

Perancangan Dan Implementasi *Switchbeam* Antena Mikrostrip

1st Adellia Rizki Oktaviani

*School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
itsmeadellia@gmail.com*

2nd Rahma Khairany

*School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
rahmakhairanyy@gmail.com*

3rd Paulus Osvaldo Yudistira Sihombing

*School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
paulusosvaldo0382003@gmail.com*

4th Bambang Sumajudin

*School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
sumajudin@telkomuniversity.ac.id*

5th Suprayogi

*School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
suprayogi@telkomuniversity.ac.id*

Abstrak — Perkembangan teknologi komunikasi mendorong kebutuhan jaringan nirkabel yang luas, handal, dan efisien. Antena sebagai komponen utama komunikasi jarak jauh dituntut berkembang dalam bentuk dan fungsi. Teknologi beamforming kini banyak digunakan karena mampu mengarahkan sinyal secara spesifik untuk mengurangi gangguan, meningkatkan kualitas, dan efisiensi daya. Namun, antena konvensional masih memakai pola radiasi menyebar, menyebabkan pemborosan daya dan interferensi. Sementara itu, pengembangan antena kompleks sering terkendala biaya dan material. Penelitian ini merancang antena dengan arah pancaran sinyal yang dapat diatur tanpa mengubah bentuk atau posisi antena secara fisik, namun tetap ekonomis dan efisien. Solusi yang diusulkan adalah antena mikrostrip *switchbeam* frekuensi 5,8 GHz yang mengubah arah pancaran berdasarkan *port input* aktif. Antena menggunakan *patch fraktal Koch Island* berbahan tembaga dan substrat FR-4. Desain terdiri dari 4 *port* yang dikombinasikan melalui *power combiner 4:1* dan dikendalikan RF switching. Pencatuan sinyal memadukan teknik *feedline* dan *coaxial*, dengan desain melalui CST Studio Suite 2019. Hasil pengujian menunjukkan *return loss* < -10 dB, *VSWR* 1,160–1,235, *bandwidth* 1,096–1,192 GHz, dan *mutual coupling* < -20 dB. Meskipun *gain* belum mencapai 6 dBi, antena tetap menunjukkan performa sesuai harapan.

Kata kunci— antena, *fraktal*, mikrostrip, pola radiasi, *switchbeam*.

I. PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan di bidang telekomunikasi, pengguna jaringan nirkabel terus bertambah, dan jenis data yang dikirimkan semakin beragam. Hal ini menuntut peningkatan kinerja sistem nirkabel, baik dari aspek jangkauan, kapasitas, maupun keandalannya. Salah satu teknologi yang banyak digunakan adalah WiFi, yang menyediakan koneksi internet bagi laptop, *smartphone*, dan perangkat IoT di rumah, kantor, maupun ruang publik. Namun, antena pada router WiFi konvensional umumnya bersifat *omnidirectional* sehingga sinyal menyebar ke segala arah, menyebabkan gangguan antar pengguna, pemborosan

daya, dan penurunan kualitas sinyal ketika pengguna bergerak menjauh dari *access point* [1], [2].

Kebutuhan akan efisiensi dalam teknologi *beamforming* semakin meningkat untuk mengarahkan pancaran sinyal ke area target dan meminimalkan radiasi ke area yang tidak diperlukan [3]. Dalam mendukung fungsi ini, pemilihan bentuk antena menjadi krusial. Desain patch *fraktal Koch Island* dipilih karena mampu menghasilkan distribusi arus yang kompleks dan mendukung karakteristik *pattern reconfigurable*, memungkinkan pembentukan beberapa arah pancaran hanya dengan pengaturan koneksi antar elemen tanpa mengubah struktur fisik utama. Bentuk ini memberikan fleksibilitas tinggi, efisiensi biaya, dan kemudahan manufaktur, sehingga sesuai untuk aplikasi *switchbeam microstrip antenna* [4] [5], [6], [7].

Berbeda dari penelitian sebelumnya yang menggunakan bentuk patch serupa namun dengan bentuk antena yang tunggal, penelitian ini mengimplementasikan konfigurasi *array* pada patch fraktal Koch Island. Tujuan penggunaan *array* ini adalah untuk meningkatkan *gain* antena, sekaligus mempertahankan kemampuan pengaturan arah pancaran sesuai kebutuhan.

II. KAJIAN TEORI

A. Antena Mikrostrip

Berdasarkan pedoman *IEEE Standard Definitions of Term for Antenna*, antena ialah perangkat yang berperan sebagai pengirim dan penerima gelombang radio. Antena mikrostrip adalah antena yang terbuat dari pelat konduktor tipis yang diletakkan di atas pelat konduktor yang lain dan dipisahkan oleh substrat dielektrik. antena mikrostrip umumnya terdiri dari tiga bagian utama, yaitu *groundplane*, *substrat*, dan *patch*. *Patch* pada antena mikrostrip punya berbagai macam bentuk [8], [9].

Pada penelitian ini, digunakan *patch* berbentuk *fraktal* karena memiliki karakteristik unik dalam hal distribusi arus, pola radiasi, dan kemungkinan peningkatan performa antena

secara keseluruhan [10], [11] [12]. Antena *fraktal* adalah jenis antena yang pola bentuknya tetap mirip meskipun diperbesar hal ini disebut *self-similarity*. Keunggulan antena *fraktal* adalah memiliki impedansi *input* yang baik. Dalam desain ini, jenis *fraktal* yang digunakan adalah *fraktal koch island*.

Patch Fraktal Koch Island adalah salah satu desain antena mikrostrip berbasis geometri *fraktal*, yang dibentuk melalui proses iteratif menggunakan pola *koch island* berbasis sudut siku-siku atau persilangan. Desain ini meningkatkan kinerja antena, khususnya dalam hal miniaturisasi dan peningkatan *bandwidth* [13].

B. Antena *Switchbeam*

Sistem *switchbeam* bekerja dengan memilih salah satu arah penerusan sinyal dari beberapa arah tetap yang telah didapatkan sebelumnya. Penelitian ini menggunakan pendekatan aktivasi *port* secara selektif karena kesederhanaannya dan tidak memerlukan *phase shifter*. Penggunaan antena *switchbeam* meningkatkan efisiensi daya dan kualitas sinyal dengan mengarahkan pola radiasi ke arah pengguna secara spesifik serta mengurangi interferensi [14], [15],[16].

C. Antena *Array*

Antena *array* merupakan antena yang terdiri dari sejumlah elemen yang digabungkan untuk mendapatkan *gain* tinggi dan pola radiasi atau *HPBW* (*Half Power Beamwidth*) yang lebih sempit. Dalam antena mikrostrip, bagian *patch* disusun secara *array* adalah bagian *patch*. Medan total ditentukan oleh penjumlahan vektor medan tiap elemen *array* berinterferensi secara konstruktif pada arah yang diinginkan dan berinterferensi secara destruktif pada arah yang lain. Untuk efisiensi pencatuan ke elemen *array*, digunakan *power combiner* [10].

