

Artikel

Rancang Bangun Buttler Matrix 4X4 Untuk Beamforming Antena Array Pada Aplikasi 5G

Alfiqril Khaikal¹, Fannush Shofi Akbar.^{2*}, Nilla Rachmaningrum³¹⁻³ Program Studi Teknik Telekomunikasi, Telkom University Surabaya, Surabaya, Indonesia* Korespondensi : fannushakbar@telkomuniversity.ac.id

Received: 10 Februari 2024; Revised: 15 Maret 2024; Accepted: 15 Maret 2024

Abstrak: Penelitian ini membahas perancangan *Buttler Matrix* 4x4 untuk *beamforming* antena array pada aplikasi 5G. Antena array digunakan untuk menciptakan variasi arah pancaran radiasi utama dengan mengatur fasa suplai arus secara berbeda untuk setiap elemen. *Buttler Matrix* adalah rangkaian *microwave* dengan N input dan N output yang digunakan dalam *beamforming*. Hasil pengukuran menunjukkan *reflection coefficient* dan *transmission coefficient* yang sesuai dengan target frekuensi 2.35 GHz. Antena array menggunakan antena mikrostrip *rectangular patch*. Hasil dari penyusunan *Buttler matrix* dan antena array menunjukkan perubahan frekuensi kerja setelah fabrikasi, dengan beberapa perbedaan antara hasil simulasi dan pengukuran. Meskipun demikian, hasil pengukuran hampir memenuhi atau sudah memenuhi spesifikasi yang ditentukan. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi antena untuk aplikasi 5G, dengan fokus pada peningkatan cakupan, kapasitas, *beamforming*, dan struktur array.

Kata Kunci : *Buttler Matrix*; *Beamforming*; Antena Array; *Reflection Coefficient*; *Transmission Coefficient*.

1. Pendahuluan

Dunia media dan komunikasi mengambil langkah maju baru dengan rencana koneksi jaringan *fifth generation* (5G). Jaringan 5G merupakan pengembangan lebih lanjut dari jaringan nternet 4G LTE (*Long Term Evolution*) berkecepatan tinggi yang saat ni banyak digunakan di ponsel pintar. Di masa depan, jaringan 5G akan menawarkan nternet nirkabel yang lebih cepat untuk berbagai tujuan [1], [2]. Antena 5G memerlukan setidaknya dua antena di setiap pita frekuensi, yang berarti antena tersebut mendukung *multiple input-multiple output* (MIMO) dan *beamforming*. [3]. Antena array adalah susunan beberapa antena dentik. Tujuan dari pembuatan antena array antara lain meningkatkan gain antena, meningkatkan arah antena, mengarahkan daya pancaran ke daerah sudut yang diinginkan, menentukan arah sinyal masuk, dan memaksimalkan SINR (*Signal-to-Interference Noise Ratio*) [4], [5]. *Beamforming* adalah pembuatan pola radiasi antena yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengguna. *Beamforming* memiliki fungsi untuk memfokuskan sinyal [6]. Pada *beamforming* analog terdapat *Buttler Matrix* yang kedepannya akan di gunakan pada tugas akhir ni. *Buttler matrix* adalah suatu jenis matriks yang digunakan dalam sistem antena array untuk membagi sinyal

masukan ke setiap elemen antenna dan mengkombinasikan sinyal keluaran dari setiap elemen antenna menjadi sinyal keluaran tunggal [7]. Matrix Buttlar mempunyai N input dan N output, dan dapat digunakan untuk membagi daya input ke setiap elemen antenna yang terhubung ke dalamnya dengan cara yang terukur [8], [9].

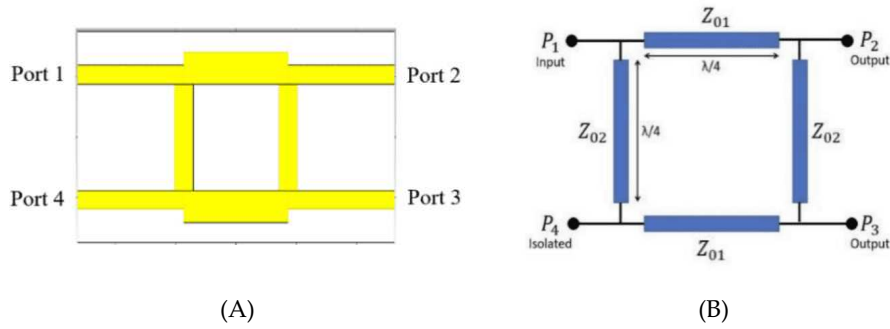
Pada penelitian terdahulu yang berjudul dengan judul *A Compact Design of 4X4 Buttlar Matrix with Four Linear Array Antenna at 38 GHz* membahas mengenai pembuatan buttlar matrix 4X4 yang terhubung dengan antenna array yang bekerja pada frekuensi 38 GHz. Pada pembuatan design nya buttlar matrix dan antenna array digabung menjadi 1 komponen dan bekerja pada frekuensi 38 GHz[10]. Maka dari itu pada penelitian ini akan dirancang Buttlar Matrix 4x4 yang memiliki 4 input dan 4 output pada frekuensi 2.35 GHz dan akan digunakan pada antenna array. Pada proses perancangan Buttlar Matrix 4x4 komponen buttlar matrix akan dibuat terpisah dengan antenna array untuk mengetahui apakah ketika kedua komponen tersebut dipisah akan mempengaruhi hasil polarisasinya atau tidak serta frekuensi yang digunakan berada pada 2.35 GHz untuk aplikasi 5G. Pemilihan menggunakan Buttlar Matrix 4x4 tergantung pada persyaratan aplikasi tertentu. Contohnya pada penelitian ni membuat Buttlar Matrix yang dimana setiap port output yang berjumlah 4 akan di sambungkan ke antenna array. Pembuatan desain antenna menggunakan aplikasi CST Studio suite 2019. Pada perancangan, antenna yang dibuat memiliki target frekuensi 2.35 GHz dengan reflection coefficient > 10 dB sebagai input untuk P1, P2, P3, P4 dan transmission coefficient > 6dB sebagai output untuk P5, P6, P7, P8 serta beda fase setiap port output yaitu 45°. Setelah dilakukan perancangan akan ada fabrikasi dengan menggunakan bahan FR 4 sebagai media pencetakan desain Buttlar Matrix 4x4. Kemudian akan dilakukan pengujian prototipe untuk memastikan kinerja dan kekurangan dari antenna array yang telah di buat dengan cara melihat nilai dari Reflection Coefficient, Transmission coefficient, Bandwidth, dan polarisasi dengan menggunakan alat Virtual Network Analyzer (VNA).

