

Studi Pengaruh Bahan Substrat Terhadap Kinerja Antena *Mikrostrip Array Satcom* pada Frekuensi Ka-Band

R Nugraha¹ M Wildan² F L Adipradama³

Program Studi Teknik Navigasi Udara PPI Curug, Tangerang, Indonesia^{1,2,3}

Email: nugraharaihan191@gmail.com¹ muh.wildan@ppicurug.ac.id²

febrianla99@gmail.com³

Abstrak

Antena parabola konvensional pada pesawat menimbulkan hambatan aerodinamis. Sebagai solusi berprofil rendah, penelitian ini merancang antena mikrostrip *rectangular array* 4x8 (32 elemen) untuk penerima satelit Ka-Band (20 GHz) sekaligus menguji pengaruh bahan substrat terhadap kinerjanya. Simulasi dilakukan menggunakan CST Studio Suite 2022 dengan metode Rancang Bangun dan Eksperimental Kuantitatif, mencakup sintesis dimensi *patch*, teknik *slot*, dan *corporate feed network*. Hasilnya, substrat Rogers RT5880 terbukti optimal dengan pencapaian VSWR 1,27, *Return Loss* -18,56 dB, *Bandwidth* 258 MHz, dan *Gain* 16,48 dBi. Sebaliknya, kinerja FR-4 Epoxy anjlok dengan *Gain* hanya 4,535 dBi akibat tingginya *loss tangent*. Kesimpulannya, Rogers RT5880 jauh lebih layak dan unggul untuk diaplikasikan pada sistem komunikasi satelit Ka-Band dibandingkan FR-4.

Kata Kunci: Antena Mikrostrip, Rectangular Array, Ka-Band, Rogers RT5880, FR-4 Epoxy



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komunikasi pada industri penerbangan menuntut ketersediaan layanan *in-flight connectivity* yang cepat dan stabil (Bilen et al., 2022). Sistem komunikasi satelit pita Ka-Band (18–40 GHz) menjadi solusi utama berkat kapasitas *bandwidth* yang sangat besar. Namun, penggunaan antena parabola konvensional pada pesawat menimbulkan hambatan aerodinamika (*aerodynamic drag*) yang fatal, terutama bagi pesawat ringan tingkat latih seperti Piper Seneca V (Monica & Jothilakshmi, 2020). Oleh karena itu, antena mikrostrip berprofil datar (*low-profile*) hadir sebagai alternatif ideal yang dapat ditempel secara konformal pada badan pesawat. Meskipun demikian, sinyal satelit pada frekuensi Ka-Band mengalami redaman propagasi ruang bebas (*free-space path loss*) yang sangat ekstrem. Kondisi ini menuntut antena dengan perolehan daya (*gain*) yang sangat tinggi melalui konfigurasi susunan (*array*) berskala masif untuk mengkompensasi atenuasi sinyal terestrial ke satelit (Monica & Jothilakshmi, 2020).

Dalam merealisasikan antena mikrostrip array berkinerja tinggi pada frekuensi 20 GHz, tantangan teknis terbesar tidak hanya terletak pada arsitektur susunannya, melainkan pada karakteristik material substrat yang digunakan. Kinerja fundamental antena mikrostrip, terutama efisiensi radiasi dan pelebaran *bandwidth*, sangat dibatasi oleh rugi-rugi dielektrik (*dielectric loss*) yang meningkat tajam pada spektrum gelombang mikro (Naqvi & Lim, 2018). Substrat konvensional yang ekonomis seperti FR-4 Epoxy umumnya memiliki nilai *loss tangent* yang tinggi (Rizqa et al., 2020). Ketika material ini diaplikasikan pada jaringan pencatu daya (*corporate feed network*) yang berjenjang dan panjang untuk menyuplai puluhan elemen antena, redaman sinyal dan penumpukan *insertion loss* menjadi sangat parah, yang pada akhirnya mendegradasi *gain* secara keseluruhan. Untuk mengatasi kebuntuan ini, material khusus frekuensi tinggi dengan *loss tangent* rendah, seperti Rogers RT5880, secara teoretis menjadi syarat mutlak, meskipun implikasi perbandingannya secara nyata pada susunan array masif masih perlu dibuktikan secara terukur.