D. Pola Radiasi

Pola radiasi merupakan gambaran distribusi daya penerusan antena di seluruh ruang. Pola radiasi biasanya digambarkan dalam bentuk grafik tiga dimensi. Pola radiasi pada antena umumnya terbagi menjadi dua jenis, yaitu omnidirectional dan unidirectional [17].

Antena omnidirectional memiliki pola penerusan yang menyebar ke segala arah secara merata, cakupan sinyal yang seragam di segala arah membuatnya sangat ideal untuk kebutuhan komunikasi umum yang tidak membutuhkan fokus arah tertentu. Namun antena omnidirectional memiliki beberapa kekurangan, terutama dalam hal jangkauan dan efisiensi

Antena unidirectional memiliki pola radiasi yang terarah dan terfokus, memungkinkan jangkauan yang relatif lebih jauh [18][19]. Antena unidirectional memiliki keunggulan utama 13 dalam fokus arah penerusan sinyal, yang memungkinkan energi terkonsentrasi ke satu arah tertentu. Hal ini menghasilkan *gain* yang lebih tinggi, sehingga sinyal bisa menjangkau jarak yang lebih jauh dengan kekuatan yang lebih besar dibanding antena omnidirectional [20].

E. Teknik Pencatuan Antena

Untuk mengalirkan energi frekuensi radio lewat antena mikrostrip, digunakan metode yang disebut teknik pencatuan. Teknik yang digunakan untuk antena mikrostrip *array* yaitu

teknik pencatuan *feedline* dan *coaxial*. Teknik pencatuan *feedline* dan *coaxial* dipilih dalam desain *Switchbeam Microstrip Antenna* karena memberikan kemudahan pencocokan impedansi, dan lebih ideal untuk sistem pencatuan terpisah [18], [21].

F. Power Combiner

Pembagi/penggabung daya (*power divider/combiner*) adalah komponen pasif yang beroperasi pada frekuensi gelombang mikro. Fungsi utamanya adalah membagi atau menggabungkan daya sinyal. Dalam pembuatan *power combiner* terdapat beberapa metode umum yang digunakan, antara lain Wilkinson *power combiner*, T-junction combiner, dan hybrid coupler. Dalam penelitian ini menggunakan teori Wilkinson *Power Combiner / Power Divider*. Dengan metode Wilkinson, isolasi diantara *port output* dapat menjadi match di setiap *port* sehingga menjadi lossless [22].

G. Perancangan *Switchbeam Microstrip Antenna*

Sebelum memulai proses perancangan dan simulasi antena, dilakukan terlebih dahulu perhitungan dimensi antena untuk memperoleh hasil yang sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan

1. Lebar *Patch* (W_p)

$$W_p = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

2. Panjang *Patch* (L_p)

$$L_p = L_{ref} - 2 \Delta L \quad (2)$$

Karena bentuk *patch fraktal Koch Island* terdiri dari 6 *patch* rectangular, maka rumus total panjang *patch fraktal Koch Island* yaitu

$$L_p = 6 \times L \quad (3)$$

3. Lebar *Feedline* (W_f)

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

4. Panjang *feedline* (L_f)

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

5. Lebar *groundplane* (W_g)

$$W_g = 6(h) + 6(W_p) \quad (6)$$

6. Panjang *groundplane* (L_g)

$$L_g = 6(h) + 6(L_p) \quad (7)$$

H. Perancangan *Power Combiner*

Dimensi antena dapat ditentukan berdasarkan karakteristik material *power combiner* yang dirancang, sehingga spesifikasi yang dibutuhkan dapat terpenuhi.

1. Impedansi Karakteristik untuk Masing-Masing Lengan Power Combiner (Z_T)

$$Z_T = Z_0\sqrt{2} \quad (8)$$

$$Z_{in} = \frac{Z_T^2}{2Z_o} \quad (9)$$

2. Lebar Saluran Transmisi

$$B = \frac{377\pi}{2Z_o\sqrt{\epsilon_r}} \quad (10)$$

3. Konstanta Dielektrik Efektif]

$$\epsilon_{refr} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \quad (11)$$

4. Panjang Saluran

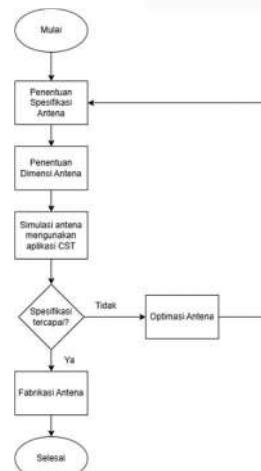
$$\lambda_o = \frac{\lambda_o}{4\sqrt{\epsilon_{refr}}} \quad (12)$$

III. METODE

A. Desain dan Simulasi Antena

Antena disimulasikan terlebih dahulu sebelum melakukan proses pabrikasi, dengan menggunakan aplikasi CST Studio, penilitian dapat dilakukan tanpa harus membuat bentuk fisik terlebih dahulu, sehingga dapat menghemat biaya dan waktu.

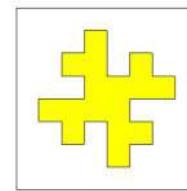
B. Desain dan Implementasi



GAMBAR 1
(Flowchart Pembuatan Antena)

Rangkaian *switchbeam antenna* nantinya akan disimulasikan dengan software CST Studio Suite 2019 untuk memberikan hasil analisis yang lebih akurat mengenai pola radiasi, *gain*, serta performa antena pada berbagai *port input*. Alur dalam proses simulasi ditunjukkan oleh GAMBAR 1. Dalam simulasi diharapkan pola radiasi antena dapat

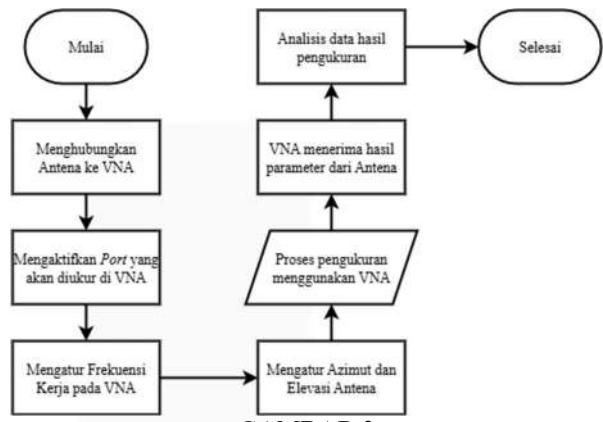
menonjol ke satu arah tertentu dengan intensitas yang tinggi, sesuai dengan sinyal yang diterima.



