

IMPLEMENTASI BUTLER MATRIX PADA ANTENA TRIANGULAR PADA FREKUENSI 5,8GHz

1st Caessar Malik Koesmanawan
Telecommunication Engineering Dept
Telkom University
Jakarta, Indonesia
caessar@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Kamelia, ST. MSc. PhD.
Telecommunication Engineering Dept
Telkom University
Jakarta, Indonesia
kquzwain@telkomuniversity.ac.id

3rd Sevierda Raniprima, S.T., M.T.
Telecommunication Engineering Dept
Telkom University'
Jakarta, Indonesia
aisyahnovfitri@telkomuniversity.ac.id

ABSTRAK

Perkembangan teknologi saat ini menjadikan sistem komunikasi sebagai kebutuhan utama manusia, terutama dalam komunikasi nirkabel yang berkembang pesat. Kebutuhan akan sistem komunikasi berkecepatan tinggi dengan kualitas yang optimal semakin meningkat. Penelitian ini mengusulkan rancangan sistem antena sederhana yang beroperasi pada frekuensi 5,8 GHz dengan ukuran yang sangat kecil pada dua material substrat yang berbeda pada saat simulasi. Penggunaan butler matrix memungkinkan jaringan WiFi memiliki cakupan yang lebih luas, lebih cepat, dan lebih stabil.

Penelitian ini merancang dan menerapkan antena menggunakan butler matrix 2x2 menggunakan patch segitiga yang dikembangkan pada material FR-4. butler matrix 2x2 ini terhubung dengan antena yang mampu secara cerdas memfokuskan sinyal WiFi ke perangkat yang terhubung, sehingga meningkatkan efisiensi transmisi dibandingkan dengan penyebaran sinyal ke segala arah. Antena yang dirancang berbasis patch triangular dan dioperasikan pada frekuensi 5,8 GHz.

Perancangan dan simulasi antena dilakukan menggunakan CST Studio. Hasil simulasi menunjukkan bahwa matriks Butler yang dirancang dapat mencapai nilai return loss sebesar dengan nilai -15.46 dan S22 -14.07 dB, gain 5.95 dB, serta dengan dimensi total yang kompak, yaitu 75x75 mm. Dengan kinerja yang optimal, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan sistem komunikasi nirkabel berkecepatan tinggi dan efisien.

Keywords: Antena Microstrip Triangular Butler Matrix, return loss, Gain.

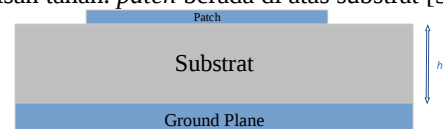
I. PENDAHULUAN

Transmisi data berkecepatan tinggi membutuhkan spektrum besar frekuensi tinggi. Agar energi dapat dikumpulkan, penerimaan harus ditingkatkan dan pola radiasi harus berubah sesuai dengan sinyal lingkungan. Memperluas jangkauan, meningkatkan kapasitas saluran, mengarahkan beberapa beam ke berbagai perangkat seluler dalam berbagai jaringan[1]. Memperluas jangkauan, meningkatkan kapasitas saluran, mengarahkan beberapa beam ke berbagai perangkat seluler dalam berbagai jaringan [2]. Dengan menggunakan pemodelan antena 2x2, penelitian ini akan melakukan implementasi antena mikrostrip patch segitiga dengan menggunakan metode butler matrix yang bekerja pada frekuensi 5,8 GHz. Karena kelebihanannya dalam memberikan fleksibilitas dalam pembentukan beamforming, butler matrix dipilih untuk meningkatkan gain dan direktivitas antena, menggunakan patch berbentuk segitiga memiliki beberapa keuntungan, seperti kemudahan dalam perancangan, pembuatan, analisis dan cenderung berukuran lebih kecil dibandingkan dengan jenis patch lainnya. Antena diharapkan memiliki hasil parameter yang didapat yaitu $\text{return loss} \leq -10\text{dB}$, $\text{gain} \geq 4\text{ dB}$.

II. KAJIAN TEORI

A. Antena Mikrostrip.

Antena mikrostrip berasal dari dua kata, yaitu *micro* yang berarti sangat tipis atau kecil dan *strip* yang berarti bilah atau potongan. struktur antena mikrostrip biasanya terdiri dari patch, substrat, dan lapisan tanah. *patch* berada di atas substrat [3]:



Gambar 1. Struktur dari Sebuah Antena Mikrostrip.

