

## BAB IV

### PERANCANGAN ANTENA *RECTANGULAR PATCH ARRAY SWITCHED*

#### *BEAM* PADA RANGE FREKUENSI KERJA 2400 - 2483.5 MHz

Perancangan antenna *rectangular patch array switched beam* diawali dengan memilih material atau substrat yang akan digunakan, kemudian merancang dimensi antenna yang berpedoman pada rumus-rumus yang telah baku. Rancangan antenna hasil perhitungan kemudian disimulasikan menggunakan *software IE3D*. Dimensi awal ini biasanya hasilnya kurang sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan, oleh sebab itu perlu proses optimasi lebih lanjut hingga diperoleh spesifikasi yang sesuai dengan tujuan perancangan. Tahapan perancangan dimulai dengan mendesain elemen peradiasi berupa antenna *rectangular patch array* dan dilanjutkan dengan mendesain sistem *switched beam* berupa *butler matrix 4x4*. Sebuah *butler matrix 4x4* memiliki komponen-komponen berupa dua buah *crossover*, empat buah *hybrid 90<sup>0</sup>*, dan empat buah *phase shifter*.

#### 4.1 Pemilihan Bahan Peradiasi dan Substrat

Bahan substrat dan peradiasi yang digunakan untuk perancangan awal adalah sebagai berikut:

- a) Bahan I (*Duroid 5880*)
  - Konstanta dielektrik ( $\epsilon_r$ ) = 2.2
  - Ketebalan dielektrik ( $h$ ) = 2.2 mm
  - *Loss tangent* = 0.0009
- b) Bahan II (*FR-4*)
  - Konstanta dielektrik ( $\epsilon_r$ ) = 4.4
  - Ketebalan dielektrik ( $h$ ) = 1.6 mm
  - *Loss tangent* = 0.02
- c) Bahan pelapis substrat (konduktor) tembaga:
  - Ketebalan bahan konduktor ( $t$ ) = 0.1 mm
  - Konduktifitas tembaga ( $\sigma$ ) =  $5.80 \times 10^7$  mho m<sup>-1</sup>
  - Impedansi karakteristik saluran = 50  $\Omega$

## 4.2 Perancangan Elemen Peradiasi

Antena yang direncanakan memiliki *range* frekuensi kerja ( $f_r$ ) antara 2.4 sampai 2.4835 GHz. Berdasarkan *range* frekuensi tersebut dapat dihitung frekuensi tengahnya yaitu 2.442 GHz. Nilai perambatan gelombang elektromagnetik di ruang bebas ( $c$ )  $3 \times 10^8$  m/s. Maka lebar elemen peradiasi ( $W$ ) dapat dihitung menggunakan persamaan (2-49) :

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

$$\text{Bahan I} \quad W = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2,442 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{2,2 + 1}} = 0.04856m = 48.56mm$$

$$\text{Bahan II} \quad W = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2,442 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{4,4 + 1}} = 0.03738m = 37,38mm$$

Sedangkan untuk menentukan panjang elemen peradiasi ( $L$ ), terlebih dahulu harus ditentukan konstanta dielektrik efektif dengan menggunakan persamaan (2-48) :

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

$$\text{Bahan I} \quad \epsilon_{\text{reff}} = \frac{2,2 + 1}{2} + \frac{2,2 - 1}{2} \left[ 1 + 12 \cdot \frac{2,2}{48,56} \right]^{-\frac{1}{2}} = 2.0829$$

$$\text{Bahan II} \quad \epsilon_{\text{reff}} = \frac{4,4 + 1}{2} + \frac{4,4 - 1}{2} \left[ 1 + 12 \cdot \frac{1,6}{48,56} \right]^{-\frac{1}{2}} = 4.0818$$

Sehingga dimensi panjang elemen peradiasi ( $L$ ) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2-51) :

$$L = \frac{c}{2 \cdot f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} - 2 \cdot \Delta L$$

Nilai  $\Delta L$  dapat dihitung menggunakan persamaan (2-49) :

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

$$\text{Bahan I} \quad \Delta L = 0,412 \cdot 2,2 \cdot \frac{(2,0829 + 0,3) \left( \frac{48,56}{2,2} + 0,264 \right)}{(2,0829 - 0,258) \left( \frac{48,56}{2,2} + 0,8 \right)} = 1,1558 \text{ mm}$$

$$\text{Bahan II} \quad \Delta L = 0,412 \cdot 1,6 \cdot \frac{(4,0818 + 0,3) \left( \frac{37,38}{1,6} + 0,264 \right)}{(4,0818 - 0,258) \left( \frac{37,38}{1,6} + 0,8 \right)} = 0,7386 \text{ mm}$$

Maka panjang elemen peradiasi ( $L$ ) adalah :

$$\text{Bahan I} \quad L = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2,442 \times 10^9 \sqrt{2,0829}} - 2 \times 1,1558 \times 10^{-3} = 0,0402491 \text{ m} = 40,249 \text{ mm}$$

$$\text{Bahan II} \quad L = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2,442 \times 10^9 \sqrt{4,0818}} - 2 \times 0,7386 \times 10^{-3} = 0,0402491 \text{ m} = 28,926 \text{ mm}$$

Setelah  $L$  dan  $W$  diketahui besarnya maka impedansi masukan ( $Z_A$ ) elemen peradiasi dapat dihitung menggunakan persamaan (2-52):

$$Z_A = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left( \frac{L}{W} \right)^2 \Omega$$

$$\text{Bahan I} \quad Z_A = 90 \frac{2,2^2}{2,2 - 1} \left( \frac{40,249}{48,56} \right)^2 = 249,372 \Omega$$

$$\text{Bahan II} \quad Z_A = 90 \frac{4,4^2}{4,4 - 1} \left( \frac{28,926}{37,38} \right)^2 = 306,8444 \Omega$$

#### 4.2.1 Perancangan Saluran *Transformer*

Lebar saluran *transformer* ( $W_T$ ) dihitung menggunakan persamaan (2-54):

$$W_T = \frac{k}{Z_T} \times \frac{h}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ (mm)}$$

Sebelumnya nilai  $Z_T$  dihitung menggunakan persamaan (2-53):

$$Z_T = \sqrt{Z_o \cdot Z_A}$$

$$\text{Bahan I} \quad Z_T = \sqrt{50 \cdot 249,3721} = 111,6629 \Omega$$

$$\text{Bahan II} \quad Z_T = \sqrt{50 \cdot 306,8444} = 123,8637 \Omega$$

Maka  $W_T$  adalah:

$$\text{Bahan I} \quad W_T = \frac{120\pi}{111,6629} \times \frac{2,2}{\sqrt{2,2}} = 5,0076 \text{ mm}$$

$$\text{Bahan II} \quad W_T = \frac{120\pi}{123.8637} \times \frac{1,6}{\sqrt{4,4}} = 2.3216\text{mm}$$

Panjang saluran *transformer* ( $L_T$ ) dihitung menggunakan persamaan (2-55):

$$L_T = \frac{1}{4} \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \text{ (m)}$$

$$\text{Bahan I} \quad L_T = \frac{1}{4} \times \frac{3 \times 10^8}{2,442 \times 10^9 \sqrt{2,2}} = 20.7064\text{mm}$$

$$\text{Bahan II} \quad L_T = \frac{1}{4} \times \frac{3 \times 10^8}{2,442 \times 10^9 \sqrt{4,4}} = 14.6416\text{mm}$$

Sedangkan untuk mengetahui seberapa dalam saluran *transformer* menjorok ke dalam elemen peradiasi ( $y_0$  / *inset feed*) untuk mendapatkan saluran transmisi yang tersesuaian (*matching*) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2-56):

$$y_0 = \cos^{-1} \sqrt{\left(\frac{Z_0}{Z_A}\right)} \left(\frac{L}{180}\right)$$

$$\text{Bahan I} \quad y_0 = \cos^{-1} \sqrt{\left(\frac{50}{249.3721}\right)} \left(\frac{40.2491}{180}\right) = 14.1764\text{mm}$$

$$\text{Bahan II} \quad y_0 = \cos^{-1} \sqrt{\left(\frac{50}{306.8444}\right)} \left(\frac{28.926}{180}\right) = 10.6371\text{mm}$$

Proses selanjutnya adalah menentukan jarak antar elemen peradiasi, dihitung menggunakan persamaan (2-57):

$$\text{Bahan I} \quad r \geq 0,6 \frac{3 \times 10^8}{2,442 \times 10^9 \sqrt{2,2}} \geq 49.6953\text{mm}$$

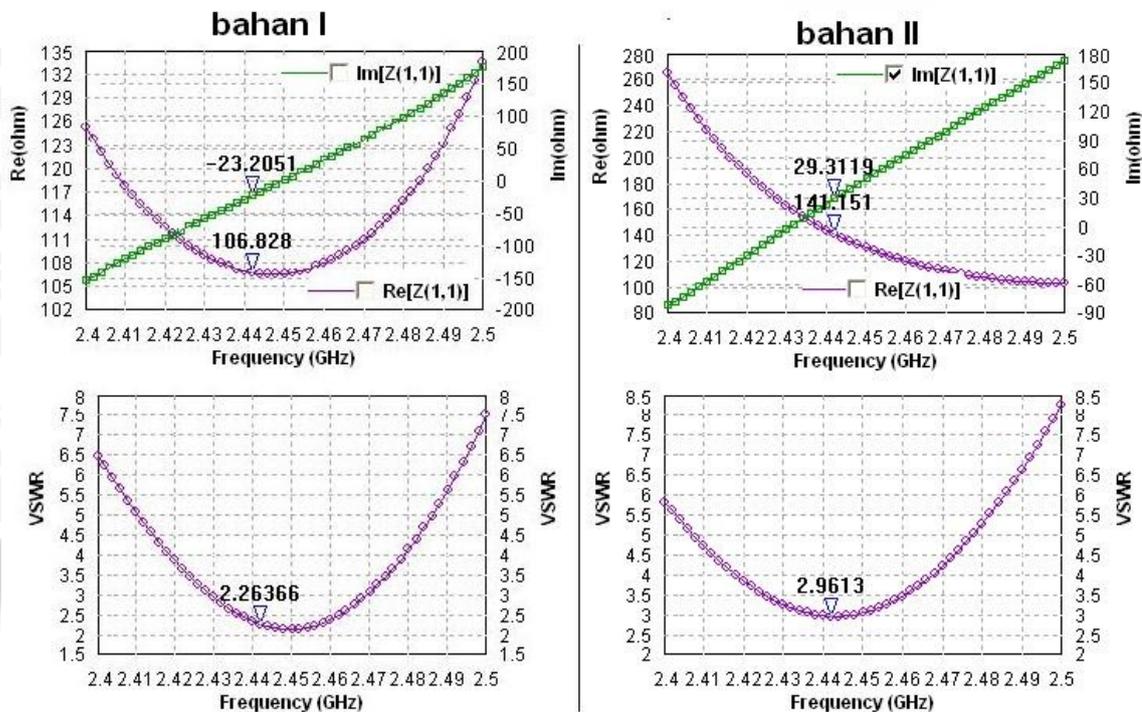
$$\text{Bahan II} \quad r \geq 0,6 \frac{3 \times 10^8}{2,442 \times 10^9 \sqrt{4,4}} \geq 35.1399\text{mm}$$

Berdasarkan hasil perhitungan maka dihasilkan dimensi antenna peradiasi sebagaimana yang tertera pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Dimensi awal peradiasi

Dimensi	Bahan I	Bahan II
W	48.56 mm	37.38 mm
L	40.25 mm	28.93 mm
$L_T$	20.7 mm	14.6 mm
$W_T$	5 mm	2.3 mm
$y_0$	14.2 mm	10.6 mm

Setelah dilakukan simulasi diperoleh hasil yang jauh dari optimal. Pada frekuensi 2.442 GHz diperoleh parameter impedansi masukan antenna peradiasi ( $Z(1,1)$ ) dan VSWR sebagaimana yang diilustrasikan pada Gambar 4.1

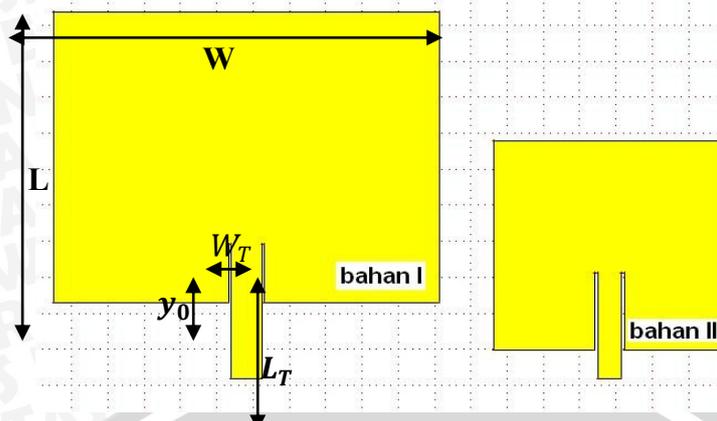


Gambar 4.1 Parameter  $Z(1,1)$  dan VSWR pada desain awal antenna peradiasi

Berdasarkan hasil simulasi di atas perlu dilakukan optimasi untuk menggeser nilai  $\text{Re}[Z(1,1)]$  dari  $106.821\Omega$  dan  $141.151\Omega$  menuju  $50\Omega$  dan  $\text{Im}[Z(1,1)]$  dari  $-j23.2051\Omega$  dan  $j29.3119\Omega$  menuju  $j0\Omega$  sehingga didapatkan nilai VSWR yang mendekati satu (optimum).

Optimasi antenna peradiasi dilakukan secara manual. Variabel-variabel dimensi antenna berupa  $W$ ,  $L$ ,  $L_T$ ,  $W_T$ , dan  $y_0$  diubah nilainya secara bergantian kemudian disimulasi untuk mengamati perubahan parameter apa saja yang terjadi sehingga memudahkan upaya menggeser nilai  $\text{Re}[Z(1,1)]$  dan  $\text{Im}[Z(1,1)]$  mendekati nilai optimum.

Setelah dilakukan optimasi pada variabel tersebut maka didapatkan dimensi dan hasil simulasi yang optimum sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.2 dan 4.3.

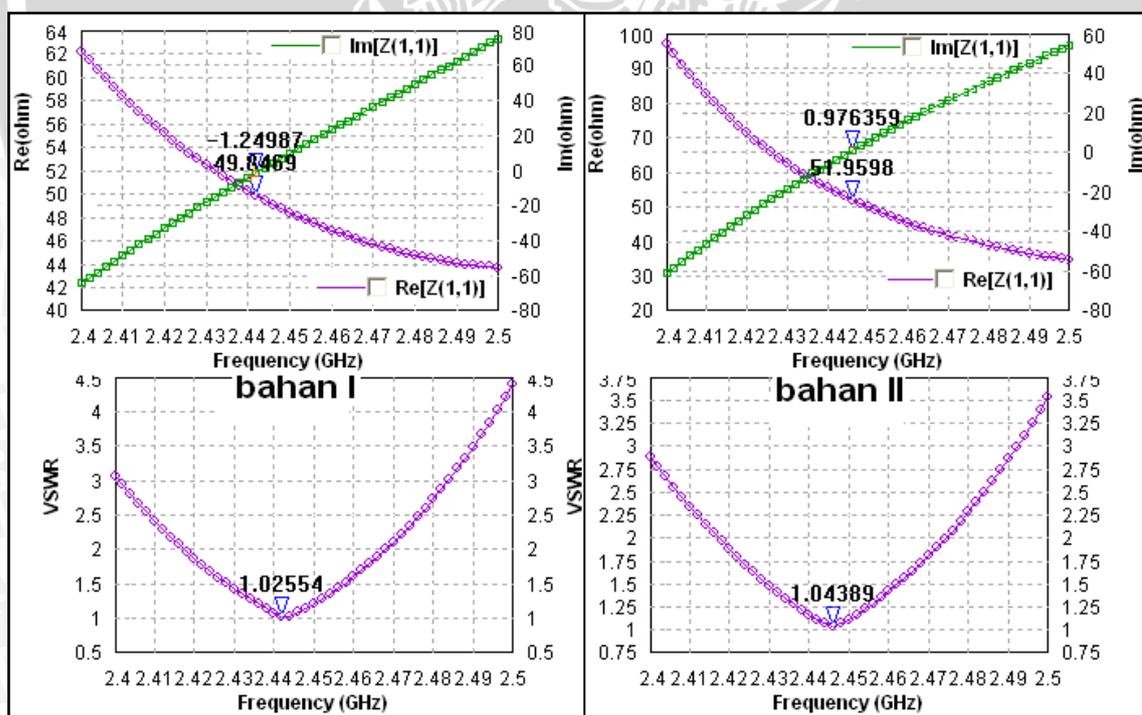


Gambar 4.2 Desain akhir antenna paradisi

Keterangan dimensi Gambar 4.2 adalah sebagai berikut:

