

Perancangan Antena Mikrostrip *Fractal Minkowski Array* pada Frekuensi 3.5 GHz untuk Sistem Komunikasi 5G

Raissa Syafira¹, *Syah Alam², Indra Surjati³

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Trisakti¹

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Trisakti²

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Trisakti³

raissa.raissa062001904028@std.trisakti.ac.id¹, *syah.alam@trisakti.ac.id², indra@trisakti.ac.id

ABSTRACT

Technological developments in the telecommunications sector are growing rapidly, especially with the emergence of fifth-generation technology with the advantages of high data transfer speeds and very low latency. The World Radiocommunication Conference (WRC) in 2015 has recommended frequencies for 5G communication systems below 6 GHz, namely in the frequency ranges: 470–694, 1427–1518, 3300–3800, and 4500–4990 MHz. One of the recommended frequencies to use is 3.5 GHz. Antenna is one of the important communication components in radio communication system. Microstrip antenna is a type of antenna that has the advantage of having a light weight and can be integrated with telecommunication devices such as modems. This study proposes the development of a microstrip antenna using fractal and array methods. The fractal method is used to reduce the dimensions of the antenna while the array is used to increase the gain. The target of this research is to produce an antenna with a return loss of -10 dB, VSWR 2, and a gain 5 dB at a frequency of 3.5 GHz for a 5G communication system. The proposed antenna is designed using a duroid R5880 substrate with a dielectric constant value of 2.2, dielectric loss (loss tan) 0.0009 and substrate thickness (h) 1.57 mm. This study succeeded in reducing the dimensions of the antenna until 53.76% with a return loss of -42.48 dB, VSWR 1.02, and a gain of 8.46 dB. The results obtained in this design can be recommended as a receiving antenna in the fifth generation (5G) communication system.

Keywords : 5G, Array, Fractal, Microstrip Antenna

INTISARI

Perkembangan teknologi pada bidang telekomunikasi berkembang pesat terutama dengan munculnya teknologi generasi kelima dengan kelebihan kecepatan *transfer* data tinggi dan *latency* yang sangat rendah. Konferensi Komunikasi Radio Dunia (WRC) pada tahun 2015 telah merekomendasikan frekuensi untuk sistem komunikasi 5G di bawah 6 GHz yaitu pada rentang frekuensi: 470–694, 1427–1518, 3300–3800, dan 4500–4990 MHz. Salah satu frekuensi yang direkomendasikan untuk digunakan adalah 3.5 GHz. Antena merupakan salah satu komponen komunikasi yang penting dalam sistem komunikasi radio. Antena mikrostrip merupakan tipe antena yang mempunyai kelebihan mempunyai bobot yang ringan dan dapat diintegrasikan dengan perangkat telekomunikasi seperti modem. Penelitian ini mengusulkan pengembangan antena mikrostrip dengan menggunakan metode *fractal* dan *array*. Metode *fractal* digunakan untuk mereduksi dimensi antena sedangkan *array* digunakan untuk meningkatkan gain. Target dari penelitian ini menghasilkan antena dengan *return loss* ≤ -10 dB, VSWR ≤ 2 , dan *gain* ≥ 5 dB pada frekuensi 3.5 GHz untuk sistem komunikasi 5G. Antena yang diusulkan dirancang dengan menggunakan substrat duroid R5880 dengan konstanta dielektrik 2.2, rugi-rugi dielektrik (*loss tan*) 0.0009 dan tebal substrat (*h*) 1.57 mm. Penelitian ini berhasil mereduksi dimensi antena sebesar 53,76 % dengan *return loss* -42.48 dB, VSWR 1.02, serta gain sebesar 8.46 dB. Hasil yang diperoleh pada rancangan ini dapat direkomendasikan sebagai antena penerima pada sistem komunikasi generasi kelima (5G).

