

TEKNOLOGI ANTENA MIKROSTRIP *MULTIPLE ARRAY* DENGAN SUBSTRAT KOMPOSIT LIMBAH SERAT RAMI-ALUMINA UNTUK MENUNJANG SISTEM FCC (*FLIGHT COMMUNICATION CONTROL*) PADA SISTEM PENERBANGAN PESAWAT

Oleh: Budi Basuki Subagio¹, Muhlasah Novitasari Mara², Irfan Mujahidin³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Semarang

Email: [1budib.subagio@polines.ac.id](mailto:budib.subagio@polines.ac.id), [2muhlasah@polines.ac.id](mailto:muhlasah@polines.ac.id), [3irfan.mujahidin@polines.ac.id](mailto:irfan.mujahidin@polines.ac.id)

Abstrak

Teknologi Microstrip saat ini pada umumnya menggunakan material substrat dari fiberglass – epoxy atau FR4, fiberglass – epoxy mempunyai kerapatan yang kurang sehingga akan menyebabkan pelemahan sedangkan substrat dengan material alumina mempunyai harga yang mahal, sulit diperoleh dan proses fabrikasi yang sulit sehingga biaya pembuatan mahal dan pemasangannya sulit. Substrat Limbah Serat Rami Komposit mempunyai karakter yang saling memperbaiki sifat elektrik, mekanik maupun kimia sehingga mempunyai kerapatan molekul yang sangat tinggi sehingga kebocoran dan pelemahan sangat kecil, fabrikasi relatif mudah, dan biaya pembuatan lebih murah. Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang suatu antena larik Microstrip Multiple Array menggunakan material substrat yang presisi dan mampu dioperasikan pada frekuensi gelombang mikro dan pada daerah yang kondisi cuacanya ekstrim. Prinsip dasar antena ini adalah resonansi sehingga dapat dikembangkan untuk mengakomodir Untuk FCC (Flight Communication Control) Pada Sistem Penerbangan Pesawat. Pada penelitian ini akan dirancang antena Microstrip Multiple Array bentuk directional menggunakan substrat Substrat Limbah Serat Rami Komposit yang merupakan pengembangan dari antena mikrostrip hasil penelitian sebelumnya.

Kata kunci : Antena, Microstrip, Komposite , CST, Flight Communication Control, CST, Flight Communication Control.

Abstract

Current Microstrip technology generally uses fiberglass-epoxy or FR4 substrate materials, fiberglass-epoxy has a low density so that it will cause weakening while substrates with alumina materials are expensive, difficult to obtain and difficult to fabricate so that manufacturing costs are expensive and installation is difficult. Substrate Waste Fiber Composite has a character that mutually improves electrical, mechanical and chemical properties so that it has a very high molecular density so that leakage and weakening are very small, fabrication is relatively easy, and manufacturing costs are cheaper. The purpose of this study is to design a Microstrip Multiple Array antenna using a precise substrate material and can be operated at microwave frequencies and in areas with extreme weather conditions. The basic principle of this antenna is resonance so that it can be developed to accommodate FCC (Flight Communication Control) in the Aircraft Flight System. In this study, a directional Microstrip Multiple Array antenna will be designed using a Composite Fiber Waste Substrate substrate which is a development of the microstrip antenna from previous research.

Kata kunci : Antenna, Microstrip, Composite, CST, Flight Communication Control. CST, Flight Communication Control.

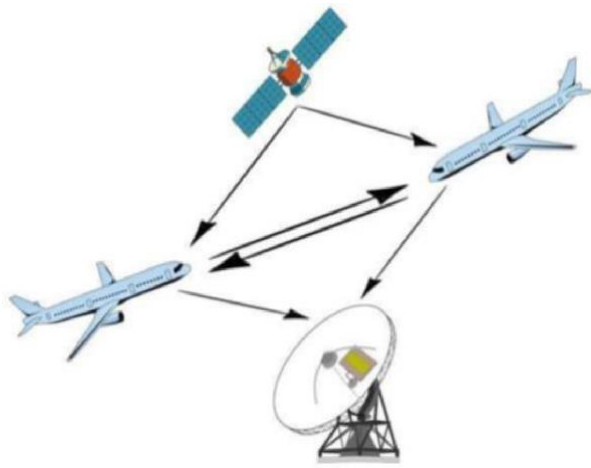
1. Pendahuluan

Dalam industri penerbangan modern, komunikasi antara pesawat dan pangkalan darat merupakan elemen kunci dalam menjaga keselamatan dan efisiensi penerbangan. Sistem komunikasi penerbangan saat ini mengandalkan teknologi antena yang handal untuk mentransfer data secara efektif antara pesawat dan pengendali lalu lintas udara. Kebutuhan akan kinerja yang lebih tinggi, keterandalan yang lebih

besar, serta peningkatan efisiensi spektrum radio mendorong perkembangan terus-menerus. dalam teknologi antena (Mujahidin & Arinda, 2019).