GAMBAR 2
(Desain Antena Mikrostrip Patch Fraktal Koch Island)

Antena yang akan dibuat memiliki desain *patch* berbentuk *fraktal* seperti gambar diatas. Untuk cara kerja antena yang dirancang, antena akan dihubungkan ke VNA. Setelah antena terpasang sempurna sesuai dengan *port* yang akan diukur lalu aktifkan juga *port* antena yang akan diukur pada VNA. Pada antena *switchbeam* ini frekuensi kerja yang diinginkan adalah 5,8 GHz. Setelah frekuensi sudah diatur kita sesuaikan azimut dan elevasi antena yang akan diukur lalu proses pengukuran antena dilakukan.

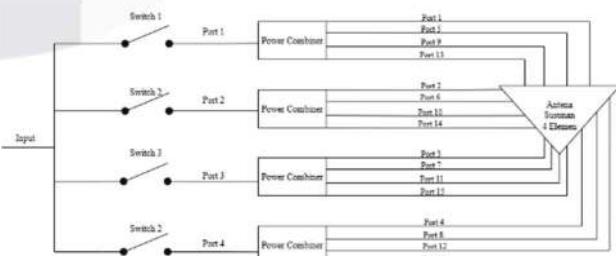
B. Pengukuran dan Cara Kerja Antena



GAMBAR 3
(Flowchart Pengukuran dan Cara Kerja Antena)

Berikut proses pengukuran antena dengan menggunakan Vector Network Analyzer (VNA) dapat di lihat pada GAMBAR 3

C. Desain Sistem Switchbeam Microstrip Antenna Susunan 4 Elemen



GAMBAR 4
(Blok Sistem Switchbeam Microstrip Antenna Susunan 4 Elemen)

Pada sistem antena yang dirancang dilakukan integrasi antara *Switchbeam Microstrip Antenna* Susunan 4 Elemen, *power combiner*, dan *RF Switch* untuk fungsi directional

beam switching. Antena terdiri atas 4 elemen radiasi yang masing-masing terhubung ke satu *port* independen, dengan pemilihan *port* aktif dilakukan secara manual melalui empat saklar SPST. Hanya satu saklar diaktifkan dalam satu waktu untuk mencegah interferensi. Jalur keluaran setiap *port* antena dihubungkan ke *power combiner* untuk mengarahkan sinyal menuju VNA, dengan catatan hanya satu *port* aktif untuk menjaga impedansi sistem. Saklar manual dan *power combiner* diintegrasikan secara fisik menggunakan konektor SMA dan jalur PCB. Konfigurasi ini menghasilkan sistem *switchbeam* sederhana, murah, dan fungsional, serta dapat dikembangkan dengan mikrokontroler dan saklar elektronik untuk aplikasi real-time.

D. Metode Pengukuran.

Pengujian antena yang sudah difabrikasi ini dilakukan di ruangan tertutup laboratorium antena. Antena akan dihubungkan dengan perangkat VNA untuk melakukan pengujian parameter antena, seperti pola radiasi, *gain*, *return loss*, *mutual coupling*, *VSWR*, dan *bandwidth* pada rentang frekuensi 4,8 GHz hingga 6,8 GHz, kemudian akan dibandingkan hasil pengukuran dengan hasil dari simulasi.

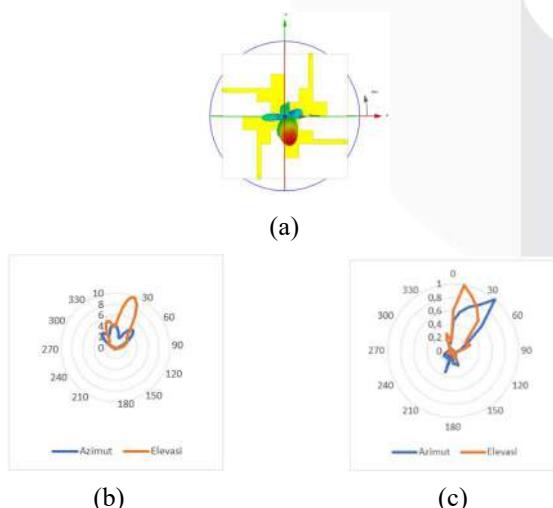
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perbandingan Pola Radiasi *Switchbeam Microstrip Antenna Single Elemen Port 1*



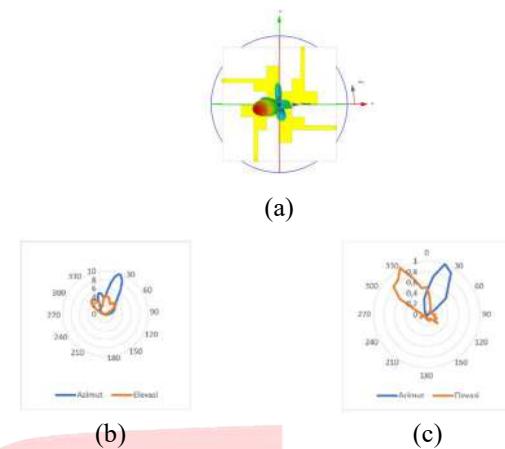
GAMBAR 5

(Hasil Fabrikasi *Switchbeam Antenna Single Elemen* (a) Tampak Depan; (b) Tampak Belakang)



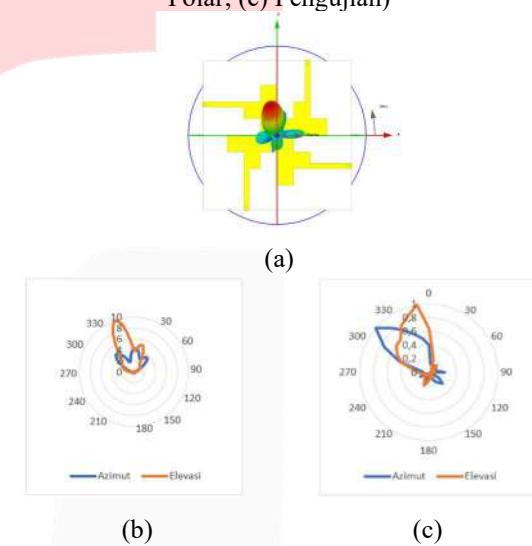
GAMBAR 6

(Grafik Perbandingan Pola Radiasi *Switchbeam Microstrip Antenna Single Elemen Port 1* (a) Simulasi 3D; (b) Simulasi Polar (c) Pengujian)



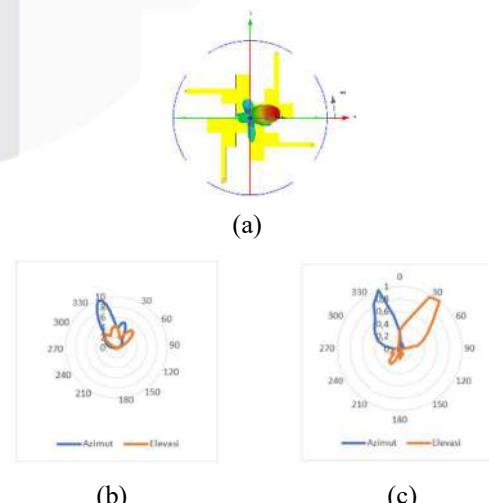
GAMBAR 7

(Grafik Perbandingan Pola Radiasi *Switchbeam Microstrip Antenna Single Elemen Port 2* (a) Simulasi 3D; (b) Simulasi Polar; (c) Pengujian)