B. Antena Mikrostrip *patch Triangular*.

Pada Tahap ini akan dilakukan perancangan antenna awal yaitu mikrostrip *patch triangular* dengan menggunakan Ini dapat dilakukan dengan mengetahui frekuensi kerja dan konstanta dielektrik yang digunakan. Panjang sisi segitiga dapat dihitung menggunakan persamaan 2.1 berikut [4]:

$$a = \frac{2c}{3fr\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

C. Pencatu *Feed Line*.

Pencatu yang paling sederhana adalah *microstrip inset-feed line* karena mudah dicocokkan dengan mengontrol posisi *inset*, yaitu kedalaman *inset* Y_0 dan pemisahan *inset* dari *patch* (S_0). Pada metode ini, posisi titik pencatu berada di dalam *patch* dan *microstrip feed line* 50Ω dikelilingi *air gap* hingga titik pencatu [3].

- a) Perhitungan dimensi lebar saluran pencatu.

Mencari nilai B dari impedansi 50Ω [5].

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

- b) Menentukan lebar saluran pencatu [5].

$$W_t = \frac{2h}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ (\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r}) \right\} \right] \quad (7)$$

- c) Menentukan Panjang saluran Pencatu [5].

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{1 + \frac{12h}{W_f}} \right] \quad (3)$$

$$\lambda g = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (4)$$

$$L_f = \frac{\lambda g}{4} \quad (5)$$

D. Butler matrix.

Butler matrix adalah salah satu pencatu yang menghasilkan banyak arah berkas, dengan pengkopel *hybrid* 90° sebagai komponen utamanya. Selain *hybrid* 90° , penyusun *butler matrix* lainnya termasuk *crossover* dan penggeser/penggeser fasa [6].

- *Cross-over* memiliki empat port genap: dua sebagai port masukan dan dua sebagai port keluaran [7].
- *Hybrid Coopler* 90° memiliki kemampuan untuk memberikan fasa sinyal 90° ke port keluaran. Komponen ini memiliki garis dasar yang terhubung ke garis opsional dengan panjang gelombang seperempat ($\lambda/4$).

III. METODE

A. Diagram Alir.

Tahapan perancangan ditunjukkan dengan *flow chard* pada gambar 2. Pada penelitian ini dilakukan perancangan awal yaitu antenna utama yang berbentuk *triangular*, selanjutnya melakukan perhitungan *butler matrix* dan perancangan *butler matrix*, lalu akan di gabungkan menjadi perancangan antenna *microstrip*

patch triangular dengan menggunakan *buttler matrix* 2×2 .

Mulai dari antenna utama sampai antenna mikrostrip menghitung dimensi *patch triangular*, menghitung dimensi pencatu, melakukan simulasi antenna yang telah dirancang, dan melakukan simulasi. menggunakan CST. kemudian dilakukan simulasi dan modifikasi sampai didapatkan spesifikasi dengan *return loss* ≤ -10 dB, *gain* ≥ 4 dB.



Gambar 2. Diagram Alir.

B. Perancangan.

Parameter tersebut akan disimulasikan dengan menggunakan *software* CST Studio Suite. Sebelum melakukan desain rancangan antenna, pada penelitian ini harus menentukan spesifikasi substrat yang digunakan.

Tabel 1. Spesifikasi Substrat.

PARAMETER	KETERANGAN
Jenis Substrat	FR-4
Konstanta Dielktrik (ϵ_r)	4,3
Tebal Substrat (h)	1,6mm
<i>Loss Tangen</i> ($\tan\delta$)	0,0265

1. Rancangan antenna *patch triangular*.

Yang memiliki permitivitas dielektrik (ϵ_r) sebesar 4,3 dan ketebalan (h) sebesar 1,6 mm.

$$a = \frac{2 \times 3 \times 10^8}{3 \times 5.8 \times 10^9 \sqrt{4.3}} \quad (6)$$

$$a = 16.6 \text{ mm} \quad (7)$$

2. Rancangan butler matrix 2x2.

Pada penelitian kali ini akan merancang suatu rangkaian yang dapat membagi daya dari 2 input menjadi 2 output dengan desain antenna *Coopler hybrid 90°*[8].

$$\frac{Z_0}{\sqrt{2}} = 35,35\Omega \quad (8)$$

$$\frac{\lambda}{\sqrt{4}} = 12.93\text{mm} \quad (9)$$

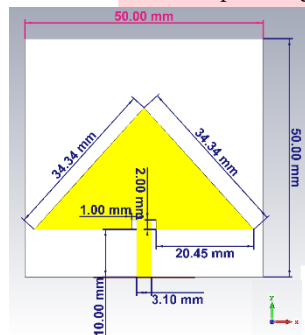
3. Rancangan butler matrix 2x2 menggunakan superstrat.