Bagaimana menentukan material yang mudah didapat untuk merancang dan membuat substrat dielektrik yang handal agar dapat digunakan untuk membuat antena dengan teknologi microstrip untuk aplikasi FCC (Flight Communication Control) menjadi

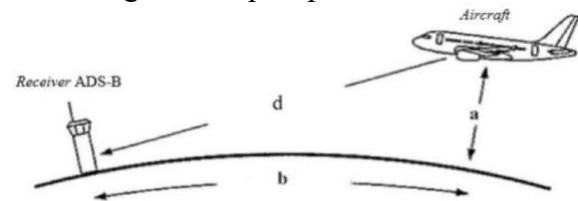
suatu permasalahan tersendiri. FCC merupakan sistem pengawasan udara yang digunakan untuk mengetahui posisi pesawat, kode pesawat, ketinggian, dan data lainnya. ADS-B secara periodic memancarkan informasi dan data - data lain ke pesawat lain, ke satelit, dan ke stasiun bumi. Sistem ADS-B terletak pada pesawat terbang yang beroperasi menggunakan satelit. FCC memiliki 2 jenis, yaitu FCC in dan FCC out. Kedua sistem tersebut memiliki fungsi yang berbeda. FCC in berfungsi untuk menerima informasi antar pesawat dan mengirimkan informasi ke ground station atau ATC (Air Traffic Control) di bandar udara. FCC out berfungsi untuk memberikan informasi rute, kedatangan setiap pesawat, dan memberikan informasi identitas pesawat, ketinggian, kecepatan, dan posisi pesawat.



Gambar 1. Sistem FCC

Gambar 1 menjelaskan tentang cara kerja system FCC. Antena pemancar FCC terletak di pesawat dengan menggunakan sistem navigasi onboard untuk memperoleh informasi. Setiap 1 detik, pesawat menyiarkan posisi, ketinggian, dan data lain ke pesawat terdekat yang sudah dilengkapi teknologi FCC dan ke stasiun bumi, bandar udara. Antena di satelit berguna untuk mencari pesawat serta mengetahui posisi pesawat. Setelah posisi pesawat sudah didapatkan, lalu transponder memberikan sinyal informasi kepada stasiun bumi. Setelah data diterima oleh stasiun bumi, data diolah dan disiarkan. Pada Peraturan Direktur Jendral Perhubungan Udara nomor KP 103 Tahun 2015 tentang

Standar Teknis Fasilitas Telekomunikasi Penerbangan, terdapat spesifikasi teknis FCC.



Gambar 2. Ilustrasi posisi receiver FCC terhadap aircraft

Pada penelitian ini akan dikaji secara menyeluruh bahan Substrat komposit Limbah Serat Rami sebagai bahan alternatif ramah lingkungan dan low cost untuk pembuatan antena FCC microstrip.

Teknologi antena mikrostrip serat rami-multiple array muncul sebagai inovasi yang menjanjikan untuk meningkatkan kinerja komunikasi dalam sistem penerbangan pesawat (Adhitya et al., 2019; Nissanov et al., 2021). Teknologi ini menggabungkan keunggulan dari antena mikrostrip, yang ringan, kompak, dan dapat diintegrasikan dengan mudah ke dalam struktur pesawat, dengan potensi peningkatan kinerja yang ditawarkan oleh multiple array.

Dalam penerapannya, teknologi ini diintegrasikan ke dalam desain pesawat dengan mudah. Setelah melalui serangkaian uji coba dan validasi yang ketat, teknologi ini siap untuk diterapkan secara luas dalam industri penerbangan. Dengan demikian, penggunaan teknologi antena mikrostrip Substrat Limbah Serat Rami-multiple array membawa manfaat nyata dalam meningkatkan kinerja, mengurangi berat, dan memperkuat ketangguhan pesawat, sambil memastikan keselamatan dan kepatuhan terhadap regulasi penerbangan yang ketat.

2. Tinjauan Pustaka

Banyak penelitian dilakukan untuk memperoleh substrat yang handal sebagai bahan antena mikrostrip. Anzar Khan dan Rajesh Nema (2012) telah melakukan penelitian perbandingan 5 substrat yakni

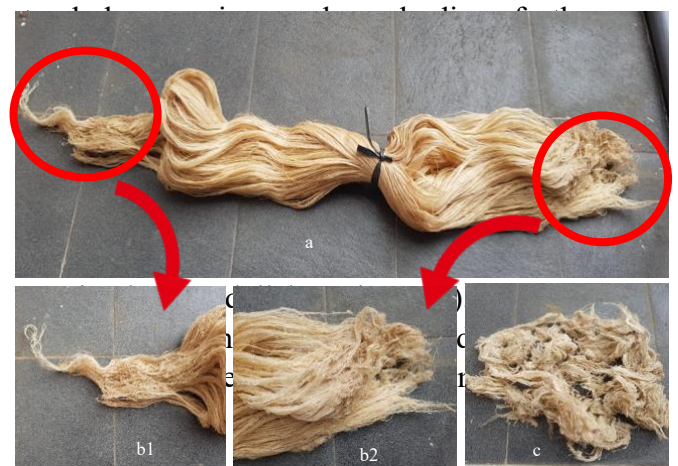
Bakelite, FR4 Glass epoxy, RO4003, Taconic TLC dan RT Duroid untuk antenna microstrip pada X band (Arum & Nisa Ismulia, 2022). Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa RT Duroid memberikan hasil terbaik dengan tingkat efisiensi antenna sebesar 80% dan penambahan bandwidth sebesar 15% sedangkan efisiensi antenna FR4 hanya sebesar 50% dengan penambahan bandwidth 10,12%.

