

Implementasi Struktur *Meander Line* untuk Mereduksi Ukuran *Butler Matrix* 2×2

(Implementation of *Meander Line Structure* for Size Reduction of 2×2 *Butler Matrix*)

Zulfi¹, Achmad Munir²

Abstract—Butler matrix is a beamforming network that is commonly used in multibeam antennas because of its simple structure and high efficiency. However, the Butler matrix has relatively large dimensions. Meander line structure is a widely used approach to reduce the dimensions of various microwave devices. This paper describes the implementation of the meander line structure on a 2×2 Butler matrix to reduce dimensions. The method used is to apply a meander line structure to the through arm. The 2×2 Butler matrix with meander line structure is designed using FR4 epoxy dielectric material with dimensions of $17.9 \text{ mm} \times 36.4 \text{ mm}$ to work at a 2.4 GHz resonant frequency. The measurement results show that the 2×2 Butler matrix with meander line structure has a reflection coefficient better than -10 dB from 1.88 GHz to 2.93 GHz (fractional bandwidth of 43.75%). The isolation of -6.15 dB, the transmission coefficients of -3.70 dB, and the phase difference between the output ports is 91.37° were achieved at the operating frequency of 2.4 GHz. The application of the meander line structure reduces the dimensions of the Butler matrix 2×2 by 34.54%.

Intisari—Butler matrix adalah beamforming network yang umum digunakan pada antenna multibeam karena memiliki struktur yang sederhana dan efisiensi yang tinggi. Namun, Butler matrix memiliki dimensi yang relatif besar. Struktur meander line merupakan pendekatan yang banyak digunakan untuk mereduksi dimensi dari berbagai peranti gelombang mikro. Makalah ini memaparkan tentang implementasi struktur meander line pada Butler matrix 2×2 untuk mereduksi dimensi. Metode yang digunakan adalah dengan menerapkan struktur meander line pada bagian through arm. Butler matrix 2×2 dengan struktur meander line dirancang menggunakan material dielektrik epoxy FR4 dengan dimensi $17,9 \text{ mm} \times 36,4 \text{ mm}$ untuk beroperasi pada frekuensi 2,4 GHz. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa Butler matrix 2×2 dengan struktur meander line memiliki koefisien refleksi kurang dari -10 dB pada frekuensi 1,88 GHz sampai 2,93 GHz (fractional bandwidth 43,75%). Pada frekuensi 2,4 GHz, dicapai isolasi sebesar -6,15 dB, koefisien transmisi sebesar -3,70 dB dan beda fase pada port keluaran sebesar $91,37^\circ$. Penerapan struktur meander line dapat mereduksi dimensi Butler matrix 2×2 sebesar 34,54%.

Kata Kunci—Multibeam, Beamforming Network, Butler Matrix, Meander Line.

¹ Fakultas Teknik Elektro Universitas Telkom, Jl. Telekomunikasi Terusan Buah Batu Bandung 40257 INDONESIA (e-mail: zulfitelu@telkomuniversity.ac.id)

² Sekolah Teknik Elektro dan Informatika Institut Teknologi Bandung, Jln. Ganesha 10 Bandung 40132 INDONESIA (e-mail: munir@itee.org)

I. PENDAHULUAN

Dalam sistem komunikasi nirkabel, interferensi *co-channel* yang disebabkan oleh bertambahnya jumlah pengguna dapat mengurangi *Carrier-to-Interference Ratio* (CIR) pada pengguna sehingga jumlah pengguna yang dapat dilayani oleh sistem (kapasitas sistem) akan semakin berkurang [1]. Salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan menggunakan antenna *multibeam*. Antena ini dapat menghasilkan pola radiasi (*radiation pattern*) yang terdiri atas beberapa *beam* dengan *beamwidth* yang sempit dan *gain* yang besar. *Beamwidth* yang sempit akan mengurangi interferensi *co-channel*, sedangkan *gain* yang besar akan menguatkan sinyal *carrier*. Interferensi *co-channel* yang kecil dan sinyal *carrier* yang besar akan meningkatkan CIR dan kapasitas sistem.

Salah satu pendekatan untuk merealisasikan antenna *multibeam* adalah dengan menggunakan *antenna array* yang dikombinasikan dengan *beamforming network*. *Beamforming network* adalah *passive device* yang terdiri atas *coupler* dan *phase shifter* yang berfungsi untuk membagi daya dan menggeser fase. *Beamforming network* diimplementasikan dengan menggunakan berbagai jenis saluran transmisi, seperti saluran *microstrip*, *stripline*, dan bumbung gelombang. Ada beberapa jenis *beamforming network*, di antaranya adalah *Blass matrix* [2], *Nolen matrix* [3], dan *Butler matrix* [4]. Di antara ketiganya, *Butler matrix* adalah yang paling banyak digunakan karena memiliki struktur yang sederhana dan efisiensi daya yang tinggi. Namun, *Butler matrix* memiliki kekurangan, salah satunya adalah dimensi yang relatif besar.

Beberapa metode telah diterapkan untuk mereduksi dimensi *Butler matrix*, di antaranya adalah *swapped port coupler* [5], dengan menerapkan *lumped-element unit cell* [6], dan dengan menggunakan *composite right/left handed transmission line* [7]. Struktur *meander line* merupakan susunan yang terdiri atas beberapa konduktor yang terkopel secara paralel (*parallel coupled-conductor*). Struktur ini telah diimplementasikan secara luas untuk mereduksi dimensi dari berbagai peranti gelombang mikro, seperti filter dan resonator [8]-[10], antenna [11]-[13], dan *coupler* [14]-[16]. Selain itu, struktur *meander line* telah diimplementasikan untuk mengurangi dimensi *Butler matrix* 4×4 [17]. Pengaruh penerapan struktur *meander line* terhadap kinerja *Butler matrix* hanya dilihat untuk *Butler matrix* dengan konfigurasi 4×4 [17]. Konfigurasi lain yang umum digunakan adalah 2×2 . *Butler matrix* 2×2 berbeda dengan *Butler matrix* 4×4 . *Butler matrix* 2×2 memiliki dua port masukan dan dua port keluaran, sedangkan *Butler matrix*

4 × 4 memiliki empat port masukan dan empat port keluaran. Ketika diaplikasikan sebagai antenna feeding network, port keluaran Butler matrix 2 × 2 dihubungkan dengan antena susun dua elemen, sedangkan port keluaran Butler matrix 4 × 4 dihubungkan dengan antena susun empat elemen, yang keduanya akan menghasilkan pola radiasi yang berbeda.