Umumnya peningkatan performansi *gain* terjadi ketika superstrat ditempatkan di atas antenna sekitar setengah panjang gelombang di ruang bebas. sehingga persamaan ketebalan *air gap* superstrat dapat dituliskan sebagai berikut:

$$h1 = \frac{51.7}{2} = 25,85 \text{ mm}. \quad (10)$$

C. Simulasi.

1. Antena Patch microstrip Triangular.

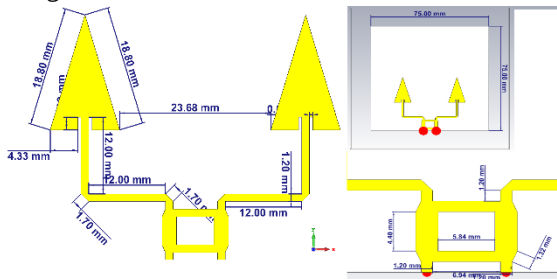


Gambar 3. Geometri Dimensi Patch tunggal Triangular.

Tabel 2. Dimensi Patch tunggal Triangular.

Parameter	Dimensi (mm)
Ketebalan Substrat (<i>h</i>)	1.6
Lebar Ground Plane (<i>Wg</i>)	50
Panjang Ground Plane (<i>Lg</i>)	50
Panjang sisi Patch Triangular (<i>a</i>)	34.34
Lebar Pencatu (<i>Wf</i>)	3.1
Panjang Pencatu (<i>Lf</i>)	10
Jarak Lebar inset (<i>X₀</i>)	1
Panjang Inset (<i>Y₀</i>)	2
Ketebalan Ground Plane (<i>t</i>)	0.035

2. Antena Butler Matrix 2x2 Patch Triangular Menggunakan FR-4.

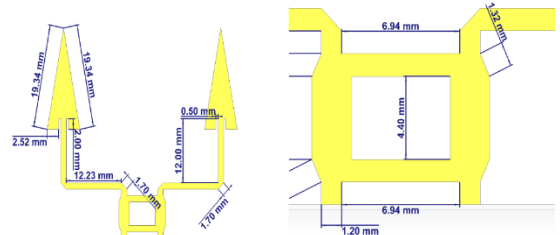
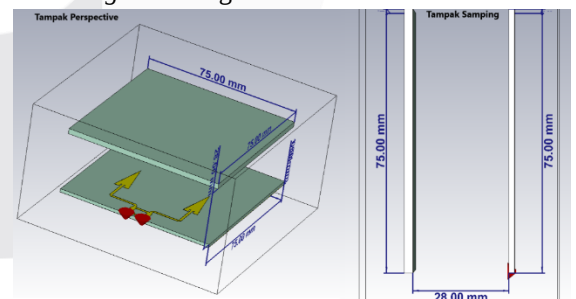


Gambar 4. Dimensi Antena Butler Matrix 2x2 Patch Triangular menggunakan FR-4.

Tabel 3. Dimensi Antena Butler Matrix 2x2 Patch Triangular menggunakan FR-4.

Parameter	Dimensi(mm)
Ketebalan Substrat (<i>h</i>)	1.6
Lebar Ground Plane (<i>Wg</i>)	75
Panjang Ground Plane (<i>Lg</i>)	75
Ketebalan Ground Plane (<i>t</i>)	0.035
Panjang sisi Patch Triangular (<i>a</i>)	21
Tinggi sisi Patch Triangular (<i>ta</i>)	18
Jarak Lebar inset (<i>X₀</i>)	0.50
Panjang Inset (<i>Y₀</i>)	2
Lebar Pencatu (<i>Wf</i>)	1.2
Panjang Pencatu (<i>Lf</i>)	12
Lebar Pencatu (<i>W 1</i>)	12.23
Panjang Pencatu (<i>L 1</i>)	1.2
Mitred-Bends (<i>Mb 1</i>)	1.2
Jarak Antar Patch (<i>d</i>)	23.68
Lebar feed line Coopler (<i>l0</i>)	1.2
Panjang feedline Coopler (<i>L2</i>)	8
Mitred-Bends Coopler (<i>Mb 2</i>)	1.32
Panjang feed line Coopler (<i>L3</i>)	4.4
Lebar feed line Coopler (<i>L4</i>)	2.3
Lebar feed line Coopler (<i>d1</i>)	6.94
Lebar feed line Coopler (<i>d2</i>)	5.84