Kata kunci: 5G, Array, Fractal, Antena Mikrostrip

I. PENDAHULUAN

Teknologi 5G hadir untuk memecahkan masalah dan kebutuhan untuk meningkatkan efisiensi dan kapasitas jaringan, peningkatan *data rate* dengan

cakupan yang lebih baik pada konsumsi daya yang rendah. Pada Konferensi Komunikasi Radio Dunia (WRC) pada tahun 2015, pita frekuensi kandidat 5G di bawah 6 GHz telah banyak dibahas, dan rentang

frekuensi berikut telah disarankan: 470–694, 1427–1518, 3300–3800, dan 4500–4990 MHz [1]. Diantaranya, 3.5 GHz sudah sangat luas dianggap, karena dapat diterima di sebagian besar negara. Oleh karena itu dibutuhkan suatu jaringan komunikasi yang handal khususnya pada pita frekuensi 3.5 GHz untuk aplikasi generasi kelima.

Antena merupakan salah satu komponen komunikasi yang penting dalam system komunikasi radio. Berbagai bentuk antena telah dirancang dan diusulkan sesuai dengan kebutuhan frekuensi dalam sistem komunikasi yang ada digunakan untuk berbagai macam keperluan. Antena mikrostrip merupakan antena yang banyak dikembangkan untuk keperluan sistem komunikasi nirkabel dikarenakan mempunyai kelebihan mempunyai bobot yang ringan, mudah diintegrasikan dengan perangkat lain dan biaya fabrikasi yang murah[2]. Salah satu cara untuk mendapatkan desain antena mikrostrip yang kompak adalah dengan menggunakan metode *fractal*. Dengan metode *fractal* dimensi antena dapat direduksi menjadi lebih kompak[3]. Metode *fractal* merupakan metode geometri yang bertumpu pada dua hal, yaitu kemiripan diri sendiri (*self-similarity*) dan ukuran dimensi seperti *Koch snowflakes*[4], *Minkowski* [5], *Sierpinski* [6].

Pada penelitian sebelumnya [7] didapatkan hasil pengukuran parameter sebuah antena mikrostrip yang di desain untuk mereduksi dimensi antena dengan metode *Defected Ground Structure* mendapatkan nilai *return loss* sebesar -22.30 dB, *gain* sebesar 3.45 dB dan presentasi reduksi dimensi sebesar 33.1 %. Pada Penelitian [8] berhasil membuktikan bahwa dengan metode *fractal* berhasil mereduksi dimensi antena dengan presentase yang lebih besar dari menggunakan metode DGS yaitu sebesar 47.80%. Pada penelitian berikutnya [9] dilakukan perbandingan antena mikrostrip untuk aplikasi 5G dengan desain awal antena single patch mendapatkan *gain* sebesar 2.90 dB dan setelah di *array gain* yang di dapatkan sebesar 6.34 dBi. Penelitian tersebut berhasil membuktikan bahwa metode *array* berhasil digunakan untuk meningkatkan *gain* pada antena mikrostrip.

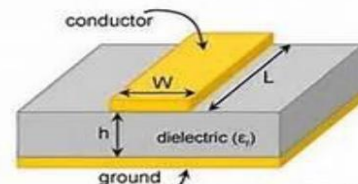
Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan desain baru antena mikrostrip menggunakan metode *fractal* *minkowski array* untuk mereduksi dimensi dan

meningkatkan *gain* antena untuk aplikasi generasi lima pada jaringan komunikasi seluler.

II. LANDASAN TEORI

A. Antena Mikrostrip

Antena mikrostrip memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan antena lainya, yaitu: Konfigurasi yang *low profile* sehingga bentuknya dapat disesuaikan dengan perangkat utamanya. Kelebihan dari antena mikrostrip adalah mempunyai bobot yang ringan dan ukuran yang kecil, mampu bekerja pada beberapa frekuensi kerja dan muda diintegrasikan dengan *microwave integrated circuits* (MICs).



