

# Perancangan *Butler matrix 4x4* pada Frekuensi 1,27 GHz untuk Aplikasi *Synthetic Aperture Radar (SAR)*

Nur Kamila<sup>1</sup>, Bambang Setia Nugroho<sup>2</sup>, Budi Syihabuddin<sup>3</sup>

Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom Bandung  
Nurkamila25@gmail.com<sup>1</sup>, Bambangsetianugroho@yahoo.com<sup>2</sup>, Bsyihabuddin@gmail.com<sup>3</sup>

## Abstrak

Synthetic aperture radar (SAR) adalah teknologi radar yang dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan optical camera yang lebih dahulu digunakan untuk aplikasi penginderaan permukaan bumi dalam jarak jauh (remote sensing). SAR menyajikan informasi dalam bentuk citra atau gambar (radar imaging) yang memanfaatkan prinsip kerja gelombang elektromagnetik yang bekerja pada frekuensi 1,265GHz – 1,275GHz sebagai sarana pengambilan data agar dapat dioperasikan dalam segala cuaca baik siang ataupun malam.

Untuk mendapatkan hasil yang akurat dibutuhkan pengarahan berkas antena yang tepat dan fokus. Masalah pengarahan berkas antena dapat diatasi dengan teknik pembentukan pola radiasi atau biasa dikenal dengan *beamforming*. *Beamforming* bisa dilakukan dengan menambahkan pencatu pada antena, salah satu pencatu antena yang dapat membentuk 2 arah berkas adalah *hybrid 90°*. Apabila diinginkan lebih dari 2 arah berkas, pencatu antena pembentuk banyak arah yang dapat digunakan, diantaranya adalah Rotman Lens, Blass matriks atau *Butler Matrix*. *Butler Matrix* memiliki kelebihan diantara ketiga pembentuk banyak arah berkas, karena lebih sederhana dan membutuhkan jumlah pengkopel *hybrid 90°* yang lebih sedikit sehingga dapat mengurangi dimensi.

Pada penelitian ini akan dirancang *Butler matrix 4x4* pada frekuensi 1,27 GHz untuk diaplikasikan pada Synthetic aperture radar (SAR). Adapun komponen penyusunnya terdiri dari 4 *hybrid 90°*, 1 *crossover* dan 2 *phase shifter 45°* dibuat menggunakan microstrip dengan jenis substrat FR4 Epoxy dengan ketebalan 1,6 mm. *Butler matrix 4x4* yang dirancang pada frekuensi 1,27 GHz menggunakan software ADS menghasilkan *return loss* dan *isolation*  $\leq -10$ dB, *insertion loss*  $\geq -10$ dB dan kesalahan fasa  $\leq 10^\circ$ .

Kata Kunci: *Beamforming*, *Butler matrix 4x4*, Synthetic aperture radar

## 1. Pendahuluan

Teknologi penginderaan jauh (*Remote sensing*) saat ini sedang dikembangkan karena memiliki manfaat yang luas. *Synthetic aperture radar (SAR)* termasuk kedalam *microwave remote sensing* yaitu penginderaan jauh menggunakan gelombang microwave. SAR sangat cocok digunakan untuk daerah tropis karena SAR dapat bekerja dalam cuaca apapun baik siang atau pun malam. Tidak seperti remote sensing yang pengambilan datanya menggunakan platform satelit dengan teknologi kamera, SAR dapat bekerja menembus awan, kabut, hujan atau benda lainnya yang menutupi bumi[2]

Pada SAR dibutuhkan pengarahan berkas antena yang bisa bekerja dengan baik dan akurat agar didapat *beamwidth* yang terarah. Salah satu cara untuk mengatasi masalah *beamwidth* yang sering digunakan adalah dengan menggunakan teknik pembentukan pola radiasi atau biasa disebut *beamforming*.

Pembentukan pola radiasi/ *beamforming* bisa dilakukan dengan menambahkan pencatu pada antena, salah satu pencatu antena yang dapat membentuk 2 arah berkas adalah *hybrid 90°*. Apabila diinginkan lebih dari 2 arah berkas, pencatu antena pembentuk banyak arah yang dapat digunakan, diantaranya adalah *Rotman*

*Lens*, *Blass matriks* atau *Butler Matrix*. *Butler Matrix* memiliki kelebihan diantara ketiga pembentuk banyak arah berkas, karena lebih sederhana dan membutuhkan jumlah pengkopel *hybrid 90°* yang lebih sedikit sehingga dapat mengurangi ukuran (dimensi). Pengkopel *hybrid 90°* pada jaringan pembentuk banyak arah berkas berfungsi sebagai pembagi daya. [4]

Pada penelitian yang telah ada sebelumnya [1], didesain dan direalisasikan Wideband *Butler matrix 4x4* untuk *switched beam adaptive* antenna. Hasil dari penelitian ini adalah wideband *Butler Matrix 4x4* dengan dimensi yang lebih kecil karena *crossover* yang digunakan hanya 1 buah sedangkan pada umumnya *crossover* yang digunakan adalah 2 buah. Adapun penelitian Penelitian yang telah ada sebelumnya [5] perancangan dan realisasi *Butler matrix 4x4* pada Frekuensi 2,3 GHz untuk aplikasi mobile WiMax.