Makalah ini memaparkan tentang perancangan, simulasi, realisasi dan pengukuran Butler matrix 2 × 2 dengan struktur meander line. Perancangan ini bertujuan untuk melihat pengaruh penerapan struktur meander line pada kinerja Butler matrix 2 × 2. Selain itu, Butler matrix 2 × 2 konvensional juga dirancang sebagai baseline dalam menilai kinerja Butler matrix 2 × 2 dengan struktur meander line.

II. METODOLOGI

Perancangan Butler matrix meliputi perancangan Butler matrix 2 × 2 konvensional dan perancangan Butler matrix 2 × 2 dengan struktur meander line. Butler matrix dirancang dengan menggunakan saluran microstrip. Bagian patch dan ground plane menggunakan material konduktor berupa tembaga dengan ketebalan (t) sebesar 0,035 mm, sedangkan bagian substrat menggunakan material dielektrik berupa epoxy FR4 dengan relative permittivity (ε_r) sebesar 4,3, loss tangent (tan δ) sebesar 0,02, dan ketebalan (d) sebesar 0,8 mm. Butler matrix yang dirancang diharapkan dapat memenuhi kriteria perancangan seperti ditunjukkan pada Tabel I.

A. Butler Matrix 2 × 2 Konvensional

Butler matrix 2 × 2 memiliki sepasang lengan yang disebut sebagai through arm dan sepasang lengan yang disebut sebagai coupled arm. Perancangan Butler matrix 2 × 2 konvensional pada dasarnya adalah menghitung impedansi, lebar, dan panjang saluran microstrip pada bagian through arm dan coupled arm. Impedansi saluran microstrip bagian through arm (Z₁) dan coupled arm (Z₂) dapat ditentukan menggunakan (1) dan (2) [18].

$$Z_1 = \frac{Z_0}{\sqrt{2}} \tag{1}$$

$$Z_2 = Z_0 \tag{2}$$

dengan Z₀ adalah impedansi karakteristik port masukan dan port keluaran. Lebar saluran microstrip bagian through arm (W₁) dan coupled arm (W₂) dapat ditentukan dengan menggunakan (3)-(6) [18]. Untuk W/d < 2,

$$\frac{W}{d} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \tag{3}$$

untuk W/d > 2,

$$\frac{W}{d} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right\} \right] \tag{4}$$

TABEL I
KRITERIA PERANCANGAN BUTLER MATRIX

Parameter	Nilai
Frekuensi operasi	2,4 GHz
Koefisien refleksi	< -10 dB
Isolasi	< -10 dB
Koefisien transmisi	-3 dB ± 1 dB
Beda fase port keluaran	90° ± 3°
Fractional bandwidth	> 10%

TABEL II
DIMENSI AWAL THROUGH ARM DAN COUPLED ARM

Bagian	Lebar (mm)	Panjang (mm)
Through arm	2,6	16,9
Coupled arm	1,5	17,3

TABEL III
DIMENSI OPTIMAL THROUGH ARM DAN COUPLED ARM

Bagian	Lebar (mm)	Panjang (mm)
Through arm	2,6	14,7
Coupled arm	1,5	17,3

TABEL IV
DIMENSI OPTIMAL STRUKTUR MEANDER LINE.

Parameter	Dimensi (mm)
Lebar (Wm)	1,5
Spasi (Sm)	1
Panjang (Lm)	3,05

dengan

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right)} \tag{5}$$

dan

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \tag{6}$$

dengan W adalah lebar saluran microstrip, d adalah ketebalan material dielektrik substrat, dan ε_r adalah relative permittivity material dielektrik substrat. Panjang saluran microstrip untuk through arm (L₁) dan coupled arm (L₂) dapat dihitung dengan menggunakan (7)-(9) [18].

$$\phi = \beta L \tag{7}$$

dengan

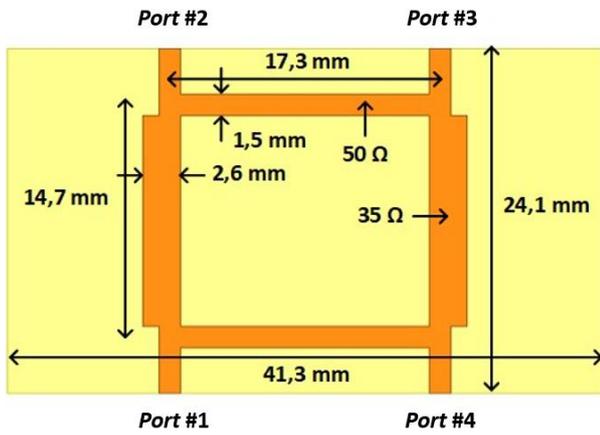
$$\beta = \frac{2\pi f_0}{c} \sqrt{\epsilon_e} \tag{8}$$

dan

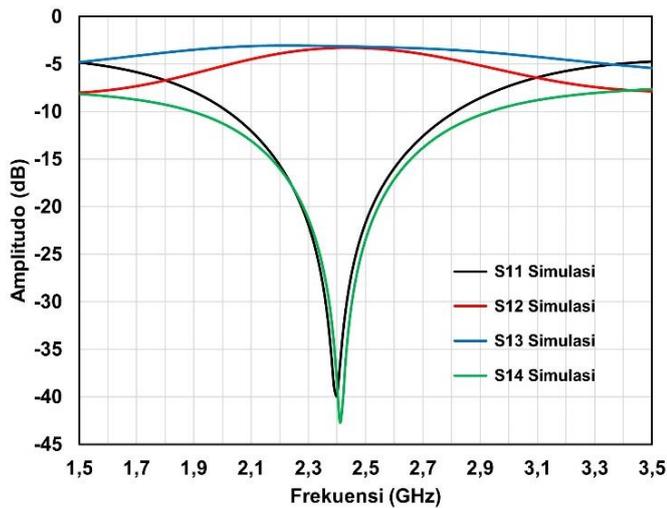
$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}} \tag{9}$$

dengan φ, β, L, f₀, c, dan ε_e berturut-turut adalah pergeseran fase, konstanta fase, panjang saluran microstrip, frekuensi operasi, kecepatan gelombang elektromagnetik di ruang bebas 3 × 10⁸ m/s, dan konstanta dielektrik efektif.