GAMBAR 8

(Grafik Perbandingan Pola Radiasi *Switchbeam Microstrip Antenna Single Elemen Port 3* (a) Simulasi 3D; (b) Simulasi Port; (c) Pengujian)



GAMBAR 9

(Grafik Perbandingan Pola Radiasi *Switchbeam Microstrip Antenna Single Elemen Port 4* (a) Simulasi 3D; (b) Simulasi Port; (c) Pengujian)

GAMBAR 6 menunjukkan pola radiasi hasil simulasi dan pengujian pada *port 1*. Terlihat perbedaan signifikan pada beberapa sudut. Pada simulasi, *main lobe* bidang azimut mengarah ke 44° , dan elevasi ke 20° . Pada pengujian, azimut ke 40° dan elevasi ke 10° , dengan selisih 4° pada azimut dan 10° pada elevasi atau sekitar 1,1% dan 2,8% terhadap satu lingkaran penuh. GAMBAR 7 menunjukkan pola radiasi hasil simulasi dan pengujian pada *port 2*. Terlihat perbedaan signifikan. *Main lobe* simulasi mengarah ke 20° (azimut) dan 316° (elevasi). Pada pengujian, azimut tetap 20° , namun elevasi bergeser ke 350° , dengan selisih 34° atau sekitar 9,4%. GAMBAR 8 menunjukkan pola radiasi hasil simulasi dan pengujian pada *port 3*. Pada simulasi, *main lobe* mengarah ke 316° (azimut) dan 340° (elevasi). Pada pengujian, azimut ke 310° dan elevasi ke 350° , dengan selisih 6° (1,7%) pada azimut dan 10° (2,8%) pada elevasi. GAMBAR 9 menunjukkan pola radiasi hasil simulasi dan pengujian pada *port 4*. *Main lobe* simulasi mengarah ke 320° (azimut) dan 44° (elevasi). Pada pengujian, azimut ke 340° dan elevasi ke 40° , dengan selisih 20° (5,6%) pada azimut dan 4° (1,1%) pada elevasi. Persentase ini dihitung terhadap sudut satu lingkaran penuh 360° , yang memberikan gambaran seberapa besar deviasi arah utama pancaran antara hasil simulasi dan realisasi. Hasil tersebut menunjukkan terdapat perbedaan bentuk pola antara grafik hasil simulasi dan pengujian, hal tersebut dipengaruhi oleh pengujian yang dilakukan diambil di setiap 10° sedangkan data simulasi di setiap 1° .

B. Hasil Perbandingan *Gain Switchbeam Microstrip Antenna Single Elemen*

TABEL 1

(Perbandingan *Gain Microstrip Antenna Single Elemen Port 4*)

Port	Gain	
	Hasil Simulasi	Hasil Pengujian
1	4,183	2,802
2	4,182	2,877
3	4,188	2,807
4	4,187	2,871

TABEL 1 Menunjukkan perbandingan *gain* antara hasil simulasi dan pengujian pada setiap *port*. *Port 1* mengalami penurunan *gain* sebesar 1,381 dBi (33,01%), *port 2* turun 1,305 dBi (31,21%), *port 3* turun 1,381 dBi (32,98%), dan *port 4* turun 1,316 dBi (31,43%).

C. Hasil Perbandingan *Return Loss*, VSWR, dan *Bandwidth* *Switchbeam Microstrip Antenna Single Elemen*

i. *Return Loss*

TABEL 2

(Perbandingan VSWR *Return Loss Microstrip Antenna Single Elemen Port 4*)

Port	<i>Return Loss</i>	
	Hasil Simulasi	Hasil Pengujian

1	-19,562	-39,692
2	-19,562	-30,711
3	-19,562	-31,666
4	-19,562	-36,426

Berdasarkan TABEL 2 terdapat perbedaan signifikan antara hasil simulasi dan pengujian *return loss*. *Port 1* mengalami penurunan sekitar 102,92% dengan selisih -20,130 dB, *port 2* turun 56,95% (-11,149 dB), *port 3* turun 61,88% (-12,104 dB), dan *port 4* turun 86,22% (-16,864 dB).

ii. VSWR

TABEL 3
(Perbandingan VSWR *Microstrip Antenna Single Elemen Port 4*)

Port	VSWR	
	Hasil Simulasi	Hasil Pengujian
1	1,235	1,0209
2	1,235	1,0600
3	1,235	1,0536
4	1,235	1,0306

TABEL 3 membandingkan hasil simulasi dan pengujian nilai VSWR. Simulasi menunjukkan nilai tetap 1,235 pada semua *port*, sedangkan hasil pengujian sedikit lebih rendah. *Port 1* turun 17,33% (1,0209; selisih 0,2141), *port 2* turun 14,17% (1,0600; selisih 0,175), *port 3* turun 14,68% (1,0536; selisih 0,1814), dan *port 4* turun 16,55% (1,0306; selisih 0,2044).

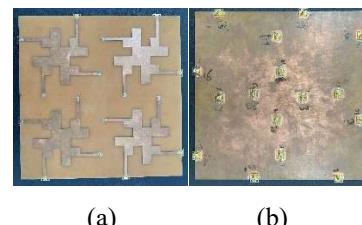
iii. *Bandwidth*

TABEL 4
(Perbandingan *Bandwidth Microstrip Antenna Single Elemen Port 4*)

Port	<i>Bandwidth (GHz)</i>	
	Hasil Simulasi	Hasil Pengujian
1	1,07	0,93
2	1,07	0,73
3	1,07	1,08
4	1,07	0,66

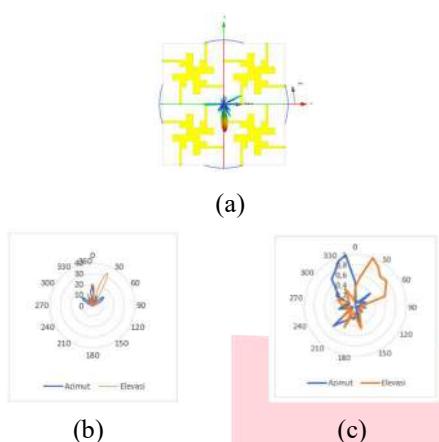
Berdasarkan TABEL 4, hasil simulasi menunjukkan *bandwidth* sebesar 1,07 GHz pada semua *port*. Hasil pengujian menunjukkan variasi: *port 1* turun 13,08% (0,93 GHz; selisih 0,14 GHz), *port 2* turun 31,78% (0,73 GHz; selisih 0,34 GHz), *port 3* naik 0,93% (1,08 GHz; selisih -0,01 GHz), dan *port 4* turun 38,32% (0,66 GHz; selisih 0,41 GHz).