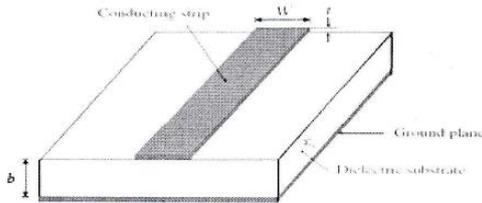
Pada penelitian ini akan dirancang *Butler Matrix 4x4* dengan frekuensi yang berbeda dari penelitian sebelumnya yaitu pada frekuensi 1,27 GHz yang akan diaplikasikan untuk teknologi SAR menggunakan software Advanced Design System (ADS). Adapun spesifikasi yang diinginkan adalah sebagai berikut : *insertion loss*  $\geq -10$  dB, *return loss*  $\leq -10$ dB dan kesalahan fasa  $\leq 10^\circ$ .

## 2. Cara Perancangan *Butler matrix 4x4*

Untuk merancang *Butler Matrix* menggunakan software simulator *Advanced Design System (ADS)* terlebih dahulu dirancang komponen penyusunnya yaitu, *hybrid 90°*, *crossover* dan *phase shifter 45°*. Komponen-komponen ini dirancang dalam mikrostrip yang berbahan substrat *FR4 Epoxy*. Bahan substrat akan berpengaruh terhadap dimensi dari komponen-komponen tersebut. Setelah mendesain dan mengoptim komponen penyusunnya maka komponen-komponen tersebut digabungkan menjadi sebuah *Butler Matrix 4x4*.

### 2.1 Saluran Mikrostrip

Saluran transmisi mikrostrip tersusun dari dua konduktor, yaitu sebuah *strip* dengan lebar  $w$  dan bidang pentanahan, keduanya dipisahkan oleh suatu substrat yang memiliki konstanta dielektrik relatif ( $\epsilon_r$ ) dengan tinggi  $h$  seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1



Gambar 2. 1 Saluran Mikrostrip

Saluran mikrostrip merupakan jenis saluran transmisi yang digunakan untuk teknologi gelombang mikro. Saluran mikrostrip sangat terkenal penggunaannya disebabkan proses pembuatannya yang relatif mudah dengan cara *photolithographic (printed-circuit)* dan dapat diintegrasikan pada perangkat *microwave* aktif maupun pasif [1].

Berikut ini merupakan beberapa referensi perhitungan dari parameter yang terdapat pada saluran mikrostrip:

a. Panjang gelombang

Panjang gelombang dalam saluran dengan konstanta dielektrik  $\epsilon_r$  adalah

$$\lambda_d = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

b. Konstanta dielektrik efektif

Konstanta dielektrik efektif nilainya adalah  $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}} \quad (2.2)$$

Untuk  $W/d \geq 1$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}} + 0.04 \left( 1 + \frac{w}{h} \right)^2 \right)$$

$$\text{Untuk } W/d < 1 \quad (2.3)$$

c. Rasio  $W/d$

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \\ \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \end{cases} \quad (2.4)$$

dengan

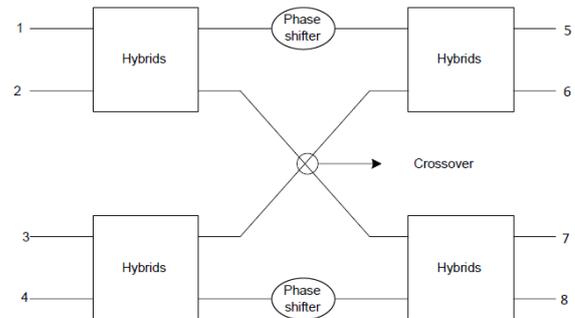
$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (2.5)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.6)$$

dimana  $\epsilon_r$  adalah konstanta dielektrik bahan yang tergantung dari substrat yang digunakan.

### 2.2 *Butler matrix 4x4*

*Butler Matrix* adalah rangkaian *microwave* yang memiliki  $N$  masukan dan  $N$  keluaran yang digunakan dalam *beamforming* dan *switched beam* pada susunan antenna linier maupun sirkular. *Butler Matrix* merupakan salah satu pencatu yang menghasilkan banyak arah berkas, dimana pengkopel *hybrid 90°* merupakan komponen utamanya[4]. Adapun penyusun *Butler Matrix* selain *hybrid 90°* adalah *crossover* dan *phase shifter*/penggeser fasa.