2. Perancangan Buttlar matrix

Buttlar Matrix terdiri dari beberapa komponen utama yaitu Branch-line Coupler, Crossover, Phase Shifter[11]. Ketiga komponen ni dapat digunakan pada jalur mikrostrip karena mudah pembuatannya dan murah. Sistem ni dapat menghasilkan sinar sempit dalam arah berbeda dengan penguatan lebih tinggi karena diproduksi pada platform yang sama[12].

2.1. Perancangan Branch-line Coupler

Branch-line Coupler sering disebut coupler 3 dB atau hybrid 90°. Komponen ni dimaksudkan untuk membagi daya input menjadi dua daya output pada port output secara merata. Secara teoritis, coupler harus mentransmisikan setengah daya (-3 dB) ke kedua port output dan menghasilkan perbedaan fase 90°[13],[14].



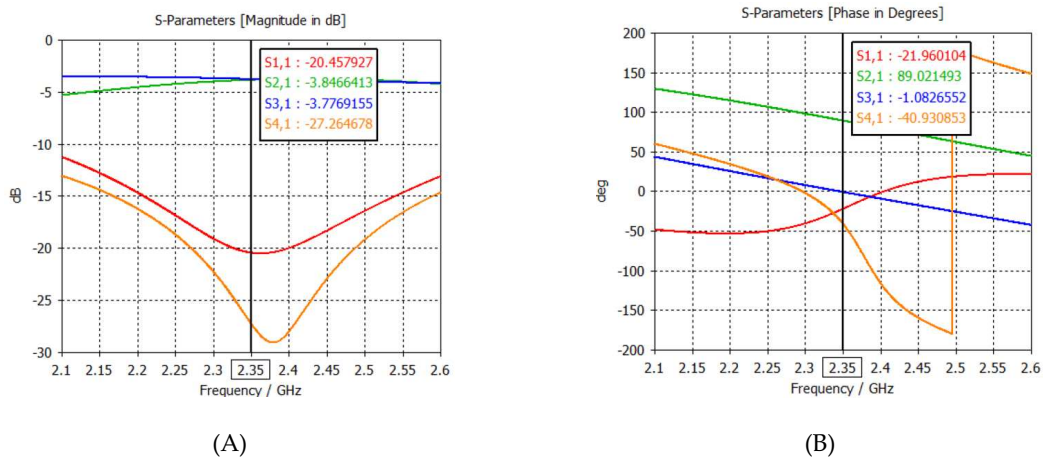
Gambar 1. Branch-line Coupler (A) Struktur, (B) Parameter impedansi

Dapat dilihat pada gambar 1 (A) struktur dari *branch-line coupler* terdapat daya *input* pada *port 1*, daya *output* pada *port 2* dan *port 3*, dan solasi pada *port 4*. Cabang *horizontal* dan *vertikal* diwakili oleh impedansi dan, masing-masing kedua cabang memiliki *electrical lengths*. Pada gambar (B) ditunjukkan parameter pengukuran impedansi pada *Branch-line Coupler* yang berupa Z_{01} dan Z_{02} . Formulasi matematis untuk mendapatkan impedansi kedua garis cabang ditunjukkan dalam rumus berikut [15]:

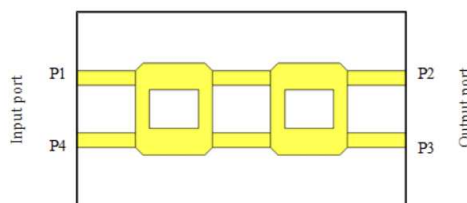
$$Z_{01} = Z_o \times \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{1}{1}}} = Z_o \sqrt{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$Z_{02} = Z_o \times \sqrt{\frac{1}{1}} = Z_o \sqrt{1} \quad (2)$$

Berikut merupakan hasil simulasi dari *branch-line coupler* yang telah dibuat dan telah dilakukan optimasi yang bekerja pada frekuensi 2.35 GHz.