C. Hasil Perbandingan Pola Hasil Simulasi dan Pengujian *Switchbeam Microstrip Antenna Susunan 4 Elemen*



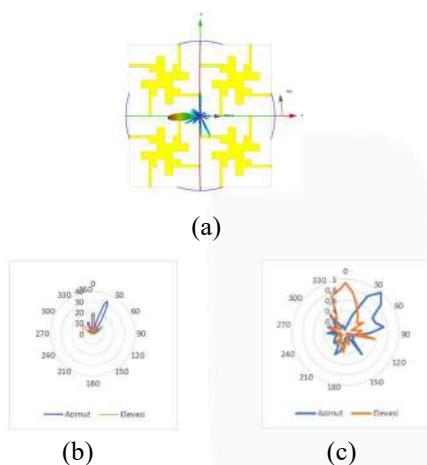
GAMBAR 10

Hasil Fabrikasi *Switchbeam Antenna 4 Elemen* (a) Tampak Depan; (b) Tampak Belakang



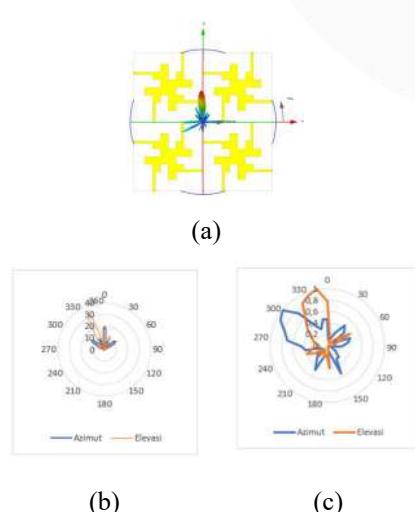
GAMBAR 11

Grafik Perbandingan Pola Radiasi *Switchbeam Microstrip Antenna 4 Elemen Port 1* (a) Simulasi 3D; (b) Simulasi Polar; (c) Pengujian.



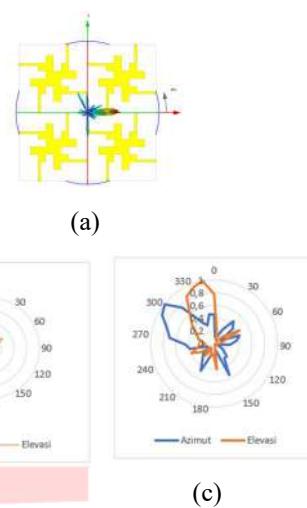
GAMBAR 12

Grafik Perbandingan Pola Radiasi *Switchbeam Microstrip Antenna 4 Elemen Port 1* (a) Simulasi 3D; (b) Simulasi Polar; (c) Pengujian.



GAMBAR 13

Grafik Perbandingan Pola Radiasi *Switchbeam Microstrip Antenna 4 Elemen Port 3* (a) Simulasi 3D; (b) Simulasi Polar; (c) Pengujian.



GAMBAR 14

Grafik Perbandingan Pola Radiasi *Switchbeam Microstrip Antenna 4 Elemen Port 4* (a) Simulasi 3D; (b) Simulasi Polar; (c) Pengujian.

GAMBAR 11 menunjukkan pola radiasi hasil simulasi dan pengujian pada *port 1*, dengan perbedaan signifikan di beberapa sudut. Pada simulasi, *main lobe* mengarah ke 359° (azimuth) dan 24° (elevasi), sedangkan pada pengujian mengarah ke 350° (azimuth) dan 30° (elevasi). Terdapat selisih 9° (2,5%) pada azimuth dan 6° (1,67%) pada elevasi. GAMBAR 12 menunjukkan pola radiasi hasil simulasi dan pengujian pada *port 2*, dengan perbedaan signifikan di beberapa sudut. Simulasi menunjukkan *main lobe* mengarah ke 24° (azimuth) dan 1° (elevasi), sedangkan pengujian ke 50° (azimuth) dan 0° (elevasi). Terdapat selisih 26° (7,22%) pada azimuth dan 1° (0,28%) pada elevasi. GAMBAR 13 menunjukkan pola radiasi hasil simulasi dan pengujian pada *port 3*, terlihat juga adanya perbedaan yang signifikan di beberapa sudut. Hasil simulasi *main lobe* pada bidang azimuth mengarah ke 1°, pada bidang elevasi *main lobe* mengarah ke sudut 336°, sedangkan pada hasil pengujian pada bidang azimuth *main lobe* mengarah ke sudut 10°, dan bidang elevasi mengarah ke sudut 330°. Dengan demikian, ada selisih 9° pada bidang azimuth yaitu sekitar 2,5% dan selisih pada bidang elevasi sebesar 6° atau sekitar 1,67%. GAMBAR 14 menunjukkan pola radiasi hasil simulasi dan pengujian pada *port 4*, dengan perbedaan signifikan di beberapa sudut. Simulasi menunjukkan *main lobe* pada 336° (azimuth) dan 359° (elevasi), sedangkan pengujian pada 310° (azimuth) dan 350° (elevasi). Terdapat selisih 26° (7,22%) pada azimuth dan 9° (2,5%) pada elevasi.

B. Hasil Perbandingan *Gain Switchbeam Microstrip*

TABEL 5

(Perbandingan *Gain Switcheam Microstrip Antenna 4 Elemen*)

<i>Port</i>	<i>Gain (dBi)</i>	
	<i>Hasil Simulasi</i>	<i>Hasil Pengujian</i>
1	9,525	5,352
2	9,525	5,811
3	9,525	5,012
4	9,525	5,086

Berdasarkan hasil pengujian *gain* pada tiap *port*, terdapat perbedaan signifikan dibandingkan hasil simulasi. *Port 1* mengalami penurunan 43,82% (selisih 4,173 dB), *port 2* turun 39% (3,714 dB), *port 3* turun 47,37% (4,513 dB), dan *port 4* turun 46,61% (4,439 dB).

