiasi Antena Mikrostrip MIMO 4x4 dengan Butler Matrix 4x4

Dapat dilihat pada Gambar 35 kurva pola radiasi keempat antena memiliki arah pancar yang berbeda-beda. Hal ini menunjukkan bahwa menggunakan *butler matrix* 4x4 pada antena MIMO 4x4 dapat membuat arah pancar antena bervariasi dan mengarah pada arah tertentu. Sedangkan antena MIMO 4x4 tanpa *butler matrix* 4x4 menghasilkan arah pancar antara antena satu dengan yang lain kurang spesifik pada arah tertentu yang ditunjukkan pada Gambar 15.

5. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan dapat didapatkan beberapa kesimpulan. Perancangan antena mikrostrip MIMO 4x4 menghasilkan spesifikasi parameter yang diinginkan, diantaranya nilai $return\ loss \leq -10$ dB, $VSWR \leq 2$, $mutual\ coupling \leq -20$ dB, koefisien korelasi ≤ 0.3 , $gain \geq 9$ dBi pada antena 1 dan 4 sedangkan antena 2 dan 3 menghasilkan $gain=9$ dBi dimana nilai tersebut cukup besar, pola radiasi antena yaitu

unidirectional dengan arah pancar antara antena 1 dengan yang lain belum berbeda-beda. Perancangan antena mikrostrip MIMO 4×4 dengan *butler matrix* 4×4 menghasilkan parameter yang sesuai spesifikasi yang diinginkan yaitu nilai *return loss* ≤ -10 dB dan *VSWR* ≤ 2 hanya pada antena 1 dan 4 yang artinya pada antena 2 dan 3 antara impedansi pada antena maupun saluran terjadi ketidaksesuaian, nilai mutual coupling tidak tercapai pada ≤ -20 dB sedangkan korelasi antara antena memenuhi kondisi ≤ 0.3 , *gain* yang dihasilkan mencapai nilai *gain* ≥ 9 dBi, dan pola radiasi yaitu *unidirectional* dengan arah pancar antena yang berbeda antara antena satu dengan yang lainnya. Hal tersebut berarti antena MIMO 4×4 dengan *butler matrix* 4×4 dapat meningkatkan nilai *gain* dan dapat mengubah arah pancar antena pada arah tertentu.

REFERENSI

- [1] A. W. Paper, "New 5G Antenna White Paper," *Huawei*, 2019.
- [2] I. Uchendu and J. Kelly, "Survey of beam steering techniques available for millimeter wave applications," *Prog. Electromagn. Res. B*, vol. 68, no. 1, pp. 35–54, 2016, doi: 10.2528/PIERB16030703.
- [3] K. Klionovski, A. Shamim, and M. S. Sharawi, "5G antenna array with wide-angle beam steering and dual linear polarizations," *In 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, pp. 1469–1470, 2017, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072777.
- [4] S. B. Akhade and P. F. I. Shaikh, "Application of Butler Matrix in Switched Beam Smart Antenna," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 3, no. 5, pp. 1400–1403, 2014.
- [5] S. P. and A. T. Alreshaid, M. S. Sharawi and K. Sarabandi, "Compact Millimeter-Wave Switched-Beam Antenna Arrays for Short Range Communication," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 58, no. 8, pp. 748–753, 2016, doi: 10.1002/mop.
- [6] F. W. Ardianto, N. M. A., and B. Syihabuddin, "Analisis Simulasi Antena MIMO 4 4 Susunan Persegi dan Sirkular pada Frekuensi 15 GHz," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 7, no. 2, pp. 174–182, 2018, doi: 10.22146/jnteti.v7i2.420.
- [7] S. Alam and F. A. Nugroho, "Perancangan Antena Mikrostrip Array 2x1 untuk Meningkatkan Gain untuk Aplikasi LTE pada Frekuensi 2300 MHz," *Jurnal Teknik dan Ilmu Komputer*, vol. 6, no. 3, pp. 108–113, 2018.
- [8] F. Deriko, and A. H. Rambe, "Rancang Bangun Antena Mikrostrip Array Patch Segiempat Dual-Band (2,3 Ghz Dan 3,3 Ghz) dengan Pencatuan Proximity Coupled," *Singuda ENSIKOM*, vol. 12, no. 32, pp. 18–22, 2015.
- [9] S. Mishra, P. Wankhade, and A. Sahu, "Design and analysis of T and U shaped slots with truncated corner rectangular microstrip patch antenna for return loss enhancement," *Symp. Colossal Data Anal. Networking, CDAN 2016*, 2016, doi: 10.1109/CDAN.2016.7570902.
- [10] R. Hidayat, R. Rushendra, and E. Agustina, "Digital beamforming of smart antenna in millimeter wave communication," *2017 Int. Conf. Broadband Commun. Wirel. Sensors Powering, BCWSP 2017*, vol. 2018-January, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/BCWSP.2017.8272564.
- [11] Q. L. Yang, Y. L. Ban, Q. Q. Zhou, and M. Y. Li, "Butler matrix beamforming network based on substrate integrated technology for 5G mobile devices," *APCAP 2016 - 2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conf. Antennas Propagation, Conf. Proc.*, pp. 413–414, 2017, doi: 10.1109/APCAP.2016.7843268.
- [12] C. Tseng, C. Chen, and T. Chu, "A Low-Cost 60-GHz Switched-Beam Patch Antenna," *IEEE Antennas Wireless. Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 432–435, 2008.
- [13] S. V. Kalam and A. B. Rathi, "Optimum Design of 4×4 Symmetrically Structured Butler Matrix," *Int. J. Sci. Res. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 31–34, 2016.
- [14] Kottkamp, M., and C. Rowell, "Antenna Array Testing - Conducted and Over the Air : The Way to 5G," *White Pap.*, pp. 1–30, 2016.
- [15] Shaikh, F. I., and Sanjay Bansidhar Akhade, "Smart Antenna System using 4×4 Butler Matrix switched beam network for 2.4 GHz ISM band," *Int. J. Appl. or Innov. Eng. Manag.*, vol. 4, no. 3, p. 282, 2015.