BB Subagio (2019) telah membimbing tugas akhir mahasiswa D4 Teknik Telekomunikasi Polines atas nama Gayuh Pangestu Putri untuk menggunakan Rami Alumina Composite Sebagai penyerap gelombang RADAR pada Stealth Technology. Hasil pengujian pada rentang frekuensi 2 sampai 12 GHz menggunakan S-Parameter (S11) di LIPI menunjukkan bahwa Rami Alumina composite dengan ketebalan 5mm paling efektif untuk digunakan sebagai RADAR Absorber Material (RAM). Penyerapan optimum Rami Alumina Composite dengan ketebalan 5mm pada frekuensi S-Band sebesar -15,158 dB, C-Band sebesar -16,398 dB dan X-Band sebesar -23,135 dB. Sedangkan nilai reflection loss yang tertinggi dan optimum Rami Alumina Composite terdapat pada frekuensi X-Band yaitu sebesar -23,135 dB dengan Lebar pita penyerapan 1000 MHz dan memiliki persentase penyerapan sebanyak 93,1 %. Sehingga Komposit-Rami sangat efektif digunakan sebagai RAM pada frekuensi X-Band.

Penggunaan multiple array pada antena mikrostrip membawa temuan signifikan dalam meningkatkan kinerja komunikasi. Dengan menyusun serangkaian elemen antena dalam konfigurasi yang terkoordinasi, peneliti berhasil meningkatkan jangkauan, kecepatan transfer data, dan keandalan sinyal komunikasi antara pesawat dan pangkalan darat (Mujahidin & Kitagawa, 2023; Tripathi & Sandha, 2022). Hal ini memberikan harapan baru untuk meningkatkan efisiensi sistem komunikasi penerbangan secara keseluruhan. Serat rami sendiri menawarkan

kekuatan yang tinggi, ringan, dan tahan terhadap lingkungan yang keras, yang menjadikannya pilihan yang ideal untuk aplikasi penerbangan (Abbas et al., 2022; Kawdungta et al., 2021). Selain itu, multiple array memungkinkan untuk meningkatkan gain, mengurangi interferensi, dan meningkatkan kinerja overall dari sistem komunikasi tersebut (Ahmed et al., 2021).

Rami (*Boehmeria Nivea*) termasuk dalam salah satu prioritas riset nasional. Tanaman rami cukup mudah tumbuh dan dapat dipanen pada usia 55 hari (dua bulan). Bagian dari



Gambar 3. a. Serat Rami Ina Grass, b1,2. Bagian Kusut Serat Rami Ina Grass c. Potongan Bagian Kusut Serat Rami Ina Grass Adalah Limbah Serat Rami

Substrat Limbah Serat Rami jumlahnya mencapai 10% dari panjang serat rami in grass. Sebagai gambaran, CV Rebersa Wonosobo memproduksi rata-rata 9,95 ton serat rami/Ha dengan luas lahan yang dimiliki 2,2225 Ha (Ben Hamou et al., 2023). Rami sendiri dapat dipanen 5-6 kali setahun (Ferrández-Pastor et al., 2022). Tidak heran bila Substrat Limbah Serat Rami di CV

Rebersa mencapai sekitar 7 ton per tahun. Sayangnya Substrat Limbah Serat Rami belum dimanfaatkan agar memiliki nilai ekonomis tinggi seperti halnya serat rami.

Keunggulan teknologi pada penelitian ini terletak pada potensi peningkatan kinerja komunikasi. Antena Microstrip mempunyai keakuratan dan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan antenna konvensional, dengan menerapkan multiple array, antena mikrostrip Substrat Limbah Serat Rami dapat meningkatkan keandalan, diantaranya jangkauan, kecepatan transfer data, dan keandalan sinyal, yang merupakan faktor kunci dalam keselamatan dan efisiensi penerbangan. Selain itu, penelitian ini juga penting dalam konteks efisiensi spektrum radio (Mujahidin, 2020; Peter et al., 2014). Dengan memanfaatkan multiple array, teknologi ini dapat membantu meningkatkan efisiensi spektrum radio, memastikan bahwa lebih banyak data dapat ditransfer dengan menggunakan bandwidth yang sama atau lebih sedikit, sesuai dengan persyaratan FCC dan regulasi penerbangan lainnya.

Dengan demikian, penelitian tentang teknologi antena mikrostrip Substrat Komposit Limbah Serat Rami-Alumina multiple array untuk FCC dalam sistem penerbangan pesawat bukan hanya relevan, tetapi juga mendesak. Implementasi teknologi ini tidak hanya akan meningkatkan efisiensi dan kinerja komunikasi dalam industri penerbangan, tetapi juga memastikan kesesuaian dengan standar keselamatan yang ketat yang ditetapkan oleh otoritas penerbangan.