3. Antena Butler Matrix 2x2 Patch Triangular Menggunakan FR-4.



Gambar 5. Dimensi Antena Butler Matrix 2x2 Dengan Lapisan superstrat Menggunakan FR-4.

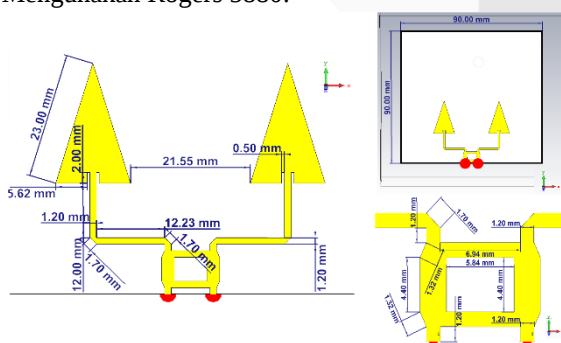
Tabel 4. Dimensi Akhir Antena *Butler Matrix* 2x2 Dengan Lapisan superstrat menggunakan FR-4.

Parameter	Dimensi(mm)
Ketebalan Substrat (h)	1.6
Lebar <i>Ground Plane</i> (W_g)	75
Panjang <i>Ground Plane</i> (L_g)	75
Ketebalan <i>Ground Plane</i> (t)	0.035
Panjang sisi <i>Patch Triangular</i> (a)	14
Jarak Lebar inset (X_0)	0.50
Panjang Inset (Y_0)	2
Lebar Pencatu (W_f)	1.2
Panjang Pencatu (L_f)	26.38
Lebar Pencatu (W_1)	12.23
Panjang Pencatu (L_1)	1.2
<i>Mitred-Bends</i> (Mb_1)	1.2
Jarak Antar <i>Patch</i> (d)	27.76
Lebar <i>feed line</i> coupler (l_0)	1.2
Panjang feedline <i>Coupler</i> (L_2)	8
<i>Mitred-Bends</i> Coupler (Mb_2)	1.32
Panjang <i>feed line</i> coupler (L_3)	4.4
Lebar <i>feed line</i> Coupler (L_4)	2.3
Lebar <i>feed line</i> Coupler (d_1)	6.94
Lebar <i>feed line</i> Coupler (d_2)	5.84
Ketebalan superstrat (h_{ss})	2,54
Ketebalan <i>air gap</i> (h_1)	28

Tabel 5. Dimensi Akhir Antena *Butler Matrix* 2x2 Menggunakan Rogers 5880.

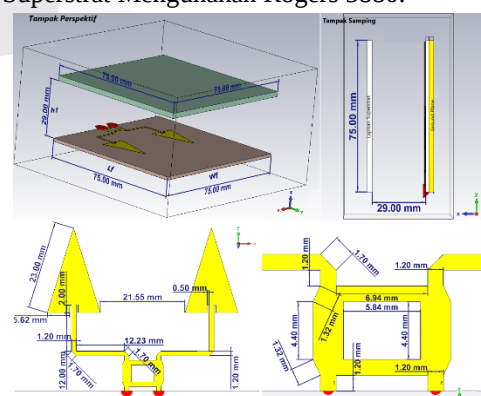
Parameter	Dimensi(mm)
Ketebalan Substrat (h)	1.6
Lebar <i>Ground Plane</i> (Wg)	90
Panjang <i>Ground Plane</i> (Lg)	90
Ketebalan <i>Ground Plane</i> (t)	0.035
Panjang sisi <i>Patch Triangular</i> (a)	23
Jarak Lebar <i>inset</i> (X_0)	0.50
Panjang <i>Inset</i> (Y_0)	2
Lebar Pencatu (Wf)	1.2
Panjang Pencatu (Lf)	12
Lebar Pencatu ($W1$)	12.23
Panjang Pencatu ($L\ 1$)	1.2
Mitred-Bends ($Mb\ 1$)	1.2
Jarak Antar <i>Patch</i> (d)	21.55
Lebar <i>feed line</i> coopler ($l0$)	1.2
Panjang <i>feedline Coopler</i> ($L2$)	8
Mitred-Bends Coopler ($Mb\ 2$)	1.32
Panjang <i>feed line</i> coopler ($L3$)	4.4
Lebar <i>feed line</i> Coopler ($L4$)	2.3
Lebar <i>feed line</i> Coopler ($d1$)	6.94
Lebar <i>feed line</i> Coopler ($d2$)	5.84