Gambar 1. Geometri Antena Mikrostrip[8]

Terdapat berbagai macam *patch* pada antena mikrostrip, salah satu bentuk *patch* adalah *rectangular*. Bentuk ini memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan bentuk *patch* lainnya karena dalam segi perancangan dan pembuatannya lebih mudah dan bentuknya lebih sederhana dibandingkan dengan bentuk *patch* lainnya. Selain itu prosesnya lebih mudah dan dapat disimulasikan dengan menggunakan bantuan *software*. Untuk mencari dimensi antena mikrostrip (*W* dan *L*), harus diketahui terlebih dahulu parameter bahan yang digunakan, yaitu tebal dielektrik (*h*), konstanta dielektrik (ϵ_r), tebal konduktor (*t*), dan rugi – rugi bahan. Panjang antena mikrostrip harus disesuaikan, karena apabila terlalu pendek maka *bandwidth* akan menjadi lebih sempit sedangkan apabila terlalu panjang *bandwidth* akan menjadi lebih lebar namun efisiensi radiasi akan menjadi kecil. Dimensi dari antena mikrostrip didapatkan dengan menggunakan persamaan (1), (2), (3), (4) dan (5) [10]:

$$W = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \quad (1)$$

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

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (3)$$

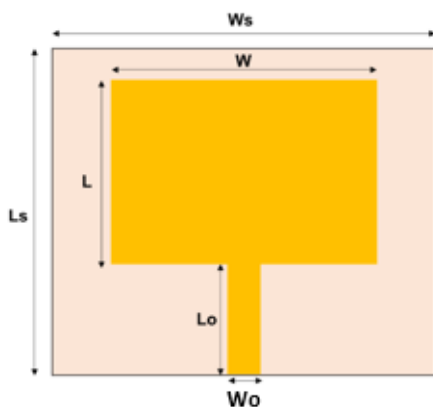
$$\Delta L = 0.412h \left(\frac{\epsilon_{\text{reff}} + 0.3}{\epsilon_{\text{reff}} + 0.258} \right) \left(\frac{\frac{W}{h} + 0.264}{\frac{W}{h} + 0.8} \right) \quad (4)$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (5)$$

$$W_o = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \ln \left[\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right] \quad (6)$$

Keterangan:

- W = Lebar patch antenna (m)
 L_{eff} = Panjang efektif patch antenna (m)
 ϵ_{reff} = Konstanta dielektrik efektif (m)
 ΔL = Pertambahan panjang patch (m)
h = Ketebalan substrat (mm)
f = Frekuensi (Hz)
L = Panjang patch antenna (m)
 W_o = Lebar Saluran Pencatu (m)



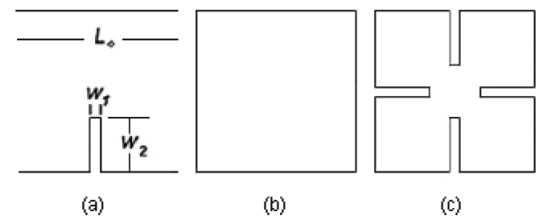
Gambar 2. Rancangan Antena Mikrostrip *Rectangular*

Gambar 2 menunjukkan disain antena mikrostrip *rectangular* dengan dimensi $W = 34$ mm, $L = 28$ mm dan $L_o = 12$ mm, sedangkan untuk dimensi lebar saluran pencatu dengan impedansi saluran 50 Ohm adalah $W_o = 3$ mm dan $L_o = 12$ mm didapatkan dengan menggunakan persamaan (6). Dimensi dari *groundplane* pada antena mikrostrip adalah $W_s = 50$ mm dan $L_s = 50$ mm.

B. Fractal Minkowski

Menurut [11] setiap objek alam berperilaku sebagai *fractal* dalam hal ini merupakan hasil kerja gaya yang sama yang bekerja pada berbagai tingkatan skala pada suatu objek sehingga mengakibatkan iterasi atau pengulangan bentuk dasar (*fractal seed* atau *fractal generator*) yang hasilnya menyatu dalam satu objek yang bersangkutan. Proses itu dikenal sebagai proses self similarity yang bersifat scale invariant: artinya diamati dengan skala berapapun bentuk geometrinya maupun dimensinya tetap sama dengan struktur awal dari *fractal*-nya.