3. Metode Penelitian Perancangan Antena

Perancangan antenna dimulai dengan perhitungan panjang antenna untuk menyesuaikan panjang gelombang sinyal yang akan diterima atau dipancarkan. Panjang antenna ditentukan dengan mengetahui konstanta dielektrik substrat dan frekuensi resonansi antenna (Balanis, 1982). Pada saat

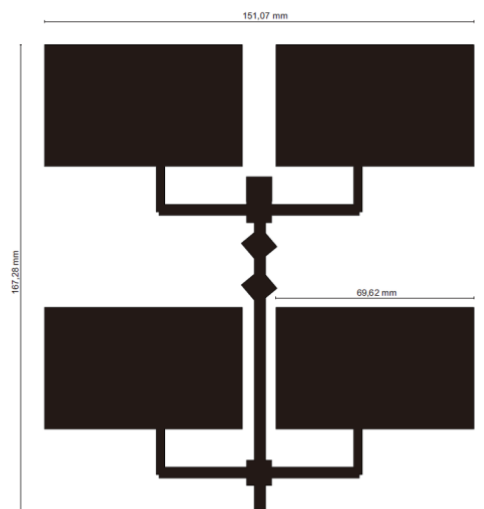
perancangan antenna ini frekuensi referensi yang digunakan untuk menentukan panjang antenna adalah frekuensi 1,090 GHz.

Langkah selanjutnya adalah menentukan bentuk antenna microstrip. Pada penelitian ini bentuk antenna mikrostrip ditentukan menggunakan antenna yang sebelumnya merupakan antenna standar (single antenna) sebagai antenna group, terlebih dahulu menyesuaikan parameter antenna yang ada.

Penyesuaian Impedansi

Dengan mencocokkan impedansi antenna dengan impedansi karakteristik saluran transmisi, koefisien pantulan menjadi sekecil mungkin untuk mencapai transmisi daya maksimum. Penyesuaian impedansi dengan mengatur jarak antara ujung elemen balok.

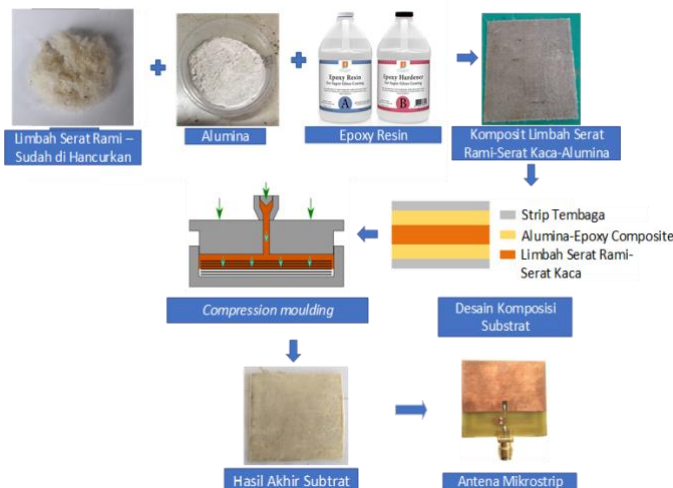
Antena dirancang memiliki gain yang cukup untuk dapat mengirimkan sinyal yang terhubung ke dua segmen jaringan yang berjauhan. Antena dirancang untuk frekuensi operasi 1,090 GHz, sesuai dengan frekuensi operasi stasiun pangkalan. Untuk menghasilkan penguatan dan kekuatan sinyal, pada penelitian ini dibuat antenna directional multiple array. Hasil desain sesuai dengan Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Desain antenna mikrostrip dengan bentuk Array

Fabrikasi Antena

Pada tahap ini dilakukan fabrikasi antenna berdasarkan hasil perancangan yang telah dilakukan fabrikasi. Semua perhitungan disesuaikan terhadap hasil perancangan agar diperoleh variabel parameter-parameter antenna pada frekuensi kerja 1,090 GHz. Bahan komposit terdiri dari limbah serat rami, alumina dan epoxy resin. Proses fabrikasi dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Proses fabrikasi antenna microstrip multiple array limbah serat rami alumina

Pengujian Antena

Pengujian antenna mikrostrip dilakukan untuk mengetahui kinerja antenna yang telah dibuat dan mengetahui parameter-parameter yang terdapat pada antenna. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini meliputi Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), return loss, Pola radiasi, polarisasi, gain, pengujian impedansi antenna dan pengujian koefisien pantul. Pengujian dilakukan pada frekuensi 1,090 GHz. Pengujian dilakukan di Laboratorium Telekomunikasi Politeknik Negeri Semarang dan pada sistem FCC (Flight Communication Control) Pada Sistem Penerbangan Pesawat.