4. Antena *Butler Matrix* 2x2 Patch Triangular Menggunakan Rogers 5880.



Gambar 6. Dimensi Antena *Butler Matrix* 2x2 Patch *Triangular* menggunakan Rogers 5880.

5. Antena *Butler Matrix* 2x2 Dengan Lapisan Superstrat Menggunakan Rogers 5880.



Gambar 7. Antena *Butler Matrix* 2x2 Dengan Lapisan Superstrat Menggunakan Rogers 5880.

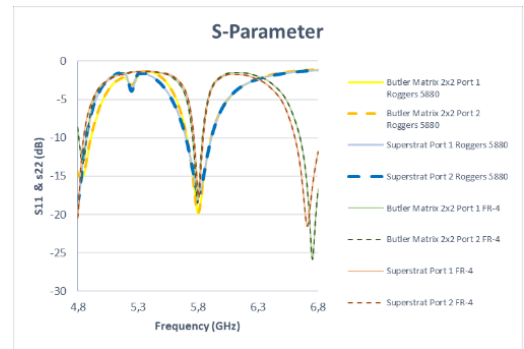
Tabel 6. Dimensi Akhir Antena Butler Matrix 2x2 Dengan Lapisan superstrat menggunakan Rogers 5880.

Parameter	Dimensi(mm)
Ketebalan Substrat (h)	1.6
Lebar Ground Plane (W_g)	90
Panjang Ground Plane (L_g)	90
Ketebalan Ground Plane (t)	0.035
Panjang sisi Patch Triangular (a)	23
Jarak Lebar inset (X_0)	0.50
Panjang Inset (Y_0)	2
Lebar Pencatu (W_f)	1.2
Panjang Pencatu (L_f)	12
Lebar Pencatu (W_1)	12.23
Panjang Pencatu (L_1)	1.2
Mitred-Bends (Mb_1)	1.2
Jarak Antar Patch (d)	21.55
Lebar feed line coopler (l_0)	1.2
Panjang feedline Coopler (L_2)	8
Mitred-Bends Coopler (Mb_2)	1.32
Panjang feed line coopler (L_3)	4.4
Lebar feed line Coopler (L_4)	2.3
Lebar feed line Coopler (d_1)	6.94
Lebar feed line Coopler (d_2)	5.84
Ketebalan superstrat (h_{ss})	2,54
Ketebalan air gap (h_1)	29

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan simulasi dan optimasi, pada subbab ini menampilkan hasil paling terbaik pada simulasi antena butler matrix 2x2 dengan penambahan metode superstrat.

1. Return Loss



(a)

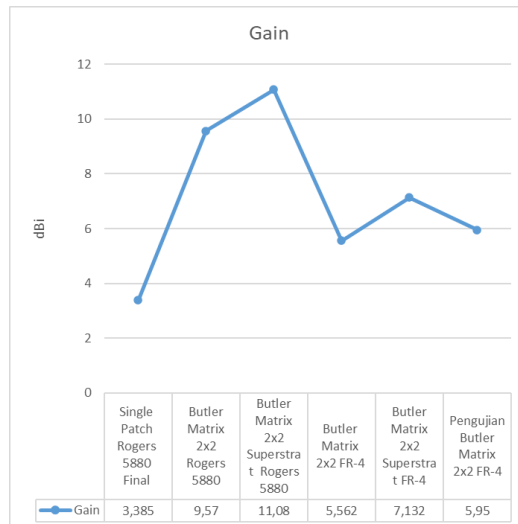


(b)

Gambar 8. Perbandingan Hasil S11(a) rentang frekuensi kerja (b) perbandingan Hasil S11.