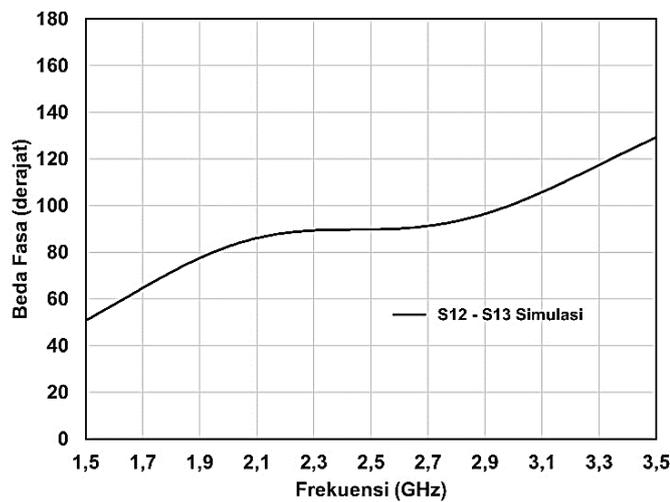
Dalam perancangan ini, seluruh port dihubungkan dengan konektor 50 Ω. Agar tercapai kondisi matched, impedansi



Gbr. 1 Rancangan *Butler matrix* 2 × 2 konvensional.

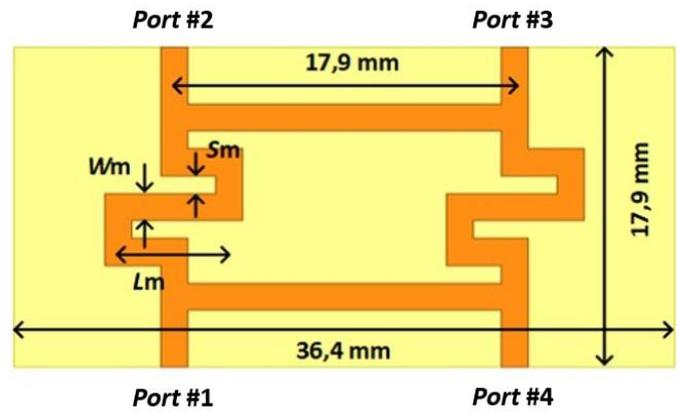


Gbr. 2 Hasil simulasi koefisien refleksi, koefisien transmisi, dan isolasi *Butler matrix* 2 × 2 konvensional.

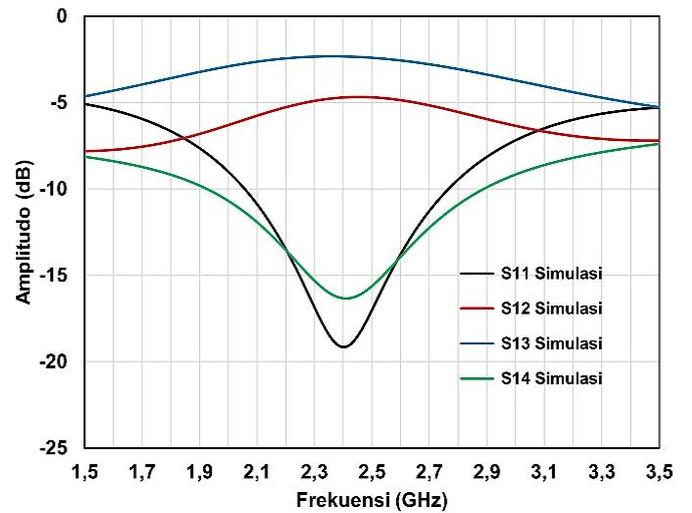


Gbr. 3 Hasil simulasi beda fase pada *port* keluaran *Butler matrix* 2 × 2 konvensional.

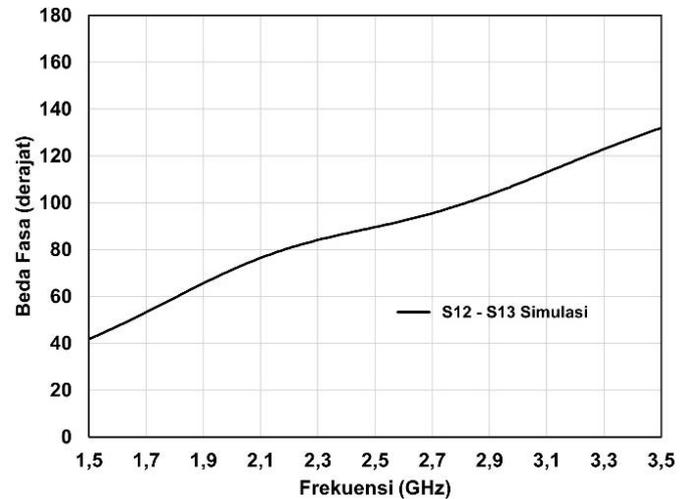
saluran *microstrip* untuk setiap *port* ditetapkan sebesar $Z_0 = 50 \Omega$. Dengan menggunakan (1) dan (2), dapat dihitung impedansi saluran *microstrip* untuk *through arm* sebesar $Z_1 = 35 \Omega$ dan *coupled arm* sebesar $Z_2 = 50 \Omega$. Bagian substrat dari saluran



Gbr. 4 Rancangan *Butler matrix* 2 × 2 dengan struktur *meander line*.