C. Hasil Perbandingan *Return Loss* dan *Bandwidth* *Switchbeam Microstrip Antenna* Susunan 4 Elemen.

i. *Return Loss*

TABEL 6

(Perbandingan *Return Loss* *Switcheam Microstrip Antenna 4 Elemen*)

<i>Port</i>	<i>Port Inisialisasi</i>	<i>Return Loss (dB)</i>	
		<i>Hasil Simulasi</i>	<i>Hasil Pengujian</i>
1	S1	-18,105	-22,599
	S5	-11,586	
	S9	-18,331	
	S13	-11,369	
2	S2	-18,329	-19,539
	S6	-18,104	
	S10	-11,372	
	S14	-11,372	
3	S3	-11,371	-20,268
	S7	-18,335	
	S11	-11,587	
	S15	-18,109	
4	S4	-11,588	-19,961
	S8	-11,371	
	S9	-18,105	
	S13	-18,331	

TABEL 6 menunjukkan perbandingan simulasi dan pengujian *return loss*. Pada *Port Agregasi 1*, rata-rata simulasi -14,85 dB dan pengujian -22,60 dB, selisih 7,75 dB (52,20%). *Port Agregasi 2*: simulasi -14,79 dB, pengujian -19,54 dB, selisih 4,74 dB (32,06%). *Port Agregasi 3*: simulasi -14,85 dB, pengujian -20,27 dB, selisih 5,42 dB (36,48%). *Port Agregasi 4*: simulasi -14,85 dB, pengujian -19,96 dB, selisih 5,11 dB (34,43%).

ii. *Bandwidth*

TABEL 7

(Perbandingan *Bandwidth* *Switchbeam Microstrip Antenna 4 Elemen*)

<i>Port</i>	<i>Port Inisialisasi</i>	<i>Bandwidth</i>	
		<i>Hasil Simulasi</i>	<i>Hasil Pengujian</i>
1	S1	1,049	1,139

	S5	0,128	
	S9	1,069	
	S13	0,138	
2	S2	1,069	1,192
	S6	1,049	
	S10	0,138	
	S14	0,128	
3	S3	0,138	1,096
	S7	1,069	
	S11	0,128	
	S15	1,049	
4	S4	0,128	1,181
	S8	0,138	
	S9	1,049	
	S13	1,069	

TABEL 7 menunjukkan perbandingan *bandwidth* antara simulasi dan pengujian yang menunjukkan perbedaan signifikan, di mana hasil pengujian cenderung lebih besar. *Port Agregasi 1*: simulasi 0,596 GHz, pengujian 1,139 GHz, selisih 0,543 GHz (91,10%). *Port Agregasi 2*: 0,596 GHz dan 1,192 GHz, selisih 0,596 GHz (100%). *Port Agregasi 3*: selisih 0,5 GHz (83,89%). *Port Agregasi 4*: peningkatan 0,585 GHz

iii. *VSWR*

TABEL 8

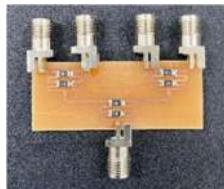
(Perbandingan *VSWR* *Switcheam Microstrip Antenna 4 Elemen*)

<i>Port</i>	<i>Port Inisialisasi</i>	<i>VSWR</i>	
		<i>Hasil Simulasi</i>	<i>Hasil Pengujian</i>
1	S1	1,180	1,160
	S5	1,635	
	S9	1,178	
	S13	1,634	
2	S2	1,178	1,235
	S6	1,180	
	S10	1,634	
	S14	1,634	
3	S3	1,634	1,214
	S7	1,178	
	S11	1,634	
	S15	1,634	
4	S4	1,634	1,223
	S8	1,634	
	S9	1,180	
	S13	1,178	

Perbandingan nilai *VSWR* dihitung dari rata-rata empat *port* individual pada tiap *port* agregasi. *Port Agregasi 1*: simulasi 1,406, pengujian 1,160, selisih 0,246 (21,26%). *Port Agregasi 2*: simulasi 1,406, pengujian 1,235, selisih 0,171 (13,89%). *Port Agregasi 3*: simulasi 1,52, pengujian 1,214, selisih 0,306 (25,20%). *Port Agregasi 4*: simulasi 1,406, pengujian 1,223, selisih 0,183 (15%). Faktanya, seluruh nilai *VSWR* pengujian berada antara 1 hingga 2, menandakan performa antena sangat baik dan efisien. Selisih antara

simulasi dan pengujian masih dalam batas toleransi, menunjukkan performa antena mendekati rancangan teoritis.

C. Hasil Perbandingan *Return Loss*, *Insertion Loss*, Isolasi dan VSWR *Power Combiner*.



GAMBAR 15
(Fabrikasi Power Combiner)

i. *Return Loss*

TABEL 9
(Perbandingan *Return Loss Power Combiner*)

Port	Return Loss (dB)	
	Hasil Simulasi	Hasil Pengujian
1	-19,729	-19,473
2	-14,958	-13,720
3	-16,052	-13,263
4	-16,053	-15,025

Hasil pengujian *return loss* pada TABEL 9 menunjukkan seluruh *port power combiner* berada dalam batas spesifikasi ≤ -10 dB, menandakan *power combiner* dapat digunakan pada *switchbeam microstrip antenna*. Namun terdapat perbedaan antara hasil simulasi dan pengujian, seperti *port S32* dengan simulasi -16,052 dB dan pengujian -13,263 dB, selisih 17,3% atau 2,789 dB. *Port S11* memiliki perbedaan kecil dari -19,729 dB menjadi -19,473 dB, selisih 1,3% atau 0,256 dB. *S22* menurun dari -14,958 dB menjadi -13,720 dB, selisih 8,3% atau 1,238 dB. *Port S44* berubah dari -16,053 dB menjadi -15,025 dB, selisih 6,4% atau 1,028 dB. *Port S55* mengalami peningkatan dari -14,957 dB menjadi -17,069 dB, peningkatan 14,1% atau 2,112 dB.

ii. *Insertion Loss*

TABEL 10
(Perbandingan *Insertion Loss Power Combiner*)

Port	Insertion Loss (dB)	
	Hasil Simulasi	Hasil Pengujian
S21	-6,931	-6,4784
S31	-7,329	-6,6594
S41	-7,325	-6,7854
S51	-6,924	-6,7044

Hasil pengujian *insertion loss* pada TABEL 11 menunjukkan seluruh *port power combiner* berada dalam spesifikasi. *S21* memiliki hasil simulasi -6,931 dB dan pengujian -6,4784 dB, selisih 0,4526 dB atau 6,53%. *S31*, simulasi -7,329 dB dan pengujian -6,6594 dB, selisih 0,6696 dB atau 9,13%. *S41*, simulasi -7,325 dB dan pengujian -6,7854 dB, selisih 0,5396 dB atau 7,37%. *S51*, simulasi -6,924 dB dan pengujian -6,7044 dB, selisih 0,2196 dB atau

3,17%. Secara keseluruhan, hasil pengujian mendekati -6 dB, menandakan antena dapat bekerja baik dan efisien. Meski ada perbedaan antara simulasi dan pengujian, nilainya masih wajar dan integrasi pembagi daya ini layak diimplementasikan pada sistem *switchbeam microstrip antenna*.

iii. Isolasi

TABEL 11
(Perbandingan Isolasi *Power Combiner*)

Port	Isolasi (dB)	
	Hasil Simulasi	Hasil Pengujian
S32	-19,729	-19,473
S43	-14,958	-13,720
S54	-16,052	-13,263