Gambar 2. 2 Blok Diagram *Conventional Butler matrix 4x4*

Pada umumnya desain *Butler matrix 4x4* menggunakan 2 buah *crossover*, yang terletak ditengah dan pada port keluaran. Namun pada tugas akhir ini akan dirancang *Butler matrix 4x4* dengan menghilangkan satu buah *crossover* pada port keluaran. Tujuan menghilangkan *crossover* yang terletak pada port keluaran adalah untuk memperkecil dimensi *Butler matrix 4x4* dan memperkecil rugi-rugi. Namun hal ini menyebabkan urutan port akan berubah, yaitu port 6 akan berubah menjadi port 7 begitupun sebaliknya. (2.1)

Jika rangkaian tanpa rugi-rugi dan semua *port* dalam keadaan *matched*, daya keluaran pada tiap *port* keluaran adalah seperempat daya masukan. Pencatuan pada masing-masing port akan menghasilkan beda fasa

yang berbeda pada port output sehingga akan menyebabkan perbedaan arah berkas kearah tertentu[1].

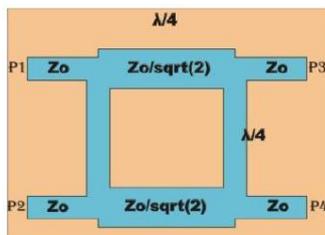
Tabel 2. 1 Beda Fasa Keluarin *Butler matrix 4x4*

	Masukan 1	Masukan 2	Masukan 3	Masukan 4
Keluaran 5	-45°	-135°	-90°	-180°
Keluaran 7	-90°	0°	-225°	-135°
Keluaran 6	-135°	-225°	0°	-90°
Keluaran 8	-180°	-90°	-135°	-45°
$\Delta\theta$	-45°	135°	-135°	45°

### 2.3 Hybrid 90°

Pengkopel *Hybrid 90°* merupakan komponen utama dari pencatu antenna banyak arah *Butler Matrix*. Pengkopel *hybrid* merupakan salah satu jenis *Directional coupler* dimana memiliki pembagian daya yang sama besar. Pengkopel *hybrid 90°* memiliki perbedaan fasa antara terminal keluaran  $90^\circ$  (*quadrature*)[4].

Apabila terminal 1 merupakan terminal masukan, maka terminal 2 merupakan terminal isolasi, terminal 3 adalah terminal langsung (*direct port*) dan terminal 4 merupakan terminal yang terkople (*coupled port*). Bila suatu pengkopel *hybrid 90°* dicatu dengan impedansi sebesar  $Z_0$ , maka nilai impedansi pada lengan *shunt* =  $Z_0$  dan nilai impedansi pada lengan serinya =  $Z_0/\sqrt{2}$ . Sedangkan jarak antar lengan  $\lambda/4$  ditentukan oleh frekuensi resonansi yang diinginkan.



Gambar 2. 3 *Hybrid 90°*

Pengkopel *hybrid 90°* adalah pengkopel dengan perbedaan fasa sebesar  $90^\circ$  pada kedua keluarannya, yaitu *port through* (terminal 3) dan *port coupled* (terminal 4) [2]. Pada pengkopel *hybrid 90°*, koefisien insersi dan koefisien koplengnya memiliki nilai yang sama, berarti pengkopel *hybrid 90°* akan membagi daya sama besar pada terminal langsung dan terminal yang terkopel.

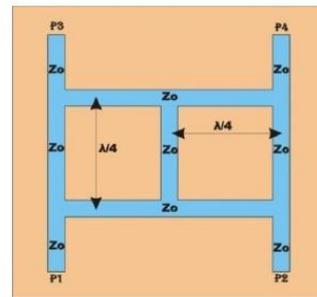
Pengkopel *hybrid 90°* yang ideal, seharusnya memiliki perbedaan daya diantara kedua terminal keluaran sebesar 0dB, dan beda fasa antara S31 dan S41 adalah  $90^\circ$  namun pada prakteknya, frekuensi mempengaruhi

keseimbangan amplitudo sehingga tidak dapat mencapai perbedaan ideal 0dB.

### 2.4 Crossover

*Crossover* dikenal sebagai pengkopel 0dB karena persyaratan *cross line transmission* pada *crossover* memiliki minimal *coupling* (0dB) diantara terminal keluaran[4]

Bentuk tersebut merupakan dua pengkopel *hybrid* yang dikaskade. Dengan kondisi yang terkaskade, sinyal hanya melewati terminal yang berada disisi lain dari terminal masukan pada *branch line* (*cross line*)[1]. *Crossover* dapat dibuat dengan menggabungkan *Hybrid 90°* secara seri[1].