Gambar 2. Hasil Simulasi Branch-line Coupler (A) Magnitude, (B) Phase

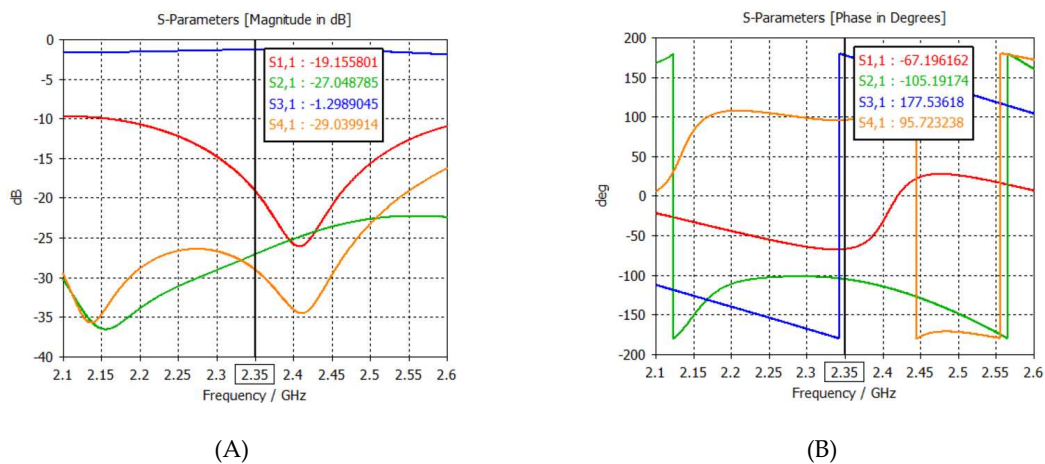


Gambar 3. Struktur Crossover

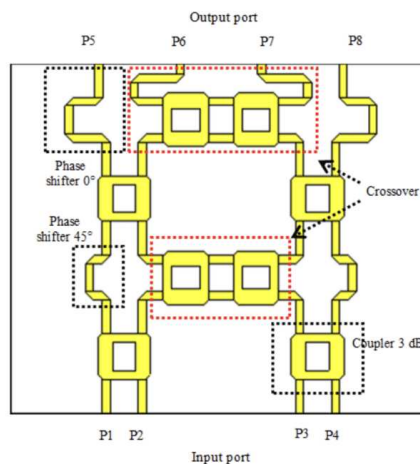
Pada gambar 4 (A) setelah dilakukan optimasi didapatkan hasil *transmission coefficient* S2.1 : -3.84 dB dan S3.1 : -3.77 dB pada frekuensi 2.35 GHz. Hasil tersebut sudah sesuai dengan hasil yang diinginkan yang dimana hasil *output* dari S2.1 dan S3.1 hasilnya harus sama. Serta didapatkan juga *reflection coefficient* sebesar S1.1 : -20.45 dB dan *solation* sebesar S4.1 : -27.26 dB pada frekuensi 2.35 GHz. Pada gambar 4 (B) dapat dilihat perbedaan fasa antara parameter S2.1 : 89.02° dan S3.1 : -1.08°. Hasil dari perbedaan fasa antara *port* 2.1 dan *port* 3.1 yaitu 90.1° sangat mendekati 90° yang dimana secara teori hasil tersebut sangat bagus dan sesuai dengan target

2.2. Crossover

Komponen utama kedua yang telah dibuat adalah *crossover*. Komponen ni umumnya dibuat dengan menggabungkan dua *coupler* 3 dB[16]. *Crossover* adalah komponen yang terdiri dari empat *port* simetris dengan dua *port input* dan dua *port output*. Untuk mencapai antarmuka yang dirancang sempurna, semua *port* yang berdekatan dengan konektor harus dipisahkan secara sempurna satu sama lain.[17]. Berikut merupakan hasil dari simulasi *crossover*



Gambar 4. Hasil Simulasi Crossover (A) Magnitude, (B) Phase



Gambar 5. Struktur Butler Matrix 4X4

Gambar 4 merupakan hasil desain pada aplikasi CST yang sudah dirancang baik setelah dilakukan optimasi. Hasil dari S-Parameter *magnitude* setelah dioptimasi didapatkan hasil S3.1 : -1.29 dB pada frekuensi 2.35 GHz. Hasil dari S-Parameter *crossover* setelah dioptimasi masih < 0 dB. Akan tetapi hasil S3.1 tersebut sudah sangat mendekati 0 dB.

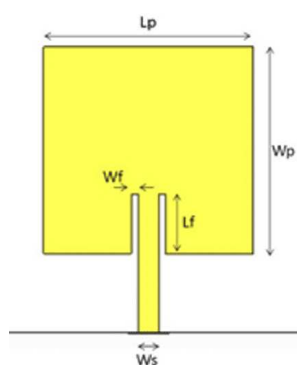
2.3. Butler Matrix 4X4

Butler Matrix dirancang setelah tiga komponen utama: *branch-line coupler*, *crossover*, dan *Phase Shifter*[11]. Matriks Butler 4x4 dalam penelitian ni terdiri dari empat *branch-line coupler*, dua *crossover*, dan ada beberapa *Phase Shifter*. Gambar 5 menunjukkan struktur *Buttler Matrix* 4x4.