Tabel 4.2 Dimensi antenna paradisi setelah dioptimasi

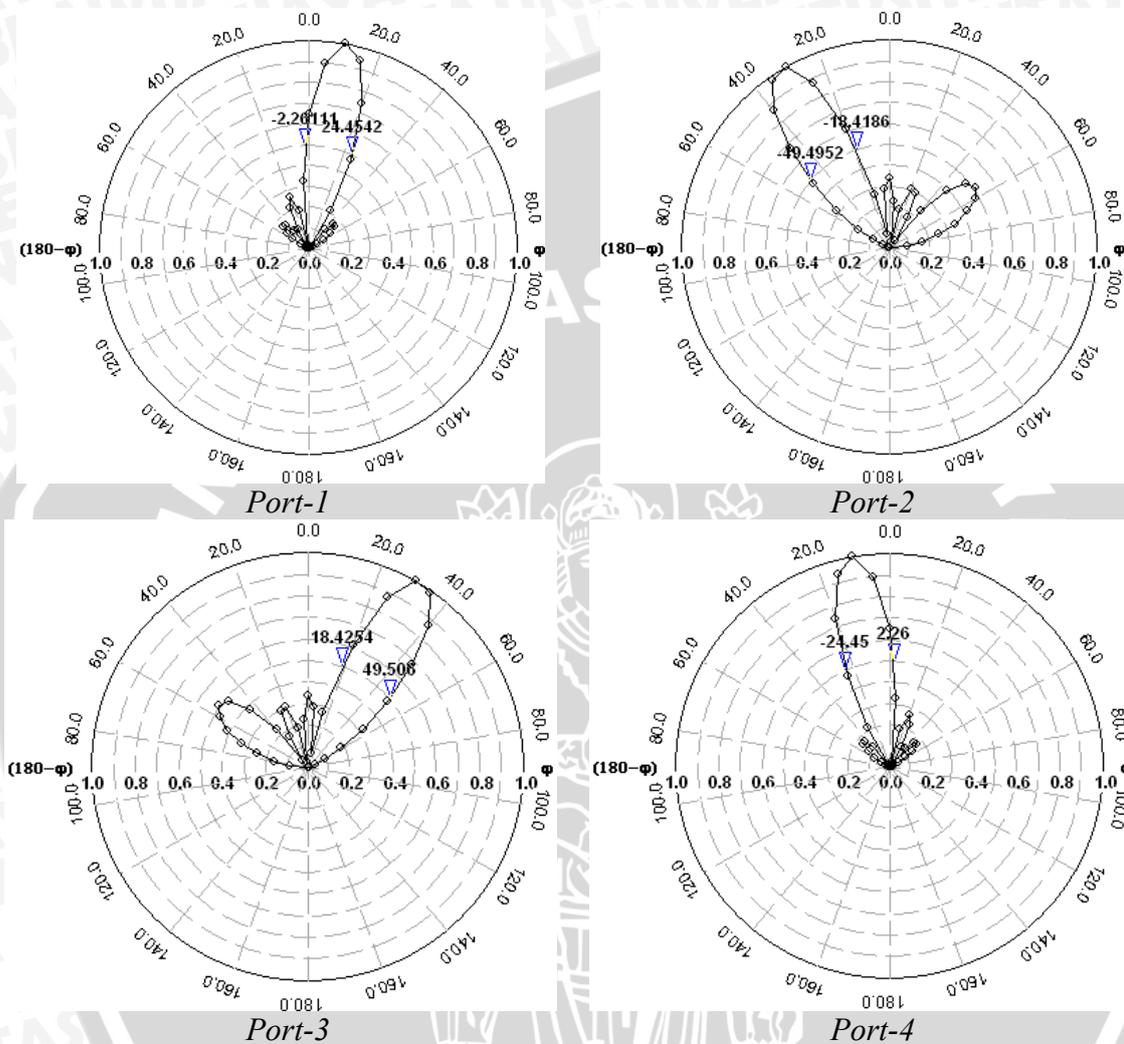
Dimensi	Bahan I	Bahan II
W	53.16 mm	32 mm
L	40.4 mm	29 mm
$L_T$	18.64 mm	14.6 mm
$W_T$	4.2 mm	3.1 mm
$y_0$	8.2 mm	10.6 mm



Gambar 4.3 Nilai Z(1,1) dan VSWR setelah proses optimasi

#### 4.2.2 Simulasi Susunan Empat Buah Antena Peradiasi

Simulasi susunan empat buah antena peradiasi dilakukan untuk menentukan pola radiasi yang akan dijadikan acuan dalam mendesain sistem *butler matix*. Hasil simulasi susunan empat buah peradiasi bahan I dan II diilustrasikan pada Gambar 4.4 dan 4.5

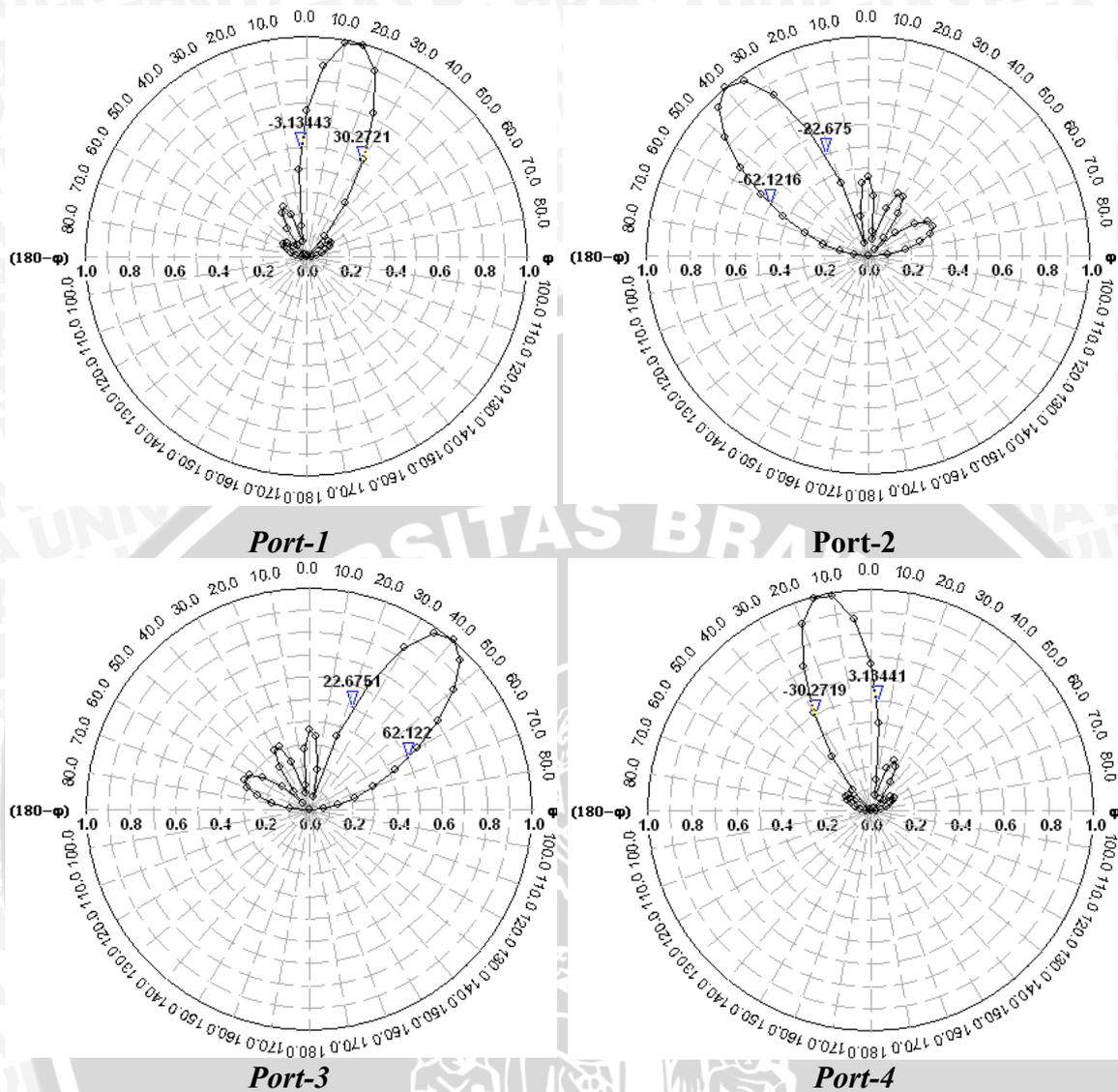


Gambar 4.4 Pola Radiasi Empat Elemen Antena yang dicatu pada Masing-Masing Port Inputnya (Bahan I)

Berikut ini adalah Tabel 4.3 yang menjelaskan grafik polar pola radiasi susunan antena peradiasi bahan I yang diilustrasikan pada Gambar 4.4.

Tabel 4.3 keterangan Gambar 4.4

Port	Pola radiasi maksimum			sudut 0.5 level maksimum		HPBW
	sudut	level	0.5 level	Kiri	kanan	
1	10.005	0.9999	0.49995	-2.26	24.45	26.71
2	-30.015	1	0.5000	-49.49	-18.42	31.07
3	30.015	1	0.5000	18.43	49.51	31.08
4	-10.005	0.9999	0.49995	-24.45	2.26	26.71



Gambar 4.5 Pola Radiasi Empat Elemen Antena yang dicatu pada Masing-Masing Port Inputnya (Bahan II)

Berikut Tabel 4.4 yang menjelaskan grafik polar pola radiasi susunan antena peradiasi bahan II:

Tabel 4.4 keterangan Gambar 4.5

Port	Pola radiasi maksimum			sudut 0.5 level maksimum		HPBW
	sudut	level	0.5 level	Kiri	Kanan	
1	$15.008^0$	0.991	0.4955	$-3.13^0$	$30.27^0$	$33.4^0$
2	$-40.020^0$	1	0.5000	$-62.12^0$	$-22.68^0$	$39.44^0$
3	$40.020^0$	1	0.5000	$22.68^0$	$62.12^0$	$39.44^0$
4	$-15.008^0$	0.991	0.4955	$-30.27^0$	$3.13^0$	$33.4^0$

### 4.3 Perancangan Hybrid $90^0$

Sebagaimana yang telah dijelaskan pada BAB II bahwa *hybrid*  $90^0$  memiliki dua jenis lengan (lengan seri dan paralel) yang impedansinya bernilai  $Z_0/\sqrt{2}$  untuk lengan

seri dan untuk lengan paralel bernilai  $Z_0$ . Lebar lengan yang memiliki impedansi tertentu dihitung menggunakan persamaan (2-63)

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right]$$

Sementara B dihitung menggunakan persamaan (2-51):

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

Untuk lengan seri, nilai B adalah:

Bahan I	$B_1 = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\frac{2.2}{2}}} = 11.2924$
---------	---

Bahan II	$B_1 = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\frac{4.4}{2}}} = 7.9849$
----------	--

Untuk lengan paralel, nilai B adalah:

Bahan I	$B_2 = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{2.2}} = 7.9849$
---------	--

Bahan II	$B_2 = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{4.4}} = 5.6462$
----------	--

Maka lebarnya lengan seri ( $W_1$ ) dapat dihitung sebagaimana rumus berikut:

$$W_1 = \frac{2h}{\pi} \left[ B_1 - 1 - \ln(2B_1 - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B_1 - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] W_1$$

Bahan I	$W_1 = 11.0462mm$
---------	-------------------

Bahan II	$W_1 = 5.2223mm$
----------	------------------

Lebarnya lengan paralel ( $W_2$ ) dihitung sebagaimana rumus berikut:

$$W_2 = \frac{2h}{\pi} \left[ B_2 - 1 - \ln(2B_2 - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B_2 - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right]$$

Bahan I	$W_2 = 6.7783mm$
---------	------------------

Bahan II	$W_2 = 3.0612mm$
----------	------------------

Panjangnya lengan seri atau paralel dihitung menggunakan persamaan (2-62):

$$L = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_r \text{ eff}}} \text{ (meter)}$$

Bahan I	$L = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 2.442 \times 10^9 \sqrt{1.8712}} = 22.4520 \text{ mm}$
---------	---

Bahan II	$L = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 2.442 \times 10^9 \sqrt{3.3304}} = 16.8293mm$
----------	--

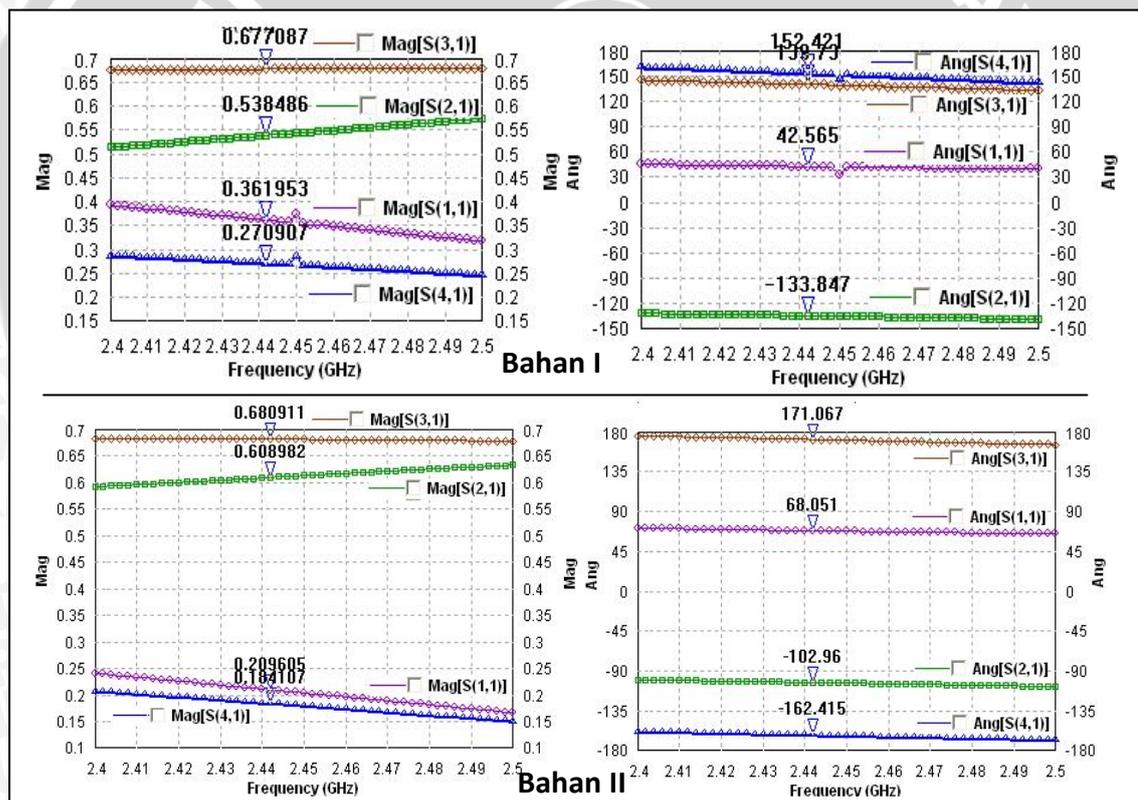
Dalam perancangan *hybrid*  $90^0$  untuk pencatutan *port-1* akan diusahakan sinyal keluaran pada *port-3* dan *port-2* memiliki amplitudo sama dan berbeda fasa  $90^0$  serta sinyal yang keluar pada *port-1* dan *port-4* mendekati nol atau tidak ada sinyal keluaran.

Berdasarkan hasil perhitungan maka dihasilkan dimensi *hybrid*  $90^0$  sebagaimana yang tertera pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Dimensi *hybrid*  $90^0$  hasil perhitungan

Dimensi	Bahan I	Bahan II
$W_1$	11.0462mm	5.2223mm
$W_2$	6.7783mm	3.0612mm
$L_1$	22.4520 mm	16.8293mm
$L_2$	22.4520 mm	16.8293mm

Simulasi dimensi awal antenna menghasilkan parameter yang kurang optimum sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.6.

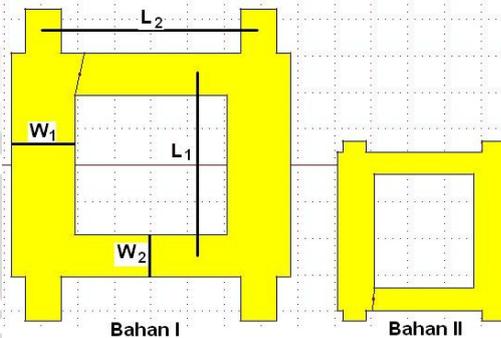


Gambar 4.6 Magnetudo dan Phase parameter  $S$  untuk dimensi awal *hybrid*  $90^0$

Metode optimasi yang diterapkan pada *hybrid*  $90^0$  adalah sama dengan metode sebelumnya yakni metode optimasi pada elemen peradiasi. Berdasarkan hasil percobaan mengubah-ubah variabel-variabel dimensi *hybrid*  $90^0$  didapat ukuran yang optimum sebagaimana dalam Tabel 4.6 dan Gambar 4.7.

Tabel 4.6 Dimensi *hybrid* 90° setelah dioptimasi

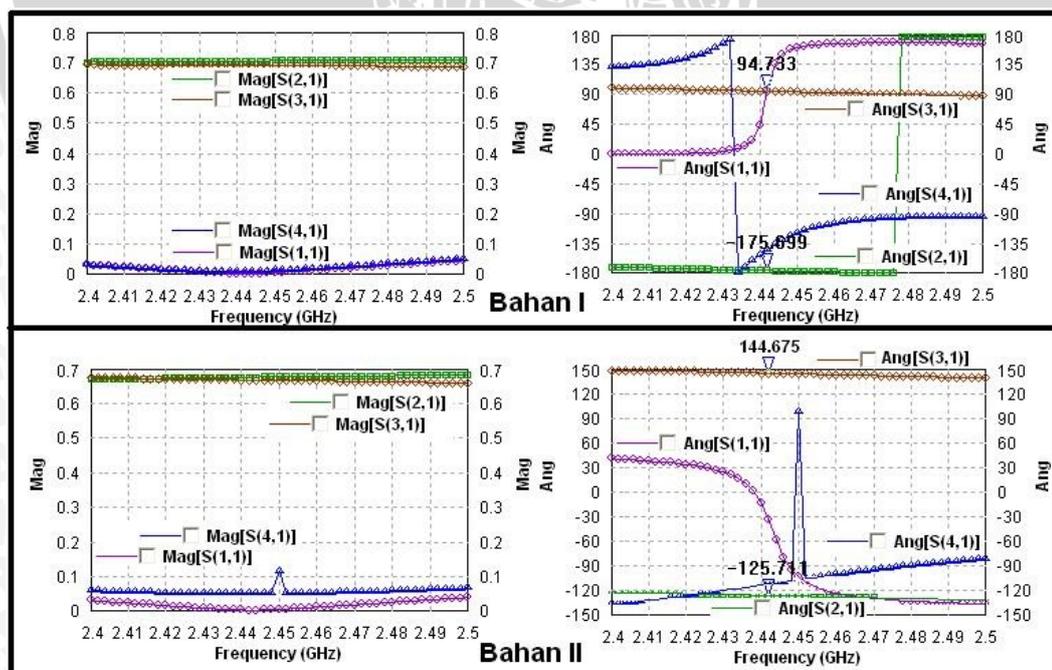
Dimensi	Bahan I	Bahan II
$W_1$	8.70875 mm	5.02 mm
$W_2$	5.78 mm	3.06 mm
$L_1$	29.454 mm	18.65 mm
$L_2$	24.85 mm	18.58 mm

Gambar 4.7 *hybrid* 90° setelah dioptimasi

Hasil simulasi *hybrid* 90° yang telah optimum dijelaskan dalam Tabel 4.7 dan Gambar 4.8.