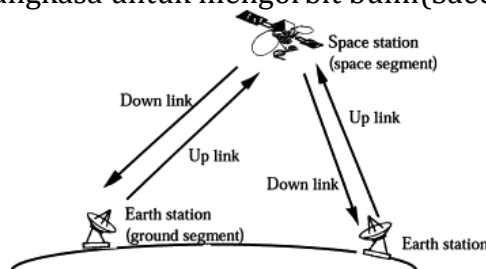
Beberapa penelitian terdahulu telah berupaya mengembangkan antena mikrostrip satelit, namun mayoritas masih mengandalkan konfigurasi array berskala kecil (seperti 2x2) dengan *gain* di bawah 14 dBi, atau memodifikasi elemen tunggal multiband dengan *gain* rendah (Preethi et al., 2023). Realisasi arsitektur array berskala masif di atas 10 GHz seringkali dihindari karena kerumitan fabrikasi dan sensitivitas efisiensi radiasi terhadap properti substrat (Monica & Jothilakshmi, 2020). Belum banyak studi yang secara langsung dan mendalam mengeksplorasi komparasi performa material substrat pada arsitektur array berskala masif di spektrum 20 GHz, khususnya untuk aplikasi aeronautika (Taha & AlSharabati, 2020). Berangkat dari celah tersebut, kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini diletakkan pada studi komparatif *head-to-head* antara substrat konvensional (FR-4 Epoxy) dan substrat frekuensi tinggi (Rogers RT5880) (Preethi et al., 2023). Komparasi ini diujikan pada sebuah rancangan arsitektur array masif 4x8 (32 elemen) yang dioptimasi khusus untuk memenuhi standar aerodinamis Piper Seneca V sekaligus menembus *free-space loss* satelit.

Fokus utama dari penelitian ini adalah mendemonstrasikan secara kuantitatif seberapa fatal dampak rugi-rugi dielektrik substrat terhadap degradasi kinerja antena di spektrum Ka-Band. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dimensi antena mikrostrip *rectangular array* 32 elemen berprofil rendah, mengoptimalkan jaringan pencatu dayanya untuk meminimalisasi *insertion loss*, dan yang paling utama, menganalisis perbandingan performa operasional (*Voltage Standing Wave Ratio*, *Return Loss*, *Bandwidth*, dan *Gain*) dari kedua substrat tersebut melalui eksperimen berbasis komputasi. Kontribusi dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi fundamental akademis dan rujukan praktis yang mempertegas urgensi pemilihan material substrat dalam perancangan antena satelit penerbangan di masa depan. Pendahuluan dimulai (secara singkat, misal maksimal 1 paragraf) dengan latar belakang umum penelitian; kemudian harus disertai State of the Art (kajian singkat pustaka atau penelitian terdahulu, 1-2 paragraf) dengan tujuan untuk membenarkan/memperkuat pernyataan kebaruan atau signifikansi atau kontribusi ilmiah atau orisinalitas artikel ini dan usahakan ada rujukan artikel dari jurnal 10 tahun terakhir yang memperkuat justifikasi orisinalitas atau kontribusi tersebut); Sebelum menuliskan tujuan penelitian, harus ada Gap Analysis atau pernyataan kesenjangan (orisinalitas) atau pernyataan kebaruan yang jelas dan gamblang, atau perbedaan unik penelitian ini dibanding penelitian terdahulu, juga dari segi penting atau tidaknya penelitian ini; baru kemudian tuliskan tujuan penelitian dalam artikel ini secara lugas dan jelas. Masukkan juga gap penelitian.

Tinjauan Pustaka

Satelit dan Komunikasi Satelit

Satelit adalah benda yang mengorbit benda lain dengan periode revolusi dan rotasi tertentu (Saeed & Nwajana, 2024). Seperti yang kita ketahui, satelit diklasifikasikan menjadi dua jenis utama, yaitu satelit alami dan satelit buatan. Satelit alami merupakan benda angkasa non-rekayasa yang secara natural mengorbit sebuah planet, seperti halnya Bulan yang menjadi satelit Bumi. Di sisi lain, satelit buatan merupakan perangkat teknologi ciptaan manusia yang sengaja diluncurkan ke luar angkasa untuk mengorbit bumi (Saeed & Nwajana, 2024).

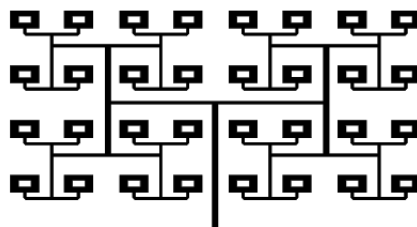


Gambar 1. Sistem Komunikasi Satelit

Dari kelima jenis di atas, orbit geostasioner (GEO) merupakan orbit yang paling sering dimanfaatkan untuk satelit cuaca dan satelit komunikasi. Satelit jenis ini diletakkan persis sejajar dengan garis khatulistiwa pada titik lintang nol derajat. Karena kecepatan edarnya sama persis dengan waktu rotasi bumi, posisi satelit GEO akan selalu terlihat diam atau tetap pada satu titik jika dipantau dari bumi.