Untuk meningkatkan kopling input / output dan untuk mendapatkan kisaran praktis dari dimensi *fractal* dari kurva *fractal* Minkowski standar dan proses generasi varian *fractal* Minkowski yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 3.

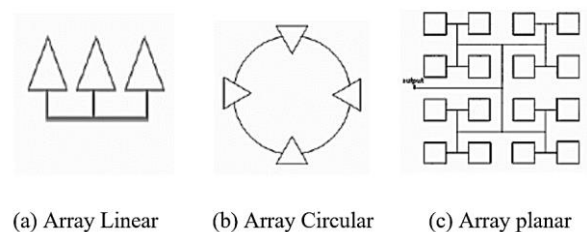


Gambar 3. Proses Generasi Varian Fractal Minkowski [9]

Gambar 3 memperlihatkan proses pembangkitan *fractal* dengan varian Minkowski. Gambar tersebut menunjukkan generasi versi modifikasi hingga iterasi kedua. Dalam versi ini, rasio 1/3 khas adalah paling populer di generasi mayoritas berbagai kurva *fractal* telah diganti dengan rasio yang berubah-ubah. Menurut [12], versi modifikasi dari *fractal* Minkowski geometri disebut geometri multi-*fractal* atau *fractal* dengan rasio lebih dari satu *generator*.

C. Antenna Array

Umumnya antena mikrostrip dengan patch elemen tunggal memiliki pola radiasi yang sangat lebar, dan menghasilkan keterarahan dan perolehan *gain* yang kurang baik. Sedangkan pada beberapa aplikasinya diperlukan antena dengan keterarahan yang baik dan perolehan (*gain*) yang tinggi. Untuk memenuhi kebutuhan karakteristik tersebut, maka antena mikrostrip disusun dengan beberapa konfigurasi. Susunan antena ini sering disebut sebagai antena susun (*Array*).[13]



Gambar 4. Konfigurasi Antena Array[13]

Masing-masing dari susunan / konfigurasi *array* memiliki keuntungan, misalnya *array* linear memiliki kelebihan dalam perhitungan yang tidak terlalu rumit, sedangkan *array* planar memiliki kelebihan dalam pengaturan dan pengendalian arah pola radiasi.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian perancangan antenna *fractal minkowski array* pada frekuensi 3.5 GHz untuk aplikasi 5G dilakukan beberapa tahapan, seperti: penentuan substrat, perhitungan antenna secara manual, dan simulasi menggunakan *software*.

A. Penentuan Substrat

Dalam penelitian ini, akan dirancang antenna yang dapat bekerja pada frekuensi 3.5 GHz yang memiliki nilai *return loss* ≤ -10 dB, *VSWR* ≤ 2 , dan *gain* ≥ 5 dB pada frekuensi 3.5 GHz. Antena akan dirancang dengan menggunakan substrat duroid Rogers R5880. Spesifikasi dari substrat yang digunakan dalam perancangan antenna dipaparkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Substrat [14]

Jenis Substrat	Duroid Rogers R5880
Konsanta Dielektrik (ϵ_r)	2.2
Ketebalan Substrat (h)	1.577 mm
Loss Tangent (σ)	0.0009

B. Perhitungan Dimensi Antena

Dimensi dari antenna yang dirancang ditentukan menggunakan persamaan yang telah dipaparkan pada bagian landasan teori. Selanjutnya disain dari antenna yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 5 sedangkan dimensi keseluruhan antenna ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Dimensi Antena *Fractal Minkowski Array*