Tabel 4.7 Parameter  $S$  pada Frekuensi 2.442 GHz

Parameter	Bahan I	Bahan II
$S_{11}$	$0.001466 \angle 96.16^{\circ}$	$0.003436 \angle -33.83^{\circ}$
$S_{21}$	$0.7052 \angle -175.7^{\circ}$	$0.675951 \angle -125.7^{\circ}$
$S_{31}$	$0.6898 \angle 94.73^{\circ}$	$0.66804 \angle 144.7^{\circ}$
$S_{41}$	$0.01042 \angle -143.4^{\circ}$	$0.0522056 \angle -111.7^{\circ}$

Gambar 4.8 Grafik *Magnetudo* dan *Phase* Parameter  $S$  Setelah dioptimasi

#### 4.4 Perancangan *Crossover*

Terdapat dua jenis *crossover* yang digunakan pada *butler matrix* 4x4 yaitu atas dan bawah. *Crossover* atas adalah yang terhubung langsung ke antena peradiasi, sehingga *port output* mengikuti jarak antar elemen *array* antena peradiasi. Rumus-rumus yang dipakai dalam perancangan dimensi *crossover* sama seperti pada perancangan *hybrid* 90°. Karena pada dasarnya *crossover* merupakan *hybrid* 90° yang disusun paralel sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.23.

Dimensi *crossover* terdiri dari tiga buah lengan seri dan dua lengan paralel yang panjangnya dua kali lengan paralel *hybrid* 90°. Panjang lengan seri ( $L_s$ ) dihitung dengan persamaan (2-62):

$$L = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_r \text{ eff}}} \text{ (meter)}$$

Bahan I	$L_s = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 2.442 \times 10^9 \sqrt{1.8712}} = 22.452 \text{ mm}$
---------	--

Bahan II	$L_s = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 2.442 \times 10^9 \sqrt{3.3304}} = 16.829 \text{ mm}$
----------	--

Panjang lengan paralel ( $L_p$ ) sama dengan dua kali lengan seri yaitu:

Bahan I	$L_p = 2 \times 22.4520 = 44.904 \text{ mm}$
---------	--

Bahan II	$L_p = 2 \times 16.8293 = 33.6587 \text{ mm}$
----------	---

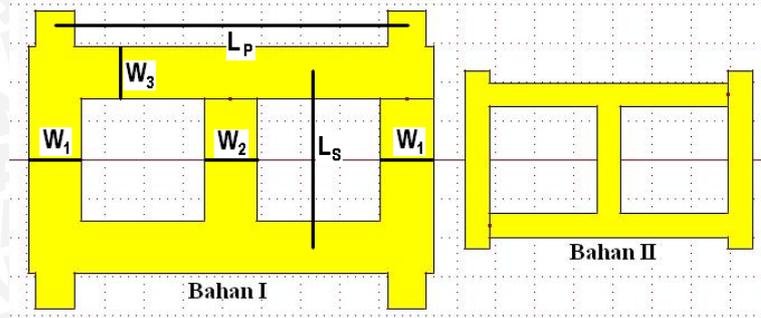
Lebar lengan seri dan paralel adalah sama besar yaitu dihitung menggunakan persamaan (2-63):

$$W = \frac{2h}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right]$$

Bahan I	$W = 6.7783 \text{ mm}$
---------	-------------------------

Bahan II	$W = 3.0612 \text{ mm}$
----------	-------------------------

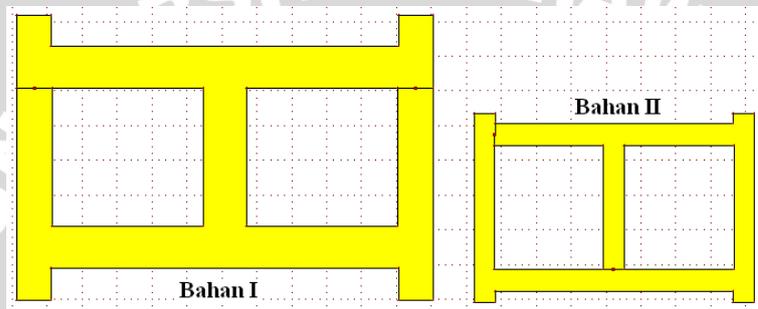
Berdasarkan perhitungan di atas maka terbentuklah *crossover* sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Dimensi awal *crossover*

#### 4.4.1 *Crossover* Bawah

Berikut ini hasil akhir optimasi dan spesifikasi desain dimensi *crossover* bawah diilustrasikan pada Gambar 4.10.



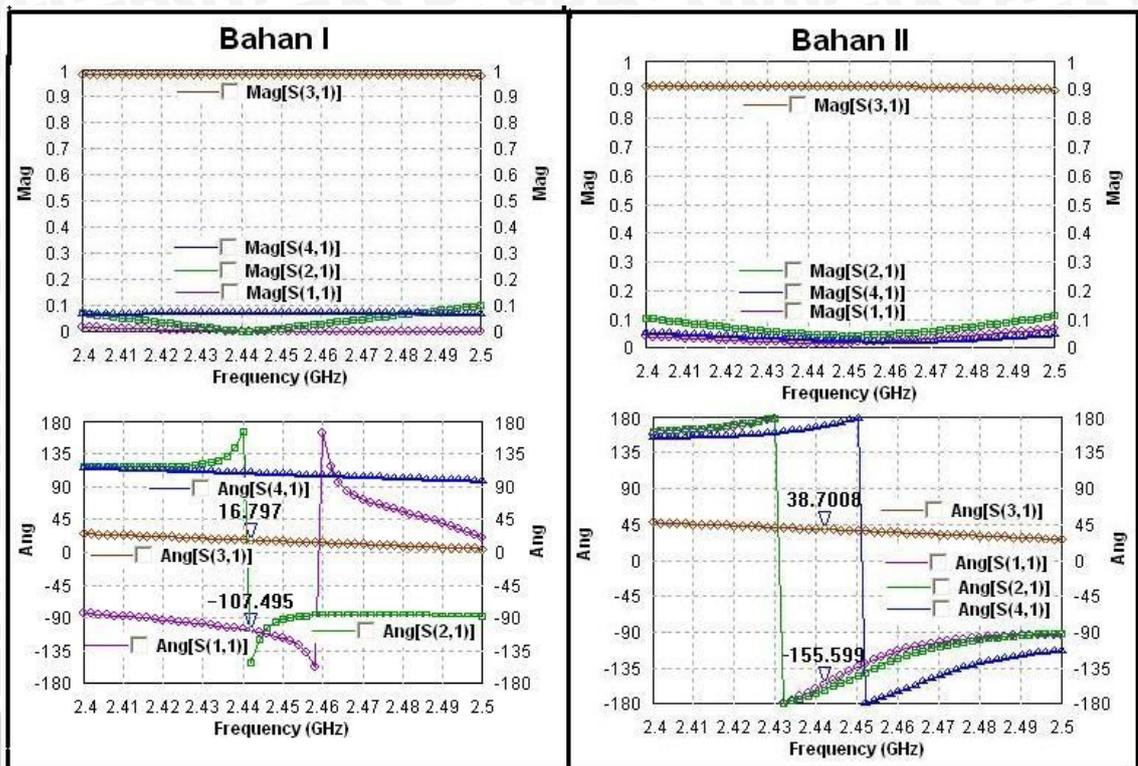
Gambar 4.10 Dimensi *crossover* bawah setelah dioptimasi

Tabel 4.8 menjelaskan dimensi *crossover* setelah dioptimasi

Tabel 4.8 Dimensi *crossover* setelah dioptimasi

Dimensi	Bahan I	Bahan II
$W_1$	5.065 mm	2.91 mm
$W_2$	6.2 mm	3.1 mm
$W_3$	6.04875 mm	3.16 mm
$L_s$	25.80875 mm	21.03 mm
$L_p$	54.595 mm	37.21 mm

Setelah dioptimasi maka didapatkan nilai *Magnetudo S* yang sesuai dengan yang diharapkan dalam perancangan sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.11



Gambar 4.11 Grafik *Magnetudo* dan *Phase S* pada Frekuensi 2.442 GHz Setelah dioptimasi

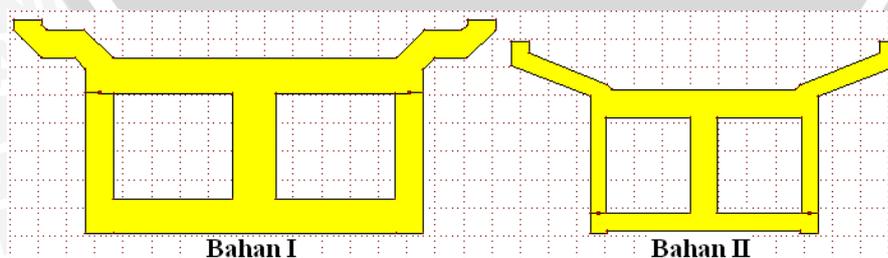
Parameter *S* hasil optimasi *crossover* bawah pada frekuensi 2.442 GHz dijelaskan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Parameter *S* pada Frekuensi 2.442 GHz

Parameter	Bahan I	Bahan II
$S_{11}$	$0.003875 \angle -107.5^{\circ}$	$0.01877 \angle -155.6^{\circ}$
$S_{21}$	$0.004 \angle -151.7^{\circ}$	$0.04747 \angle -162.3^{\circ}$
$S_{31}$	$0.983 \angle 16.8^{\circ}$	$0.9123 \angle 38.7^{\circ}$
$S_{41}$	$0.074542 \angle 108.7^{\circ}$	$0.02975 \angle 168.2^{\circ}$

#### 4.4.2 *Crossover Atas*

Spesifikasi dan hasil akhir optimasi pada desain dimensi *crossover* atas diilustrasikan pada Gambar 4.12 dan diterangkan dalam Tabel 4.10.

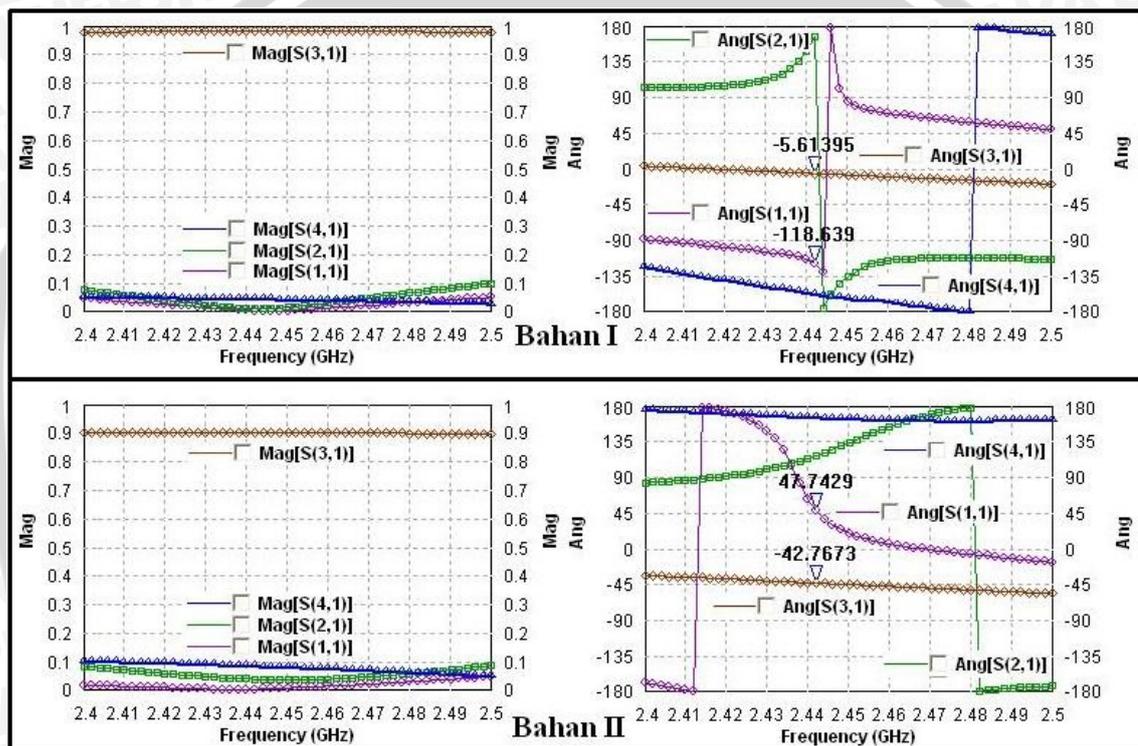


Gambar 4.12 Dimensi *crossover* atas setelah dioptimasi  
(Sumber : simulasi)

Tabel 4.10 Dimensi *crossover* atas setelah dioptimasi

Dimensi	Bahan I	Bahan II
$W_1$	4.97 mm	2.81 mm
$W_2$	7.5559 mm	4.71 mm
$W_3$	6.19375 mm	Atas=4.96 mm Bawah= 3 mm
$L_s$	24.94375 mm	20.95 mm
$L_p$	54.69 mm	37.31 mm

Hasil simulasi *crossover* atas yang sudah dioptimasi diilustrasikan pada Gambar 4.13

Gambar 4.13 Grafik *Magnetudo S crossover* atas setelah dioptimasi

Parameter  $S$  hasil optimasi *crossover* atas pada frekuensi 2.442 GHz dijelaskan dalam Tabel 4.11:

Tabel 4.11 Parameter  $S$  *crossover* atas pada Frekuensi 2.442 GHz

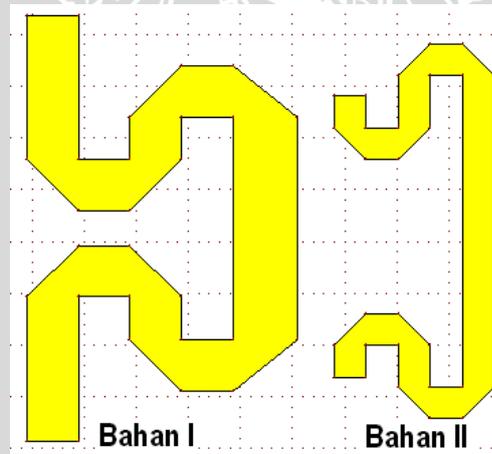
Parameter	Bahan I	Bahan II
$S_{11}$	0.004351 $\angle -118.6^0$	0.004518 $\angle 47.74^0$
$S_{21}$	0.01016 $\angle 165.7^0$	0.03985 $\angle 117.6^0$
$S_{31}$	0.9826 $\angle -5.614^0$	0.9017 $\angle -42.77^0$
$S_{41}$	0.04651 $\angle -156.9^0$	0.08679 $\angle 165.8^0$

#### 4.5 Perancangan *Phase Shifter*

Terdapat dua jenis *phase shifter* yang digunakan pada *butler matrix* 4x4 yaitu atas dan bawah. *Phase shifter* bawah adalah *phase shifter*  $45^\circ$  ditujukan untuk mengompensasi pergeseran fasa oleh *crossover* bawah. Sedangkan *phase shifter* atas digunakan untuk mengompensasi pergeseran fasa oleh *crossover* atas.

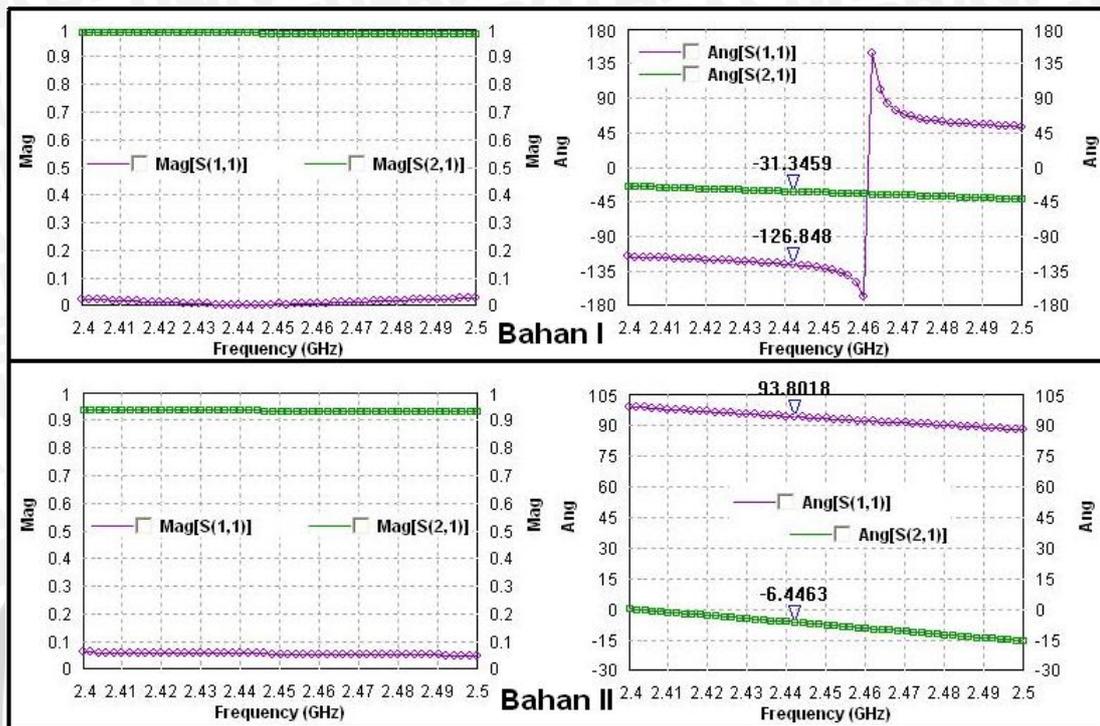
##### 4.5.1 Perancangan *Phase Shifter* Bawah

*Phase shifter*  $45^\circ$  digunakan untuk mengompensasi pergeseran fasa oleh *crossover* bawah. Sehingga pergeseran fasa yang dirancang adalah  $45^\circ$  dikurangi fasa  $S_{31}$  *crossover* bawah. Hasil simulasi *crossover* bawah menunjukkan  $S_{31} = 0.983 \angle 16.8^\circ$  untuk bahan pertama dan  $S_{31} = 0.9123 \angle 38.7^\circ$  untuk bahan kedua, sehingga fasa *phase shifter* yang harus dirancang untuk bahan pertama adalah untuk mengompensasi pergeseran fasa  $45^\circ - 16.8^\circ = 28.2^\circ$  dan bahan kedua adalah  $45^\circ - 38.7^\circ = 6.3^\circ$ . Dimensi *phase shifter* bawah yang sudah dioptimasi diilustrasikan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Dimensi *phase shifter* bawah

Hasil simulasi *phase shifter* bawah diilustrasikan pada Gambar 4.15 dan diterangkan dalam Tabel 4.12.