2.4. Perancangan Antena Array Mikrostrip

Bentuk *patch* yang banyak digunakan dalam pembuatan antenna mikrostrip adalah persegi panjang (*rectangular patch*). Antena patch persegi panjang adalah susunan beberapa antena mikrostrip persegi panjang yang beroperasi bersama-sama. Antena ni biasa digunakan dalam berbagai aplikasi seperti radar kapal, komunikasi satelit, dan teknologi komunikasi nirkabel 5G[18]. *Patch* persegi panjang adalah bagian dari antena mikrostrip dan bertindak sebagai pemancar gelombang elektromagnetik[19]. Antena *patch* mikrostrip persegi panjang terdiri dari lebar (W) dan panjang (L) pada permukaan dielektrik substrat dengan ketebalan (h) dan konstanta dielektrik (ϵ_r)[20]. Pada penelitian ni menggunakan antena mikrostrip *rectangular patch* sebagai *antenna array* atau antena *output* dari *buttler matrix* yang telah dibuat.

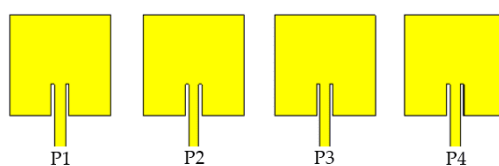
Dimensi *antenna microstrip patch* persegi dengan pencatuan *insert feeding* dapat dilihat pada tabel 1. Setelah didapatkan ukuran dimensi dari *rectangular patch* selanjutnya patch tersebut di susun menjadi *antenna array* seperti pada gambar 7.



Tabel 1. Ukuran Dimensi *Rectangular Patch*

Parameter	Nilai
Wp	30.2 mm
Lp	30.2 mm
Wf	1 mm
Lf	9.5 mm
Ws	3.2 mm
Ls	10 mm

Gambar 6. Struktur *Rectangular Patch*



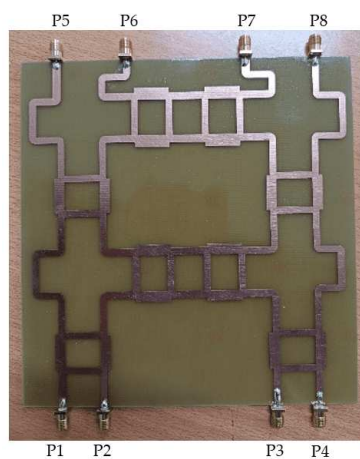
Gambar 7. Struktur *Antenna Array*

3. Hasil dan Analisa

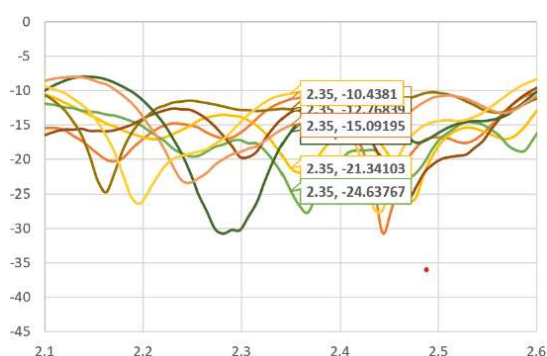
Pada desain *Buttler Matrix* 4X4 yang bekerja pada frekuensi 2.35 GHz yang telah dibuat memiliki dimensi 16 mm X 17 mm X 1.6 mm serta desain *antenna array* yang telah dibuat memiliki dimensi 16 mm X 5 mm X 1.6 mm. Berikut merupakan hasil dari simulasi serta pengukuran *Buttler Matrix* 4X4 dan *antenna array* yang telah dibuat.

3.1. Buttler Matrix 4X4

Buttler Matrix yang sempurna dan deal untuk di fabrikasi terdiri dari gabungan antara *Branch-line Coupler*, *crossover*, dan *Phase Shifter*. *Phase Shifter* memiliki ukuran panjang (L) dan lebar (W) yang berbeda-beda. Phase shifter juga berperan dalam mengoptimalkan kinerja antena array[21]. Dapat dilihat pada gambar 8 hasil dari fabrikasi *buttler matrix* 4X4 yang dimana P1, P2, P3, dan P4 sebagai *input* dan P5, P6, P7, dan P8 sebagai *output*. Berikut merupakan nilai *reflection coefficient* dari pengukuran *battler matrix* yang telah difabrikasi.