Berdasarkan hasil pengujian pada TABEL 11, dilakukan perbandingan antara nilai simulasi dan pengujian isolasi antar *port input*. *S32* menunjukkan hasil simulasi -20,798 dB dan pengujian -17,763 dB, selisih 3,035 dB atau 14,59%. *S43*, simulasi -27,895 dB dan pengujian -16,678 dB, selisih 11,217 dB atau 40,21%. *S54*, simulasi -20,700 dB dan pengujian -15,701 dB, selisih 4,999 dB atau 24,17%. Seluruh hasil pengujian isolasi berada di bawah ambang batas ≤ -10 dB, sehingga kinerja isolasi antar *port input* masih memenuhi spesifikasi teknis.

iv. VSWR

TABEL 12
(Perbandingan VSWR *Power Combiner*)

Port	VSWR	
	Hasil Simulasi	Hasil Pengujian
1	1,241	1,237
2	1,434	1,519
3	1,379	1,554
4	1,380	1,431
5	1,434	1,325

Berdasarkan hasil pengujian VSWR pada TABEL 12, seluruh *port power combiner* berada dalam batas spesifikasi $\leq 1,5$, yang menunjukkan pencocokan impedansi sudah baik dan *power combiner* layak diimplementasikan pada sistem *switchbeam microstrip antenna*. *Port 1* simulasi 1,241 dan pengujian 1,237, selisih 0,004 atau 0,32%. *Port 2* simulasi 1,434 dan pengujian 1,519, selisih 0,085 atau 5,93%. *Port 3* simulasi 1,379 dan pengujian 1,554, selisih 0,175 atau 12,70%. *Port 4* simulasi 1,380 dan pengujian 1,431, selisih 0,051 atau 3,70%. *Port 5* simulasi 1,434 dan pengujian 1,325, selisih 0,109 atau 7,61%. Meskipun ada sedikit perbedaan antara simulasi dan pengujian, seluruh nilai VSWR masih sesuai spesifikasi teknis, sehingga pencocokan impedansi pada *power combiner* dapat dianggap sangat baik.

v. Bandwidth

TABEL 13
(Perbandingan Bandwidth *Power Combiner*)

Port	Bandwidth (GHz)	
	Hasil Simulasi	Hasil Pengujian

1	1,767	0,46
2	2	1,2
3	2	1,32
4	2	0,71

Berdasarkan hasil pengujian *bandwidth* pada TABEL 13, dilakukan perbandingan antara hasil simulasi dan pengujian pada masing-masing *port*. *Port 1*: simulasi 1,767 GHz, pengujian 0,46 GHz, selisih 1,307 GHz atau 73,96%. *Port 2*: simulasi 2 GHz, pengujian 1,2 GHz, selisih 0,8 GHz atau 40%. *Port 3*: simulasi 2 GHz, pengujian 1,32 GHz, selisih 0,68 GHz atau 34%. *Port 4*: simulasi 2 GHz, pengujian 0,71 GHz, selisih 1,29 GHz atau 64,5%. *Port 5*: simulasi 2 GHz, pengujian 0,71 GHz, selisih 1,29 GHz atau 64,5%. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan *bandwidth* lebih sempit dibandingkan simulasi, namun masih berada dalam rentang frekuensi kerja yang sesuai dan tetap dapat diimplementasikan pada sistem *switchbeam microstrip antenna*.

V. KESIMPULAN

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pola radiasi dari antena mengalami pergeseran *main lobe* saat *port* yang diaktifkan berbeda, yang mengonfirmasi prinsip kerja *switchbeam antenna*. Hal ini didukung oleh hasil pengukuran yang menghasilkan pola radiasi unidirectional dalam bentuk linier.

Switchbeam Microstrip Antenna patch fractal yang telah dirancang, berhasil direalisasikan dan diuji. *Switchbeam Microstrip Antenna patch fractal* yang dirancang mampu menghasilkan perubahan pola radiasi tanpa memerlukan perubahan posisi fisik dari antenna. Karena setiap *port* berhasil mengarahkan *main lobe* pola radiasi ke arah tertentu sesuai dengan konfigurasi simulasi yang telah dirancang sebelumnya.

Pada parameter *return loss*, hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai *return loss* pada masing-masing *port* telah memenuhi target spesifikasi, yaitu ≤ -10 dB. Nilai *return loss* terbaik diperoleh pada *port 1* sebesar -22,599 dB, lalu *port 3* sebesar -20,268 dB, *port 4* sebesar -19,961 dB, dan *port 2* sebesar -19,539 dB. Semua nilai tersebut menunjukkan bahwa refleksi yang kembali ke sumber sangat kecil, sehingga sebagian besar daya berhasil dipancarkan oleh antena. Hasil ini menunjukkan bahwa dari sisi *return loss*, *Switchbeam Microstrip Antenna patch fractal* yang telah dirancang telah berfungsi dengan sangat baik dan sesuai dengan spesifikasi desain. Pada parameter VSWR, hasil pengujian nilai VSWR pada keempat *port* yaitu 1,160 (*Port 1*), 1,235 (*Port 2*), 1,214 (*Port 3*), 1,223 (*Port 4*). Hal ini menunjukkan bahwa antena memiliki pencocokan impedansi yang baik pada masing-masing *port*, dengan tingkat refleksi daya yang rendah.

Pada parameter *bandwidth*, hasil pengujian menunjukkan bahwa antena yang dirancang berhasil melampaui target spesifikasi yang ditetapkan, yaitu *bandwidth* minimal 0,1 GHz. Hasil pengujian menunjukkan *bandwidth* sebesar 1,139 GHz (*Port 1*), 1,192 GHz (*Port 2*), 1,096 GHz (*Port 3*), dan 1,181 GHz (*Port 4*). Nilai-nilai tersebut berada jauh di atas batas minimum, dengan pencapaian lebih dari 1000% dari target spesifikasi. *Bandwidth* yang lebar ini memberikan keuntungan penting dalam fleksibilitas pemrosesan sinyal,

toleransi frekuensi kerja, serta memungkinkan antena digunakan dalam berbagai aplikasi komunikasi berkecepatan tinggi.

Pada parameter *mutual coupling*, hasil pengujian *Switchbeam Microstrip Antenna* Susunan 4 Elemen, diperoleh nilai *mutual coupling* yang bervariasi, dengan nilai minimum sebesar -55,973 dB dan maksimum sebesar -19,539 dB. Sebagian besar nilai *mutual coupling* berada di bawah -20 dB, yang menunjukkan adanya isolasi yang baik antar elemen antena. Secara keseluruhan, nilai *mutual coupling* telah memenuhi spesifikasi target yaitu ≤ -20 dB, sehingga dapat disimpulkan bahwa antena memiliki isolasi antar *port* yang cukup baik, meminimalkan interferensi antar elemen, dan mendukung performa radiasi yang optimal.