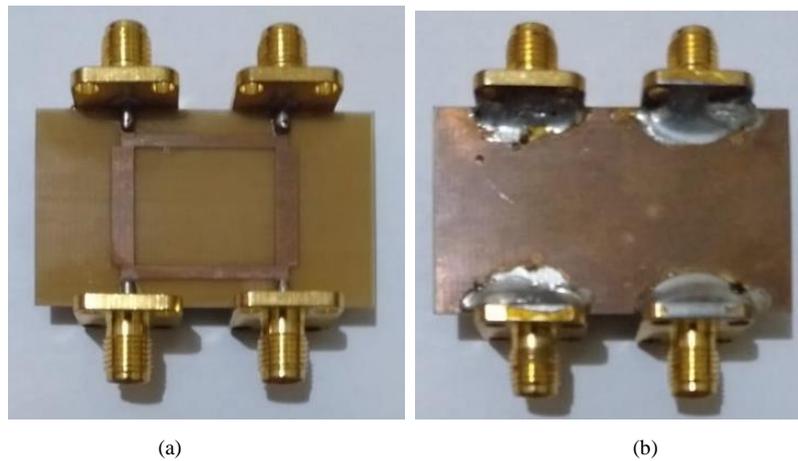


Gbr. 5 Hasil simulasi koefisien refleksi, koefisien transmisi dan isolasi *Butler matrix* 2 × 2 dengan struktur *meander line*.

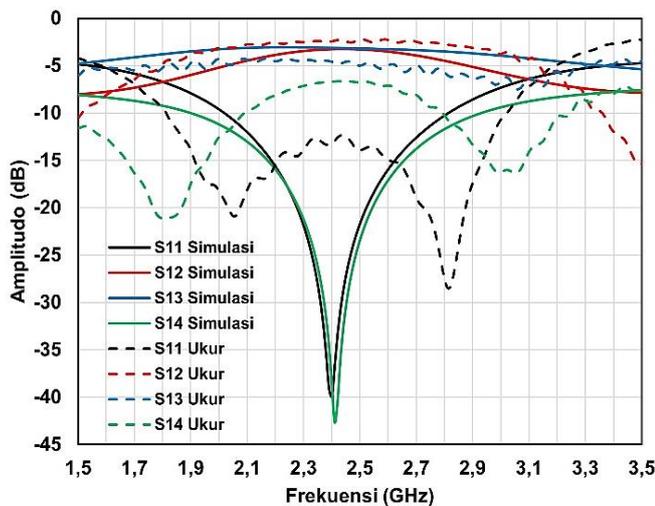


Gbr. 6 Hasil simulasi beda fase pada *port* keluaran *Butler matrix* 2 × 2 dengan struktur *meander line*.

microstrip yang digunakan dalam perancangan ini menggunakan material dielektrik *epoxy* FR4 dengan *relative permittivity* $\epsilon_r = 4,3$ dan ketebalan $d = 0,8 \text{ mm}$. Dengan menggunakan (3)-(6), dapat ditentukan lebar saluran *microstrip*



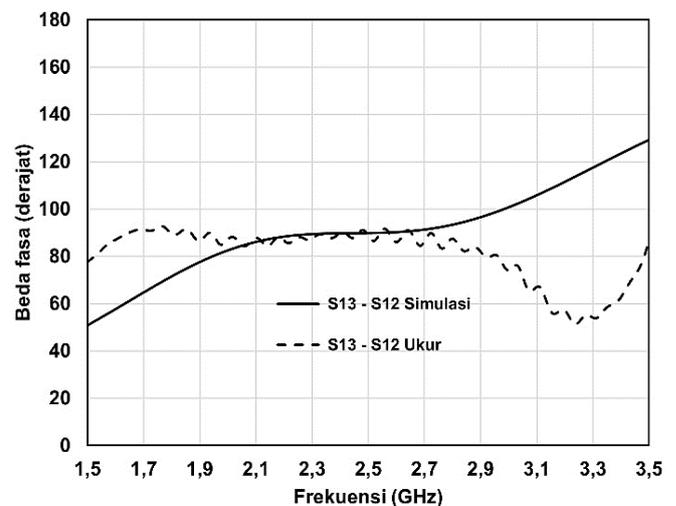
Gbr. 7 Hasil fabrikasi *Butler matrix* 2 × 2 konvensional, (a) tampak depan, (b) tampak belakang.



Gbr. 8 Hasil pengukuran koefisien refleksi, koefisien transmisi, dan isolasi *Butler matrix* 2 × 2 konvensional.

untuk *through arm* sebesar $W_1 = 2,6$ mm dan *coupled arm* sebesar $W_2 = 1,5$ mm. *Butler matrix* dirancang agar dapat bekerja pada frekuensi 2,4 GHz. Dengan menggunakan (7)-(9), dapat dihitung panjang saluran *microstrip* untuk *through arm* sebesar $L_1 = 16,9$ mm dan *coupled arm* sebesar $L_2 = 17,3$ mm. Hasil perhitungan lebar dan panjang saluran *microstrip* untuk *through arm* dan *coupled arm* ditunjukkan pada Tabel II.

Langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi dengan menggunakan bantuan perangkat lunak simulator. Simulasi bertujuan untuk mendapatkan lebar dan panjang saluran *microstrip* untuk *through arm* dan *coupled arm* yang dapat memberikan kinerja *Butler matrix* yang optimal, yaitu dapat memenuhi kriteria perancangan seperti yang ditunjukkan pada Tabel I. Kinerja optimal dapat dicapai dengan cara melakukan penyesuaian pada lebar dan panjang saluran *microstrip* untuk *through arm* dan *coupled arm*. Berdasarkan hasil simulasi, kinerja *Butler matrix* yang optimal dapat dicapai dengan mengurangi panjang *through arm* dari 16,9 mm menjadi 14,7 mm. Dimensi optimal untuk *through arm* dan *coupled arm* ditunjukkan pada Tabel III, sedangkan hasil perancangan *Butler matrix* 2 × 2 konvensional ditunjukkan pada Gbr. 1.