Antena Mikrostrip dan Susunan Array

Antena adalah salah satu komponen yang mempunyai peranan sangat penting dalam sistem komunikasi. Fungsi antena adalah untuk merubah gelombang elektromagnetik menjadi listrik atau sebaliknya. Antena pada dasarnya beroperasi sebagai perangkat transisi antara saluran transmisi dan ruang bebas. Antena mikrostrip merupakan antena yang populer saat ini karena biayanya yang murah, ukurannya kecil, dan mudah difabrikasi. Selain itu, antena mikrostrip mudah dalam penyesuaian frekuensi resonansi, impedansi input, polarisasi, dan pola radiasi (Zuru et al., 2026).



Gambar 2. Susunan Antena Array

Prinsip kerja antena *array* didasarkan pada superposisi gelombang elektromagnetik. Dengan mengatur jarak antar elemen (umumnya berkisar pada $1/2\lambda$ hingga $0,8\lambda$ dari panjang gelombang frekuensi operasi) dan fasa sinyal yang dicatukan pada masing-masing elemen, medan radiasi dari setiap *patch* akan saling menguatkan (*constructive interference*) pada arah utama yang diinginkan dan saling melemahkan (*destructive interference*) pada arah lainnya. Peningkatan jumlah elemen dalam sebuah *array* berbanding lurus dengan peningkatan nilai *gain* dan penyempitan *beamwidth*, yang menghasilkan kinerja antena yang lebih fokus dan terarah.

Material Substrat Rogers RT5880 dan FR-4 Epoxy

Substrat merupakan lapisan material dielektrik yang berfungsi sebagai medium penyekat fisik sekaligus pemisah antara elemen peradiasi (*patch*) dan bidang pentanahan (*ground plane*). Pemilihan material substrat sangat krusial dalam perancangan antena, di mana masing-masing jenis bahan memiliki karakteristik unik yang direpresentasikan oleh nilai konstanta dielektrik yang berbeda-beda. Substrat Rogers terbuat dari campuran material khusus seperti *polytetrafluoroethylene* (PTFE) yang diperkuat dengan microfiber kaca atau keramik hidrokarbon. Karakteristik utama dari material Rogers adalah memiliki konstanta dielektrik (ϵ_r) yang sangat stabil terhadap perubahan frekuensi dan suhu. FR-4 Epoxy merupakan material substrat standar yang paling umum dan luas digunakan dalam industri pembuatan *Printed Circuit Board* (PCB) komersial untuk berbagai peralatan elektronik. Material ini sangat diminati karena biaya produksinya yang terjangkau, ketersediaannya yang melimpah, serta memiliki kekuatan dan kekakuan mekanik yang sangat baik. Substrat FR-4 terbuat dari anyaman serat kaca (*woven fiberglass cloth*) yang disatukan dan direkatkan menggunakan resin epoksi (*epoxy resin binder*) yang memiliki sifat tahan api. Secara elektrik, material ini umumnya memiliki nilai konstanta dielektrik (ϵ_r) yang lebih tinggi dibandingkan dengan Rogers RT5880.

Parameter Kinerja Antena

Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) adalah perbandingan antara tegangan maksimum dan minimum yang terjadi dalam saluran yang tidak terhubung secara sempurna. Kualitas suatu antena dapat dinilai berdasarkan nilai VSWR yang dihasilkan. Standar performa antena yang ideal mensyaratkan nilai pencapaian VSWR sebesar ≤ 2 . Jika angka VSWR semakin tinggi, itu menandakan bahwa porsi daya yang dipantulkan semakin dominan.

$$VSWR = \frac{1 + [r]}{1 - [r]} \quad (1)$$

Return Loss adalah salah satu parameter yang digunakan untuk membandingkan antara amplitudo gelombang yang dipantulkan dengan amplitudo gelombang yang dikirimkan. Standar performa antena yang ideal umumnya ditandai dengan pencapaian nilai *Return Loss* ≤ -10 dB.