Gambar 4.15 Hasil simulasi *phase shifter* bawah

Tabel 4.12 Parameter *S* *Phase shifter* bawah pada Frekuensi 2.442 GHz

Parameter	Bahan I	Bahan II
$S_{11}$	$0.009343 \angle -126.8^{\circ}$	$0.0561 \angle 93.8^{\circ}$
$S_{21}$	$0.984 \angle -31.35^{\circ}$	$0.9344 \angle -6.446^{\circ}$

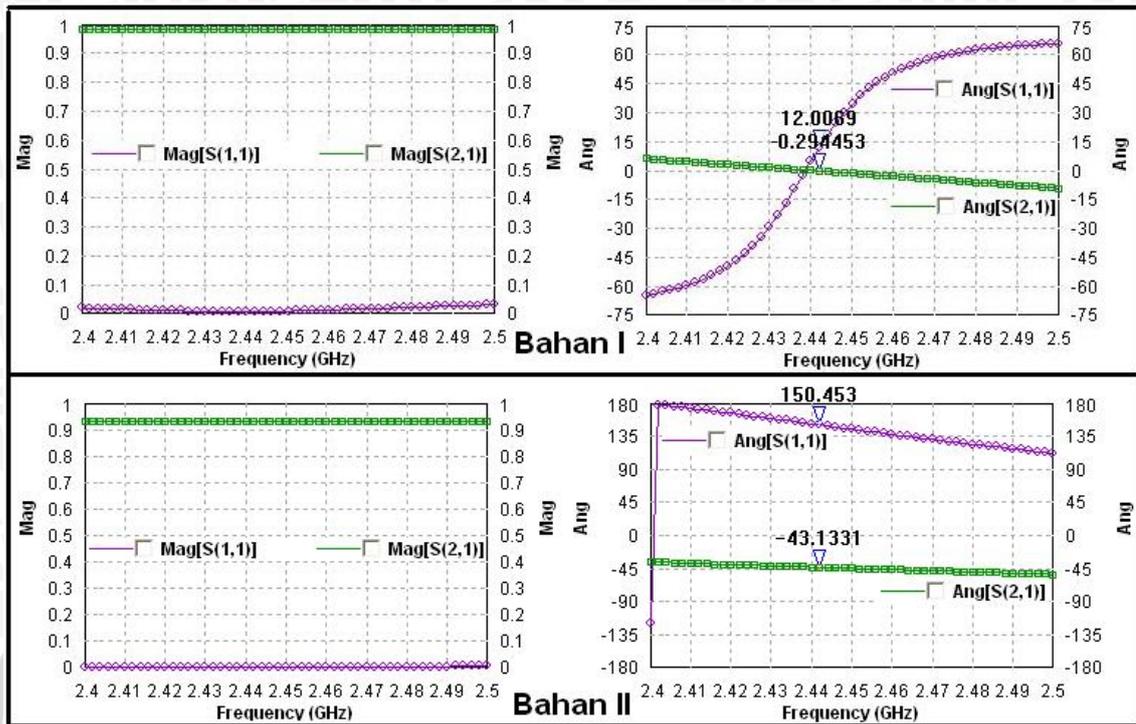
#### 4.5.2 Perancangan *Phase Shifter* Atas

*Phase shifter* atas digunakan untuk mengompensasi pergeseran fasa *crossover* atas. Berdasarkan hasil simulasi  $S_{31}$  pada *crossover* atas sebagaimana dijelaskan pada Tabel 4.11 maka fasa  $S_{21}$  *phase shifter* yang akan dirancang adalah  $-5.6^{\circ}$  untuk bahan I dan  $-42.77^{\circ}$  untuk bahan II. Berikut adalah dimensi rancangan *phase shifter* atas diilustrasikan pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Dimensi *phase shifter* atas

Hasil simulasi *phase shifter* atas diilustrasikan pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Hasil simulasi *phase shifter* atas

Hasil simulasi parameter *S Phase shifter* atas secara spesifik pada Frekuensi 2.442 GHz dijelaskan dalam Tabel 4.13.

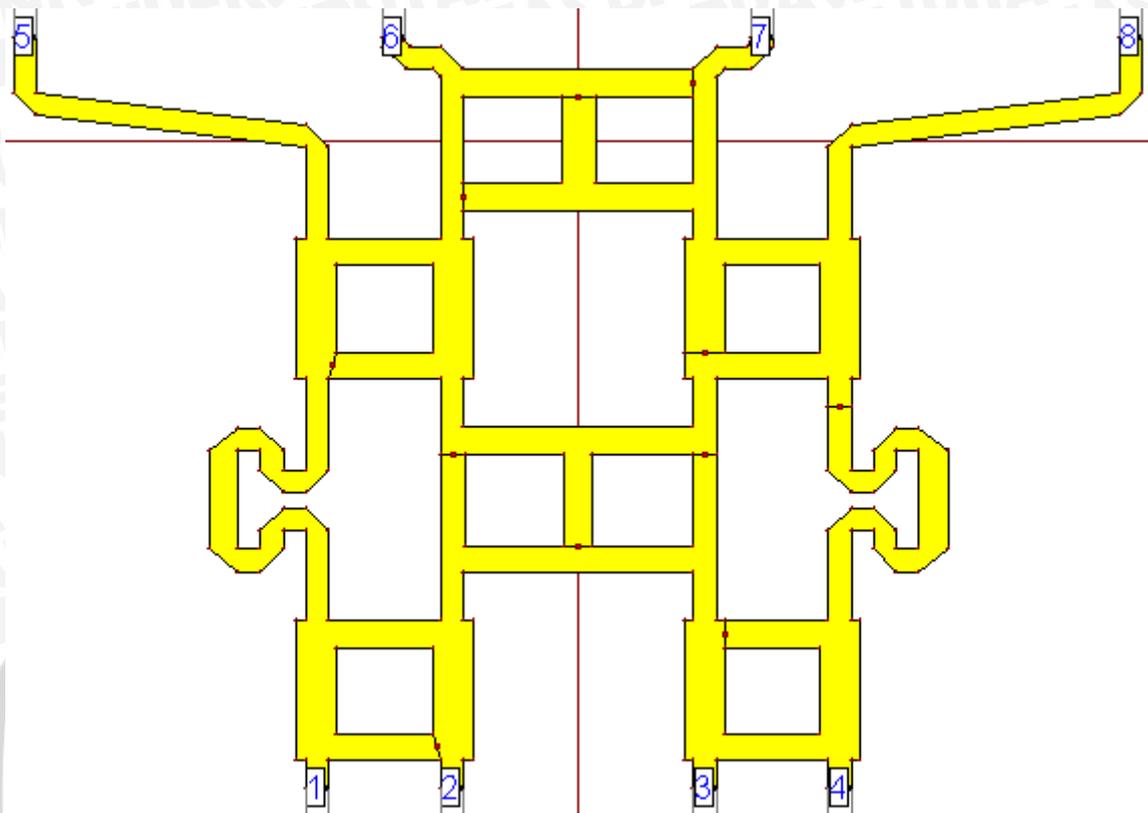
Tabel 4.13 Parameter *S Phase shifter* atas pada Frekuensi 2.442 GHz

Parameter	Bahan I	Bahan II
$S_{11}$	$0.007855 \angle 12.01^{\circ}$	$0.005059 \angle 150.5^{\circ}$
$S_{21}$	$0.9833 \angle -0.2945^{\circ}$	$0.9322 \angle -43.13^{\circ}$

#### 4.6 Desain Akhir *Butler Matrix* 4x4

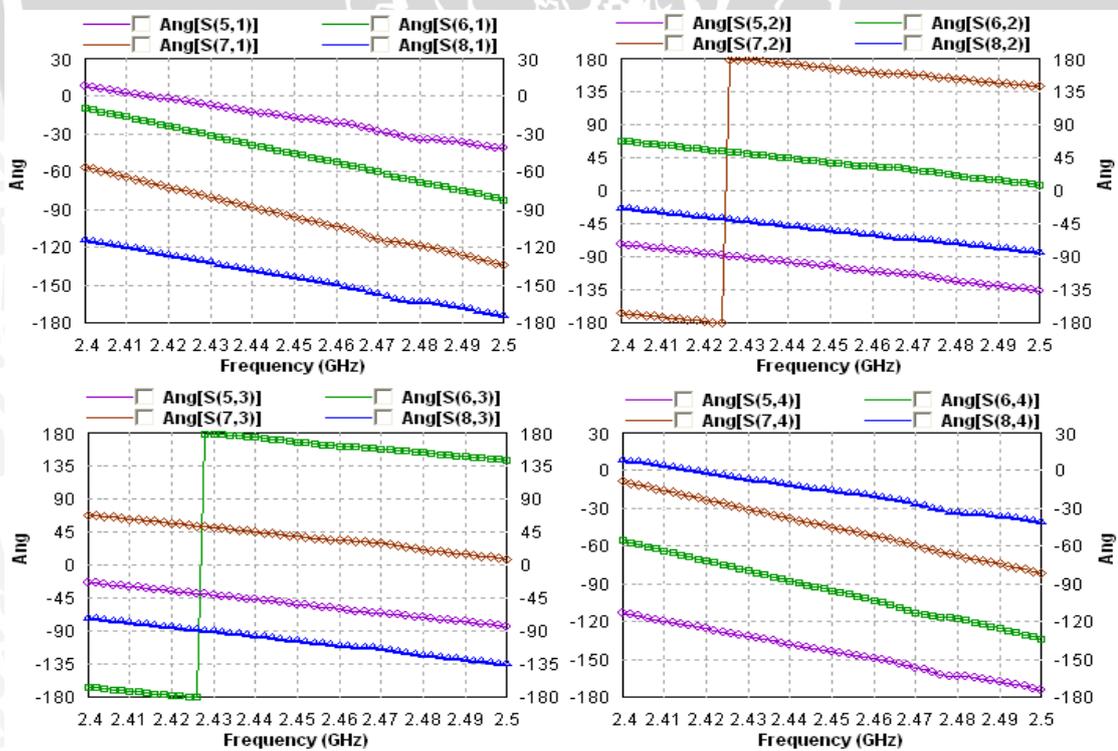
Berikut adalah gambar dan hasil simulasi *butler matrix* yang merupakan perpaduan dari empat buah *hybrid*  $90^{\circ}$ , dua buah *crossover*, dan empat buah *phase shifter* yang telah didesain sebelumnya diilustrasikan pada Gambar 4.18 untuk bahan I dan Gambar 4.21 untuk bahan II.

#### 4.6.1 Desain Akhir *Butler Matrix* 4x4 Bahan I



Gambar 4.18 Desain akhir *Butler Matrix* 4x4 bahan I

Hasil simulasi *butler matrix* 4x4 bahan I diilustrasikan pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19 Fasa keluaran *butler matrix* 4x4 untuk pencatutan pada *port-1*, *port-2*, *port-3*, dan *port-4*

Keterangan lebih jelas mengenai beda fasa antar *port* keluaran untuk masukan *port* yang berbeda dijelaskan dalam Tabel 4.14, 4.15, 4.16, dan 4.17.

Tabel 4.14 Beda fasa antar *port* keluaran untuk masukan pada *port-1* (bahan I)

No.	frekuensi	port 6-5	port 7-6	port 8-7
1	2.4	-17.175	-46.623	-57.52
2	2.402	-17.586	-46.82	-57.08
3	2.406	-18.428	-47.18	-56.33
4	2.41	-19.267	-47.54	-55.49
5	2.414	-20.124	-47.87	-54.67
6	2.418	-20.979	-48.2	-53.96
7	2.422	-21.983	-48.4	-53.16
8	2.426	-22.734	-48.8	-52.38
9	2.43	-23.674	-49	-51.73
10	2.434	-24.796	-49.08	-50.99
11	2.438	-25.76	-49.32	-50.14
<b>12</b>	<b>2.442</b>	<b>-26.66</b>	<b>-49.61</b>	<b>-49.26</b>
13	2.446	-27.65	-49.79	-48.6
14	2.45	-28.66	-50.13	-47.87
15	2.454	-29.71	-50.38	-47.14
16	2.458	-30.87	-50.69	-46.4
17	2.462	-31.7	-51.07	-45.8
18	2.466	-31.81	-52.51	-44.4
19	2.47	-32.42	-53.32	-43.4
20	2.474	-32.65	-52.12	-44.7
21	2.478	-32.94	-50.63	-45.8
22	2.482	-34.57	-50.07	-44
23	2.486	-36.42	-50.72	-42.5
24	2.49	-37.69	-51.19	-41.8
25	2.494	-38.79	-51.52	-41.1
26	2.498	-39.84	-51.7	-40.5
27	2.5	-40.38	-51.72	-40.2

Berdasarkan hasil simulasi dengan masukan *port-1* (Tabel 4.14) menunjukkan adanya kesalahan fasa keluaran. Idealnya jika sinyal masukan pada *port-1* maka beda fasa keluaran adalah  $-45^0$ . Pada frekuensi tengah 2.442 GHz menghasilkan kesalahan beda fasa keluaran antara *port-6* dan *port-5* adalah  $18.34^0$ , *port-7* dan *port-6* adalah  $4.61^0$ , dan *port-8* dan *port-7* adalah  $4.26^0$ . Namun kesalahan tersebut tidak berdampak terlalu besar terhadap arah *mainlobe* antena, sehingga masih dapat ditoleransi.

Tabel 4.15 Beda fasa antar *port* keluaran untuk masukan pada *port-2* (bahan I)

No.	frekuensi	port 6-5	port 7-6	port 8-7
1	2.4	140.23	126.23	142.12
2	2.402	140.33	126.27	142.05
3	2.406	140.53	126.25	141.99
4	2.41	140.7	126.35	141.83
5	2.414	140.87	126.46	141.68
6	2.418	141.02	126.58	141.53
7	2.422	141.18	126.7	141.39
8	2.426	141.32	126.93	141.18
9	2.43	141.41	127.13	141.03
10	2.434	141.36	127.37	140.91
11	2.438	141.37	127.53	140.69
<b>12</b>	<b>2.442</b>	<b>141.41</b>	<b>127.7</b>	<b>140.33</b>
13	2.446	141.53	127.77	140.22
14	2.45	139.31	127.99	140.12
15	2.454	141.68	128.22	139.93
16	2.458	141.97	127.83	139.71
17	2.462	143.29	126.91	138.64
18	2.466	144.07	127.23	136.78
19	2.47	142.99	128.31	137.06
20	2.474	143.63	129.27	137.48
21	2.478	143.81	130.49	136.91
22	2.482	143.33	131.37	136.61
23	2.486	143.23	131.77	136.41
24	2.49	143.42	132.08	136.12
25	2.494	143.5	132.5	296.09
26	2.498	143.664	133.036	135.21
27	2.5	143.637	133.263	135.01

Berdasarkan hasil simulasi dengan masukan *port-2* (Tabel 4.15) menunjukkan adanya kesalahan fasa keluaran. Idealnya jika sinyal masukan pada *port-2* maka beda fasa keluaran adalah  $135^{\circ}$ . Pada frekuensi tengah 2.442 GHz menghasilkan kesalahan beda fasa keluaran antara *port-6* dan *port-5* adalah  $6.41^{\circ}$ , *port-7* dan *port-6* adalah  $7.3^{\circ}$ , dan *port-8* dan *port-7* adalah  $5.33^{\circ}$ . Namun kesalahan tersebut tidak berdampak terlalu besar terhadap arah *mainlobe* antenna, sehingga masih dapat ditoleransi.

Tabel 4.16 Beda fasa antar *port* keluaran untuk masukan pada *port-3* (bahan I)

No.	frekuensi	port 6-5	port 7-6	port 8-7
1	2.4	-142.07	-126.32	-140.01
2	2.402	-141.99	-126.36	-140.1
3	2.406	-141.84	-126.45	-140.28
4	2.41	-141.68	-126.54	-140.46
5	2.414	-141.52	-126.65	-140.62
6	2.418	-141.37	-126.77	-140.78
7	2.422	-141.24	-126.89	-140.92
8	2.426	-141.1	-127.01	-141.06
9	2.43	-140.93	-127.18	-141.17
10	2.434	-140.71	-127.51	-141.14
11	2.438	-140.59	-127.74	-141.13
<b>12</b>	<b>2.442</b>	<b>-140.39</b>	<b>-128.04</b>	<b>-141.13</b>
13	2.446	-140.23	-128.25	-141.25
14	2.45	-140.04	-128.44	-141.36
15	2.454	-139.87	-128.48	-141.32
16	2.458	-139.6	-128.06	-141.64
17	2.462	-138.42	-127.25	-142.95
18	2.466	-136.82	-127.38	-143.72
19	2.47	-137.12	-128.4	-142.6
20	2.474	-137.22	-129.39	-143.41
21	2.478	-136.69	-130.61	-143.69
22	2.482	-136.34	-131.61	-143.09
23	2.486	-136.17	-132.03	-142.97
24	2.49	-135.89	-132.35	-143.15
25	2.494	-135.49	-132.77	-143.23
26	2.498	-135	-132.92	-143.29
27	2.5	-134.8	-133.529	-143.371

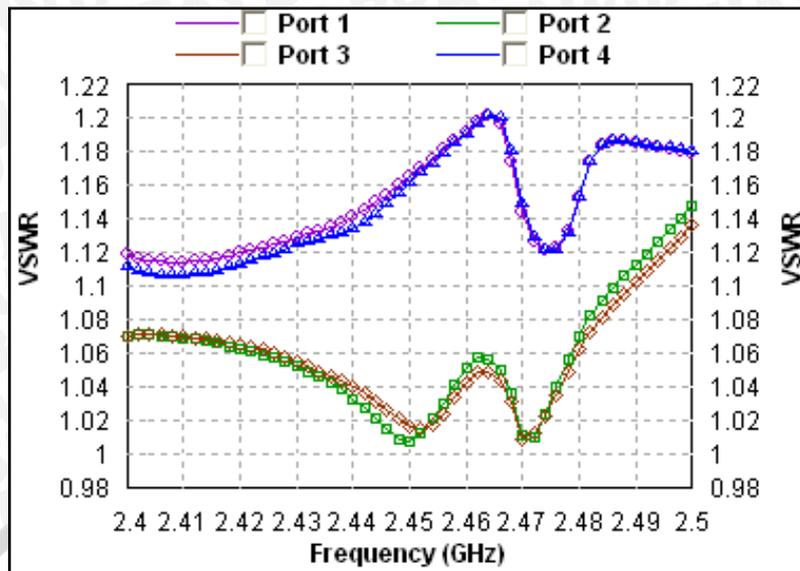
Berdasarkan hasil simulasi dengan masukan *port-3* (Tabel 4.16) menunjukkan adanya kesalahan fasa keluaran. Idealnya jika sinyal masukan pada *port-3* maka beda fasa keluaran adalah  $-135^0$ . Pada frekuensi tengah 2.442 GHz menghasilkan kesalahan beda fasa keluaran antara *port-6* dan *port-5* adalah  $5.39^0$ , *port-7* dan *port-6* adalah  $6.96^0$ , dan *port-8* dan *port-7* adalah  $6.13^0$ . Namun kesalahan tersebut tidak berdampak terlalu besar terhadap arah *mainlobe* antena, sehingga masih dapat ditoleransi.