Pengujian VSWR pada penelitian ini menggunakan VNA. *VSWR* merupakan perbandingan antara amplitudo gelombang berdiri (*standing wave*) maksimum ($|V|_{max}$) dengan minimum ($|V|_{min}$). Pada saluran transmisi ada dua komponen gelombang

tegangan, yaitu tegangan yang dikirimkan (V_0^+) dan tegangan yang dipantulkan (V_0^-).

Return loss mengindikasikan hilangnya suatu daya yang ditransmisikan dan mengetahui besar receiver menerima daya yang ditransmisikan. Return loss memiliki nilai yang baik sebesar ≤ -10 dB. Semakin kecil nilai return loss maka performa antenna semakin baik kualitasnya. Ada beberapa hal yang mempengaruhi nilai return loss, antara lain nilai impedansi saluran dengan impedansi tidak sama. Pada pengujian ini menggunakan rentang frekuensi 590 MHz sampai dengan 1,59 GHz. Impedansi antenna diukur menggunakan VSWR dengan penganalisa impedansi, dimana faktor pantulan antenna juga diketahui.

Pengujian pola radiasi dilakukan dengan antenna referensi tetap, tetapi antenna uji diputar 360° . Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui pola performansi coverage antenna dari masing-masing sudut azimuth pada bidang horizontal dan sudut elevasi vertikal. Olehkarenanya, pada proses ini dibutuhkan bantuan busur untuk mengukur pergeseran antenna dan untuk mengamati perubahan daya pada tiap sudut. Pengujian pola radiasi dilakukan dengan menggunakan spectrum analyzer dan RF Generator.

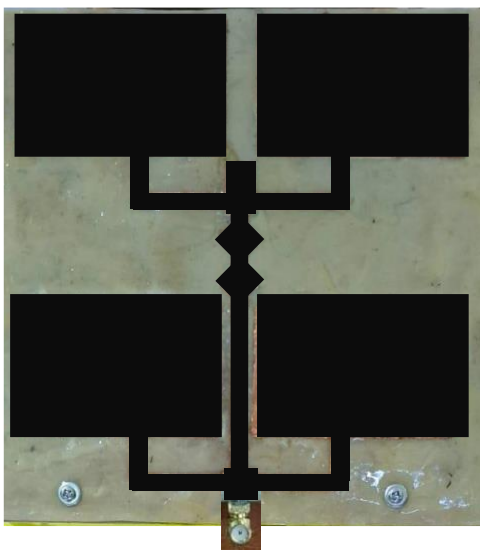
Pengujian polarisasi bertujuan untuk menentukan vektor medan listrik antenna. Untuk mengetahui bentuk polarisasi tersebut diperlukan antenna pengukur sebagai pemancar. Pada saat yang sama, antenna dipol $1/2\lambda$ digunakan untuk deteksi polarisasi. Sifat polarisasi dapat dilihat dengan membandingkan nilai komponen orthogonal.

Gain merupakan karakter antenna terkait dengan kemampuan antenna mengarahkan radiasi sinyalnya, atau penerimaan sinyal dari arah tertentu. Gain antenna dapat diperoleh dengan mengukur power pada main lobe dan membandingkan powernya dengan power pada antenna referensi dengan menggunakan spectrum analyzer. Pengujian gain antenna yang dilakukan dengan membandingkan

antena yang penguatannya tidak diketahui dengan antenna standar yang penguatannya diketahui. Antena dipol $1/2 \lambda$ digunakan sebagai antenna standar. Pada pengujian ini, daya yang diterima antenna referensi PR = -96,8 dBm dan daya yang diterima antenna uji PU = -85,8 dBm.

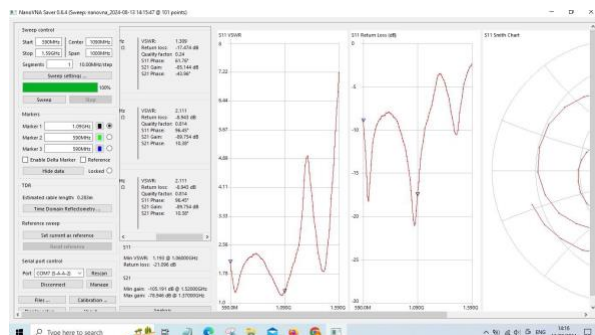
4. Hasil

Hasil fabrikasi antenna mikrostrip multiple array menggunakan substrat dielektrik komposit serat rami – alumina dapat dilihat pada Gambar 6



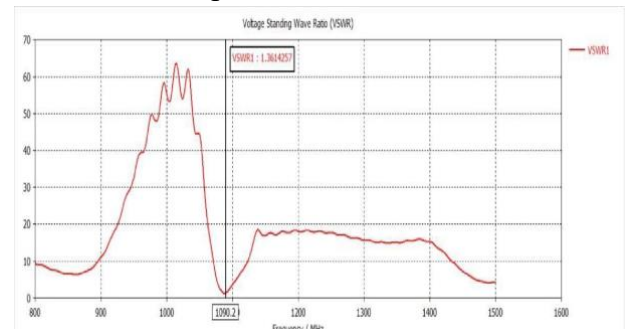
Gambar 6. Antena mikrostrip multiple array menggunakan substrat dielektrik komposit serat rami – alumina

Hasil pengujian Return Loss dapat dilihat pada Gambar 7. Dari hasil uji tersebut diperoleh return loss terendah sebesar -17,474 dB pada frekuensi 1,090 GHz.