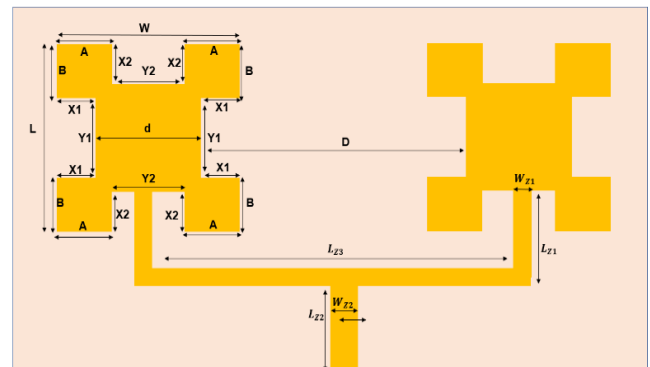
Parameter	Keterangan	Dimensi (mm)
Ws	Lebar Substrat	75
Ls	Panjang Substrat	50
W	Lebar Patch	24.8
L	Panjang Patch	23
A	Panjang Fractal	7.4
B	Lebar Fractal	6.5
X1	Panjang celah fractal 1	5.3
X2	Panjang celah fractal 2	5
Y1	Lebar celah fractal 1	10
Y2	Lebar celah fractal 2	10
d	Jarak antar fractal 1	14
D	Jarak antar element	38.5
Wz1	lebar saluran	1.9
Lz1	panjang saluran	11
Wz2	lebar saluran	3.7
Lz2	panjang saluran	13
Lz3	panjang saluran	54.5

C. Simulasi Perancangan Antena

Simulasi antenna yang dirancang menggunakan *software AWR Microsoft Studio 2014* dengan paramater yang disimulasikan adalah *return loss*, *VSWR*, *bandwidth*, *gain* dan pola radiasi.

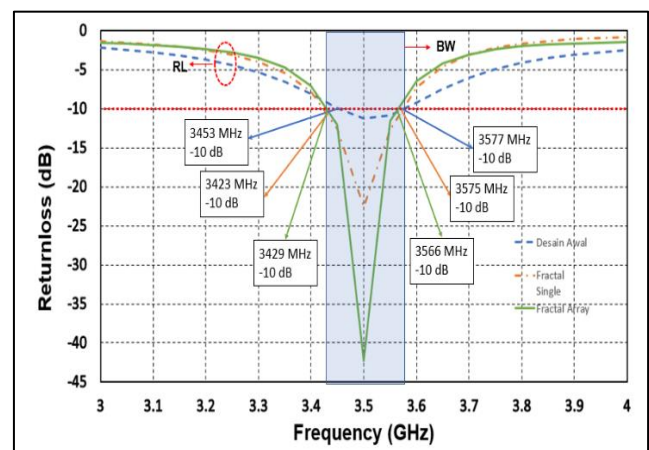
IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Perbandingan Hasil Return Loss dan Bandwidth



Gambar 5. Desain Antena Mikrostrip *Fractal Array* 2x1

Gambar 6 dapat menunjukkan perbandingan hasil simulasi dari *return loss* antara antenna desain awal dengan *fractal single element* dan *fractal array* 2x1.



Gambar 6. Hasil Perbandingan *Return loss*

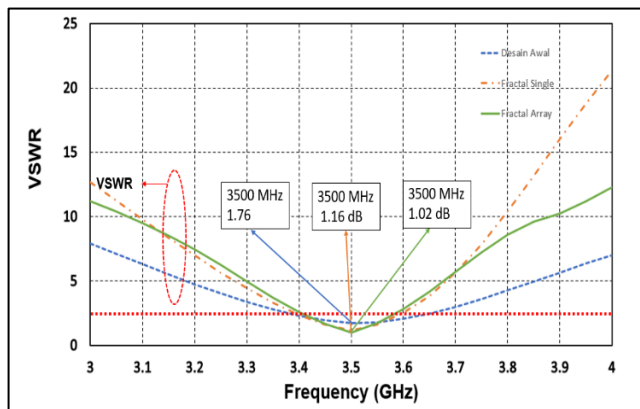
Gambar 6 menunjukan perbandingan hasil simulasi dari *return loss* pada antenna desain awal, *fractal single element*, dan *fractal array* 2 x 1. *Return Loss* yang dihasilkan pada desain awal adalah -10.28 dB sedangkan pada antenna *fractal single element* meningkat sebesar -22.63dB dan pada antenna *fractal array* 1 x 2 sebesar -42.48 pada frekuensi kerja 3.5 GHz. Dari hasil simulasi tersebut dapat dilihat bahwa penambahan metode *fractal* dan *array* berhasil

meningkatkan nilai *return loss*, hal ini disebabkan adanya perubahan arus listrik yang mengalir pada *patch* antenna yang telah dimodifikasi sehingga menghasilkan karakteristik antenna yang berbeda.