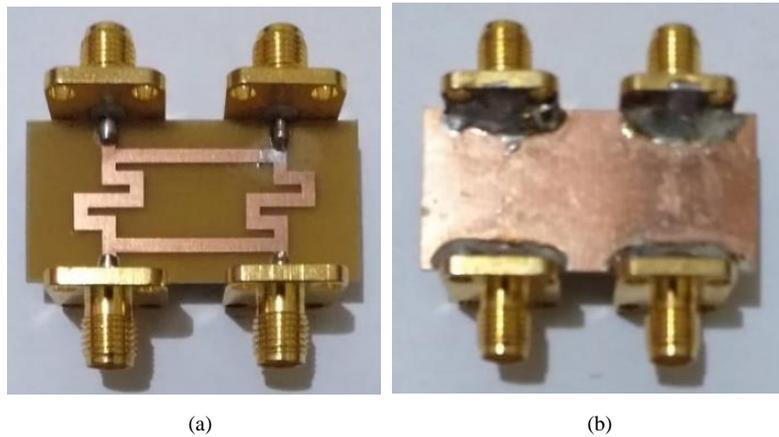


Gbr. 9 Hasil pengukuran beda fase pada *port* keluaran *Butler matrix* 2 × 2 konvensional.

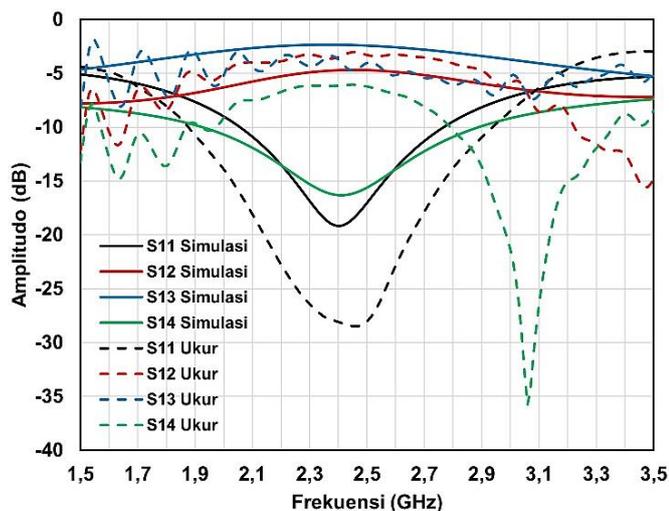
Hasil simulasi koefisien refleksi (S_{11}), isolasi (S_{14}), dan koefisien transmisi (S_{12} dan S_{13}) untuk *Butler matrix* 2 × 2 konvensional yang telah dirancang ditunjukkan pada Gbr. 2. Pada frekuensi operasi 2,4 GHz, diperoleh koefisien refleksi sebesar -39,91 dB, isolasi sebesar -38,49 dB, serta koefisien transmisi sebesar -3,29 dB dan -3,12 dB. Koefisien refleksi kurang dari -10 dB diperoleh dari frekuensi 2,02 GHz sampai 2,81 GHz (*fractional bandwidth* sebesar 32,92%). Hasil simulasi beda fase pada *port* keluaran ($\angle S_{13} - \angle S_{12}$) ditunjukkan pada Gbr. 3. Pada frekuensi operasi 2,4 GHz, beda fase pada *port* keluaran adalah 89,80°. Nilai-nilai kinerja koefisien refleksi, isolasi, koefisien transmisi, *fractional bandwidth*, dan beda fase pada *port* keluaran yang dihasilkan telah memenuhi kriteria perancangan yang terdapat pada Tabel I. Selanjutnya dilakukan perancangan *Butler matrix* 2 × 2 dengan struktur *meander line* untuk mengurangi panjang saluran *microstrip* dari *through arm*.

B. Butler Matrix 2 × 2 Dengan Struktur Meander Line

Bagian *through arm* *Butler matrix* konvensional 2 × 2 dengan lebar dan panjang saluran *microstrip* sebesar 1,5 mm



Gbr. 10 Hasil fabrikasi Butler matrix 2×2 dengan struktur *meander line*, (a) tampak depan, (b) tampak belakang.

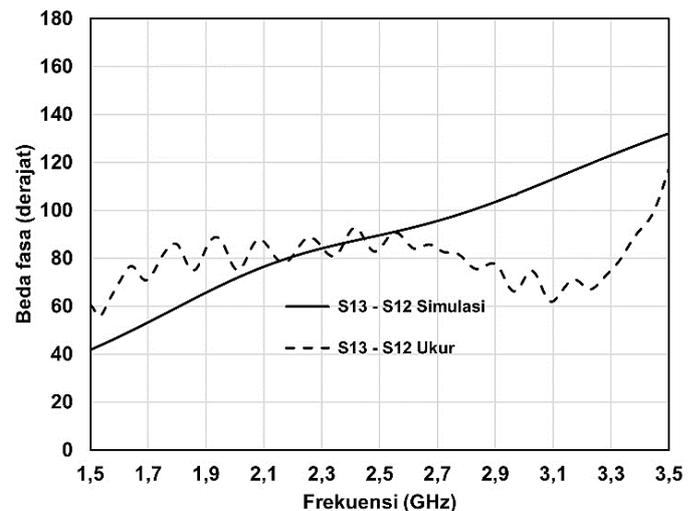


Gbr. 11 Hasil pengukuran koefisien refleksi, koefisien transmisi, dan isolasi Butler matrix 2×2 dengan struktur *meander line*.

dan 14,7 mm digantikan dengan struktur *meander line*, seperti ditunjukkan pada Gbr. 4. Dalam proses simulasi, dilakukan penyesuaian terhadap panjang saluran *microstrip* dari struktur *meander line* untuk mendapatkan kinerja yang optimal. Dimensi saluran *microstrip* dari struktur *meander line* yang optimal ditunjukkan pada Tabel IV. Hasil simulasi koefisien refleksi (S_{11}), isolasi (S_{14}), dan koefisien transmisi (S_{12} dan S_{13}) ditunjukkan pada Gbr. 5. Pada frekuensi operasi 2,4 GHz, koefisien refleksi sebesar -19,15 dB, isolasi sebesar -16,32, serta koefisien transmisi sebesar -4,70 dB dan -2,34 dB. Koefisien refleksi kurang dari -10 dB diperoleh dari frekuensi 2,06 GHz sampai 2,76 GHz (*fractional bandwidth* sebesar 29,17%). Hasil simulasi beda fase pada *port* keluaran ($\angle S_{13} - \angle S_{12}$) ditunjukkan pada Gbr. 6. Pada frekuensi operasi 2,4 GHz, beda fase pada *port* keluaran adalah sebesar 86,97°.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Realisasi Butler matrix meliputi proses fabrikasi dan penyolderan. Butler matrix yang difabrikasi adalah Butler matrix 2×2 konvensional (tanpa struktur *meander line*) dan Butler matrix 2×2 dengan struktur *meander line*. Material yang digunakan pada proses fabrikasi adalah epoxy FR4 dengan