Gambar 8, merupakan perbandingan terlihat gambar pada 8 (b) pengukuran antena butler matrix 2x2 patch segitiga menggunakan bahan FR-4 mendapatkan hasil yang tidak terlalu jauh dengan simulasi yang mendapatkan return loss S11 dengan nilai -15.46 dan S22 -14.07. Perbedaan kecil antara hasil pengukuran dan simulasi bisa disebabkan oleh beberapa faktor seperti, ketidak sempurnaan dalam proses fabrikasi – Perbedaan toleransi dalam pemotongan dan pencetakan lapisan tembaga, variasi dalam konstanta dielektrik bahan FR-4 – Nilai yang digunakan dalam simulasi mungkin sedikit berbeda dengan bahan fisik yang digunakan dan efek lingkungan dan koneksi – Termasuk rugi-rugi dari konektor, kabel, dan variasi dalam proses pengukuran.

2. Gain

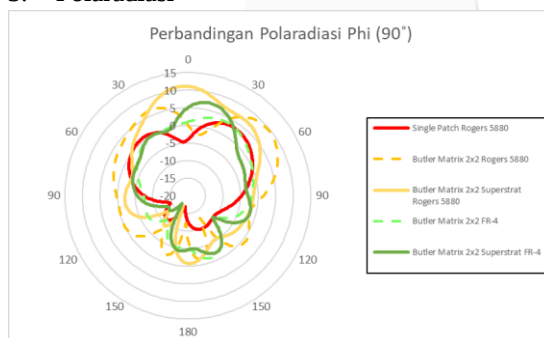


Gambar 9 Perbandingan Hasil Gain.

Hal ini menunjukkan bahwa *gain* yang menggunakan superstrat lebih tinggi tanpa menggunakan superstrat meskipun kenaikan *gain* tidak terlalu besar hanya ≥ 1.5 dB. Walau berbeda bahan material yang dipakai. Namun, ini menunjukkan bahwa superstrat berpengaruh besar pada *gain* antenna *butler matrix*.

Ketika nilai jarak antar *air gap* superstrat diatas element antenna di ubah maka akan mempengaruhi perolehan hasil yang di dapat. Lalu untuk pengujian pengukuran antenna. Pengujian tambahan dengan *butler matrix* 2x2 fr-4 menghasilkan *gain* 5.95 dBi, sedikit lebih tinggi dari konfigurasi *butler matrix* 2x2 FR-4 awal dikarenakan adanya perbedaan model simulasi yang mempertimbangkan rugi-rugi nyata dan Melakukan pengukuran di lingkungan yang minim interferensi.

3. Polaradiasi



Gambar 10 Perbandingan Hasil Pola Radiasi

Pola radiasi, yang berfungsi sebagai koordinat ruang, menjelaskan bagaimana antenna melepaskan energi ke ruang bebas atau sebaliknya.

Pada hasil simulasi Konfigurasi *single patch* menggunakan Rogers 5880 menunjukkan karakteristik *bidirectional* dengan dua lobus utama yang signifikan dan *gain* maksimum sebesar 3.39 dBi pada arah 36°, mencerminkan sifat dasar antenna *patch* yang memancarkan energi ke dua arah berlawanan. Ketika antenna dikonfigurasi dalam *butler matrix* 2x2

menggunakan Rogers 5880, pola radiasi tetap *bidirectional*, tetapi *gain* meningkat menjadi 9.55 dBi pada arah 51°, menunjukkan bahwa array antenna dapat meningkatkan penguatan radiasi sambil mempertahankan pola *bidirectional*. Penambahan superstrat pada *butler matrix* 2x2 dengan Rogers 5880 mengubah pola radiasi menjadi *unidirectional* dengan *gain* maksimum 11.1 dBi pada arah 2°, yang menunjukkan peningkatan *directivity* dan membuatnya lebih cocok untuk aplikasi yang memerlukan pancaran terarah.

Sementara itu, ketika *butler matrix* 2x2 menggunakan FR-4, pola radiasi juga menjadi *unidirectional*, tetapi dengan *gain* lebih rendah, yaitu 3.66 dBi pada arah 28°, karena material FR-4 dengan konstanta dielektrik lebih tinggi menyebabkan penyebaran energi yang lebih luas. Namun, penggunaan superstrat pada *butler matrix* 2x2 dengan FR-4 meningkatkan penguatan dan mengarahkan pancaran lebih baik dibandingkan konfigurasi tanpa superstrat, dengan *gain* maksimum sebesar 7.09 dBi pada arah 14°.