Gambar 2. 4 *Crossover*

Jika sinyal masuk pada *port 1*, idealnya keluaran hanya ada pada *port 3* dengan amplitudo yang sama dengan beda fasa  $0^\circ$ . Sedangkan pada *port 2* dan *port 4* tidak ada sinyal yang lewat[1].

*Crossover* pada jaringan pembentuk banyak arah berfungsi sebagai perangkat yang mengisolasi arus pada arah tertentu. *Crossover* yang banyak digunakan dalam penelitian adalah *crossover* yang dibentuk dari beberapa pengkopel *hybrid* yang dikaskade. Kekurangan cara tersebut akan menyebabkan ukuran yang lebih besar dengan karakteristiknya bersifat pita sempit[4].

### 2.5 Phase shifter 45°

Penggeser fasa merupakan saluran transmisi dengan panjang tertentu berfungsi untuk menggeser fasa sinyal yang dilewatkan[1] dan pada dasarnya juga memiliki lebar pita (*impedance bandwidth*) terbatas[2]. Untuk menggeser fasa sebesar  $\phi$  panjang saluran transmisi yang dibutuhkan adalah :

$$l = \phi \frac{\lambda_{med}}{2\pi} \quad (2.8)$$

dimana

$$\lambda_{med} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{r,eff}}} \quad (2.9)$$

## 3. Perancangan dan Analisis

### 3.1 Spesifikasi *Butler matrix 4x4*

Dalam perancangan *Butler matrix 4x4* yang akan dikerjakan pada penelitian ini diperlukan spesifikasi terlebih dahulu, kemudian dirancang dan disimulasikan.

Pada penelitian ini akan dirancang *Butler matrix 4x4* dengan spesifikasi sebagai berikut:

- a. Frekuensi kerja : 1,27 GHz
- b. kesalahan fasa :  $\leq 10^\circ$
- d. *Insertion loss* :  $\geq -10\text{dB}$
- e. *Return loss* dan *Isolation* :  $\leq -10\text{dB}$

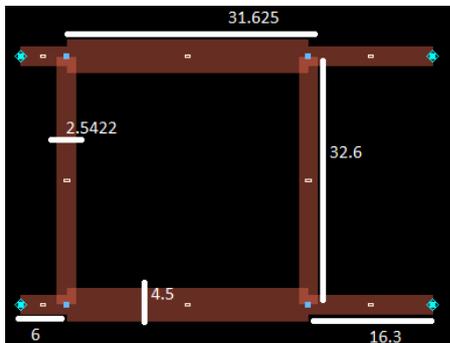
### 3.2 Perancangan Hybrid 90°

Perhitungan dimensi *hybrid 90°* menggunakan rumus (2.1), (2.2), (2.3), (2.4), (2.5) dengan frekuensi 1,27GHz dan bahan substrat FR-4 Epoxy, maka didapatkan dimensi *hybrid 90°* sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Dimensi Hybrid 90°

Saluran	Impedansi ( $\Omega$ )	$\epsilon_e$	W (mm)	L (mm)
$Z_0$	50	3,2813	2,5422	32.6
$\frac{Z_0}{\sqrt{2}}$	35,3553	3,4861	52.214	31.625

Hasil simulasi desain awal menunjukkan pergeseran titik maximum pada S31 dan S41 pada frekuensi lebih dari frekuensi kerja, nilai S31 dan S41 belum mendekati -3 dB atau setengah daya masukan. Hal ini dapat terjadi akibat adanya rugi-rugi pada saluran. Gambar 3.12 menunjukkan desain *quadrature hybrid* yang telah dioptimasi.



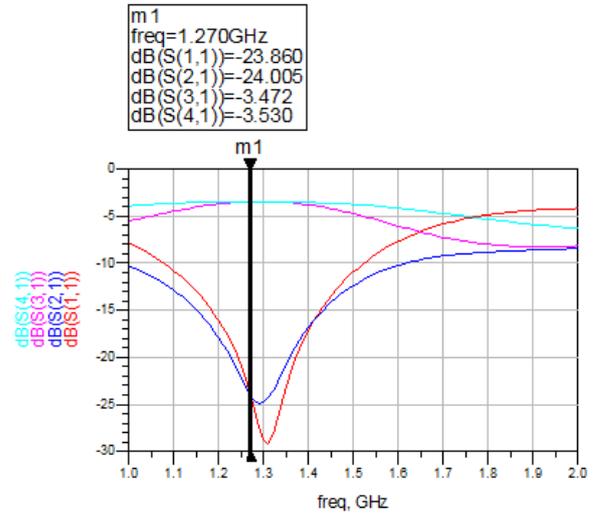
Gambar 3. 1 Design Hybrid 90°

Dari hasil simulasi desain yang telah dioptimasi dengan mengubah panjang lengan paralel dan seri, diperoleh nilai S31 dan S41 telah mendekati -3 dB. Selain itu, nilai S11 (*return loss*) dan S21 (*isolation loss*) sudah memenuhi spesifikasi yaitu  $\leq -10$  dB pada frekuensi 1,27 GHz. Perbedaan fasa antar port 3