$$Return Loss = -20\text{Log}[r] \quad (2)$$

Gain antena adalah besarnya perbandingan antara intensitas daya yang dipancarkan antena dengan total daya yang diterima. Parameter *gain* mendeskripsikan tingkat efektivitas sebuah antena dalam mengonversi daya listrik masukan menjadi pancaran gelombang radio pada arah utamanya. Nilai ini menjadi indikator penentu seberapa kuat antena tersebut mampu menangkap atau memancarkan sinyal.

$$G = \eta A \cdot D \quad (3)$$

Bandwidth merupakan batasan rentang frekuensi kerja yang memfasilitasi sebuah antena untuk dapat beroperasi sesuai dengan karakteristik yang ditargetkan. Kelayakan operasi ini ditinjau dari kestabilan berbagai parameter teknisnya, seperti impedansi masukan, polarisasi, perolehan daya (*gain*), tingkat efisiensi, hingga nilai toleransi VSWR dan *Return Loss*.

$$Bandwidth = \frac{f_1 - f_2}{f_c} \times 100\% \quad (4)$$

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode rancang bangun (*Research and Development*) tingkat 1 yang dipadukan dengan pendekatan eksperimental kuantitatif berbasis simulasi komputasi (*computational experiment*) (Saraswati et al., 2017). Fokus utamanya adalah merancang arsitektur antena mikrostrip *rectangular array* pada pita frekuensi Ka-Band (20 GHz), serta membandingkan performanya secara komprehensif saat diimplementasikan menggunakan material substrat konvensional FR-4 Epoxy dan material frekuensi tinggi Rogers RT5880 [10]. Perhitungan matematis untuk menentukan lebar (W) dan panjang fisik aktual (L) antena dilakukan menggunakan pendekatan *Transmission Line Model* melalui Persamaan (5) hingga (9) (Sadasivam et al., 2022):

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (5)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-0.5} \quad (6)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{reff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \quad (7)$$

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (8)$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (9)$$

Keterangan:

c = Kecepatan cahaya di ruang hampa (3×10^8 m/s)

f_r = Frekuensi resonansi target (20 GHz)

ϵ_r = Konstanta dielektrik material substrat

h = Ketebalan material substrat

ϵ_{reff} = Konstanta dielektrik efektif

ΔL = Pertambahan panjang fiktif akibat *fringing field*

L_{eff} = Panjang efektif *patch* antenna

Setelah dimensi dasar tunggal diperoleh, elemen digandakan menjadi susunan array 4x8 bersistem pencatu daya terpusat (*corporate feed*). Arsitektur *corporate feed* sangat rentan terhadap akumulasi redaman sinyal pada frekuensi milimeter-wave (mm-wave), sehingga desain lebar saluran transimisinya harus dihitung presisi untuk mempertahankan *gain* (Hong et al., 2017). Untuk mencegah timbulnya *grating lobes* yang merusak pola radiasi terarah (*directional*), jarak antar pusat elemen (d) diatur pada rentang $0,5\lambda_0$ hingga $0,9\lambda_0$, di mana λ_0 adalah panjang gelombang di ruang bebas pada frekuensi 20 GHz. Jarak optimum ini juga berfungsi vital dalam menekan efek *mutual coupling* antar elemen yang kerap mendegradasi *bandwidth* dan efisiensi radiasi antenna susun. Seluruh perhitungan matematis di atas digunakan sebagai nilai acuan dasar (*baseline*), yang kemudian dioptimasi secara iteratif memanfaatkan komputasi numerik di dalam perangkat lunak simulasi CST Studio Suite 2022 untuk mendapatkan akurasi pemodelan elektromagnetik 3D yang komprehensif (Sugiyono, 2016).

Evaluasi kelayakan desain didasarkan pada pengujian variabel independen (dimensi fisik antenna dan jenis substrat) untuk mengamati respons pada variabel dependen yang meliputi *Return Loss*, *VSWR*, *Gain*, *Bandwidth*, dan pola radiasi (Obot et al., 2019). Setelah pemodelan awal, dimensi antenna dioptimasi secara terpisah untuk masing-masing material hingga mencapai target spesifikasi kinerja operasional (dapat dilihat pada Tabel 1). Parameter ini diselaraskan dengan standar ketat komunikasi satelit tingkat *airborne*, di mana kestabilan *VSWR* dan *Return Loss* merupakan syarat mutlak agar tidak terjadi gangguan pada *transceiver* penerbangan. Tahapan yang dilalui dalam penelitian, pembangunan konsep, atau penyelesaian kasus, dituliskan pada bagian metodologi.