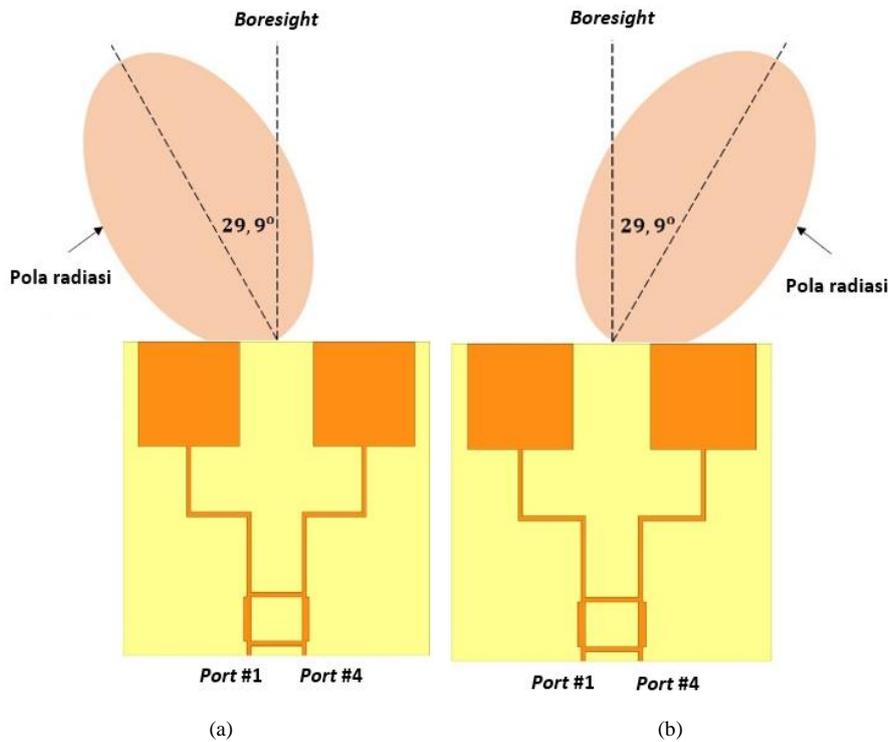


Gbr. 12 Hasil pengukuran beda fase pada *port* keluaran Butler matrix 2×2 dengan struktur *meander line*.

ketebalan substrat sebesar 0,8 mm. Untuk mengetahui kesesuaian antara Butler matrix hasil rancangan dengan realisasi, dilakukan pengukuran parameter yang meliputi koefisien refleksi, koefisien transmisi, isolasi, beda fase pada *port* keluaran, dan *fractional bandwidth*. Seluruh parameter diukur menggunakan Vector Network Analyzer (VNA). *Port-port* yang diukur dihubungkan dengan VNA, sedangkan *port-port* yang lainnya diterminasi dengan konektor yang memiliki impedansi 50 Ω .

A. Butler Matrix 2×2 Konvensional

Realisasi Butler matrix 2×2 konvensional menggunakan dimensi seperti ditunjukkan pada Tabel III. Hasil realisasi Butler matrix 2×2 konvensional ditunjukkan pada Gbr. 7(a) dan Gbr. 7(b). Fabrikasi dilakukan menggunakan substrat dari material dielektrik berupa epoxy FR4 dengan ketebalan 0,8 mm dan dimensi 24,1 mm \times 41,3 mm. Seluruh *port*, baik *port* masukan maupun *port* keluaran, dihubungkan langsung dengan konektor 50 Ω melalui penyolderan. Penyolderan meliputi bagian saluran *microstrip* yang terdapat pada setiap *port* dan bagian *ground plane*.



Gbr. 13 Skematik dan ilustrasi pola radiasi antenna susun dua elemen yang dihubungkan dengan port keluaran Butler matrix 2 × 2 konvensional, (a) eksitasi port #1, (b) eksitasi port #4.