Tabel 4.17 Beda fasa antar *port* keluaran untuk masukan pada *port-4* (bahan I)

No.	frekuensi	port 6-5	port 7-6	port 8-7
1	2.4	57.69	46.45	17.312
2	2.402	57.25	46.65	17.732
3	2.406	56.5	47.01	18.576
4	2.41	55.67	47.36	19.416
5	2.414	54.84	47.7	20.271
6	2.418	54.13	48.01	21.144
7	2.422	53.34	48.3	22.024
8	2.426	52.56	48.58	22.91
9	2.43	51.91	48.74	23.871
10	2.434	51.2	48.82	24.951
11	2.438	50.48	49.17	25.82
12	2.442	49.66	49.67	26.68
13	2.446	48.93	49.95	27.72
14	2.45	48.15	50	28.92
15	2.454	47.36	50.33	29.88
16	2.458	46.6	50.48	31.07
17	2.462	46	50.8	31.95
18	2.466	44.4	52.51	32.07
19	2.47	43.5	53.24	32.68
20	2.474	44.9	51.84	32.94
21	2.478	45.8	50.49	33.14
22	2.482	44.1	49.94	34.78
23	2.486	42.7	50.5	36.65
24	2.49	41.9	51.06	37.94
25	2.494	41.3	51.29	39.04
26	2.498	40.7	51.46	40.1
27	2.5	40.4	51.48	40.64

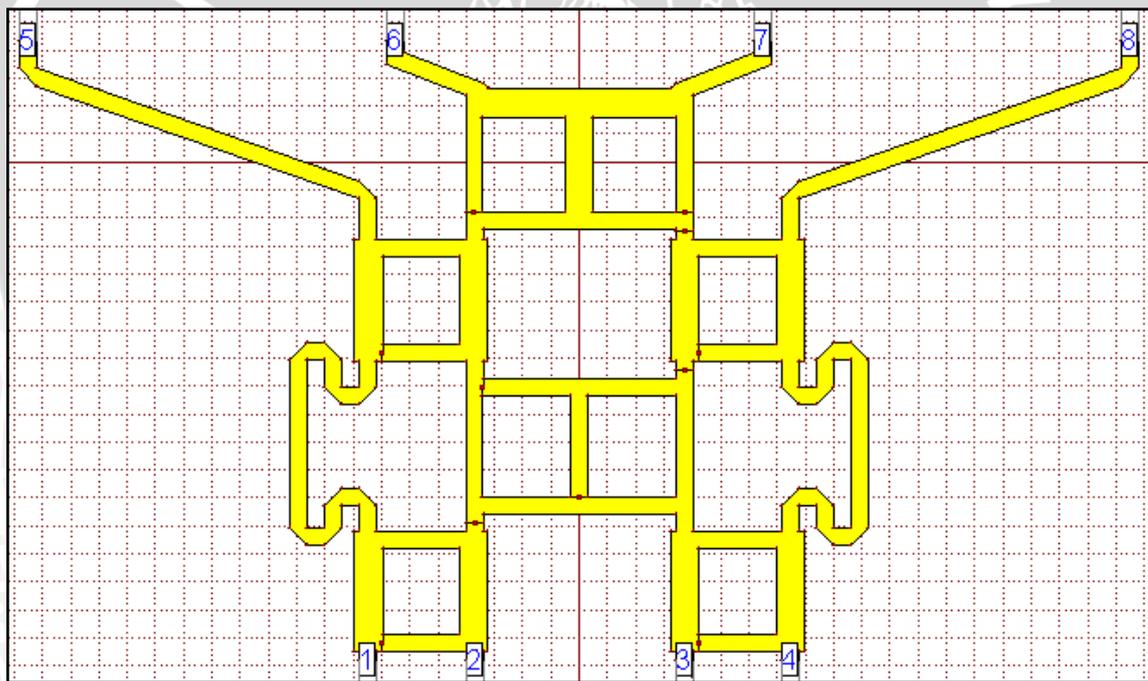
Berdasarkan hasil simulasi dengan masukan *port-4* (Tabel 4.17) menunjukkan adanya kesalahan fasa keluaran. Idealnya jika sinyal masukan pada *port-1* maka beda fasa keluaran adalah  $45^0$ . Pada frekuensi tengah 2.442 GHz menghasilkan kesalahan beda fasa keluaran antara *port-6* dan *port-5* adalah  $4.66^0$ , *port-7* dan *port-6* adalah  $4.67^0$ , dan *port-8* dan *port-7* adalah  $18.32^0$ . Namun kesalahan tersebut tidak berdampak terlalu besar terhadap arah *mainlobe* antena, sehingga masih dapat ditoleransi.

Hasil simulasi *butler matrix* jika ditinjau dari nilai *VSWR* maka *butler matrix* dinyatakan baik dan memenuhi syarat karena pada *range* frekuensi 2.4 – 2.5 GHz nilai *VSWR input* (*port-1*, 2, 3, dan 4) dibawah dua, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.20.



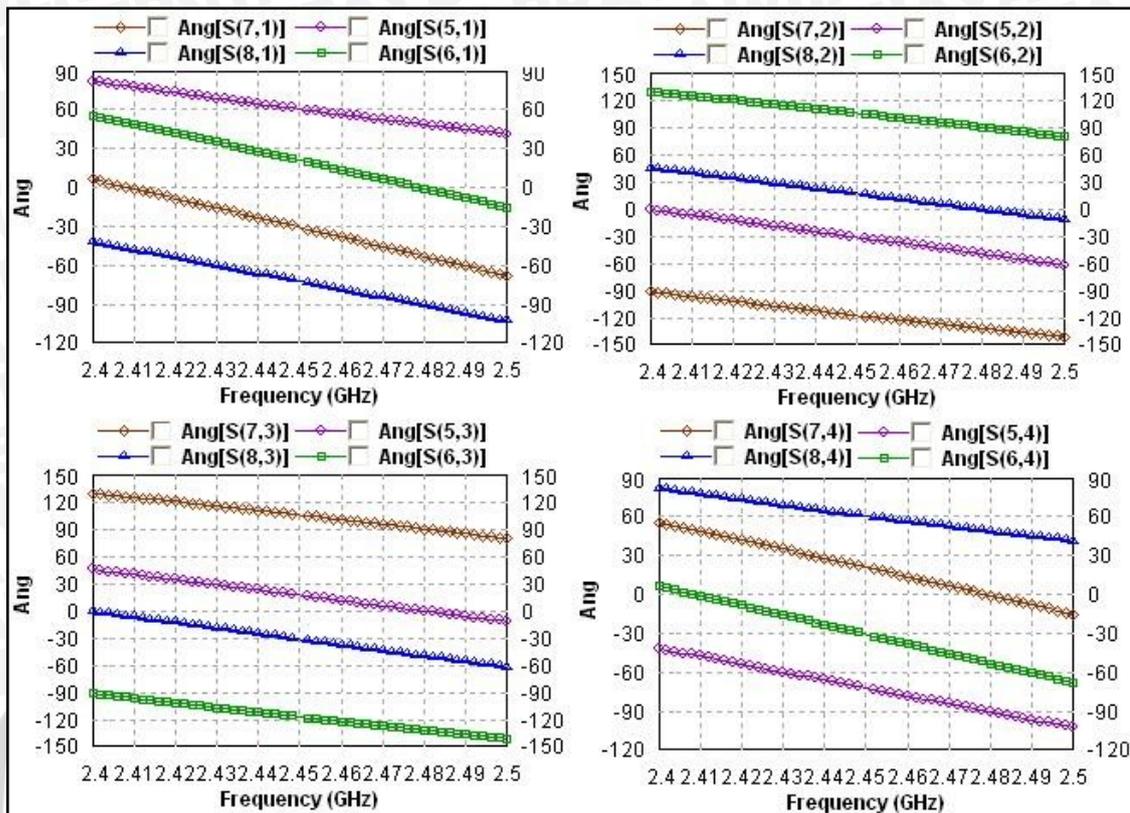
Gambar 4.20 Kurva *VSWR* input butler matrix

#### 4.6.2 Desain Akhir *Butler Matrix* 4x4 Bahan II



Gambar 4.21 Desain akhir *Butler Matrix* 4x4 bahan II

Hasil simulasi *butler matrix* 4x4 bahan II diilustrasikan pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Grafik fasa keluaran *butler matrix* 4x4 untuk pencatuan pada *port-1*, *port-2*, *port-3*, dan *port-4*

Keterangan lebih jelas mengenai beda fasa antar *port* keluaran untuk masukan *port* yang berbeda dijelaskan dalam Tabel 4.18, 4.19, 4.20, dan 4.21.

Tabel 4.18 Beda fasa antar *port* keluaran untuk masukan pada *port-1* (bahan II)

No.	frekuensi	port 6-5	port 7-6	port 8-7
1	2,4	-26,41	-49,303	-48,107
2	2,402	-26,84	-49,426	-47,854
3	2,406	-27,71	-49,666	-47,334
4	2,41	-28,62	-49,892	-46,818
5	2,414	-29,57	-50,104	-46,296
6	2,418	-30,53	-50,313	-45,777
7	2,422	-31,55	-50,508	-45,252
8	2,426	-32,6	-50,69	-44,72
9	2,43	-33,68	-50,86	-44,2
10	2,434	-34,78	-51,04	-43,66
11	2,438	-35,92	-51,19	-43,14
<b>12</b>	<b>2,442</b>	<b>-37,09</b>	<b>-51,34</b>	<b>-42,6</b>
13	2,446	-38,29	-51,48	-42,07
14	2,448	-38,9	-51,54	-41,8
15	2,452	-40,13	-51,68	-41,26
16	2,454	-40,77	-51,73	-41
17	2,458	-42,05	-51,85	-40,45
18	2,462	-43,35	-51,97	-39,91
19	2,466	-44,678	-52,072	-39,37
20	2,47	-46,03	-52,17	-38,83
21	2,474	-47,387	-52,263	-38,29
22	2,478	-48,77	-52,35	-37,75
23	2,482	-50,177	-52,433	-37,21
24	2,486	-51,608	-52,502	-36,68
25	2,49	-53,06	-52,57	-36,14
26	2,494	-54,52	-52,63	-35,62
27	2,498	-56	-52,68	-35,1
28	2,5	-56,76	-52,7	-34,81

Berdasarkan hasil simulasi dengan masukan *port-1* (Tabel 4.18) menunjukkan adanya kesalahan fasa keluaran. Idealnya jika sinyal masukan pada *port-1* maka beda fasa keluaran adalah  $-45^{\circ}$ . Pada frekuensi tengah 2.442 GHz menghasilkan kesalahan beda fasa keluaran antara *port-6* dan *port-5* adalah  $7,91^{\circ}$ , *port-7* dan *port-6* adalah  $6,34^{\circ}$ , dan *port-8* dan *port-7* adalah  $2,4^{\circ}$ . Namun kesalahan tersebut tidak berdampak terlalu besar terhadap arah *mainlobe* antenna, sehingga masih dapat ditoleransi.

Tabel 4.19 Beda fasa antar *port* keluaran untuk masukan pada *port-2* (bahan II)

No.	frekuensi	port 6-5	port 7-6	port 8-7
1	2.4	129.9071	139.54	136.32
2	2.402	130.212	139.37	136.28
3	2.406	130.824	139.04	136.19
4	2.41	131.441	138.71	136.08
5	2.414	132.063	138.39	135.96
6	2.418	132.59	138.2	135.79
7	2.422	133.22	137.9	135.62
8	2.426	133.76	137.7	135.45
9	2.43	134.2	137.6	135.27
10	2.434	134.75	137.4	135.07
11	2.438	135.21	137.4	134.77
<b>12</b>	<b>2.442</b>	<b>135.67</b>	<b>137.3</b>	<b>134.57</b>
13	2.446	136.13	137.3	134.26
14	2.448	136.37	137.3	134.1
15	2.452	136.94	137.2	133.78
16	2.454	137.08	137.3	133.62
17	2.458	137.46	137.4	133.3
18	2.462	137.91	137.52	132.878
19	2.466	138.33	137.59	132.556
20	2.47	138.74	137.76	132.133
21	2.474	139.15	137.94	131.713
22	2.478	139.55	138.13	131.2958
23	2.482	139.93	138.33	130.881
24	2.486	140.31	138.53	130.47
25	2.49	140.69	138.83	129.962
26	2.494	141.06	139.03	129.559
27	2.498	141.42	139.34	129.06
28	2.5	141.61	139.49	128.82

Berdasarkan hasil simulasi dengan masukan *port-2* (Tabel 4.19) menunjukkan adanya kesalahan fasa keluaran. Idealnya jika sinyal masukan pada *port-2* maka beda fasa keluaran adalah  $135^{\circ}$ . Pada frekuensi tengah 2.442 GHz menghasilkan kesalahan beda fasa keluaran antara *port-6* dan *port-5* adalah  $0.67^{\circ}$ , *port-7* dan *port-6* adalah  $2.3^{\circ}$ , dan *port-8* dan *port-7* adalah  $0.43^{\circ}$ . Namun kesalahan tersebut tidak berdampak terlalu besar terhadap arah *mainlobe* antena, sehingga masih dapat ditoleransi.

Tabel 4.20 Beda fasa antar *port* keluaran untuk masukan pada *port-3*

No.	frekuensi	port 6-5	port 7-6	port 8-7
1	2.4	-136.39	-139.69	-130.042
2	2.402	-136.35	-139.42	-130.445
3	2.406	-136.26	-139.09	-131.056
4	2.41	-136.16	-138.86	-131.571
5	2.414	-136.03	-138.54	-132.191
6	2.418	-135.92	-138.3	-132.72
7	2.422	-135.75	-138	-133.35
8	2.426	-135.58	-137.8	-133.88
9	2.43	-135.3	-137.8	-134.32
10	2.434	-135.11	-135.6	-136.87
11	2.438	-134.91	-137.5	-135.32
<b>12</b>	<b>2.442</b>	<b>-134.61</b>	<b>-137.5</b>	<b>-135.78</b>
13	2.446	-134.3	-137.5	-136.25
14	2.448	-134.14	-137.5	-136.48
15	2.452	-133.82	-137.5	-136.95
16	2.454	-133.66	-137.5	-137.18
17	2.458	-133.34	-137.6	-137.56
18	2.462	-133.021	-137.63	-138.01
19	2.466	-132.599	-137.8	-138.41
20	2.47	-132.178	-137.97	-138.83
21	2.474	-131.859	-138.05	-139.23
22	2.478	-131.443	-138.24	-139.63
23	2.482	-130.929	-138.54	-140.01
24	2.486	-130.519	-138.74	-140.39
25	2.49	-130.111	-138.94	-140.76
26	2.494	-129.608	-139.25	-141.13
27	2.498	151.09	-139.34	-141.5
28	2.5	-128.87	-139.71	-141.67

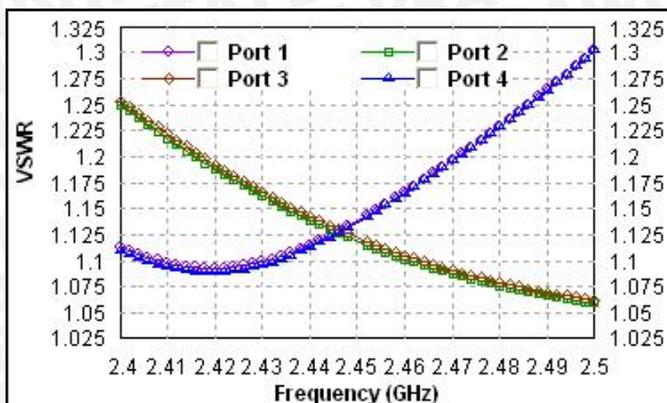
Berdasarkan hasil simulasi dengan masukan *port-3* (Tabel 4.20) menunjukkan adanya kesalahan fasa keluaran. Idealnya jika sinyal masukan pada *port-3* maka beda fasa keluaran adalah  $-45^0$ . Pada frekuensi tengah 2.442 GHz menghasilkan kesalahan beda fasa keluaran antara *port-6* dan *port-5* adalah  $0.39^0$ , *port-7* dan *port-6* adalah  $2.5^0$ , dan *port-8* dan *port-7* adalah  $0.78^0$ . Namun kesalahan tersebut tidak berdampak terlalu besar terhadap arah *mainlobe* antena, sehingga masih dapat ditoleransi.

Tabel 4.21 Beda fasa antar *port* keluaran untuk masukan pada *port-4*

No.	frekuensi	port 6-5	port 7-6	port 8-7
1	2.4	47.98	49.27	26.35
2	2.402	47.718	49.392	26.77
3	2.406	47.2	49.63	27.65
4	2.41	46.686	49.844	28.57
5	2.414	46.165	50.065	29.51
6	2.418	45.638	50.262	30.49
7	2.422	45.116	50.454	31.5
8	2.426	44.6	50.63	32.55
9	2.43	44.07	50.81	33.63
10	2.434	43.54	50.97	34.74
11	2.438	43.01	51.13	35.85
<b>12</b>	<b>2.442</b>	<b>42.47</b>	<b>51.28</b>	<b>37.04</b>
13	2.446	41.94	51.41	38.25
14	2.448	41.67	51.48	38.85
15	2.452	41.14	51.6	40.1
16	2.454	40.86	51.67	40.73
17	2.458	40.33	51.78	42.01
18	2.462	39.79	51.89	43.31
19	2.466	39.24	52.001	44.639
20	2.47	38.71	52.089	45.981
21	2.474	38.17	52.193	47.337
22	2.478	37.64	52.271	48.719
23	2.482	37.09	52.354	50.116
24	2.486	36.56	52.424	51.546
25	2.49	36.02	52.492	52.998
26	2.494	35.5	52.55	54.46
27	2.498	34.94	52.6	55.94
28	2.5	34.66	52.58	56.73

Berdasarkan hasil simulasi dengan masukan *port-4* (Tabel 4.21) menunjukkan adanya kesalahan fasa keluaran. Idealnya jika sinyal masukan pada *port-4* maka beda fasa keluaran adalah  $45^0$ . Pada frekuensi tengah 2.442 GHz menghasilkan kesalahan beda fasa keluaran antara *port-6* dan *port-5* adalah  $2.53^0$ , *port-7* dan *port-6* adalah  $6.28^0$ , dan *port-8* dan *port-7* adalah  $7.96^0$ . Namun kesalahan tersebut tidak berdampak terlalu besar terhadap arah *mainlobe* antena, sehingga masih dapat ditoleransi.