Selanjutnya, *bandwidth* yang dihasilkan pada desain awal adalah 124 MHz sedangkan *fractal single element* adalah 152 MHz dan pada antenna *fractal array* 2 x 1 sebesar 137 MHz. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terjadi peningkatan yang signifikan dari *bandwidth* ketiga antenna yang diusulkan.

B. Perbandingan Hasil VSWR

Gambar 7 menunjukkan perbandingan hasil simulasi VSWR antara antenna desain awal, *fractal single element* dan *fractal Array* 2 x 1. VSWR yang dihasilkan pada desain awal adalah 1.76 sedangkan pada antenna *fractal single element* adalah 1.16 dB dan pada antenna *fractal array* 2 x 1 sebesar 1.02 pada frekuensi kerja 3.5 GHz. Hal ini menunjukkan bahwa ketiga antenna yang diusulkan telah memenuhi kriteria dari antenna yang dirancang dengan nilai $VSWR \leq 2$ pada frekuensi 3.5 GHz.



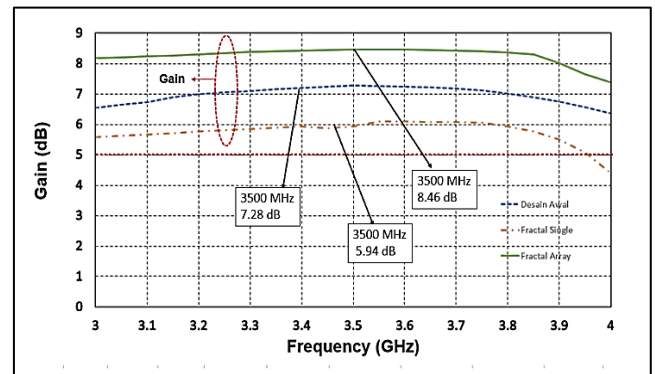
Gambar 7. Hasil Perbandingan VSWR

C. Perbandingan Hasil Gain

Gambar 8 menunjukkan perbandingan simulasi *gain* dari antenna desain awal, *fractal single element* dan *fractal array* 2x1. *Gain* dari antenna mikrostrip ditingkatkan menggunakan metode *array* 2x1 yang diterapkan dengan menyusun antenna secara horizontal dan dihubungkan dengan saluran pencatu mikrostrip.

Gain pada desain awal adalah 7.28 dB sedangkan pada antenna *fractal single element* sebesar 5.94 dB dan pada antenna *fractal array* 2 x 1 sebesar 8.46 dB pada frekuensi kerja 3.5 GHz. Penggunaan metode *fractal* berdampak terhadap penurunan nilai *gain* dari antenna, hal ini disebabkan adanya perubahan *bandwidth* pada

antenna setelah diterapkan metode fraktal. Umumnya, antenna dengan *bandwidth* yang lebar akan menghasilkan *gain* yang rendah dan juga sebaliknya. Selanjutnya, penerapan metode *array* 2x1 berhasil meningkatkan *gain* sampai dengan 8.46 dB pada frekuensi kerja 3.5 GHz.