Tabel 1. Parameter Capaian Antena

Parameter	Nilai
Frekuensi Kerja	20 GHz
VSWR	≤ 2
<i>Return Loss</i>	≤ -10 dB
<i>Gain</i>	≥ 10 dBi
Impedansi	± 50 Ohm
Pola Radiasi	<i>Directional</i>

Data hasil simulasi akhir kemudian dianalisis melalui studi komparasi *head-to-head* antara skenario rancangan berbahan FR-4 Epoxy dan Rogers RT5880. Perbandingan ini

dijabarkan secara deskriptif kuantitatif dengan meninjau dua aspek krusial: kemampuan penyesuaian impedansi (*impedance matching*) untuk mengevaluasi pantulan daya, serta karakteristik radiasi (*gain* dan efisiensi) guna mengukur secara nyata dampak rugi-rugi dielektrik (*loss tangent*) substrat. Pada frekuensi Ka-Band, nilai *loss tangent* yang tinggi seperti pada FR-4 terbukti secara dramatis memicu pelemahan rambatan gelombang di dalam substrat yang dapat berujung pada disipasi daya menjadi panas, bukan radiasi elektromagnetik. Oleh karena itu, komparasi dengan material *low-loss* seperti Rogers secara nyata diperlukan untuk membuktikan efektivitas transmisi energi frekuensi tinggi dalam susunan array masif.

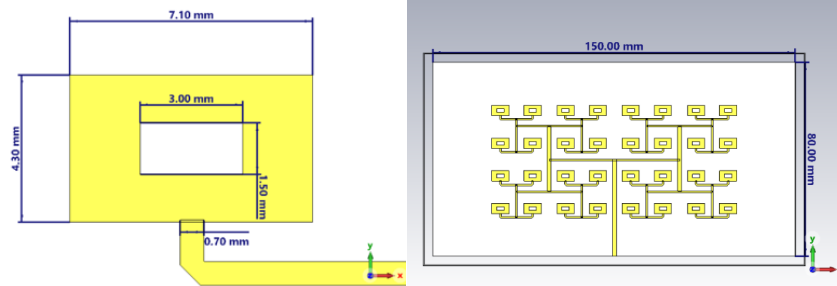
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Perancangan dan Arsitektur Antena Array

Perancangan antena diawali dengan sintesis dimensi elemen tunggal (*single patch*) yang dimodifikasi menggunakan teknik *slotting* di area tengah konduktor. Modifikasi berupa celah berdimensi 3 mm x 1,5 mm ini bertindak sebagai transformator impedansi lokal yang secara efektif memperlebar bandwidth sekaligus memperbaiki kualitas penyesuaian impedansi tanpa memperbesar dimensi fisik patch (Hong et al., 2017). Guna mengkompensasi redaman ruang bebas (*free-space path loss*) dari sinyal satelit geostasioner, elemen peradiasi ini dilipatgandakan menjadi susunan matriks *array* 4x8 (32 elemen). Jarak antar pusat elemen ditetapkan secara presisi sebesar 13 mm, ruang yang cukup renggang untuk mencegah efek kopling saling silang (*mutual coupling*) yang parah, namun tidak melebihi batas yang dapat memicu kemunculan *grating lobes* (Li et al., 2020). Sistem distribusi daya pada 32 elemen ini dirancang menggunakan jaringan *corporate feed* bertopologi percabangan *T-junction*. Untuk mengatasi ketidaksesuaian nilai resistansi saat percabangan membelah daya, jaringan pencatu dioptimalkan menggunakan saluran transformasi seperempat panjang gelombang untuk menyeimbangkan impedansi dari percabangan kembali ke nilai standar 50 Ohm. Desain percabangan yang simetris ini menjamin seluruh elemen menerima sinyal masukan dengan fasa dan amplitudo yang identik (*in-phase*), sehingga memicu pancaran gelombang tegak lurus (*broadside radiation*) yang terfokus kuat. Keseluruhan arsitektur ini dibangun di atas bidang pentanahan (*ground plane*) dengan total luasan papan yang sangat ringkas, yakni 150 mm x 80 mm, serta disimulasikan secara utuh menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite 2022. Setelah dilakukan Perancangan dan Simulasi, didapatkan hasil dimensi optimasi yang tertampil dalam Tabel 2 dan tampilan pada Gambar 3.