Hasil simulasi *butler matrix* jika ditinjau dari nilai *VSWR* maka *butler matrix* dinyatakan baik dan memenuhi syarat karena pada *range* frekuensi 2.4 – 2.5 GHz nilai *VSWR input* (*port-1*, 2, 3, dan 4) dibawah dua, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.23.



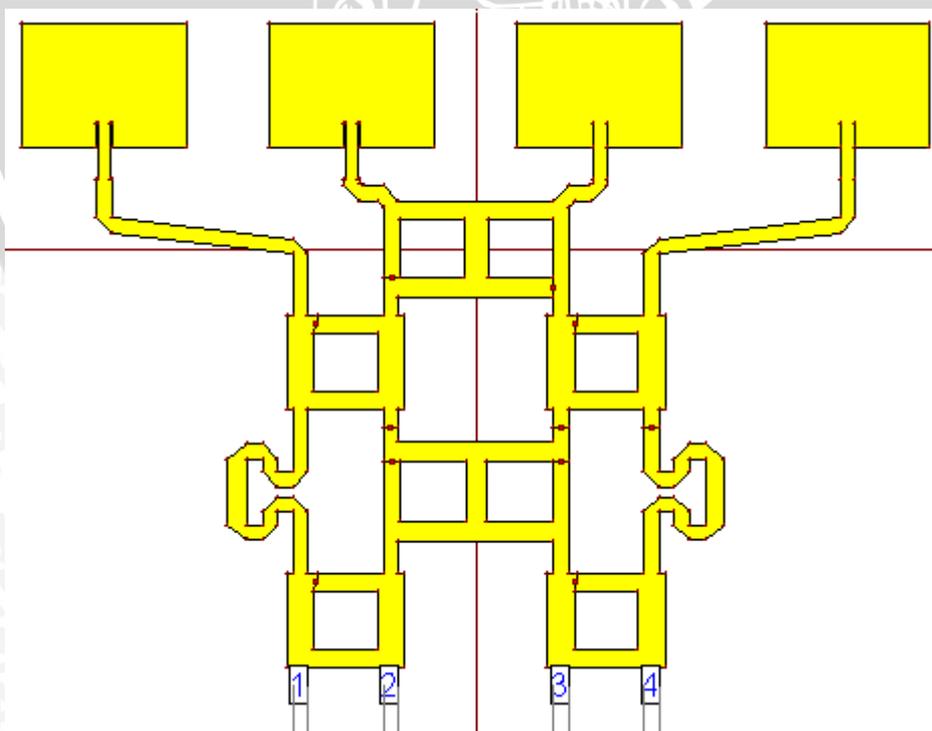
Gambar 4.23 VSWR input Butler Matrix 4x4 bahan II

#### 4.7 Desain Akhir Antena Switched Beam

Setelah semua desain komponen sudah selesai maka proses terakhir adalah menggabung menjadi sebuah antena *array* dengan sistem *switched beam* berupa *butler matrix* 4x4 sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.24 untuk bahan I dan 4.31 untuk bahan II.

##### 4.7.1 Antena Switched Beam Bahan I

Berikut ini pada Gambar 4.24 adalah ilustrasi susunan antena lengkap dengan *butler matrix* bahan I.

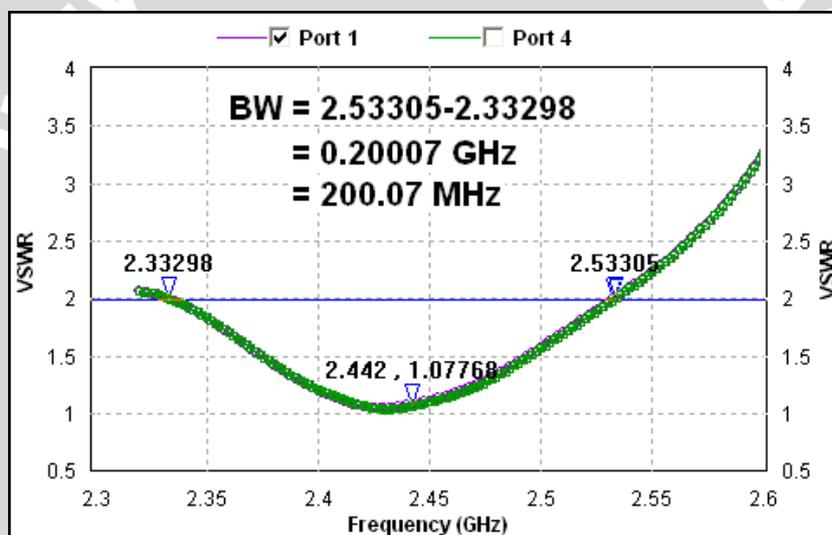


Gambar 4.24 Desain akhir antena *switched beam* bahan I

Langkah selanjutnya adalah simulasi menggunakan *software* IE3D untuk mencari parameter-parameter antenna berupa *VSWR*, *bandwidth*, *return loss*, *gain*, dan pola radiasi. Untuk simulasi *VSWR* dan *return loss*, pencatuan diberikan ke semua *port* dengan nilai daya yang sama besar atau *uniform*. Sedangkan untuk simulasi pola radiasi dan *gain*, dilakukan bergantian pada salah satu *port*. Sehingga didapatkan pola radiasi dan *gain* yang berbeda setiap pencatuan masing-masing *port*.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai *VSWR* dan *return loss* pada pencatuan *port-1* mirip dengan pencatuan pada *port-4*, sedangkan pencatuan pada *port-2* mirip dengan pencatuan *port-3*. Oleh karena itu, hasil simulasi (*VSWR* dan *return loss*) *port-1* dan 4 digabung, demikian juga *port-2* dan 3 untuk memudahkan dan meringkas penghitungan *bandwidth*.

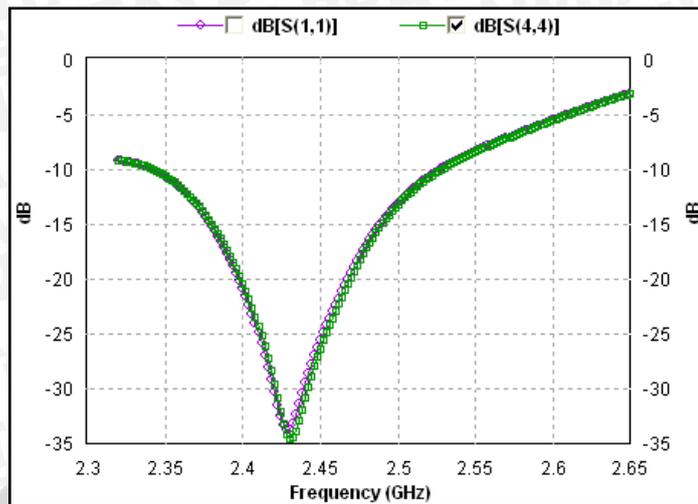
Hasil simulasi *VSWR* pencatuan *port-1* dan 4 diilustrasikan pada Gambar 4.25.



Gambar 4.25. Grafik *VSWR* untuk pencatuan *port-1* dan 4

Berdasarkan grafik *VSWR* Gambar 4.25, maka *bandwidth* dihitung dengan cara menyelisihkan antara dua nilai frekuensi yang memiliki nilai *VSWR* sama (bernilai dua). Pada Gambar 4.25 diilustrasikan bahwa hasil simulasi pencatuan *port-1* dan 4 memiliki *bandwidth* 200.07 MHz yaitu pada *range* frekuensi 2.33298 sampai 2.53305 GHz. Berdasarkan tujuan awal, bahwa frekuensi kerja yang direncanakan adalah antara 2.4 – 2.4835 GHz (*bandwidth*=83.5 MHz), maka *bandwidth* antenna tersebut dinyatakan memenuhi syarat.

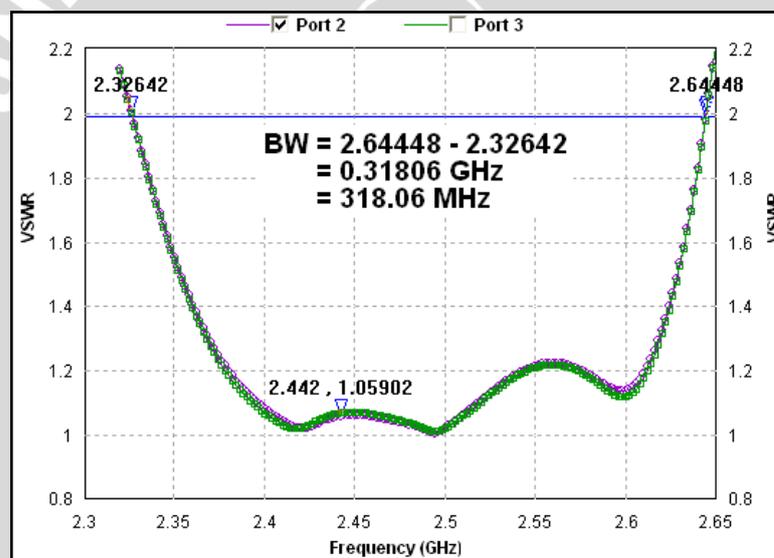
Hasil simulasi *return loss* pada pencatuan *port-1* dan 4 diilustrasikan pada Gambar 4.26.



Gambar 4.26. Grafik *return loss* antenna pada pencatuan *port-1* dan *4*

Hasil simulasi *VSWR* pada pencatuan *port-2* dan *3* diilustrasikan pada Gambar

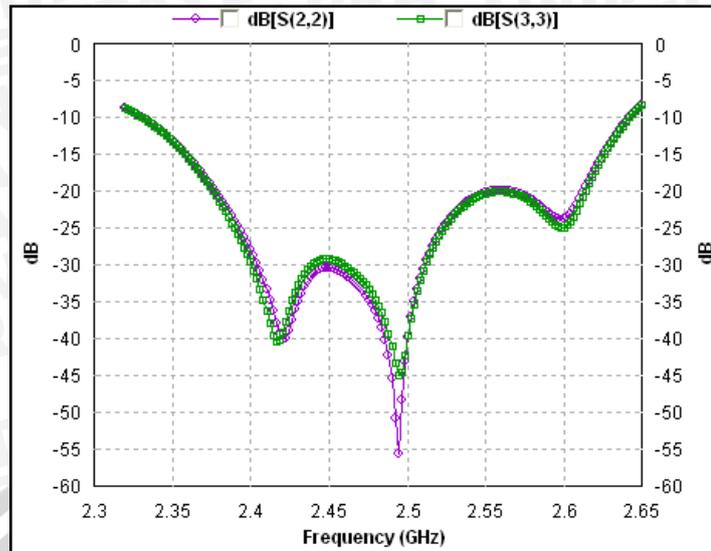
4.27



Gambar 4.27. Grafik *VSWR* untuk pencatuan *port-2* dan *3*  
(Sumber : simulasi)

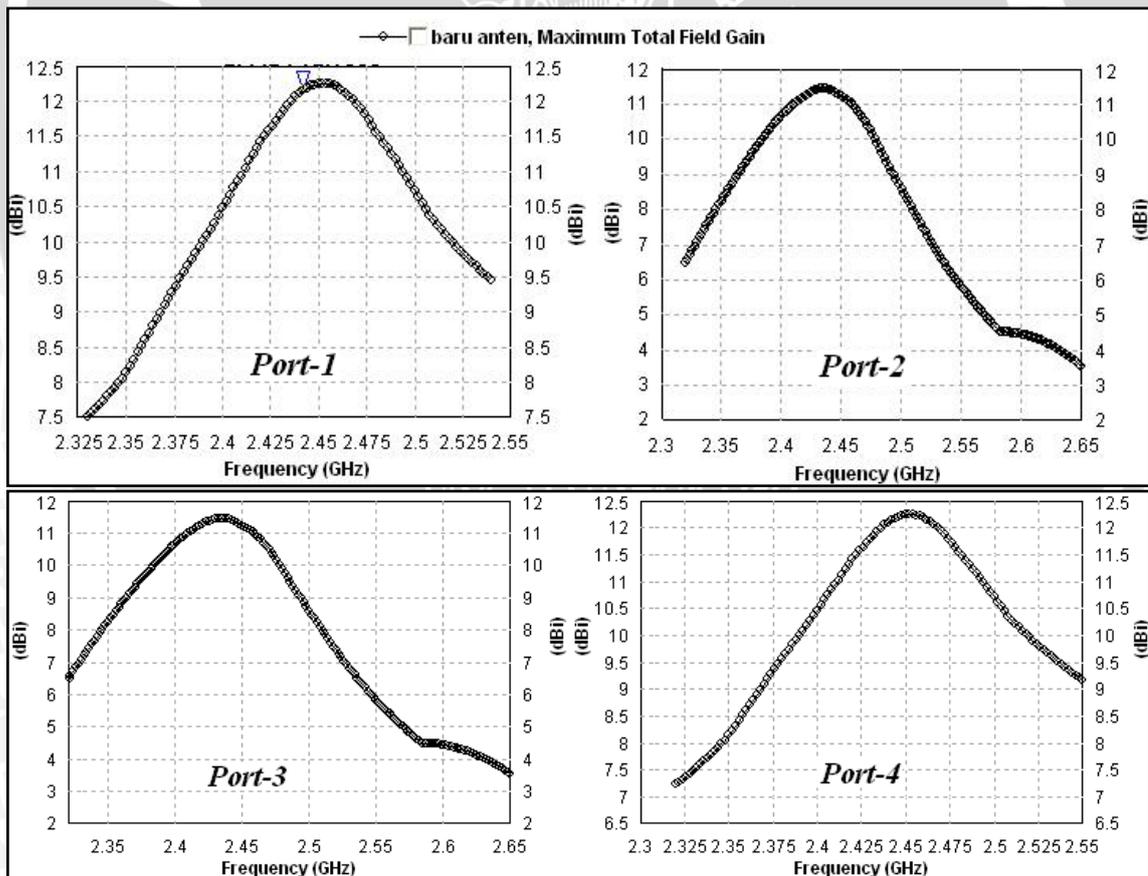
Pada Gambar 4.27 diilustrasikan bahwa hasil simulasi pencatuan *port-2* dan *3* memiliki *bandwidth* 318.06 MHz yaitu pada range frekuensi 2.32642 sampai 2.64448 GHz. Jadi, *bandwidth* antenna tersebut dinyatakan sudah memenuhi syarat berdasarkan tujuan awal perancangan.

Hasil simulasi *return loss* pada pencatuan *port-2* dan *3* diilustrasikan pada Gambar 4.28.



Gambar 4.28 Grafik *return loss* antenna pada pencatuan *port-2* dan *3*

Hasil simulasi *gain* pencatuan *port-1*, *2*, *3*, dan *4* diilustrasikan pada Gambar 4.29.



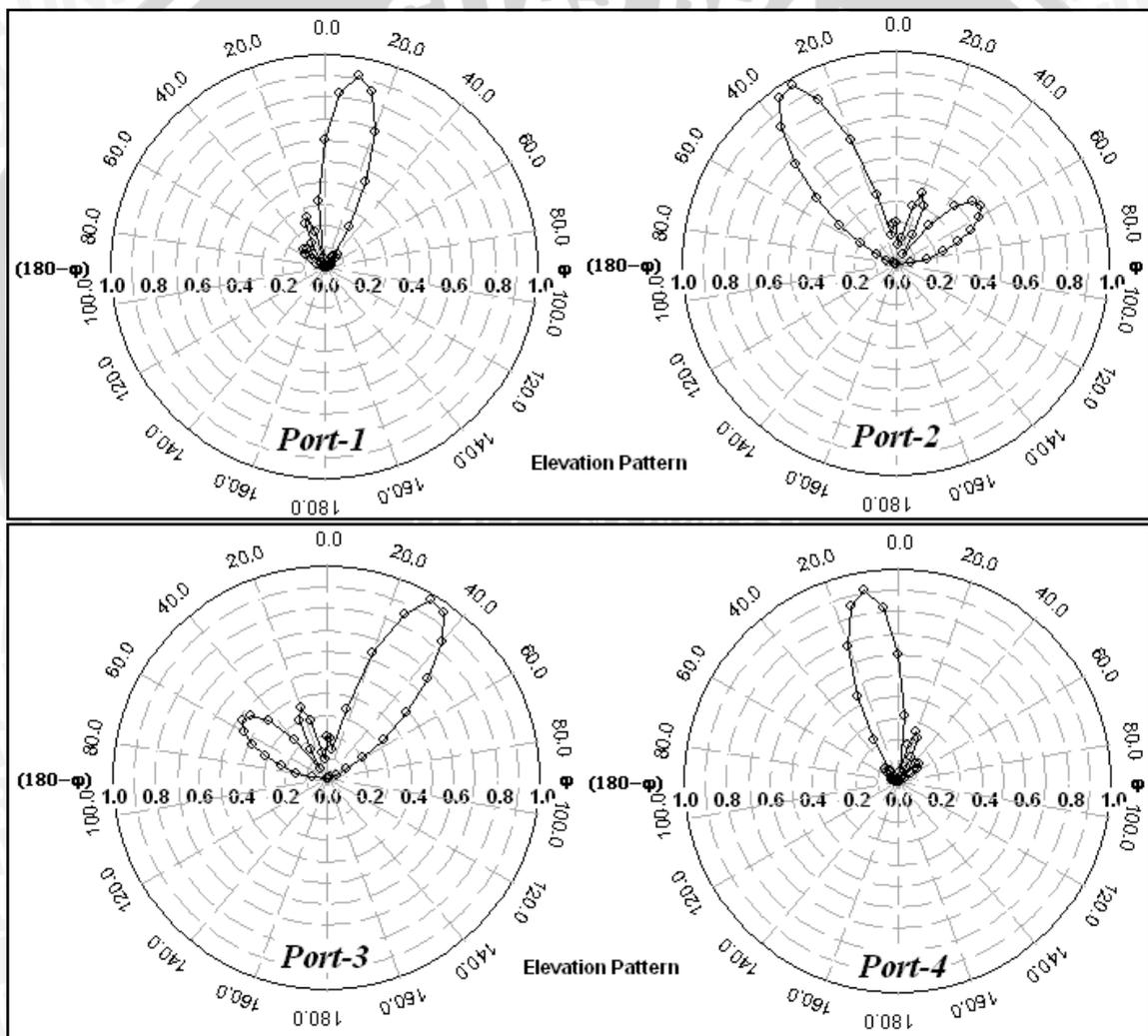
Gambar 4.29 Grafik *gain* untuk pencatuan *port-1*, *2*, *3*, dan *4*

Hasil simulasi menunjukkan bahwa *gain* pada pencatuan *port-1* dan *port-4* adalah mirip. Kedua *port* memiliki *gain* maksimum pada frekuensi 2.452 GHz yaitu

bernilai 12.2485 dBi (*port-1*) dan 12.2374 dBi (*port-4*). Sedangkan pada frekuensi 2.442 GHz *gain* antenna pada pencatuan kedua *port* bernilai 12.1503 dBi (*port-1*) dan 12.1372 dBi (*port-4*).