Gambar 8. Hasil Perbandingan Gain

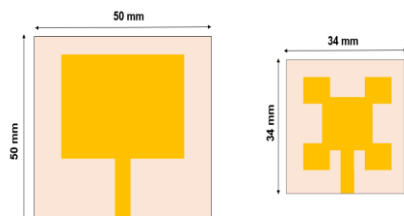
Keseluruhan hasil perbandingan simulasi dari ketiga model antenna yang dirancang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Perbandingan Keseluruhan Proses Simulasi

Jenis Antena	Return Loss	Bandwidth	VSWR	Gain
Desain Awal	-10.28 dB	124 MHz	1.76	7.28 dB
Fractal Single Element	-22.63 dB	152 MHz	1.16	5.94 dB
Fractal Array 2x1	-42.28 dB	137 MHz	1.02	8.46 dB

Tabel 3 menunjukkan perbandingan hasil simulasi dari ketiga model antenna yang diusulkan. Hasil simulasi dari antenna desain awal menunjukkan bahwa antenna telah bekerja pada frekuensi 3.5 GHz dengan *return loss* -10.28 dB, VSWR 1.76, *bandwidth* 124 MHz dan *gain* 7.28 dB. Setelah dioptimasi menggunakan metode fraktal minkowski dengan $n = 1$, terjadi peningkatan terhadap nilai *return loss*, VSWR dan *bandwidth* namun *gain* mengalami penurunan. Selanjutnya, untuk meningkatkan *gain* antenna dilakukan optimasi dengan mengembangkan model antenna dengan *array* 2x1. Pengembangan antenna *fractal array* 2x1 berhasil meningkatkan *return loss*, VSWR dan *gain* dari antenna dibandingkan dengan antenna desain awal dan antenna *fractal single element*. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan *array* 2x1

berhasil meningkatkan nilai *gain* antenna sampai dengan 8.78 dB pada frekuensi kerja 3.5 GHz. Selain itu, efek penggunaan metode *fractal minkowski* juga berhasil mereduksi dimensi antenna yang awalnya adalah 50 x 50 mm menjadi 34 x 34 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9 dan Tabel 4.



Gambar 9. Perbandingan Dimensi Antena *Fractal* dan Antena Desain Awal

Tabel 4. Dimensi Antena *Fractal Single* dan Desain Awal

Mikrotrip Antena	Dimensi
Desain Awal	50 mm x 50 mm
Desain <i>Fractal Single Element</i>	34 mm x 34 mm

Tabel 4 menunjukkan bahwa penggunaan metode *fractal* dapat mereduksi dimensi dari antenna sebesar 53.76 % dibandingkan dengan antenna disain awal pada frekuensi 3.5 GHz. Selain itu metode *fractal* juga berhasil meningkatkan parameter *return loss* sebesar 54.77 % dan *bandwidth* sampai dengan 18.42 % dibanding dengan antenna desain awal. Namun, parameter *gain* dari antenna *fractal* mengalami penurunan sebesar 18 % dari antenna desain awal. Hal ini disebabkan perbandingan lurus antara besar dimensi antenna dengan nilai *gain*, semakin besar dimensi antenna akan semakin besar *gain* nya begitu juga sebaliknya. Spesifikasi dari antenna *fractal array 2x1* elemen ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Spesifikasi Antena Mikrostrip *Fractal Array 2x1* Elemen

Parameter	Nilai
Return Loss	-42.48 dB
Bandwidth	137 MHz
VSWR	1.02
Gain	8.46 dB

Tabel 5 memperlihatkan spesifikasi antenna yang dirancang dengan nilai *return loss* nilai -42.28 dB, VSWR 1.02, dan *gain* sebesar 8.46 dB pada frekuensi

3.5GHz. Hal ini menunjukkan bahwa disain antenna yang dirancang telah memenuhi target yang telah ditentukan pada yaitu dengan parameter dari *return loss* ≤ -10 dB, $VSWR \leq 2$, dan *gain* ≥ 5 dB. Selain itu, penerapan metode *fractal* berhasil mereduksi dimensi antenna sampai dengan 53.76 % dan penerapan metode array 2x1 berhasil meningkatkan *gain* sebesar 16.2% dibandingkan dengan antenna disain awal dan meningkat 30 % dibandingkan dengan antenna *fractal* sebelum menggunakan array.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini mengusulkan desain antenna mikrostrip yang dikembangkan dengan metode *fractal* dan array 1x2. Berdasarkan hasil perancangan dan simulasi diperoleh antenna mikrostrip *fractal minkowski array 2x1* yang bekerja pada frekuensi 3.5 GHz dan telah memenuhi kriteria parameter *return loss* ≤ -10 dB, $VSWR \leq 2$, dan *gain* ≥ 5 dB. Metode *fractal minkowski* berhasil mereduksi dimensi antenna hingga 53.76% sedangkan metode array 1 x 2 pada antenna *fractal* menghasilkan peningkatan nilai *return loss* dengan presentase sebesar 46.72%. Penerapan metode array 1x2 berhasil meningkatkan *gain* pada antenna *fractal minkowski* hingga 30% jika dibandingkan dengan antenna yang tidak menggunakan metode array. Penelitian ini dapat direkomendasikan sebagai disain antenna penerima pada sistem komunikasi generasi kelima (5G).