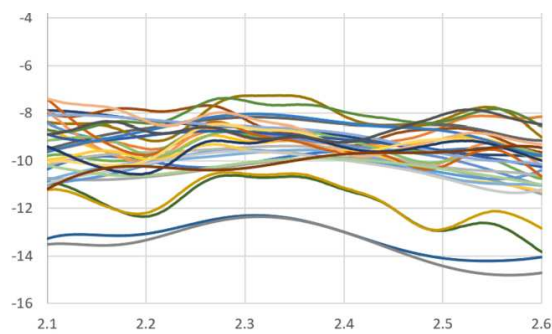
Gambar 8. Buttler Matrix 4X4 yang Telah Difabrikasi



Gambar 9. Grafik hasil Pengukuran *Reflection Coefficient* Buttler Matrix 4X4

Tabel 2. Nilai Hasil Pengukuran Buttler Matrix 4X4

Port	S-Parameter	Bandwidth
1	11.23 dB	600 MHz
2	21.53 dB	760 MHz
3	24.63 dB	790 MHz
4	13.17 dB	560 MHz
5	12.76 dB	400 MHz
6	15.97 dB	411 MHz
7	15.05 dB	432 MHz
8	10.36 dB	456 MHz



Gambar 10. Grafik Hasil Pengukuran *Transmission Coefficient Buttler Matrix 4X4*

Tabel 3. Nilai *Transmission Coefficient Buttler*

Matrix 4X4	
Port	Transmissio Coefficient
5.1	8.889119 dB
6.1	9.115906 dB
7.1	8.936133 dB
8.1	8.861545 dB
5.2	7.288182 dB
6.2	10.65578 dB
7.2	9.169137 dB
8.2	9.559458 dB
5.3	8.721014 dB
6.3	9.162804 dB
7.3	10.5356 dB
8.3	7.675084 dB
5.4	8.585118 dB
6.4	8.762975 dB
7.4	8.979973 dB
8.4	8.986133 dB

Bisa dilihat pada tabel 2 hasil yang didapatkan berbeda-beda terdapat jarak yang cukup jauh. Dari hasil pengukuran nilai *reflection coefficient* yang paling rendah terdapat pada port 8 yaitu 10.36 dB dan nilai *reflection coefficient* yang paling tinggi yaitu di port 3 yaitu 24.63 dB. Pada hasil *bandwidth* yang didapatkan hasil juga berbeda-beda. *Bandwidth* terendah terdapat pada port 5 yaitu 400 MHz dan yang paling tinggi ada di port 3 yaitu 790 MHz. Berikut merupakan nilai hasil dari simulasi pengukuran *transmission coefficient* pada *Buttler Matrix 4X4*

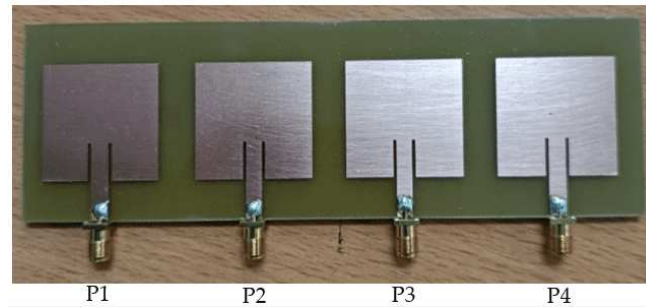
Dapat dilihat Tabel 3 yang merupakan hasil dari pengukuran *transmission coefficient Buttler matrix 4X4*. Dari hasil pengukuran tersebut hasilnya cukup stabil walaupun hasil dari pengukuran yang didapatkan tidak sesuai dengan target yang diinginkan yaitu > 6 dB serta *error* yang didapatkan juga cukup tinggi, ada beberapa yang *error* nya berada di atas 50% dan efisiensi nilai *transmission coefficient* hasil dari pengukuran setelah fabrikasi yaitu rata-rata berada di 50% pada setiap port put.

Pada tabel 4 merupakan hasil pengukuran *Phase output* pada setiap port input yang telah dinormalisasi pada port output 5 pada *buttler matrix*. Dari hasil di atas dapat dilihat banyak terjadi *error* dari hasil yang didapatkan. Hasil perbedaan fasa didapat dari hasil simulasi menggunakan CST dan hasil dari pengukuran menggunakan VNA. *Error* dari perbedaan fasa hasil pengukuran berbeda-beda, ada yang *error* nya tinggi dan ada juga yang *error*-nya rendah. Dapat dilihat juga hasil polaradiasi pada bagian *main lobe direction* yang juga terdapat *error* setelah dilakukan pengukuran pada *Buttler Matrix*.

Tabel 4. Hasil Pengukuran *Phase Output Buttler Matrix 4X4*

Port	Keterangan	Perbedaan Fasa				Main Lobe Direction	Main Lobe Direction (Error)
		5	6	7	8		
1	Target	0°	-45°	-90°	-135°	-21°	2°
	Hasil	-0°	-9°	-82°	-115°	-19°	
2	Target	-90°	45°	180°	-45°	58°	23°
	Hasil	-90°	78°	-169°	-22°	35°	
3	Target	-45°	180°	45°	-90°	-58°	25°
	Hasil	-45°	-176°	46°	-105°	-33°	
4	Target	-135°	-90°	-45°	0°	20°	0°
	Hasil	-135°	-86°	-32°	12°	20°	

3.2. Antena Array



Gambar 11. Antena Array Setelah Fabrikasi

Pada tabel 5 merupakan hasil pengukuran S-Parameter menggunakan VNA. Hasil pengukuran yang dilakukan terjadi pergeseran frekuensi saat fabrikasi sehingga menyebabkan nilai atau titik terendah dari S-Parameter tidak tepat berada di frekuensi 2.35 GHz. Sehingga hasil dari pengukuran S-Parameter tidak sesuai dengan hasil simulasi yang telah dilakukan.