Tabel 2. Dimensi Ukuran Antena

Uraian	Simbol	Dimensi (mm)
Panjang Patch	Tp	4.3
Lebar Patch	Wp	7.1
Panjang Slot Patch	Tsp	3
Lebar Slot Patch	Wsp	1.5
Tebal Substrate	Hsubs	0.787
Panjang Ground plane	Ts	80
Lebar Ground plane	Ws	150
Lebar Feedline 50	Wf	1.6
Lebar Feedline 100	Wf2	0.7
Jarak Vertikal antar Patch	-	13



Gambar 3. Susunan Antena Array

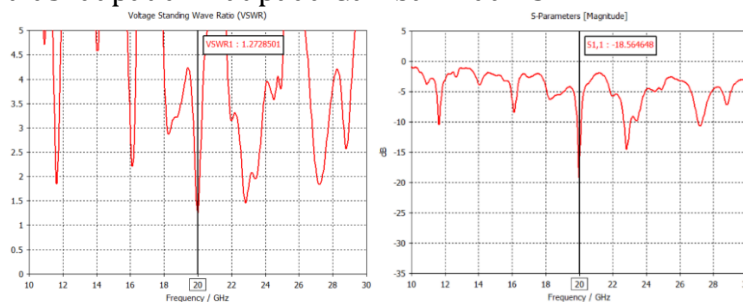
Kinerja Optimal Antena Berbasis Rogers RT5880

Skenario simulasi utama mengevaluasi arsitektur antena menggunakan material substrat khusus frekuensi tinggi Rogers RT5880 ($\epsilon_r = 2.2$) dengan ketebalan 0,787 mm. Melalui tahapan optimasi iteratif pada ukuran *patch* dan kalibrasi lebar saluran pencatu, performa antena sukses beresonansi secara presisi pada target frekuensi 20 GHz. Indikator penyesuaian impedansi (*impedance matching*) menunjukkan kualitas yang sangat baik.

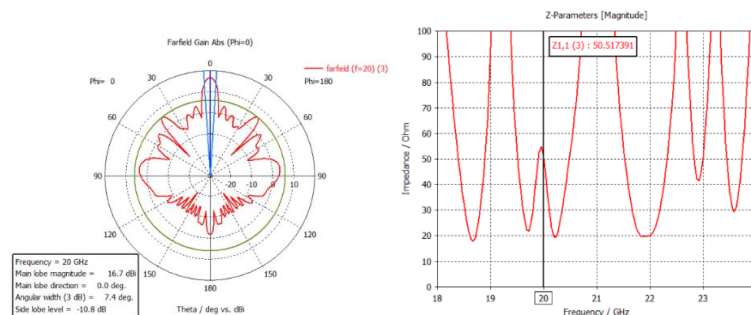
Tabel 3. Nilai Parameter Capaian Antena

Parameter	Nilai
Frekuensi Kerja	20 GHz
VSWR	1,27
<i>Return Loss</i>	-18,56 dB
<i>Gain</i>	16,48 dBi
Impedansi	± 50 Ohm

Ditinjau dari karakteristik radiasi, penyatuan 32 elemen ini menghasilkan lonjakan perolehan daya (*Gain*) yang masif hingga mencapai 16,48 dBi, disertai dengan lebar cakupan pita (*Bandwidth*) sebesar 258 MHz. Terdapat peningkatan *gain* lebih dari 11 dB jika dibandingkan dengan kemampuan pancar elemen tunggalnya yang hanya berada di angka 4,756 dBi. Hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5.



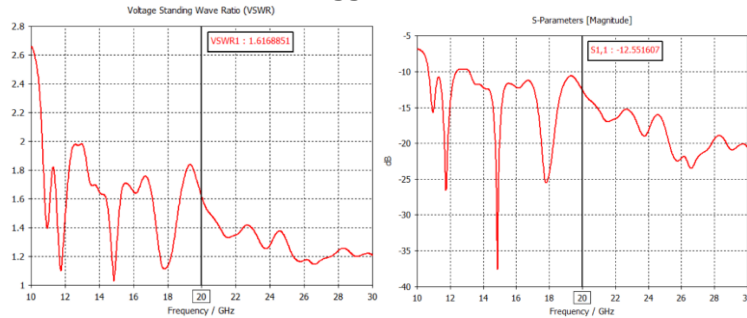
Gambar 4. Grafik VSWR dan *Return Loss* Hasil Simulasi Rogers RT5880