Tambahan : Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian Universitas Trisakti dan Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri yang telah membiayai dan mendukung kegiatan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] F. S. Awangga, "Kajian Awal 5G Indonesia," *Pus. Penelit. dan Pengemb. Sumber Daya dan Perangkat Pos dan Inform. Indones. Hal.*, pp. 97–114, 2015.
- [2] I. Surjati, *Antena Mikrostrip: Konsep dan Aplikasinya*. Universitas Trisakti, 2010.
- [3] S. Alam and E. Surya, "Miniaturisasi Antena Mikrostrip dengan Desain Fraktal untuk Aplikasi Global Positioning System," *J. Kaji. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 2, pp. 71–77, 2017.
- [4] Z. Yu, J. Yu, C. Zhu, and Z. Yang, "An

- improved Koch snowflake fractal broadband antenna for wireless applications,” in *2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing)*, 2017, pp. 1–5.
- [5] H. Ali, P. Singh, S. Kumar, and T. Goel, “A Minkowski fractal ultrawide band antenna for 5G applications,” in *2017 IEEE International Conference on Antenna Innovations & Modern Technologies for Ground, Aircraft and Satellite Applications (iAIM)*, 2017, pp. 1–5.
- [6] S. Gundala, V. SrinivasaBaba, A. Vijaya, and S. Machanna, “Compact High Gain Hexagonal Fractal Antenna for 5G applications,” in *2019 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, 2019, pp. 1–7.
- [7] N. N. Tawfeeq, “Size reduction and gain enhancement of a microstrip antenna using partially defected ground structure and circular/cross slots,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 7, no. 2, p. 894, 2017.
- [8] S. Alam, I. Surjati, A. Ferawan, and T. Firmansyah, “Design and Realization of Compact Microstrip Antenna Using Fractal Sierpensi Carpet for Wireless Fidelity Application,” *Indones. J. Electr. Eng. Informatics*, vol. 6, no. 1, pp. 70–78, 2018.
- [9] P. S. Naik and H. G. Virani, “1× 4 Microstrip Patch Slotted Array Antenna for 5G C-Band Access Point Application,” *2020 Int. Conf. Electron. Sustain. Commun. Syst.*, pp. 641–644, 2020.
- [10] S. Alam, I. Surjati, and T. Firmansyah, “Bandwidth Enhancement of Square Microstrip Antennas Using Dual Feed Line Techniques,” *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun.*, vol. 10, no. 1, pp. 60–65, 2021, doi: 10.18178/ijeetc.10.1.60-65.
- [11] B. B. Mandelbrot, “The fractal geometry of Nature WH Freeman and Company,” in *New York*, 1983, p. 468.
- [12] K. Falconer, *Fractal geometry: mathematical foundations and applications*. John Wiley & Sons, 2004.
- [13] R. Garg, P. Bhartia, I. J. Bahl, and A. Ittipiboon, *Microstrip antenna design handbook*. Artech house, 2001.
- [14] R. A. Alahnomi, Z. Zakaria, E. Ruslan, S. R. Ab Rashid, and A. A. Mohd Bahar, “High-Q sensor based on symmetrical split ring resonator with spurlines for solids material detection,” *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 9, pp. 2766–2775, 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2682266.