3.3. Integrasi Butler Matrix dan Antena array

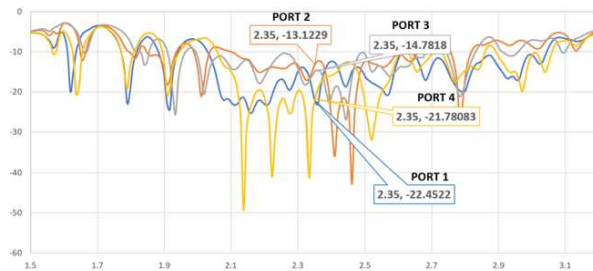
Berikut merupakan hasil dari pengukuran *Buttler Matrix* yang sudah dihubungkan dengan *antenna array* menggunakan kabel konektor dan di ukur untuk mencari polaradiasi dari antenna *output* setelah terhubung dengan *Buttler Matrix* . Untuk gambar dari penggabungan antara *Buttler Matrix* dengan *antenna array* dapat dilihat pada gambar 12.

Tabel 5. Nilai Hasil Simulasi dan Sesudah Fabrikasi Antena Array

Port	S-Parameter		Bandwidth	
	Simulasi	Pengukuran	Simulasi	Pengukuran
1	21.36 dB	12.42 dB	88 MHz	53 MHz
2	17.85 dB	21.18 dB	75 MHz	72 MHz
3	17.87 dB	16.53 dB	75 MHz	69 MHz
4	22.49 dB	13.56 dB	86 MHz	69 MHz



Gambar 12. Butler Matrix 4X4 dan Antena Array

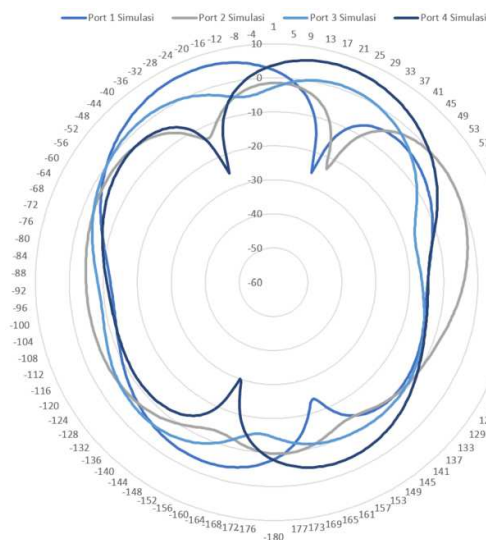


Gambar 13. Grafik Hasil Pengukuran *Buttler Matrix* 4X4 dan Antena Array

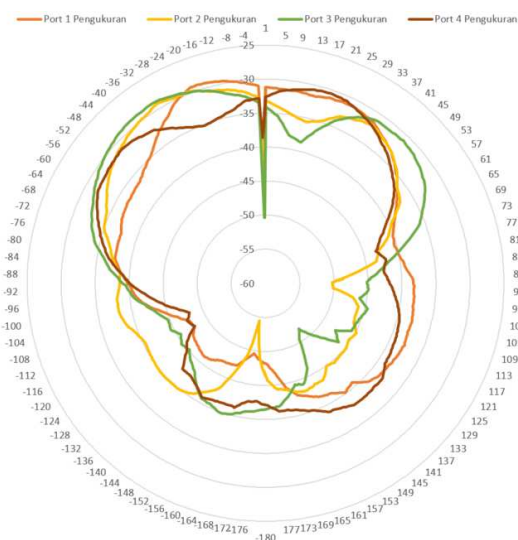
Pada tabel 6 terdapat nilai *reflection coefficient* dan *bandwidth* dari *Buttler Matrix* yang telah digabung dengan *antenna array*. Hasil yang didapatkan yaitu bervariasi, nilai terendah terdapat pada port input 2 yaitu 13.03 dB dan nilai tertinggi terdapat pada port input 1 yaitu 22.54 dB. *Bandwidth* yang didapatkan juga bervariasi yang terendah pada port input 3 yaitu 451 MHz dan yang tertinggi di port input 1 yaitu 579 MHz. Setelah dilakukan pengukuran menggunakan VNA untuk mencari nilai dari *reflection coefficient* dan *bandwidth* selanjutnya dilakukan pengukuran untuk mencari hasil polarisasi dari *Buttler Matrix* yang telah digabungkan dengan *antenna array*. Pengukuran dapat dilihat pada gambar 14. Pada gambar 14 merupakan hasil polarisasi dari *buttler matrix* dan *antenna array*. Dari hasil simulasi pada aplikasi CST Studio polarisasi yang didapatkan yaitu pada port 1 hasil -21° , pada port 2 hasilnya yaitu 59° , pada port 3 hasilnya -37° , dan pada port 4 hasilnya -19° . sedangkan dari hasil pengukuran polarisasi *Buttler Matrix with antenna array* didapatkan hasilnya yaitu port 1 polarisasinya yaitu -19° dan dengan *gain* sebesar -29.2 dBi, pada port 2 polarisasinya yaitu 35° dan dengan *gain* sebesar -31.9 dBi, pada port 3 polarisasinya yaitu -33° dan dengan *gain* sebesar -28.8 dBi, dan pada port 4 polarisasinya yaitu 20° dan dengan *gain* sebesar -30.5 dBi. Perbedaan hasil dari simulasi dan hasil pengukuran terjadi dikarenakan adanya pergeseran frekuensi yang terjadi pada saat fabrikasi akibat adanya penambahan atau pengurangan dimensi secara tidak sengaja sehingga terjadinya pergeseran frekuensi.