Namun demikian, berdasarkan hasil pengujian, nilai *gain* yang diperoleh pada masing-masing *port* masih berada di bawah target spesifikasi yang ditetapkan, yaitu ≤ 6 dBi. *Gain* tertinggi diperoleh pada *port 2* sebesar 5,811 dBi, lalu *port 1* sebesar 5,352 dBi, *port 4* sebesar 5,086 dBi, dan pada *port 3* sebesar 5,012 dBi. Jika dibandingkan dengan target 6 dBi, maka pencapaian *gain* masing-masing *port* adalah *port 1* mencapai 89,20%, *port 2* sebesar 96,85%, *port 3* sebesar 83,53%, dan *port 4* sebesar 84,77%. Meskipun belum mencapai target sepenuhnya, hasil ini menunjukkan bahwa performa antena mendekati spesifikasi yang diharapkan.

Perbedaan hasil simulasi dan pengujian dipengaruhi oleh beberapa keterbatasan yang ditemukan. Dalam simulasi, model yang digunakan bersifat ideal dengan asumsi material sempurna, konektor tanpa rugi, serta lingkungan bebas gangguan, sehingga hasilnya lebih kaku dan rentang frekuensi kerja terlihat sempit. Pada pengujian hasil fabrikasi terjadi perbedaan karena ketidaksesuaian dimensi fisik antena akibat keterbatasan proses manufaktur atau ketidaksempurnaan fabrikasi, kualitas penyolderan yang kurang bagus. Selain itu, keberadaan objek termasuk manusia dan barang-barang di dalam ruangan pengujian yang menyebabkan fluktuasi daya yang kurang stabil juga dapat mempengaruhi. Karena proses pengujian dilakukan pada laboratorium *antenna* bukan di chamber. Hal tersebut bisa menjadi bahan evaluasi untuk penelitian berikutnya.

REFERENSI

- [1] M. I. Setiawan and J. Endri, "Rancang Bangun Antena Mikrostrip Path Rectangular pada Frekuensi 900 MHz untuk Aplikasi GSM," *Jurnal Teknologi Informasi*, Jun. 2019.
- [2] A. K. Dewi, S. H. Pramono, and O. Setyawati, "Analisis Beamforming Adaptif pada Smart Antenna Menggunakan Algoritma Robust Kalman Filter : kondisi stasioner dan nonstasioner," Dec. 2012. [Online]. Available: <http://ppsub.ub.ac.id>
- [3] N. W. Gaspura, D. Arseno, and A. A. Pramudita, "PENGARUH MUTUAL COUPLING PADA BEAMFORMING ANTENA ARRAY," 2020.
- [4] W. Wu, B. G.-Z. Wang, X.-S. Yang, and Y. Zhang, "A Pattern-Reconfigurable Planar Fractal Antenna and its Characteristic-Mode Analysis," 2007.
- [5] T. A. Riza, Y. Wahyu, and R. A. Ibrahim, "ANALISIS ANTENA BOWTIE PADA FREKUENSI 500-700 MHZ UNTUK TV DIGITAL DI INDONESIA," 2015.

- [6] S. Listia Rosa Sekolah Tinggi Teknologi Pelalawan JIMaharaja, E. Supriyanto, T. Abd Rahman, S. Kamal Abdul Rahim, and A. Moradikordalivand, "Switched Beam Smart Antenna for Wireless Local Area Network."
- [7] A. B. , & P. P. M. Barbadekar, "Phased-array antennas using novel PSoC-controlled phase shifters for wireless applications." International Journal of Microwave and Wireless Technologies," 2021.
- [8] D. FADILAH, "IMPLEMENTASI DOUBLE SLIT DENGAN METODE PENCATUAN PROXIMITY COUPLED PADA ANTENA MIKROSTRIP PATCH RECTANGULAR," Universitas Telkom, Bandung, 2025.
- [9] C. Alfianita, "Perancangan Antena Mikrostrip Rectangular dengan Butler Matrix untuk Teknologi 5G pada Frekuensi 28 GHz - Dalam bentuk buku karya ilmiah," UniversitasTelkom, Bandung, 2025.
- [10] R. P. I. E. C. CIPTA, "ANTENNA ARRAY 4X2 MIKROSTRIP PATCH PERSEGI DUAL FREKUENSI UNTUK BTS 5G," Universitas Telkom, Bandung, 2024.
- [11] Y. S. Vishnu and G. Anitha, "Analysis of fractal patch antenna using different iterations and comparing with basic square patch antenna to enhance return loss performance for aerospace applications," *ADVANCED COMMUNICATION COMPUTING AND MATERIAL SCIENCES*, vol. 2871, no. 1, 2024.
- [12] I. ANGGELINA and T. YUNITA, "Perancangan dan Realisasi Antena Mikrostrip Fraktal Koch untuk Aplikasi TV Digital di Dalam Ruangan," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 8, no. 1, p. 16, Jan. 2020, doi: 10.26760/elkomika.v8i1.16.
- [13] K. Il-Kwon, "The Koch Island Fractal Microstrip Patch antenna," *IEEE AP-S Symposium Proceedings*, 2001.
- [14] Y. M. Aragbaiye, "SMART SWITCHABLE BEAM ANTENNAS FOR INTERNET OF THINGS APPLICATIONS," 2021.
- [15] Wina Priska, "Jaringan Surveillance Kampus Cerdas Dengan Teknik Tracking Sensor Node Secara sekuensial = Smart Campus Surveillance Network with Sequential Sensor Node Tracking Techniques," UniversitasHasanuddin, Makassar, 2021.
- [16] Sofyan Sandi, "Perancangan Dan Pembuatan Antena Rectangular Patch Array Switched Beam Pada Range Frekuensi Kerja 2400 - 2483.5 MHz," UniversitaBrawijaya, Malangada, 2013.
- [17] Y. Muhaiban, H. Srihendayana, N. T. Mooniarsih, T. Elektro, and J. Elektro, "ANALISIS POLARADIASI PADA PEMANCAR STASIUN NET TV PONTIANAK," Pontianak, 2017.
- [18] B. DARMAWAN, "RANCANG BANGUN ANTENA MIKROSTRIP ARRAY FRAKTAL 2X1 UNTUK APLIKASI RADAR C-BAND PADA FREKUENSI 5,6 GHZ," UniversitasTelkom, Bandung, 2024.
- [19] X. Qing, *Omnidirectional Antennas*, vol. 1–53. 2015.
- [20] B. Pratama, L. Lidyawati, and A. D. Ramadhan, "Perancangan Dan Implementasi Antena Yagi 2.4 GHz Pada Aplikasi WIFI (Wireless Fidelity)," Jun. 2013.
- [21] W. N. Hamid, "Studi Perancangan dan Eksperimental Antena Frekuensi 5,8 GHz Teknik Log periodic Array dengan penambahan Metamaterial untuk Aplikasi Energy harvesting," Universitas Telkom, Bandung, 2024.
- [22] M. Gamantyo Hendrantoro, E. Eng, and S. T. Setijadi, "DESIGN OF POWER COMBINER / DIVIDER FOR ANTENNA ARRAY IN S BAND FREQUENCY FOR RADAR SYSTEM BASED ON SOFTWARE DEFINED RADIO," 2016.