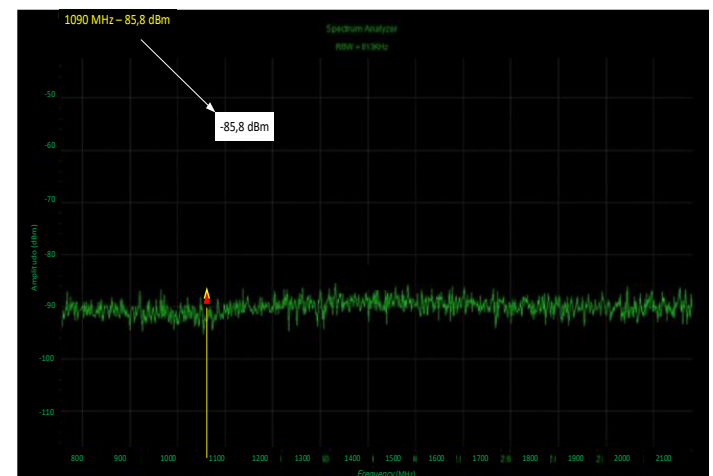
Gambar 7. Return Loss Antena

Gambar 8 menunjukkan hasil pengujian VSWR terbaik pada frekuensi 1,090 GHz. Hal ini menginterpretasikan bahwa antenna mikrostrip multiple array limbah serat rami – alumina match pada frekuensi 1,090 GHz.

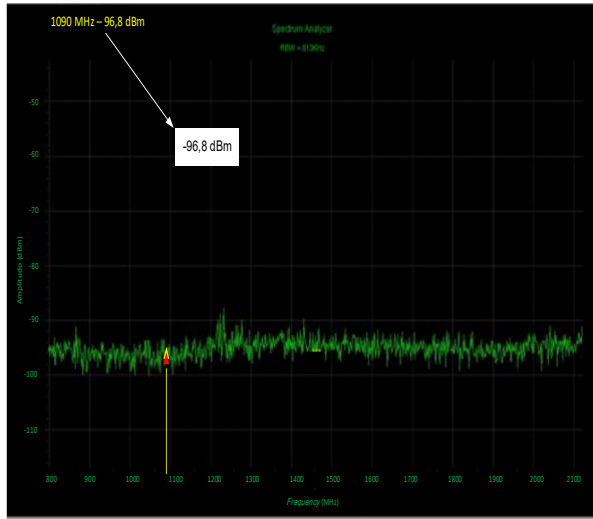


Gambar 8. Grafik Hasil Pengujian VSWR

Gain diukur berdasarkan hasil pengujian VSWR dengan hasil yang baik dan pada frekuensi yang optimal yaitu pada frekuensi 1090 MHz. Pada Gambar 9 menunjukkan hasil pengujian daya terima antenna uji dan Gambar 10 hasil pengujian daya terima antenna referensi.



Gambar 9. Daya yang diterima Antena Uji

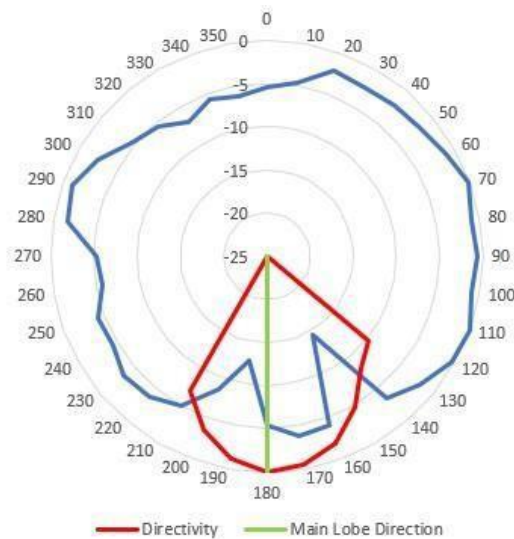


Gambar 10. Daya yang diterima Antena Referensi

Seperti yang sudah diuraikan sebelumnya pada bagian metode pengujian, pada pengujian ini daya yang diterima antena referensi $P_R = -96,8$ dBm dan daya yang diterima antena uji $P_U = -85,8$ dBm. Dari data tersebut diperoleh nilai *gain* antena microstrip limbah serat rami 1,090 GHz yaitu

$$G \text{ (dB)} = 2 + P_U \text{ (dBm)} - P_R \text{ (dBm)} = 13 \text{ dB} \quad (1)$$