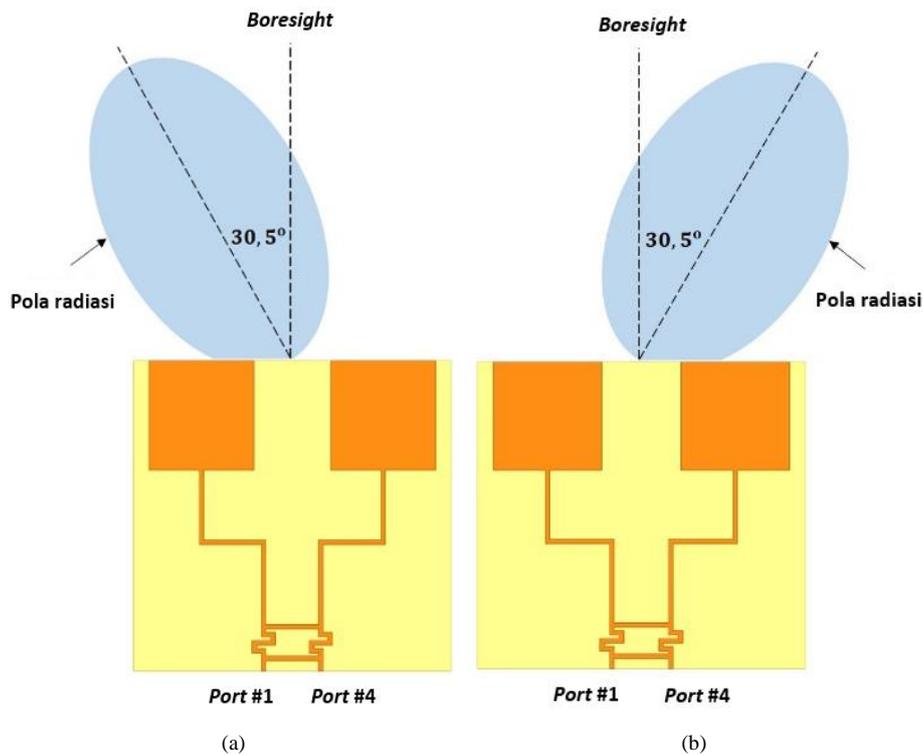
Hasil pengukuran koefisien refleksi (S_{11}), isolasi (S_{14}), serta koefisien transmisi (S_{12} dan S_{13}) untuk Butler matrix 2 × 2 konvensional yang telah difabrikasi ditunjukkan pada Gbr. 8. Pada frekuensi operasi 2,4 GHz, koefisien refleksi bernilai sebesar -13,25 dB, isolasi sebesar -6,71 dB, serta koefisien transmisi sebesar -2,45 dB dan -4,58 dB. Koefisien refleksi kurang dari -10 dB diperoleh pada rentang frekuensi dari 1,82 GHz sampai 3,02 GHz (*fractional bandwidth* sebesar 50%). Pada Gbr. 8, hasil pengukuran S_{11} dan S_{14} berbeda dengan hasil simulasi. Hasil pengukuran menunjukkan adanya dua frekuensi resonansi yang muncul di sekitar 2 GHz dan 2,8 GHz untuk S_{11} dan di sekitar 1,8 GHz dan 3 GHz untuk S_{14} . Hal tersebut dimungkinkan terjadi akibat terjadinya kesalahan-kesalahan pada proses fabrikasi maupun pengukuran (pada port #1 dan port #4) yang mengakibatkan terjadinya kondisi *over-coupling* maupun *under-coupling* (pada port #1 maupun antara port #1 dan port #4) sehingga mengakibatkan munculnya beberapa frekuensi resonansi di sekitar 2,4 GHz (frekuensi resonansi yang ditargetkan). Hasil pengukuran beda fase pada port keluaran ($\angle S_{13} - \angle S_{12}$) ditunjukkan pada Gbr. 9. Pada frekuensi operasi 2,4 GHz, beda fase pada port keluaran sebesar 89,80°.

B. Butler Matrix 2 × 2 dengan Struktur Meander Line

Realisasi Butler matrix 2 × 2 dengan struktur meander line dilakukan menggunakan dimensi struktur meander line seperti yang ditunjukkan pada Tabel IV. Hasil fabrikasi Butler matrix 2 × 2 dengan struktur meander line ditunjukkan pada Gbr. 10(a) dan Gbr. 10(b). Fabrikasi dilakukan menggunakan substrat dari material dielektrik berupa epoxy FR4 dengan ketebalan 0,8 mm dan dimensi 17,9 mm × 36,4 mm.

Hasil pengukuran koefisien refleksi (S_{11}), isolasi (S_{14}), dan koefisien transmisi (S_{12} dan S_{13}) untuk Butler matrix 2 × 2 dengan struktur meander line yang telah difabrikasi ditunjukkan pada Gbr. 11. Pada frekuensi operasi 2,4 GHz, koefisien refleksi sebesar -28,10 dB, isolasi sebesar -6,15 dB, sedangkan koefisien transmisi sebesar -3,50 dB dan -3,70 dB. Koefisien refleksi kurang dari -10 dB diperoleh pada rentang frekuensi dari 1,88 GHz sampai 2,93 GHz (*fractional bandwidth* sebesar 43,75%). Sama seperti yang terjadi pada Butler matrix 2 × 2 konvensional (Gbr. 8), pada Butler matrix 2 × 2 dengan struktur meander line juga terjadi perbedaan S_{11} dan S_{14} antara hasil pengukuran dan hasil simulasi. Berbeda dengan Butler matrix 2 × 2 konvensional, hasil pengukuran S_{11} pada Butler matrix 2 × 2 dengan struktur meander line menunjukkan adanya drop amplitudo yang lebih rendah dan *fractional bandwidth* yang lebih lebar dibandingkan hasil simulasi. Hasil pengukuran S_{14} menunjukkan terjadinya pergeseran frekuensi resonansi ke sekitar 3 GHz dan *fractional bandwidth* yang lebih sempit dibandingkan hasil simulasi. Hal tersebut terjadi karena perhitungan dimensi struktur meander line hanya memperhitungkan *self inductance*, tidak mempertimbangkan *mutual inductance* dan *parasitic capacitance*. Kesalahan-kesalahan yang terjadi pada proses fabrikasi/pengukuran struktur meander line juga dapat memengaruhi hasil pengukuran. Hasil pengukuran beda fase pada port keluaran ($\angle S_{13} - \angle S_{12}$) ditunjukkan pada Gbr. 12. Pada frekuensi operasi 2,4 GHz, diperoleh beda fase pada port keluaran sebesar 91,37°.

Gbr. 13 menunjukkan skematik dan ilustrasi pola radiasi untuk antenna susun dua elemen ketika dihubungkan dengan



Gbr. 14 Skematik dan ilustrasi pola radiasi antenna susun dua elemen yang dihubungkan dengan port keluaran *Butler matrix* 2×2 dengan struktur *meander line*, (a) eksitasi port #1, (b) eksitasi port #4.

port keluaran *Butler matrix* 2×2 konvensional. Hasil pengukuran pada frekuensi operasi 2,4 GHz menunjukkan bahwa eksitasi yang diberikan pada port #1 dan port #4 (port masukan) menghasilkan beda fase antara port #2 dan port #3 (port keluaran) sebesar $-89,8^\circ$ dan $+89,8^\circ$. Kedua nilai beda fase tersebut menghasilkan pola radiasi dengan arah $-29,9^\circ$ ($29,9^\circ$ di sebelah kiri arah *boresight*) dan $+29,9^\circ$ ($29,9^\circ$ di sebelah kanan arah *boresight*). Untuk *Butler matrix* 2×2 dengan struktur *meander line*, hasil pengukuran pada frekuensi operasi 2,4 GHz menunjukkan bahwa eksitasi yang diberikan pada port #1 dan port #4 (port masukan) menghasilkan beda fase antara port #2 dan port #3 (port keluaran) sebesar $-91,4^\circ$ dan $+91,4^\circ$. Ketika port #2 dan port #3 dihubungkan dengan antenna susun dua elemen, akan dihasilkan pola radiasi dengan arah $-30,5^\circ$ ($30,5^\circ$ di sebelah kiri arah *boresight*) dan $+30,5^\circ$ ($30,5^\circ$ di sebelah kanan arah *boresight*), seperti diilustrasikan pada Gbr. 14. Arah pola radiasi yang dihasilkan oleh antenna susun dua elemen yang dihubungkan dengan *Butler matrix* 2×2 dengan struktur *meander line* berbeda sebesar $0,6^\circ$ dibandingkan dengan *Butler matrix* 2×2 konvensional. Perbedaan yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa ketika diaplikasikan sebagai *antenna feeding network*, *Butler matrix* 2×2 dengan struktur *meander line* memiliki kinerja yang relatif sama dengan *Butler matrix* 2×2 konvensional, sehingga dapat dibuktikan bahwa struktur *meander line* dapat diterapkan pada *Butler matrix* 2×2 dengan kinerja yang relatif baik.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada makalah ini telah dipaparkan tentang perancangan, simulasi, realisasi, dan pengukuran *Butler matrix* 2×2 dengan