Hasil simulasi menunjukkan bahwa *gain* pada pencatuan *port-2* dan *port-3* adalah mirip. Kedua *port* memiliki *gain* maksimum pada frekuensi 2.436 GHz yaitu bernilai 11.4362 dBi (*port-2*) dan 11.4442 dBi (*port-3*). Sedangkan pada frekuensi 2.442 GHz *gain* antenna pada pencatuan kedua *port* bernilai 11.3893 dBi (*port-2*) dan 11.3965 dBi (*port-3*).

Berikut ini adalah hasil simulasi pola radiasi pada pencatuan *port-1*, 2,3, dan 4 diilustrasikan pada Gambar 4.30.



Gambar 4.30 Grafik polar pola radiasi antenna pada pencatuan *port-1*, 2,3, dan 4

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada pencatuan *port-1*, arah dan daya maksimum *main lobe* berada pada sudut  $10^{\circ}$ . Sedangkan sudut setengah daya

maksimum berada pada sudut  $24.73^{\circ}$  dan  $-2.47^{\circ}$ . jadi nilai *HPBW* pada pencatuan *port-1* adalah  $27.2^{\circ}$ .

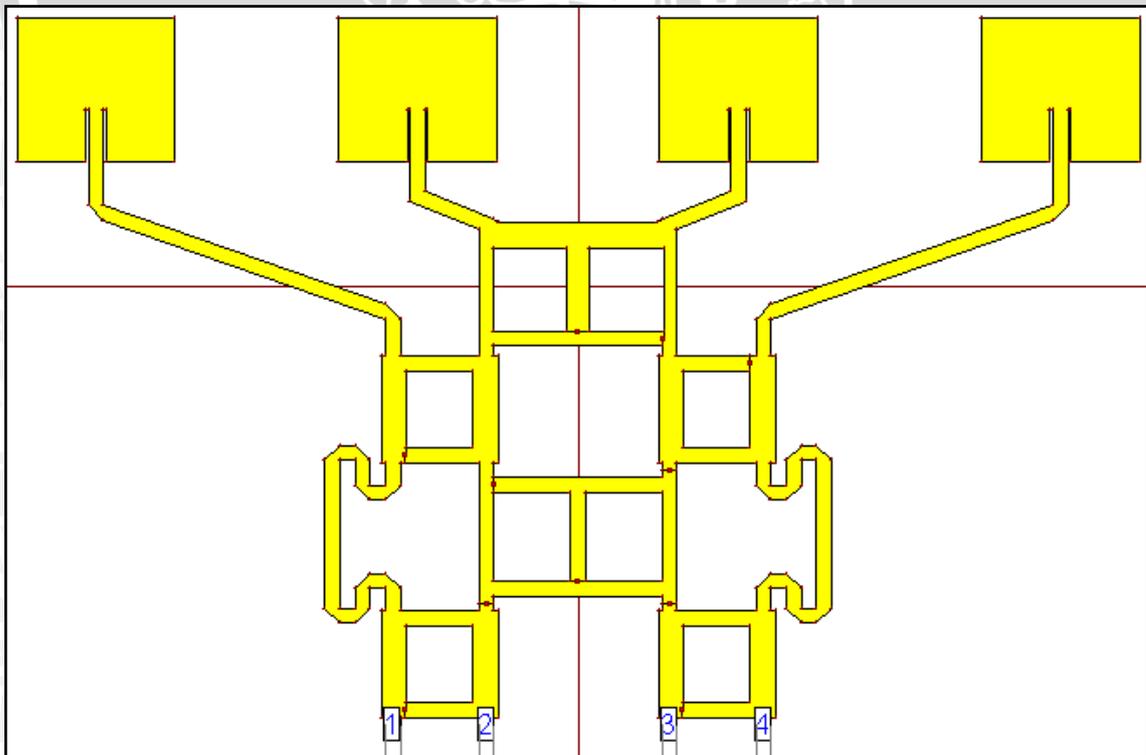
Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada pencatuan *port-2*, arah dan daya maksimum *main lobe* berada pada sudut  $-30^{\circ}$ . Sedangkan sudut setengah daya maksimum berada pada sudut  $-49.99^{\circ}$  dan  $-17.52^{\circ}$ . jadi nilai *HPBW* pada pencatuan *port-2* adalah  $32.47^{\circ}$

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada pencatuan *port-3*, arah dan daya maksimum *main lobe* berada pada sudut  $30^{\circ}$ . Sedangkan sudut setengah daya maksimum berada pada sudut  $17.5^{\circ}$  dan  $49.97^{\circ}$ . jadi nilai *HPBW* pada pencatuan *port-3* adalah  $32.47^{\circ}$ .

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada pencatuan *port-4*, arah dan daya maksimum *main lobe* berada pada sudut  $-10^{\circ}$ . Sedangkan sudut setengah daya maksimum berada pada sudut  $-24.77^{\circ}$  dan  $2.45^{\circ}$ . jadi nilai *HPBW* pada pencatuan *port-4* adalah  $27.22^{\circ}$ .

#### 4.7.2 Antena Switched Beam Bahan II

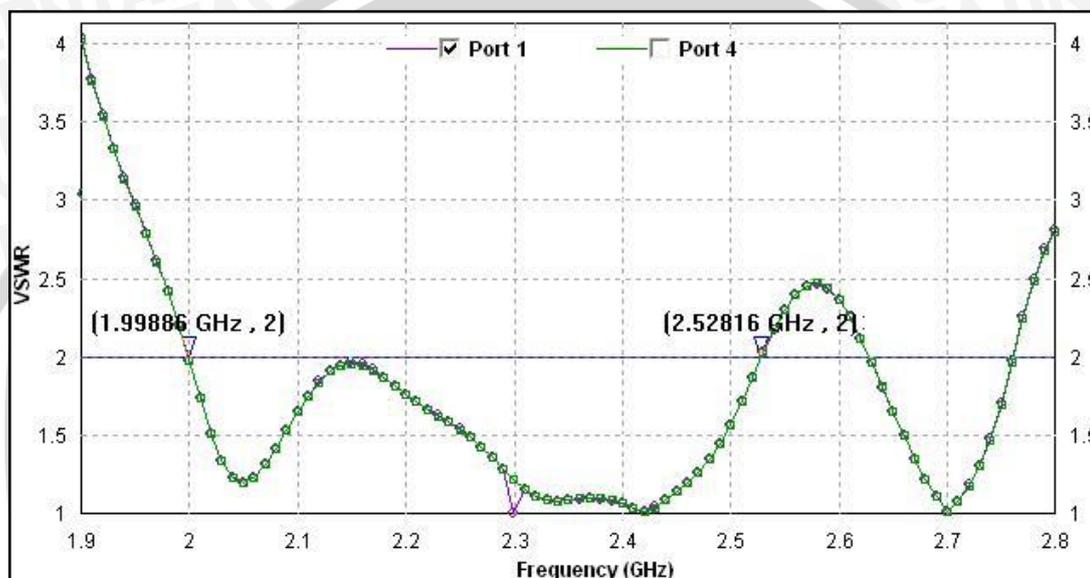
Berikut ini pada Gambar 4.31 adalah ilustrasi susunan antenna lengkap dengan *butler matrix* bahan II.



Gambar 4.31 Desain akhir antenna switched beam bahan II

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai  $VSWR$  dan  $return\ loss$  pada pencatuan  $port-1$  mirip dengan pencatuan pada  $port-4$ , sedangkan pencatuan pada  $port-2$  mirip dengan pencatuan  $port-3$ . Oleh karena itu, hasil simulasi ( $VSWR$  dan  $return\ loss$ )  $port-1$  dan 4 digabung, demikian juga  $port-2$  dan 3 untuk memudahkan dan meringkas penghitungan  $bandwidth$ .

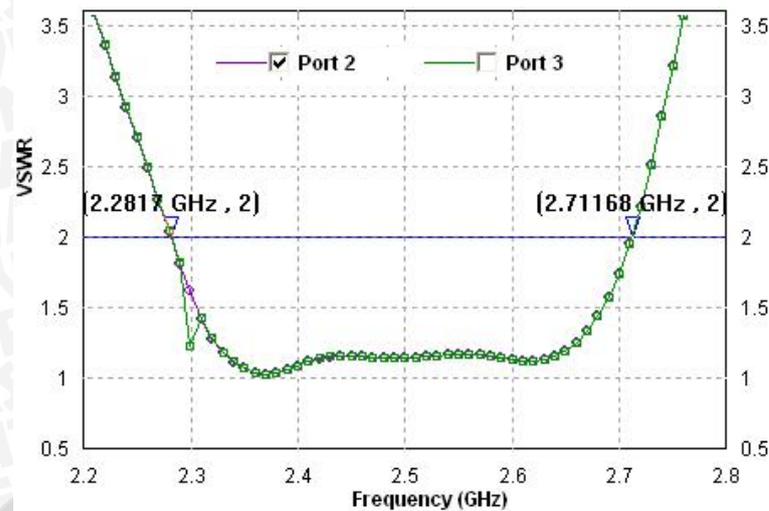
Berikut ini adalah hasil simulasi  $VSWR$  pada pencatuan  $port-1$  dan 4 diilustrasikan pada Gambar 4.32.



Gambar 4.32 Grafik  $VSWR$  untuk pencatuan  $port-1$  dan 4

Berdasarkan grafik  $VSWR$  Gambar 4.32, maka  $bandwidth$  dihitung dengan cara menyelisihkan antara dua nilai frekuensi yang memiliki nilai  $VSWR$  sama (bernilai dua). Pada Gambar 4.32 diilustrasikan bahwa hasil simulasi pencatuan  $port-1$  dan 4 memiliki  $bandwidth$  529.3 MHz yaitu pada  $range$  frekuensi 1.99886 sampai 2.52816 GHz. Berdasarkan tujuan awal, bahwa frekuensi kerja yang direncanakan adalah antara 2.4 – 2.4835 GHz ( $bandwidth=83.5$  MHz), maka  $bandwidth$  antenna tersebut dinyatakan memenuhi syarat.

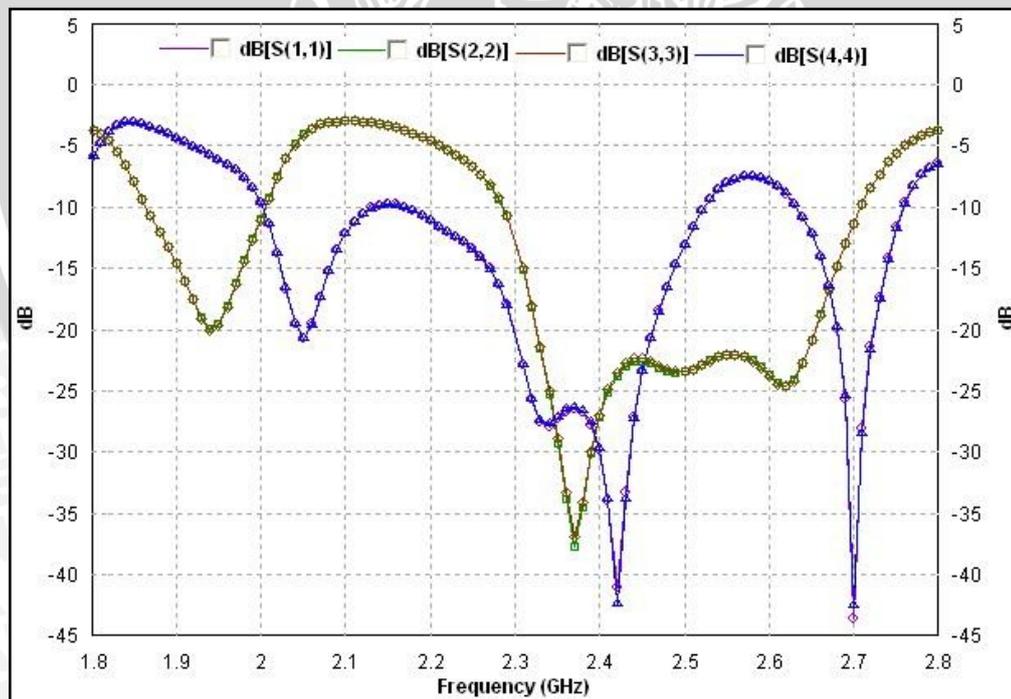
Berikut ini adalah hasil simulasi  $VSWR$  pada pencatuan  $port-2$  dan 3 diilustrasikan pada Gambar 4.33.



Gambar 4.33. Grafik *VSWR* untuk pencatuan *port-2* dan *3*

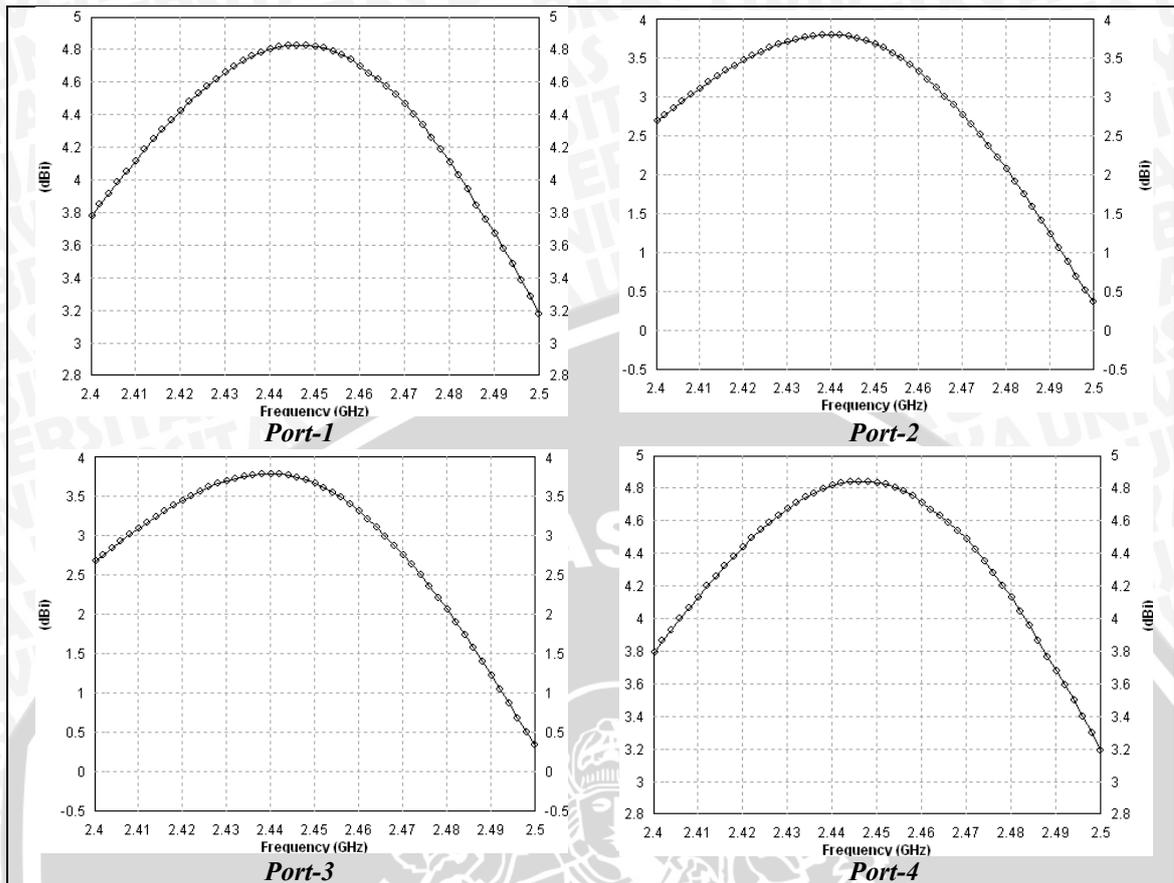
Pada Gambar 4.33 diilustrasikan bahwa hasil simulasi pencatuan *port-2* dan *3* memiliki *bandwidth* 429.468 MHz yaitu pada range frekuensi 2.2817 sampai 2.71168 GHz. Jadi, *bandwidth* antenna tersebut dinyatakan sudah memenuhi syarat berdasarkan tujuan awal perancangan.

Berikut ini adalah hasil simulasi *return loss* pada pencatuan *port-1*, *2*, *3*, dan *4* diilustrasikan pada Gambar 4.34.