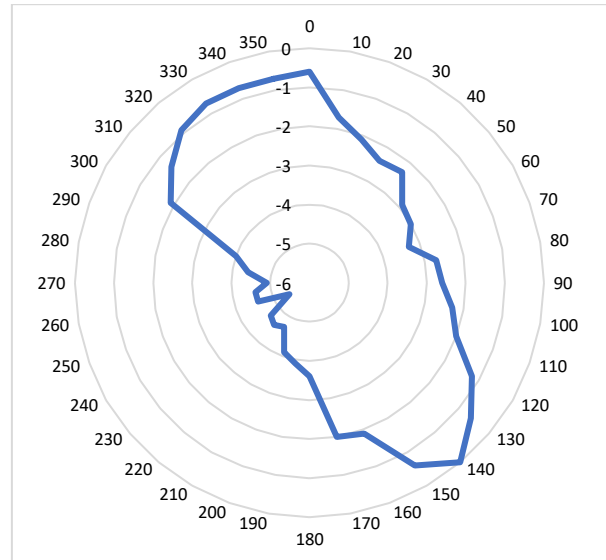
Nilai (1) sudah memenuhi nilai *gain* yang dikehendaki yaitu > 5 dB.



Gambar 11. Pola Radiasi Antena

Hasil pola radiasi horizontal dapat dilihat pada Gambar 11. Dapat dilihat bahwa antena memiliki karakteristik *directional*. Arah utama pancaran sinyal berada pada sudut 180° . Selain lobus utama, terdapat beberapa

lobus samping yang menunjukkan adanya radiasi sinyal ke arah lain selain arah utama. Meskipun demikian, kekuatan lobus samping relatif lebih kecil dibandingkan dengan lobus utama. Pola radiasi ini menunjukkan bahwa antena cocok untuk aplikasi FCC.



Gambar 6. Polarisasi Antena

Hasil pengujian polarisasi antenna microstrip multi array limbah serat rami alumina dapat dilihat pada Gambar 12. Terlihat bahwa polarisasi antenna microstrip multi array limbah serat rami alumina memiliki polarisasi elips ketika diputar 360° terhadap sumbu X (axial) terhadap antena referensi. Berdasarkan gambar 4.5 hasil pengukuran menunjukkan level penerima sinyal maximum berada pada sudut 0° dengan nilai $-81,2$ dBm, sedangkan level penerima sinyal minimum berada pada sudut 140° dengan nilai $-86,6$ dBm.

5. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan antena mikrostrip multiple array dengan memanfaatkan limbah serat rami-alumina sebagai substrat dielektrik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa antena yang dihasilkan memiliki performa yang baik pada frekuensi 1,090 GHz.

1. Nilai return loss yang sangat rendah ($-17,474$ dB) pada frekuensi 1,090 GHz mengindikasikan pencocokan impedansi yang sangat baik antara antena dan saluran

transmisi. Hal ini meminimalkan pemantulan sinyal dan meningkatkan efisiensi transmisi data.

2. Nilai VSWR yang optimal juga diperoleh pada frekuensi 1,090 GHz, yang menunjukkan bahwa antenna tersebut tersesuaian dengan baik pada frekuensi tersebut, dan matching antara antenna dan saluran transmisi sesuai.
3. Nilai gain sebesar 13 dB, melebihi nilai ambang yang ditetapkan yaitu 5 dB. Hal ini menunjukkan kemampuan antenna dalam mencapai jangkauan komunikasi yang lebih luas.
4. Pola radiasi horizontal yang dihasilkan sesuai dengan desain antenna, menunjukkan distribusi daya sinyal yang terarah dan efisien.
5. Antena mikrostrip multiple array limbah serat rami-alumina memiliki polarisasi elips yang konsisten saat diputar 360° pada sumbu axial. Nilai sinyal maksimum berada pada sudut 0° dengan level -81,2 dBm, sedangkan sinyal minimum berada pada sudut 140° dengan level -86,6 dBm.