Tabel 6. Nilai Hasil Pengukuran *Buttler Matrix* 4X4 dan Antena Array

Port	S-Parameter	Bandwidth
1	22.54 dB	579 MHz
2	13.02 dB	561 MHz
3	14.89 dB	451 MHz
4	21.88 dB	545 MHz



(A)



(B)

Gambar 14. Hasil Polaradiasi *Buttler Matrix* 4X4 dan Antena Array (A) Simulasi, (B) Pengukuran

4. Kesimpulan

Dari hasil penyusunan *Buttler matrix*, diperoleh kesimpulan bahwa setiap patch menghasilkan parameter yang berbeda karena dimensi yang berbeda pula. *Buttler matrix* 4X4 dengan dimensi 16,4 cm x 17 cm memiliki 4 *port input* dan 4 *port output*, sedangkan desain *antenna array* memiliki dimensi 16 cm x 5 cm dengan 4 *port input*. Kedua desain tersebut menggunakan bahan dasar FR-4 untuk *substrate* dan *copper* untuk *patch* dan *ground*. Keduanya digabungkan menggunakan 4 kabel *coaxial*, di mana *port 5* pada *Buttler matrix* disambungkan dengan *port 1* antena *array*, *port 6* *Buttler matrix* dengan *port 2* antena *array*, *port 7* *Buttler matrix* dengan *port 3* antena *array*, dan *port 8* *Buttler matrix* dengan *port 4* antena *array*.

Adanya perubahan frekuensi kerja pada *Buttler matrix* dan *antenna array* terjadi setelah fabrikasi karena penambahan atau pengurangan dimensi serta perubahan nilai ϵ_r pada saat fabrikasi antena. Pergeseran frekuensi ini berdampak pada perubahan parameter seperti S-Parameter, *reflection coefficient*, *bandwidth*, *transmission coefficient*, *phase output*, dan polarisasi dari *Buttler matrix* dan *antenna array* yang telah difabrikasi. Hasil pengukuran *Buttler matrix* dan *antenna array* setelah fabrikasi menunjukkan beberapa perbedaan dengan hasil simulasi, dengan *reflection coefficient* pada frekuensi 2.35 GHz menunjukkan nilai S1.1: 22.45 dB, S2.2: 13.12 dB, S3.3: 14.78 dB, dan S4.4: 21.78 dB, Serta efisiensi hasil *transmission coefficient* pada *port 1* : 50%, *port 2* : 50%, *port 3* : 51%, *port 4* : 55%, dan hasil Polaradiasi pada *Port 1*: -19° , *Port 2*: 35° , *Port 3*: -33° , *Port 4*: 20° . Hasil dari pengukuran *Buttler matrix* dan *antenna array* setelah fabrikasi hampir memenuhi atau sudah memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan.

Referensi

- [1] T. Yuniarto, L. Kompas, and J. P. Selatan, "Masa Depan Jaringan 5G dan Perilaku Komunikasi Digital," *Warta ISKI*, vol. 02, no. 01, pp. 1–7, 2019, doi: <https://doi.org/10.25008/wartaiski.v2i01.22>.
- [2] N. Al-Falahy and O. Alani, "Coverage and capacity improvement of millimetre wave 5G network using distributed base station architecture," *IET Networks*, vol. 8, no. 4, pp. 246–255, Jul. 2019, doi: 10.1049/iet-net.2018.5059.
- [3] F. Amillia, E. Setijadi, and G. Hendrantoro, "Subarray 4x4 for 5G MIMO Antenna with Elements that Implement Parasitic Techniques," *JNTETI*, vol. 12, no. 1, pp. 8–14, 2023.
- [4] Prasetiadi and Ananto E, "PENGARUH DISTRIBUSI PEMBOBOTAN TERHADAP POLA ARRAY PADA DELAY AND SUM BEAMFORMING," 2012. Accessed: May 31, 2023. [Online]. Available: <https://jurnal.unnur.ac.id/index.php/indept/about>
- [5] K. Quzwain, O. Ardiansyah, and V. Rahmawati, "Implementasi Struktur Array 8x2 Pada Antena Mikrostrip Yagi," *Journal of Informatics and Communications Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 74–88, 2023, doi: 10.52661.
- [6] A. Farino, D. Suryadi,) Program, S. Teknik, E. Jurusan, and T. Elektro, "RANCANG BANGUN ANTENA ARRAY MIKROSTRI PATCH TRIANGULAR-CIRCULAR UNTUK APLIKASI WIRELESS LOCAL AREA NETWORK (WLAN)," *J3EIT*, vol. 7, no. 1, 2019.