Gambar 4.34 Grafik *return loss* antenna pada pencatuan *port-1*, *2*, *3*, dan *4*

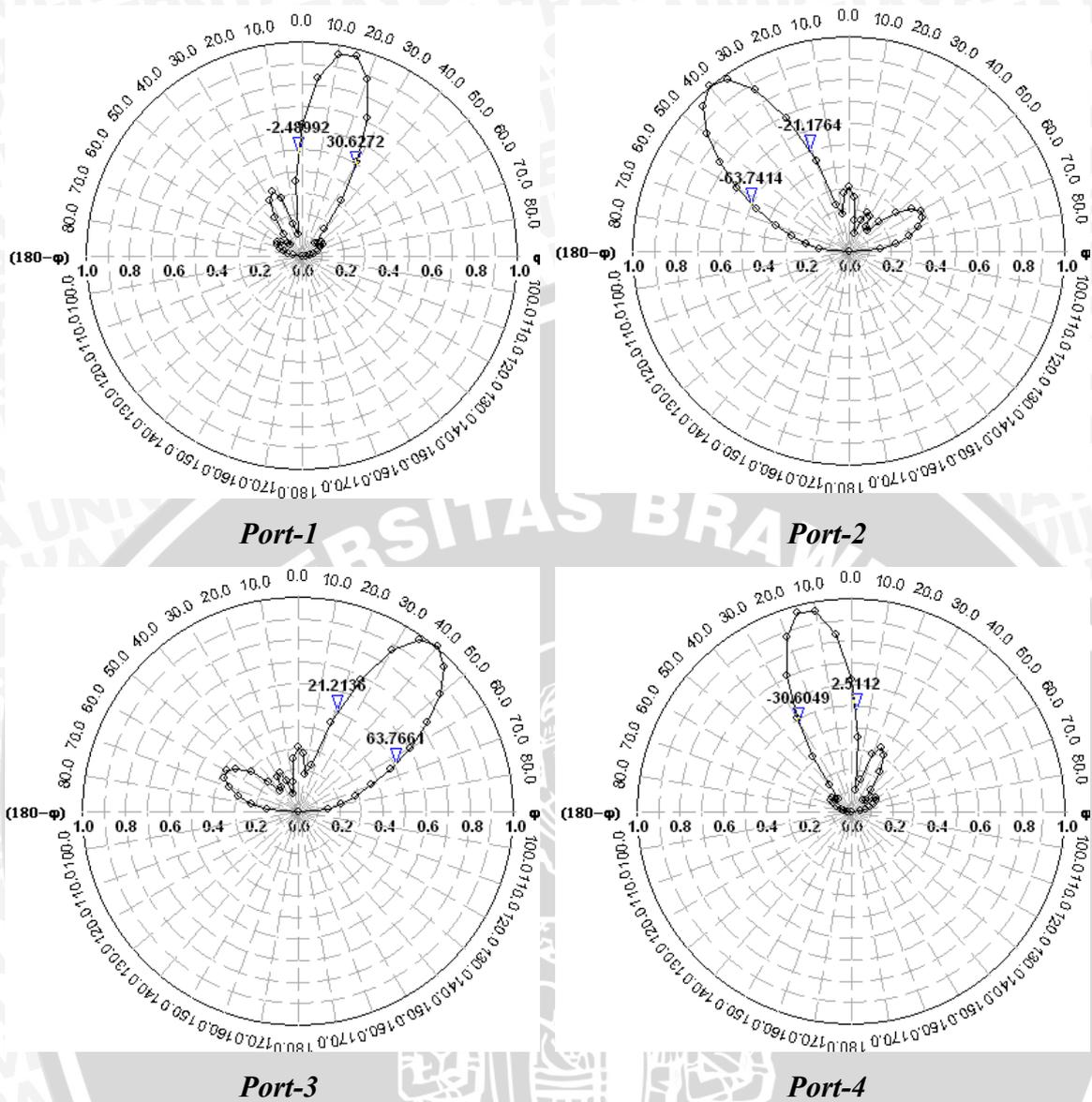
Berikut adalah hasil simulasi *gain* pencatuan *port-1*, *2*, *3*, dan *4* diilustrasikan pada Gambar 4.35



Gambar 4.35 Grafik *gain* untuk pencatuan *port-1*, *2*, *3*, dan *4*

Hasil simulasi menunjukkan bahwa *gain* pada pencatuan *port-1* dan *port-4* adalah mirip. Pada frekuensi 2.442 GHz *gain* antenna bernilai 4.81419 dBi (*port-1*) dan 4.82828 dBi (*port-4*). Sedangkan *gain* pada pencatuan *port-2* dan *port-3* adalah mirip. Pada frekuensi 2.442 GHz *gain* antenna bernilai 3.78334 dBi (*port-2*) dan 3.76669 dBi (*port-3*).

Berikut adalah grafik polar hasil simulasi pola radiasi pada pencatuan *port-1*, *2*, *3*, dan *4* pada frekuensi 2.442 GHz diilustrasikan pada Gambar 4.36.



Gambar 4.36 Grafik polar pola radiasi antenna pada pencatuan *port-1*, *2,3*, dan *4*

Pada Tabel 4.22 dijelaskan nilai *HPBW* yang diilustrasikan pada Gambar 4.36.

Tabel 4.22 Data pola radiasi hasil simulasi pada frekuensi 2.442 GHz

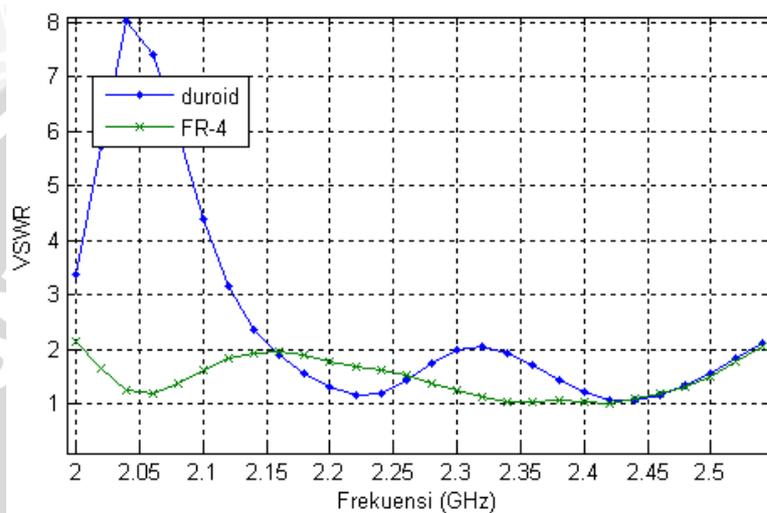
<i>Port</i>	Pola Radiasi Maksimum			Sudut 0.5 Level Pola Radiasi Maksimum		<i>HPBW</i>
	sudut	Level	1/2 Level	Kiri	Kanan	
1	15.00761 <sup>0</sup>	0.96536	0.48268	-2.48992 <sup>0</sup>	30.6272 <sup>0</sup>	33.11712 <sup>0</sup>
2	-40.0232 <sup>0</sup>	1	0.5	-63.7414 <sup>0</sup>	-21.1764 <sup>0</sup>	41.565 <sup>0</sup>
3	40.02029 <sup>0</sup>	1	0.5	21.2136 <sup>0</sup>	63.7661 <sup>0</sup>	42.5525 <sup>0</sup>
4	-15.0076 <sup>0</sup>	0.964909	0.482454	-30.6049 <sup>0</sup>	2.5112 <sup>0</sup>	33.1161 <sup>0</sup>

#### 4.8 Grafik perbandingan hasil simulasi parameter antenna bahan I dan II

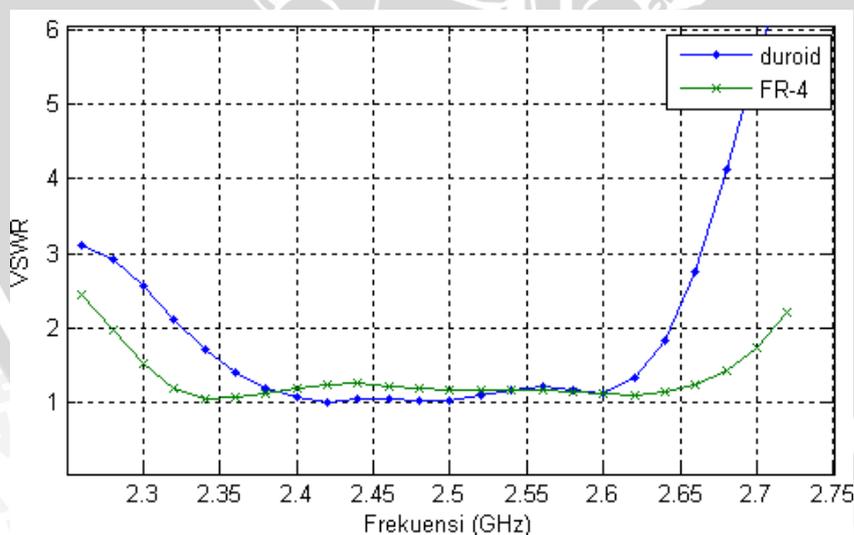
Berdasarkan hasil simulasi yang ditampilkan dalam sub-bab 4.71 dan 4.72 menunjukkan bahwa pola hasil simulasi pencatuan *port-1* dan 4 adalah identik, begitu juga dengan pencatuan *port-2* dan 3. Jadi dalam sub-bab 4.8 ini ditampilkan grafik perbandingan antara pencatuan *port-1* dan 2 saja.

##### a. Simulasi *VSWR*

Perbandingan hasil simulasi *VSWR* diilustrasikan pada Gambar 4.37 dan 4.38.



Gambar 4.37 Grafik *VSWR* hasil simulasi antenna *duroid* dan *FR-4* untuk pencatuan *port-1*

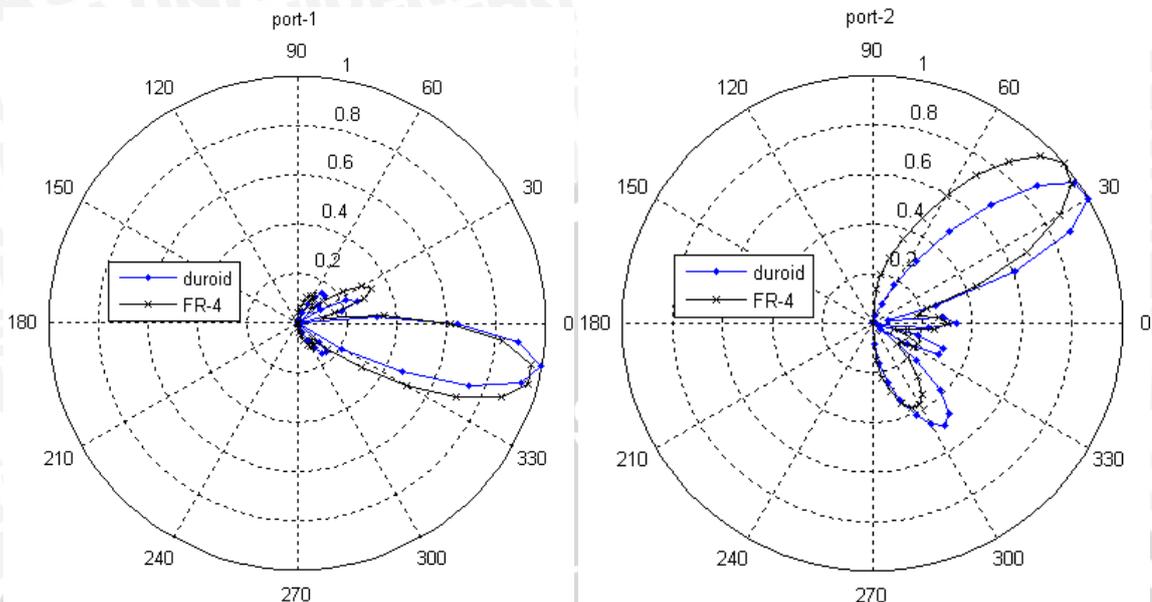


Gambar 4.38 Grafik *VSWR* hasil simulasi antenna *duroid* dan *FR-4* untuk pencatuan *port-2*

Hasil simulasi *VSWR* sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.37 dan 4.38 menunjukkan bahwa kedua antenna layak direalisasikan karena memenuhi salah satu syarat perancangan yaitu memiliki  $VSWR < 2$  pada rentang frekuensi 2400 - 2483.5 MHz.

### b. Simulasi pola radiasi

Perbandingan hasil simulasi pola radiasi diilustrasikan pada Gambar 4.9

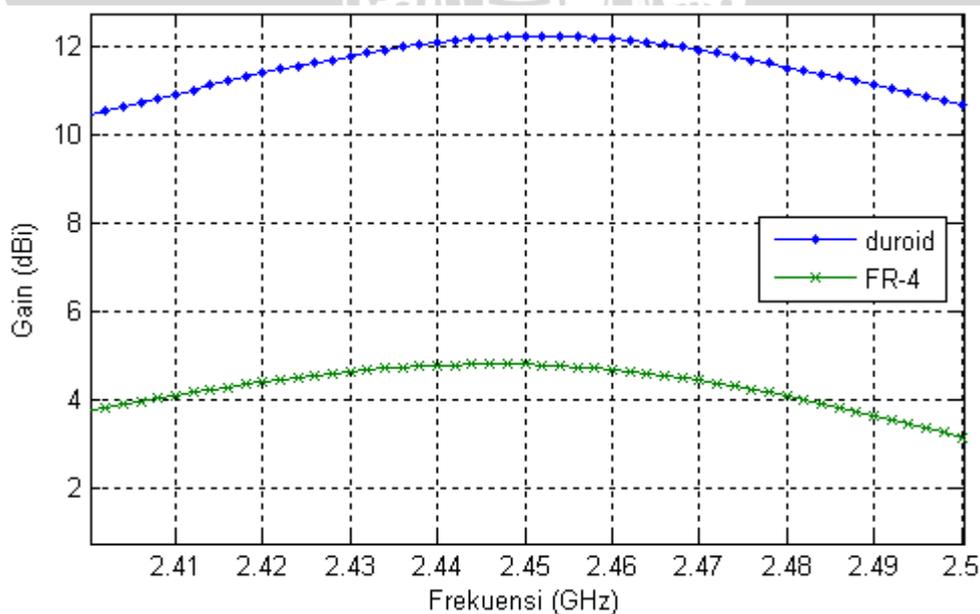


Gambar 4.39 Grafik pola radiasi hasil simulasi antenna *duroid* dan *FR-4* untuk pencatuan *port-1* dan 2

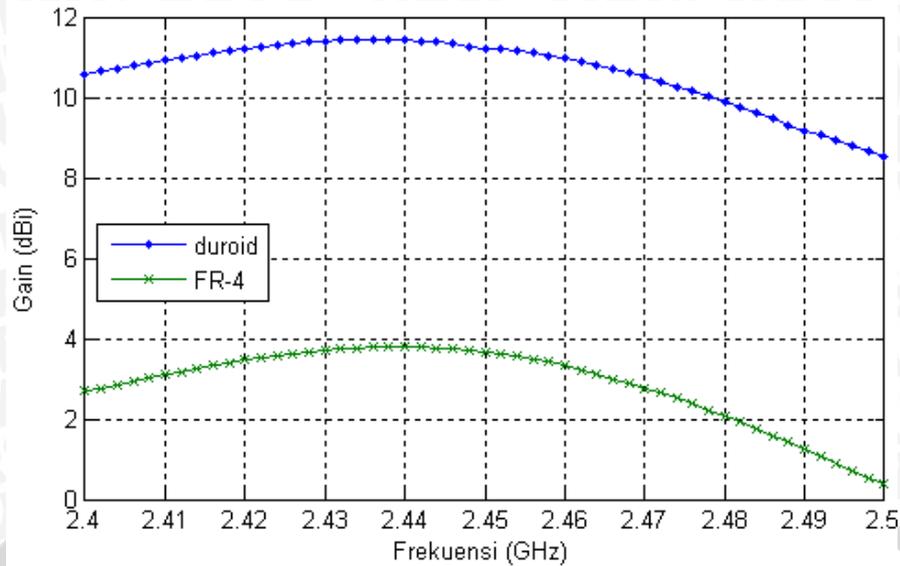
Hasil simulasi pola radiasi sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.39 menunjukkan bahwa kedua antenna memiliki arah radiasi yang berbeda sesuai dengan *port* masukan yang dicatu.

### c. Simulasi gain

Perbandingan hasil simulasi *gain* diilustrasikan pada Gambar 4.40 dan 4.41.



Gambar 4.40 Grafik *gain* hasil simulasi antenna *duroid* dan *FR-4* untuk pencatuan *port-1*

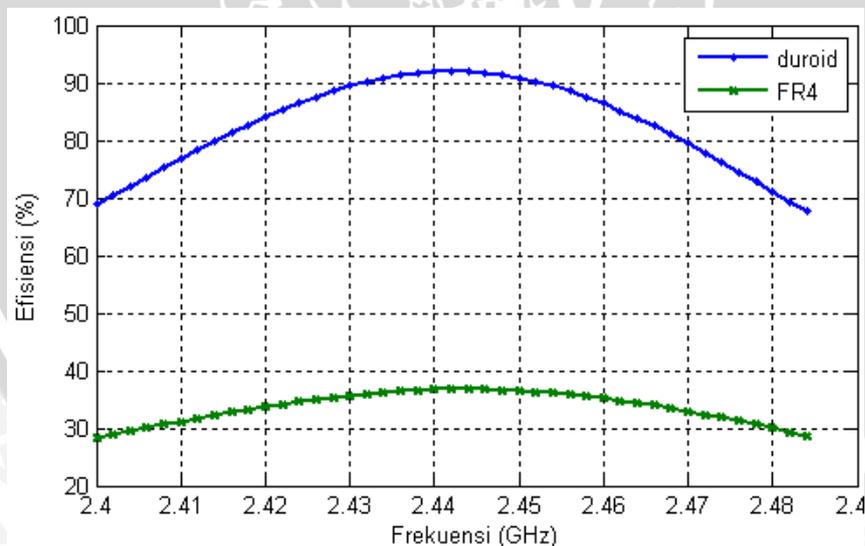


Gambar 4.41 Grafik *gain* hasil simulasi antenna *duroid* dan *FR-4* untuk pencatuan *port-2*

Hasil simulasi *gain* sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.40 dan 4.41 menunjukkan bahwa antenna *duroid* memiliki nilai *gain* lebih besar dari pada *FR-4*, hal ini dikarenakan perbedaan rugi-rugi bahan dielektrik keduanya, yaitu *FR-4* memiliki rugi-rugi dielektrik lebih besar dari pada *duroid*.

#### d. Simulasi efisiensi

Perbandingan hasil simulasi efisiensi diilustrasikan pada Gambar 4.42



Gambar 4.42 Grafik efisiensi hasil simulasi antenna peradiasi *duroid* dan *FR-4*

Hasil simulasi efisiensi sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.42 menunjukkan bahwa antenna *duroid* memiliki nilai efisiensi lebih besar dari pada *FR-4*, hal ini dikarenakan perbedaan rugi-rugi bahan dielektrik keduanya, yaitu *FR-4* memiliki rugi-rugi dielektrik lebih besar dari pada *duroid*.