Daftar Pustaka

- Abbas, N., Basir, A., Iqbal, A., Yousaf, M., Akram, A., & Yoo, H. (2022). Ultra-Miniaturized Antenna for Deeply Implanted Biomedical Devices. *IEEE Access*, 10. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3176720>
- Abdel-Malek, M. A., Akkaya, K., Bhuyan, A., & Ibrahim, A. S. (2022). A Proxy Signature-Based Swarm Drone Authentication With Leader Selection in 5G Networks. *IEEE Access*, 10. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3178121>
- Adhitya, G., Abishek, V., Sundaram, R. M., & Jothilakshmi, P. (2019). Design of Microstrip Antenna for X Band Satellite Communications. *International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR)*, 6(2).
- Ahmed, A. M., Thanthrige, U. S. K. P. M., Gamal, A. E., & Sezgin, A. (2021). Deep Learning for DOA Estimation in MIMO Radar Systems via Emulation of Large Antenna Arrays. *IEEE Communications Letters*, 25(5). <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3053114>
- Al-Janabi, F., Singh, M. J., & Pharwaha, A. P. S. (2021). Development of microstrip antenna for satellite application at Ku/Ka band. *Journal of Communications*, 16(4). <https://doi.org/10.12720/jcm.16.4.118-125>
- Arum, W. F., & Nisa Ismulia, K. (2022). Analysis Of The Composite Properties Of Ramp/Lycal Fiber Variation Of Layer 1, 2, And 3 Fiber On Structural Materials Of Lsu Aircraft. *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, 8(2). <https://doi.org/10.56521/teknika.v8i2.684>
- Asadallah, F. A., Eid, A., Shehadeh, G., Costantine, J., Tawk, Y., & Tentzeris, E. M. (2021). Digital Reconfiguration of a Single Arm 3-D Bowtie Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69(7). <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3044703>
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design*, Fourth Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Balanis, C. E. (2005). *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd Edition—Constantine A. Balanis. Book. <https://doi.org/10.1049/ep.1982.0113>
- Ben Hamou, K., Kaddami, H., Elisabete, F., & Erchiqui, F. (2023). Synergistic association of wood /hemp fibers reinforcements on mechanical, physical and thermal properties of polypropylene-based hybrid composites. *Industrial Crops and Products*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116052>
- Chiang, Y. C., & Chen, C. Y. (2001). Design of a wide-band lumped-element 3-dB quadrature coupler. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. <https://doi.org/10.1109/22.910551>
- Elbir, A. M., & Mishra, K. V. (2020). Joint antenna selection and hybrid beamformer design using unquantized and quantized deep learning networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2956146>
- Ferrández-Pastor, F. J., Mora-Pascual, J., & Díaz-Lajara, D. (2022). Agricultural traceability model based on IoT and Blockchain: Application in industrial hemp production. *Journal of Industrial Information Integration*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100381>
- Gao, Z., Xu, C., Tian, X., Wang, J., Tian, C., Yang, B., Qu, S., & Fan, Q. (2021). Ultra-wideband flexible transparent metamaterial with wide-angle microwave absorption and

- low infrared emissivity. *Optics Express*, 29(14). <https://doi.org/10.1364/oe.428184>
- Ikram, M., Sultan, K. S., Abbosh, A. M., & Nguyen-Trong, N. (2022). Sub-6 GHz and mm-Wave 5G Vehicle-to-Everything (5G-V2X) MIMO Antenna Array. *IEEE Access*, 10. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172931>
- Kawdungta, R., Kawdungta, S., Torrungrueng, D., & Phongcharoenpanich, C. (2021). Switched Beam Multi-Element Circular Array Antenna Schemes for 2D Single-Anchor Indoor Positioning Applications. *IEEE Access*, 9. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3072951>
- Lasmono, J., Sari, A. P., Kuncoro, E., & Mujahidin, I. (2019). Optimasi Kerja Peluncur Roket Pada Robot Roda Rantai Untuk Menentukan Ketepatan Sudut Tembak. *JASIEK (Jurnal Aplikasi Sains, Informasi, Elektronika Dan Komputer)*. <https://doi.org/10.26905/jasiek.v1i1.3149>
- Mujahidin, I. (2020). A Compact 5.8 GHz CPW Double Square Edge Antenna With BPF Stepped Impedance Resonator. *PROTEK : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*. <https://doi.org/10.33387/protk.v7i2.2026>
- Mujahidin, I., & Arifuddin, R. (2020). Double Output 2.4 GHz Square Frame Antenna for Doppler Wireless Sensor. *JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science)*. <https://doi.org/10.26905/jeemecs.v3i2.4299>
- Mujahidin, I., & Arinda, P. S. (2019). Antena Compact Double Square Marge 2, 6GHz Dengan Output Perbedaan Fase 90 Derajat Untuk Aplikasi LTE. *JEECAE (Journal of Electrical, Electronics, Control, and Automotive Engineering)*, 4(2), 273–278.
- Mujahidin, I., & Kitagawa, A. (2023). Ring slot CP antenna for the hybrid electromagnetic solar energy harvesting and IoT application. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 21(2), 290–301. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v21i2.24739>
- Mujahidin, I., Prasetya, D. A., Setywan, A. B., & Arinda, P. S. (2019). Circular Polarization 5.5 GHz Double Square Margin Antenna in the Metal Framed Smartphone for SIW Wireless Sensor. *Proceedings - 2019 International Seminar on Intelligent Technology and Its Application, ISITIA* 2019. <https://doi.org/10.1109/ISITIA.2019.8937257>
- Myagmardulam, B., Miura, R., Ono, F., Kagawa, T., Shan, L., Nakayama, T., Kojima, F., & Choihil, B. (2021). Performance evaluation of lora 920 mhz frequency band in a hilly forested area. *Electronics (Switzerland)*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/electronics10040502>
- Nissanov, U., Singh, G., & Kumar, N. (2021). High gain microstrip array antenna with SIW and FSS for beyond 5 G at THz band. *Optik*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166568>
- Peter, T., Rahman, T. A., Cheung, S. W., Nilavalan, R., Abutarboush, H. F., & Vilches, A. (2014). A novel transparent UWB antenna for photovoltaic solar panel integration and RF energy harvesting. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(4). <https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2298044>
- Tripathi, A., & Sandha, K. S. (2022). Impact of Thickness and wt% on the Dielectric Properties of Sugarcane Bagasse and MWCNT Composite Material as Microwave Absorber. *Waste and Biomass Valorization*. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01977-6>