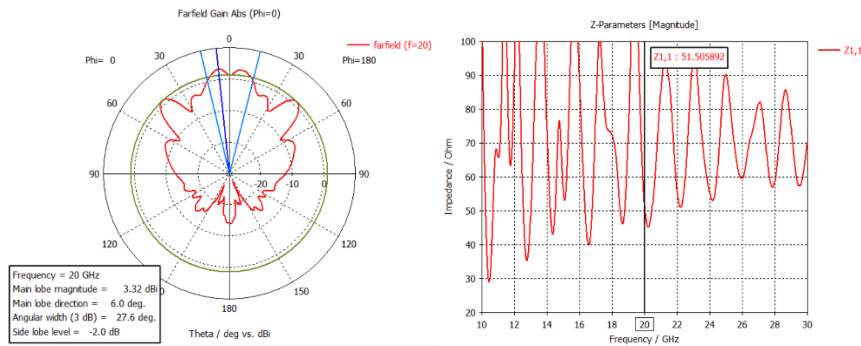
Gambar 5. Grafik Impedansi dan Bentuk Pancaran Rogers RT5880

Analisis Komparatif Pengaruh Bahan Substrat

Untuk membuktikan urgensi dan signifikansi pemilihan material pada pita spektrum Ka-Band, penelitian ini melakukan pengujian komparatif secara *head-to-head*. Arsitektur *array* 32 elemen yang sama diujikan ulang di atas material substrat konvensional FR-4 Epoxy ($\epsilon_r = 4.3$) dengan ketebalan 1,6 mm, yang disesuaikan kembali lebar saluran pencatunya agar beresonansi pada frekuensi yang sama. Material FR-4 sengaja dipilih sebagai parameter pembanding dasar (*baseline*) karena posisinya sebagai substrat konvensional standar yang umum digunakan dan memiliki nilai *loss tangent* (faktor disipasi) jauh lebih tinggi dibandingkan material khusus frekuensi tinggi.



Gambar 6. Grafik VSWR dan Return Loss Hasil Simulasi FR-4 Epoxy



Gambar 7. Grafik Impedansi dan Bentuk Pancaran FR-4 Epoxy

Hasil pengujian menyingkap terjadinya degradasi kinerja yang sangat fatal pada skenario FR-4. Meskipun secara teknis parameter *matching* pada frekuensi 20 GHz masih berada di dalam batas toleransi aman—dengan VSWR 1,68 dan *Return Loss* -11,82 dB—karakteristik pancaran radiasi antenna mengalami kelumpuhan. Nilai VSWR dan *Return Loss* yang berada pada nilai yang baik di frekuensi lain dapat menyebabkan Nilai *Gain* maksimal anjlok drastis menjadi hanya 4,535 dBi. Kemerosotan nyaris sebesar 12 dB dibandingkan substrat Rogers ini merupakan akibat langsung dari tingginya persentase nilai *loss tangent* (faktor disipasi) pada material FR-4, Perbandingan hasil simulasi ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Parameter Capaian Antena

Parameter	Nilai	
	Rogers RT5880	FR-4 Epoxy Glass
Frekuensi Kerja	20 GHz	20 GHz
VSWR	1,27	1.61
<i>Return Loss</i>	-18,56 dB	-12,55 dB
<i>Gain</i>	16,48 dBi	3.32 dBi
Impedansi	± 50 Ohm	± 50 Ohm

Perbandingan ini mendemonstrasikan secara kuantitatif bahwa aliran arus gelombang mikro yang dipaksa melintasi jalur distribusi *corporate feed* yang berjenjang panjang di atas