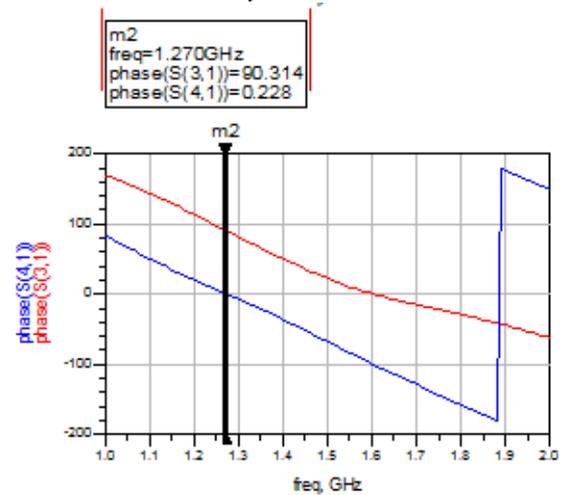
Tabel 3. 2 Hasil Simulasi Hybrid 90°

Frekuensi	S11	S21	S31	S41	Beda Fasa
1.27 GHz	-23,860 dB	-24,005 dB	-3,472 dB	-3,530 dB	90,0 86°

dan 4 telah mendekati 90°, sehingga desain *quadrature hybrid* telah memenuhi spesifikasi



Gambar 3. 2 Insertion Loss, Return Loss, dan Isolation pada Hybrid 90°



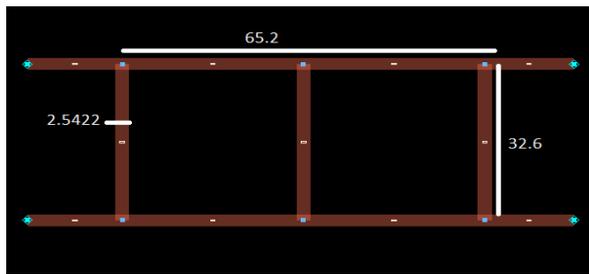
Gambar 3. 3 Hasil Fasa pada Hybrid 90°

### 3.3 Perancangan Crossover

Perhitungan dimensi *crossover* menggunakan rumus (2.1), (2.2), (2.3), (2.4), (2.5) dengan frekuensi 1,27GHz dan bahan substrat FR-4 Epoxy, maka didapatkan dimensi *hybrid 90°* sebagai berikut:

Tabel 3. 3 Dimensi Crossover

Saluran	Impedansi ( $\Omega$ )	$\epsilon_e$	W (mm)	L(mm)
$Z_0$	50	3,2813	2,5422	32.6

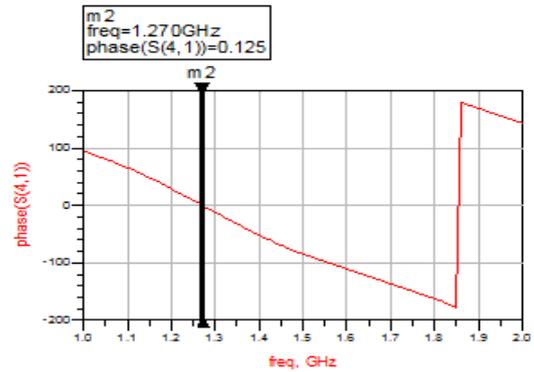


Gambar 3. 4 Design Crossover

Tabel 3. 4 Hasil Simulasi Crossover

Frekuensi	S11	S21	S31	S41	Fasa S41
1.27 GHz	-39,45 dB	26,22 dB	45,767 dB	-0,915 dB	0,125°

Hasil simulasi crossover diperoleh nilai insertion loss (S41) mendekati 0 dB yaitu 0,125 dB atau dengan fasa pada port 4 sudah mendekati 0° sehingga tidak terjadi pergeseran fasa. Sedangkan nilai return loss (S11), dan isolasi (S21 dan S31) diperoleh nilai  $\leq -10$  dB, yang artinya hampir tidak ada yang dilewatkan pada port-port tersebut, meskipun ada tapi masih dalam nilai yang dapat ditolerir, sehingga desain crossover sudah memenuhi spesifikasi.