struktur *meander line*. Penerapan struktur *meander line* pada bagian *through arm Butler matrix* 2×2 dapat mengurangi dimensi sebesar 34,54%. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pada frekuensi operasi 2,4 GHz, seluruh parameter telah memenuhi kriteria perancangan, kecuali parameter isolasi. Terdapat perbedaan pada S_{11} dan S_{14} antara hasil pengukuran dan hasil simulasi, baik pada *Butler matrix* 2×2 konvensional maupun pada struktur *meander line*. Hal ini terjadi karena perhitungan dimensi struktur *meander line* hanya memperhitungkan pengaruh *self inductance*. Selain itu, kesalahan-kesalahan yang terjadi pada proses fabrikasi/pengukuran memungkinkan terjadinya perbedaan pada hasil pengukuran dan hasil simulasi. Untuk meminimalkan perbedaan antara hasil pengukuran dan hasil simulasi, pengaruh *mutual inductance* dan *parasitic capacitance* perlu diperhitungkan dalam perhitungan dimensi struktur *meander line* dan kesalahan pada proses fabrikasi dan pengukuran perlu diminimalkan.

REFERENSI

- [1] T.S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed., Upper Saddle River, N.J, USA: Prentice Hall, 1996.
- [2] J. Blass, "Multidirectional Antenna - A New Approach to Stacked Beams," *1958 IRE International Convention Record*, 1960, hal. 48-50.
- [3] J. Nolen, "Synthesis of Multiple Beam Networks for Arbitrary Illumination," Ph.D. dissertation, The Jhon Hopkins Univ., Baltimore, USA, 1965.
- [4] J. Butler, "Beam-Forming Matrix Simplifies Design of Electronically Scanned Antennas," *Electronic Design*, Vol. 9, hal. 170-173, 1961.
- [5] Y.S. Jeong dan T.W. Kim, "Design and Analysis of Swapped Port Coupler and Its Application in a Miniaturized Butler Matrix," *IEEE*

- Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 58, No. 4, hal. 764-770, Apr. 2010.
- [6] E. Gandini, M. Ettore, R. Sauleau, dan A. Grbic, "A Lumped-Element Unit Cell for Beam-Forming Networks and Its Application to a Miniaturized Butler Matrix," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 61, No. 4, hal. 1477-1487, Apr. 2013.
- [7] H.X. Xu, G.M. Wang, dan X. Wang, "Compact Butler Matrix Using Composite Right/Left Handed Transmission Line," *Electronics Letters*, Vol. 47, No. 19, hal. 1081-1083, Sep. 2011.
- [8] V.K. Killamsetty dan B. Mukherjee, "Miniaturised Highly Selective Bandpass Filter with Very Wide Stopband Using Meander Coupled Lines," *Electronics Letters*, Vol. 53, No. 13, hal. 889-890, Jun. 2017.
- [9] S. Chakraborty, Y. Yang, X. Zhu, O. Sevimli, Q. Xue, K. Esselle, dan M. Heimlich, "A Broadside-Coupled Meander-Line Resonator in 0.13- μm SiGe Technology for Millimeter-Wave Application," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 37, No. 3, hal. 329-332, Mar. 2016.
- [10] X. Jin, Z. Zhang, L. Wang, dan B. Guan, "Compact Dual-Band Bandpass Filter Using Single Meander Multimode DGS Resonator," *Electronics Letters*, Vol. 49, No. 17, hal. 1083-1084, Agu. 2013.
- [11] E.A. Soliman, M.O. Sallam, W. De Raedt, dan G.A.E. Vandenbosch, "Miniaturized RFID Tag Antenna Operating at 915 MHz," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 11, hal. 1068-1071, 2012.
- [12] M.W.K. Lee, K.W. Leung, dan Y.L. Chow, "Low Cost Meander Line Chip Monopole Antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 62, No. 1, hal. 442-445, Jan. 2014.
- [13] D. Lin, J. Chou, C. Wu, dan H. Li, "A Novel Miniaturized Dual-Layered LTE Printed Antenna for Handheld Devices," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 12, hal. 1680-1683, 2013.
- [14] Y. Wang, K. Ma, dan S. Mou, "A Compact Branch-Line Coupler Using Substrate Integrated Suspended Line Technology," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 26, No. 2, hal. 95-97, Feb. 2016.
- [15] J. He dan B. Wang, "Compact Rat-Race Ring Coupler with Meander High-Impedance Transmission Line and Port Impedance Matching," *The Journal of Engineering*, Vol. 2015, No. 8, hal. 252-254, Agu. 2015.
- [16] J. He dan B. Wang, "Compact Branch-Line Coupler with Meander High-Impedance Transmission Line and Port Impedance Matching," *The Journal of Engineering*, Vol. 2016, No. 4, hal. 92-93, Apr. 2016.
- [17] Zulfi, A. Dewantari, dan A. Munir, "Implementation of Meander Line Structure for Size Miniaturization of 4x4 Butler Matrix," *Proc. of 27th International Conference on Telecommunications (ICT)*, 2020, hal. 1-4.
- [18] D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed., New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012.