substrat berspesifikasi rendah akan terserap dan terdisipasi menjadi energi panas (*dielectric/ohmic loss*) sebelum sempat diradiasikan oleh elemen *patch*. Hal ini memvalidasi fakta bahwa material konvensional berbahan *epoxy glass* sama sekali tidak memenuhi kelayakan teknis untuk transmisi data satelit jarak jauh (*high-gain*).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil optimasi dan simulasi komputasi pada frekuensi presisi 20 GHz, penggunaan substrat khusus frekuensi tinggi Rogers RT5880 terbukti mampu memberikan performa yang sangat optimal, dengan capaian VSWR 1,27, *Return Loss* -18,56 dB, *Bandwidth* 258 MHz, dan peningkatan *Gain* yang masif hingga 16,48 dBi. Di sisi lain, hasil analisis komparatif secara tegas membuktikan bahwa substrat konvensional FR-4 Epoxy tidak memenuhi syarat kelayakan teknis untuk aplikasi ini. Tingginya nilai *loss tangent* pada material FR-4 menyebabkan sebagian besar energi pada jaringan pencatu terdisipasi menjadi panas, sehingga merontokkan nilai *Gain* secara fatal menjadi hanya 4,535 dBi. Secara keseluruhan, rancangan antenna berbasis Rogers RT5880 ini terbukti mampu memancarkan gelombang terarah untuk mengatasi redaman ruang bebas satelit. Adapun saran yang perlu dikembangkan pada penelitian selanjutnya yaitu melakukan fabrikasi fisik purwarupa (*prototype*) secara komparatif pada substrat Rogers RT5880 dan melakukan pengujian *S-parameter* langsung di laboratorium menggunakan instrumen *Vector Network Analyzer* (VNA). Penelitian selanjutnya dapat memperluas studi komparatif dengan menguji material substrat *aerospace-grade* atau *high-frequency* lainnya, seperti seri Rogers RO4003C, RT/duroid 6002, atau substrat berbasis *Teflon* lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- A. B. Obot, G. A. Igwe, and K. M. Udofia, "Design and Simulation of Rectangular Microstrip Patch Antenna for X-Band Application," *Umudike Journal of Engineering and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 1–8, 2019, doi: 10.33922/j.ujet_si1_10.
- A. H. Naqvi and S. Lim, "Review of recent phased arrays for millimeter-wave wireless communication," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 10, 2018, doi: 10.3390/s18103194.
- B. Taha and T. AlSharabati, "Performance Comparison between the FR4 Substrate and the Rogers Kappa-438 Substrate for Microstrip Patch Antennas," *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, vol. 9, no. 2, pp. 1–12, 2020.
- F. Rizqa, D. Arseno, and T. Yunita, "Analisis dan Desain Antena Mikrostrip untuk Komunikasi Satelit pada Frekuensi Ka-Band," *Aviation Electronics, Information Technology, Telecommunications, Electricals, and Controls (AVITEC)*, vol. 2, no. 1, p. 1, 2020, doi: 10.28989/avitec.v2i1.590.
- J. Li, F. Zhao, X. Wang, F. Cao, and X. Han, "The underground explosion point measurement method based on high-precision location of energy focus," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 165989–166002, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3015486.
- J. M. Zuru, S. S. Akanji, A. A. Akinlabi, and S. Umar, "Research In Engineering Management And Science (Ijprems) Simulation-Based Performance Comparison Of 5 . 8 Ghz Microstrip Patch Antennas On Rogers And Fr-4 Substrates," pp. 1272–1278, 2026.
- J. Monica, P. Jothilakshmi, J. Monica, and P. Jothilakshmi, "A Design of Bandwidth-Enhanced Conformal Antenna for Aircraft Applications," 2020, doi: 10.1080/03772063.2020.1829507.
- M. A. Saeed and A. O. Nwajana, "Design of a Rectangular Linear Microstrip Patch Antenna Array for 5G Communication," *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, no. July, pp. 25–27, 2024, doi: 10.1109/ARRAY58370.2024.10880409.
- P. Saraswati, M. Mardijah, and K. Kamiran, "Analisis dan Kontrol Optimal Sistem Gerak Satelit



- Menggunakan Prinsip Minimum Pontryagin," *Jurnal Sains dan Seni ITS*, vol. 6, no. 2, 2017, doi: 10.12962/j23373520.v6i2.23934.
- S. Sadasivam, V. Thulasi Bai, R. Yuvaraj, P.S. Rahul, M. Rushith Thomas. (2022). "Comparison of FR4 and Roger substrates in multiband two-slot rectangular patch antenna for 5G applications", *Volume 55, Part 2*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.600>.
- Sugiyono, *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R & Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif Dan R & D*. Bandung: Alfabeta. 2016.
- T. Bilen, H. Ahmadi, B. Canberk, and T. Q. Duong, "Aeronautical Networks for In-Flight Connectivity: A Tutorial of the State-of-the-Art and Survey of Research Challenges," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 20053–20079, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3151658.
- V. Preethi, P. Swamalatha, V. Rajpoot, R. V. V. Krishna and S. Kumar, "Design and Implementation of Circular Microstrip Patch Array Antenna for 5G Communication Using Rogers RT5880," *2023 International Conference on Advanced & Global Engineering Challenges (AGEC)*, Surampalem, Kakinada, India, 2023, pp. 32-37, doi: 10.1109/AGEC57922.2023.00018
- W. Hong, K. -H. Baek and S. Ko, "Millimeter-Wave 5G Antennas for Smartphones: Overview and Experimental Demonstration," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6250-6261, Dec. 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2740963