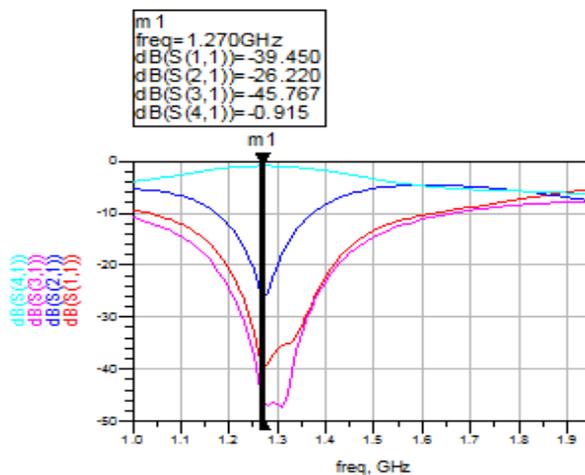
Gambar 3. 6 Hasil fasa pada Crossover

### 3.3 Perancangan Phase shifter 45°

Phase shifter yang akan dirancang pada tugas akhir ini adalah phase shifter 45° sebanyak 2 buah. Untuk mendesainnya lebar phase shifter harus sama dengan lebar crossover.

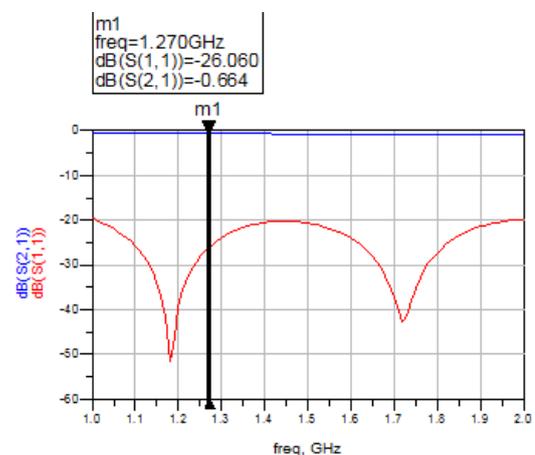


Gambar 3. 7 Design Phase shifter 45°

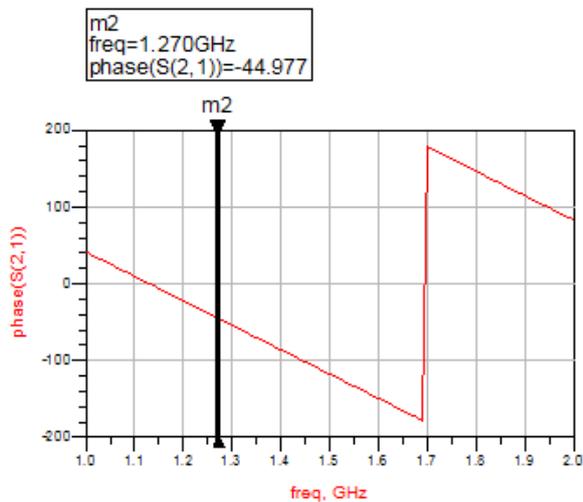


Gambar 3. 5 Insertion loss, return loss, isolation pada Crossover

Dari hasil simulasi diperoleh nilai S11 (return loss) kurang dari -10 dB yaitu -26,06, S21 (insertion loss) mendekati 0 dB yaitu -0,664, dan perbedaan fasa antara port keluaran S21 -44,977° pada frekuensi 1,27 GHz, sehingga desain phase shifter 45° sudah sesuai spesifikasi.



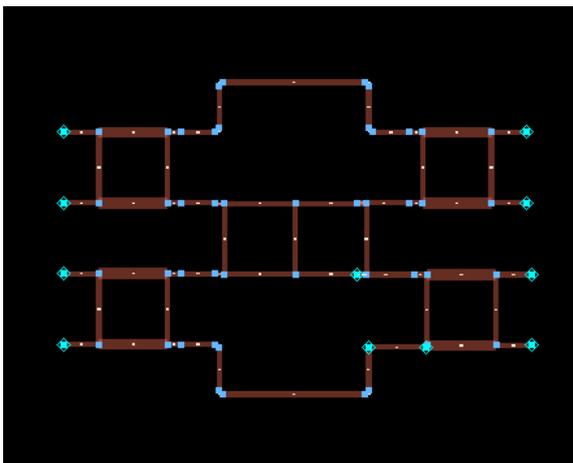
Gambar 3. 8 Insertion loss dan Return loss pada Phase shifter 45°



Gambar 3. 9 Hasil fasa pada Phase shifter 45°

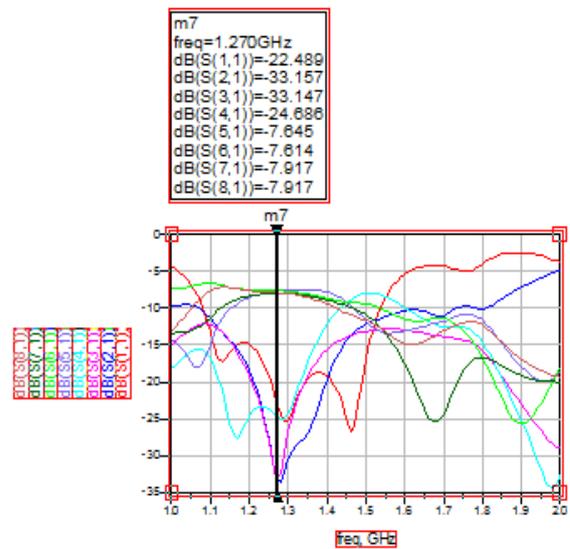
### 3.4 Perancangan Butler matrix 4x4

Perancangan desain Butler matrix 4x4 didapat dengan menggabungkan 4 buah hybrid 90°, 1 buah crossover dan 2 buah phase shifter 45° yang telah dioptimasi. Dibawah ini adalah desain akhir Conventional Butler matrix 4x4:



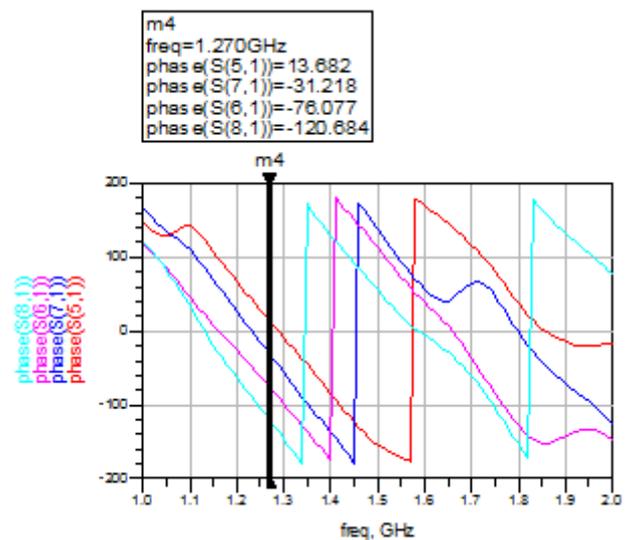
Gambar 3. 10 Design Butler matrix 4x4

Dari hasil simulasi diperoleh nilai S11 (return loss) kurang dari -10 dB, nilai S21, S31, S41 (isolasi) kurang dari -10 dB, nilai S51, S61, S71, S81 (insertion loss) lebih dari -10 dB dan perbedaan fasa antar port keluaran dengan input port 1,2,3, dan 4 secara berurutan adalah  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 135^\circ$ ,  $\pm 135^\circ$  dan  $\pm 45^\circ$ . Desain Butler matrix 4x4 sudah sesuai spesifikasi.

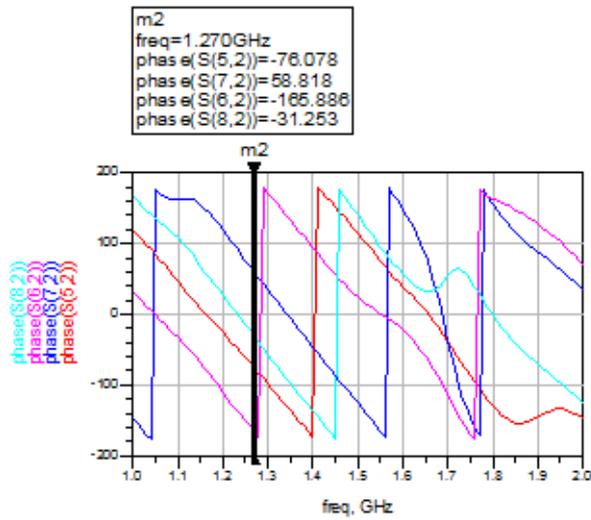


Gambar 3. 11 Insetion loss, return loss, isolation pada Butler Matrix

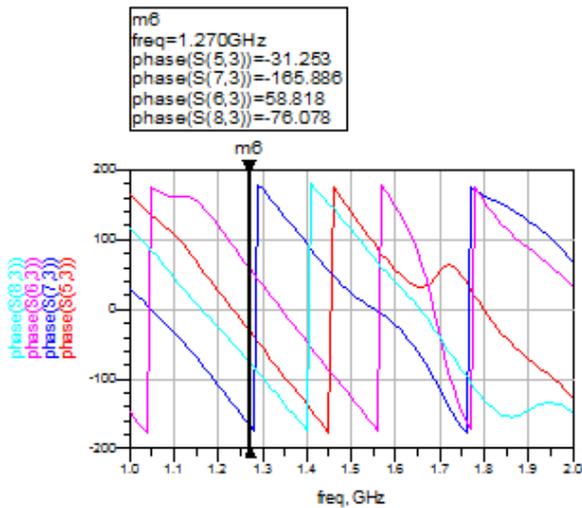
Idealnya hasil insertion loss pada port keluaran adalah -6dB, atau 1/4 daya masukan, namun pada hasil simulasi ada sedikit pergeseran nilai insertion loss dikarenakan adanya rugi-rugi pada saluran.