V. KESIMPULAN

Antena *butler matrix* 2x2 2 dengan frekuensi operasi 5,8 GHz telah berhasil dirancang, disimulasikan, dan diuji dalam penelitian ini. Antena menggunakan elemen *patch triangular* dan menghasilkan ukuran total 75 × 75 mm, sehingga tetap ringan dan kompak.

Antena ini menggunakan *coupler hybrid* 90° *butler matrix* 2x2 pada rogers 5880 dan FR-4. Pada rogers 5880, tanpa superstrat, antenna mencapai *gain* 9.55 dB dengan *return loss* S11 -19.829 dan S22 -19.833, sementara dengan superstrat, *gain* meningkat menjadi 11.08 dB dengan *return loss* S11 -17.245 dan S22 -17.248. Pada FR-4, tanpa superstrat, *gain* yang diperoleh sebesar 5.562 dB dengan *return loss* S11 -18.395 dan S22 -18.395, sedangkan dengan superstrat, *gain* meningkat menjadi 7.132 dB dengan *return loss* S11 -17.247 dan S22 -17.247. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan superstrat meningkatkan *gain* antenna secara signifikan.

Hasil simulasi menunjukkan antenna mencapai *gain* tertinggi 11.08 dB pada Rogers 5880 dan 7.132 dB pada FR-4, membuktikan efektivitas desain dan material. Substrat Rogers 5880 (1,575 mm) meningkatkan kinerja dan menjaga desain tetap ringan, tetapi lebih mahal dibanding FR-4. Parameter simulasi memenuhi standar dengan matching yang baik, memastikan kompatibilitas untuk aplikasi yang diinginkan.

Pada pengukuran dan pengujian *butler matrix* 2x2 *patch* segitiga dengan material FR-4, hasil yang diperoleh tidak terlalu jauh dari nilai simulasi, dengan nilai S11 sebesar -15.46, S22 sebesar -14.07, dan *gain* sebesar 5.95 dB. Desain yang compact dan ringan, dikombinasikan dengan *gain* yang cukup tinggi serta performa yang kompatibel, menjadikannya pilihan yang sangat baik untuk aplikasi praktis dan telah sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Eshaghi and R. Rashidzadeh, "A 5.8 GHz Array Antena Based on 4×4 Butler Matrix for Beamforming in 5G Network," in 2022 IEEE Sensors.
- [2] M.M. Aldemerdash, A.A. Mitkees, and H.A. Almekaty, "A Butler Matrix Fed Two-Element Microstrip Antena Array over EBG Substrate," in 14th International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology, ASAT - 14, May 24-26, 2011.
- [3] C. A. Balanis, "Antena Theory: Analysis Design", 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [4] E.Cahyani, dan M.Ulfah, "Rancang Bangun Antena Mikrostrip MIMO Triangular Patch Frekuensi 2300 MHz Untuk Teknologi 4G LTE (Long Term Evolution), ISBN: 978-602-51450-2-5, 2020, pp. 233 - 242.
- [5] M. S. Dewi, "Optimasi Bandwidth Antena Mikrostrip Patch E-Shape Dengan Triangular Slot Untuk Aplikasi WiFi Pada Frekuensi 2400 MHZ, Akademi Telkom Jakarta, 2020.
- [6] N. Iftita, "Perancangan Butler Matrix 4x4 Untuk Aplikasi CCTV Pada Frekuensi 2.4 GHz," Institut Teknologi Telkom Jakarta, 2020.
- [7] N. Kamila, "Perancangan Butler Matrix 4x4 pada Frekuensi 1,27 GHz untuk Aplikasi Synthetic Aperture Radar (SAR)," Universitas Telkom Bandung, pp. 1-8.
- [8] Y. Jeong and T.W. Kim, "Design and analysis of swapped port Coopler and its application in a miniaturized Butler Matrix," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 58, no. 4, pp. 904-913, April 2010, doi: 10.1109/TMTT.2010.2041571.
- [9] S. Dulluc, C. Gocen, I. Akdag, "5.8 GHz Band Wi-Fi AND IoT Applications Antena Design", Icontech International Journal of Surveys, Engineering, Technology, pp-42-47, Maret 2022.
- [10] J. Geier, "Designing and Deploying 802.11n Wireless Networks," USA, Cisco Systems, 2010, pp. 1-27.
- [11] C. A. Balanis, "Antena Theory Analysis and Design", 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016