- [7] A. Vosoogh, P. S. Kildal, and V. Vassilev, "A multi-layer gap waveguide array antenna suitable for manufactured by die-sink EDM," in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2016*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., May 2016. doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481259.
- [8] C. Mahardhika, S. Nugroho, and B. Syihabuddin, "PERANCANGAN BUTLER MATRIKS 4X4 UNTUK PENGARAHAN BERKAS ANTENA PADA STASIUN BUMI," *Prosiding SENIATI*, vol. 3, no. 1, Feb. 2017, Accessed: May 31, 2023. [Online]. Available: <https://ejournal.itn.ac.id/index.php/seniati/article/view/1631>
- [9] N. M. Jizat, Z. Yusoff, A. S. M. Marzuki, N. Zainudin, and Y. Yamada, "Insertion Loss and Phase Compensation Using a Circular Slot Via-Hole in a Compact 5G Millimeter Wave (mmWave) Butler Matrix at 28 GHz," *Sensors*, vol. 22, no. 5, Mar. 2022, doi: 10.3390/s22051850.
- [10] Y. Rahayu, J. R. M. Simanihuruk, and Y. Wahyu, "A Compact Design of 4x4 Butler Matrix with Four Linear Array Antenna at 38 GHz," 2022. [Online]. Available: <http://www.ijeepse.ejournal.unri.ac.id>
- [11] N. Kamila, B. Setia Nugroho, and B. Syihabuddin, "Perancangan Butler matrix 4x4 pada Frekuensi 1,27 GHz untuk Aplikasi Synthetic Aperture Radar (SAR)," *Prosiding Seminar Nasional ReTII ke-10 2015*, pp. 1–8, Jan. 2017, Accessed: Jun. 09, 2023. [Online]. Available: <https://journal.itny.ac.id/index.php/ReTII/article/view/398>
- [12] S. Vijaykumar Kalam Snehal Vijaykumar Kalam and A. Bhagwandas Rath, "Optimum Design of 4X4 Symmetrically Structured Butler Matrix," 2016. [Online]. Available: www.ijret.org
- [13] Y. Rahayu, J. R. M. Simanihuruk, and Y. Wahyu, "A Compact Design of 4x4 Butler Matrix with Four Linear Array Antenna at 38 GHz," *International Journal of Electrical, Energy and Power System Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 80–85, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.31258/ijeepse.5.3.80-85>.
- [14] Y. Barnadi, "PENGARUH PERUBAHAN DIMENSI TERHADAP NILAI ISOLASI PADA BRANCH LINE COUPLER," 2021.
- [15] F. S. Akbar and N. Rachmaningrum, "Design and Realization Of 2-Way Unequal-Split Power Divider Based On Branchline Coupler For S-Band Radar Applications," *EAI*, Feb. 2023, doi: 10.4108/eai.6-10-2022.2327432.
- [16] P. G. Student, M. Prashant, and S. Malge, "Design & Simulation of Switched-Beam Antenna using Butler Matrix Feed Network Mr. Amit N. Kshirsagar," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 3, no. 7, pp. 441–445, 2014, [Online]. Available: www.ijert.org
- [17] N. L. Yusup, E. S. Nugraha, and P. K. Goran, "Perancangan Antena Mikrostrip Rectangular Array Untuk Teknologi 5G Pada Frekuensi 28 GHz," *Jurnal Telekomunikasi dan Komputer*, vol. 11, no. 2, p. 100, Aug. 2021, doi: 10.22441/incomtech.v11i2.10814.
- [18] B. B. Harianto, M. A. Aditiyawardman, N. Pambudiyatno, Y. S. Politeknik, and P. Surabaya, "Desain Antena Mikrostrip Rectangular Array 2x1 Desain Antena Mikrostrip Rectangular Array 2x1 untuk Radar Kapal," *Jurnal Penelitian Politeknik Penerbangan Surabaya Edisi XXXIII*, vol. 6, no. 3, 2021.
- [19] K. S. Jones Andrean, L. Olivia Nur, and B. Syihabuddin, "PERANCANGAN DAN REALISASI ANTENA MIMO 4x4 ARRAY RECTANGULAR PATCH DENGAN U-SLOT UNTUK APLIKASI 15 GHZ DESIGN AND REALIZATION MIMO 4x4 ARRAY RECTANGULAR PATCH ANTENNA WITH U-SLOT FOR 15 GHZ APPLICATION," *Telkom University Repository*, 2017.
- [20] S. Alam, "PERANCANGAN ANTENA MIKROSTRIP ARRAY 2x1 UNTUK MENINGKATKAN GAIN UNTUK APLIKASI LTE PADA FREKUENSI 2.300 MHz," *ResearchGate*, vol. 7, no. 28, pp. 365–378, 2018, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/327594703>

- [21] Z. R. Omam *et al.*, "Ka-Band passive phased-array antenna with substrate integrated waveguide tunable phase shifter," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 68, no. 8, pp. 6039–6048, Aug. 2020, doi: 10.1109/TAP.2020.2983838.



© 2019 oleh penulis. Dikirim untuk kemungkinan publikasi akses terbuka di bawah syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).