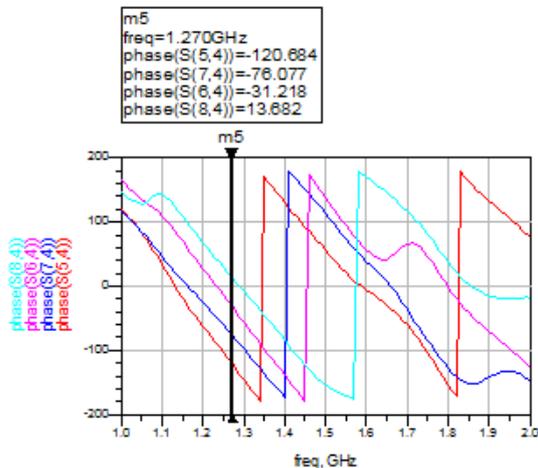
Gambar 3. 12 Hasil fasa dengan input port 1



Gambar 3. 13 Hasil fasa dengan input port 2



Gambar 3. 14 Hasil fasa dengan input port 3



Gambar 3. 15 Hasil fasa dengan input port 4

Tabel 3. 5 Hasil fasa pada masing-masing port

Input Output	1	2	3	4
5	13.682	-76.078	-31.253	120.684
7	-31.218	58.818	165.886	-76.077
6	-76.077	165.886	58.818	-31.218
8	120.684	-31.253	-76.078	13.682

Tabel 3. 6 Beda fasa pada masing-masing port

Port	1	2	3	4
5-7	44.900	134.896	134.633	-44.607
7-6	44.859	133.184	133.184	-44.859
6-8	44.607	134.633	134.896	-44.900

Terlihat dari tabel beda fasa antar port sudah sesuai spesifikasi, yaitu dengan kesalahan fasa  $\leq 10^\circ$ .

#### 4. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah

1. Mengurangi jumlah *crossover* menjadi hanya satu buah memang akan memperkecil dimensi antenna, tapi menjadikan keluaran fasa tidak berurutan, yaitu antara port 6 dan port 7.
2. Untuk mendapatkan hasil Butler Matrix sesuai yang diharapkan, maka semua komponennya pun harus dirancang sesuai spesifikasi juga.
3. Dari hasil penelitian yang dilakukan, telah diperoleh hasil simulasi Butler Matrix 4x4 yang sesuai dengan karakteristik yang diharapkan pada frekuensi 1,27 GHz dengan insertion loss  $\geq -10$  dB, return loss dan isolation  $\leq -10$  dB dan kesalahan fasa  $\leq 10^\circ$ .

## Ucapan Terima Kasih

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih secara tulus dan ikhlas kepada semua pihak yang telah membantu dan mesupport dalam pengerjaan penelitian ini.

## Daftar Pustaka

- [1] Agustian Putra, Deny. Desain Dan Realisasi Wideband *Butler Matrix*4x4 Untuk Switched Beam Adaptive Antenna. Bandung. Tugas Akhir S1 Jurusan Teknik Telekomunikasi IT Telkom. 2011.
- [2] Hamza Nachouane\*, Abdellah Najid, Abdelwahed Tribak, Fatima Riouch. Broadband 4x4 *Butler Matrix* Using Wideband 90° *hybrid* Couplers and *Crossovers* for *Beamforming Networks*. National Institute of Posts and Telecommunications Rabat, Morocco.
- [3] Moleria, Alberto. Iraola, Paul Prats, dkk. A Tutorial on Synthetic Aperture Radar. *Microwaves and Radar Institute of The German Aeospace Center (LDR)*. Germany. 2013
- [4] Ningsih, Yuli Kurnia. Pengkopel Hibrid 90° Mikrostrip Non Linier Pita Lebar dan Aplikasinya pada *Butler Matrix* untuk Antena dengan Banyak Arah Berkas pada X-Band. Disertasi S3 Jurusan Teknik Elektro Universitas Indonesia. Depok. 2011.
- [5] Pamungkas, Adiyanto. 2010. Perancangan dan Realisasi *Butler Matrix*4x4 pada Frekuensi 2,3 GHz untuk Aplikasi Mobile Wimax. Tugas Akhir S1 Jurusan Teknik Telekomunikasi IT Telkom.
- [6] Riyadi, Taufik Prihananto. *Design And Realization Of Dual Phase Shifter Butler Matrix 4x4 Using Pin Diode Switched-Line Methode*. Bandung. Tugas Akhir S1 Teknik Telekomunikasi IT Telkom. 2013.
- [7] Wriddhi Bhowmik, Shweta Srivastava. Optimum Design of a 4x4 Planar *Butler Matrix* Array for WLAN Application. *Journal Of Telecommunications*, Volume 2, Issue 1, April. 2010.