

Perancangan Non-Deployable Antena UHF/LoRa untuk Nano Satelit Jenis CubeSat

1st Eldorado Valentino Sitompul
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia

eldoradovaletino@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Rozita Afina
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia

rozitaafiina@student.telkomuniversity.ac.id

3rd Muhammad Wildan Hafizh
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia

mwildanhfzh@student.telkomuniversity.ac.id

4th Heroe Wijanto
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
heroew@telkomuniversity.ac.id

5th Edwar
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
edwarm@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Perkembangan teknologi satelit mini seperti CubeSat semakin pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan sistem komunikasi ruang angkasa yang ringkas dan efisien, di mana antena merupakan salah satu komponen utama yang menentukan kualitas komunikasi. Antena deployable memang umum digunakan, namun memiliki risiko kegagalan akibat mekanisme buka lipat yang kompleks, sehingga penelitian ini difokuskan pada pengembangan antena non-deployable yang lebih sederhana dan andal meskipun memiliki tantangan dalam menjaga performa radiasi dengan dimensi terbatas. Tujuan penelitian ini adalah merancang dan mengimplementasikan antena non-deployable berbasis PCB untuk CubeSat berukuran 1U pada frekuensi UHF orbit rendah (LEO). Metode yang digunakan meliputi perancangan dengan perangkat lunak simulasi elektromagnetik, fabrikasi menggunakan substrat FR-4, serta pengujian parameter antena yang mencakup VSWR, return loss, bandwidth, polarisasi, pola radiasi, dan gain. Hasil penelitian menunjukkan bahwa antena yang dirancang memiliki nilai VSWR sebesar 1,33 dan return loss $-16,83$ dB, yang menandakan pencocokan impedansi serta efisiensi transfer daya yang baik, dengan polarisasi sirkular dan pola radiasi omnidireksional sesuai kebutuhan komunikasi CubeSat. Namun demikian, bandwidth hanya mencapai ± 40 MHz dan gain $-20,754$ dB, sehingga performa radiasi masih terbatas. Secara keseluruhan, antena non-deployable ini mampu memenuhi sebagian besar parameter penting, meskipun aspek bandwidth dan gain perlu dioptimalkan agar komunikasi CubeSat lebih efektif.

Kata kunci— Antena Non-Deployable, CubeSat, UHF, Komunikasi Satelit, PCB

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi nano-satelit, khususnya CubeSat, telah merevolusi pendekatan konvensional terhadap peluncuran dan pengoperasian satelit. Dengan ukuran kecil dan bobot ringan yang berkisar antara 1–10 kg, CubeSat

umumnya dibuat dalam satuan U ($1U = 10 \times 10 \times 10$ cm) dan dirancang agar ekonomis dalam biaya produksi, integrasi, maupun peluncuran [1] - [3]. Inovasi ini membuka akses lebih luas terhadap pemanfaatan teknologi satelit di bidang akademik, militer, maupun industri sipil. Namun demikian, keberhasilan misi CubeSat sangat ditentukan oleh efektivitas subsistem komunikasinya, di mana antena berperan penting sebagai media transmisi dan penerimaan sinyal antara satelit dengan stasiun bumi. Desain antena untuk CubeSat harus mempertimbangkan keterbatasan ukuran, bobot, efisiensi radiasi, serta keandalan tanpa mengganggu integrasi sistem lain.

Pada umumnya, CubeSat menggunakan antena deployable karena mampu mencapai panjang resonansi tanpa melanggar batas dimensi satelit. Akan tetapi, antena deployable membutuhkan mekanisme mekanis tambahan seperti motor, pegas, atau thermal knife, yang menambah kompleksitas serta risiko kegagalan, termasuk potensi antena gagal membuka di orbit dan menyebabkan hilangnya komunikasi total. Beberapa solusi komersial seperti sistem antena deployable ISISPACE menawarkan kinerja yang andal, namun tetap menghadapi keterbatasan pada panjang antena, daya RF maksimum, dan ketergantungan pada mekanisme pemanas [4]. Alternatif lain, yaitu antena mikrostrip, memiliki keunggulan integrasi langsung pada badan CubeSat, tetapi menghadapi tantangan dalam mencapai resonansi frekuensi rendah karena keterbatasan dimensi [5].

Dengan berbagai keterbatasan tersebut, solusi antena non-deployable muncul sebagai pilihan yang lebih sederhana dan andal. Antena ini dapat diintegrasikan langsung pada body atau PCB CubeSat tanpa memerlukan mekanisme tambahan, sehingga meningkatkan keandalan sistem. Meski demikian, tantangan utama pada desain antena non-deployable adalah pencapaian performa optimal pada frekuensi rendah seperti UHF, termasuk parameter gain, return loss, VSWR, polarisasi, dan pola radiasi, di bawah keterbatasan dimensi CubeSat 1U.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang antena non-deployable berbasis antena chip keramik UHF yang dapat bekerja pada frekuensi

437 MHz untuk aplikasi CubeSat 1U. Desain ini diarahkan agar mendukung polarisasi sirkular dengan pola radiasi omnidireksional, melalui tahapan simulasi elektromagnetik, pengujian menggunakan peralatan seperti Vector Network Analyzer dan spectrum analyzer, hingga menghasilkan desain akhir yang dapat mendukung kebutuhan komunikasi CubeSat secara efektif.

A. KAJIAN TEORI

A. CubeSat dan Sistem Komunikasinya

CubeSat adalah nanosatelit berbentuk kubus dengan dimensi standar 1U (10x10x10 cm) yang dikembangkan oleh Cal Poly tahun 1999 melalui *CubeSat Design Specification* [6]. Standar modular memungkinkan format 1U, 2U, 3U, 6U hingga 21U dengan massa 1–10 kg bergantung konfigurasi [7] - [9]. Hingga kini lebih dari 2.000 CubeSat telah diluncurkan, dengan tingkat keberhasilan operator komersial sekitar 77% dan akademik 45%, rata-rata agregat 67–75%. Misi CubeSat beragam: pengamatan bumi (EO) seperti konstelasi Doves (Planet Labs) yang memerlukan downlink berkapasitas tinggi; komunikasi dan radio amatir pada pita UHF (435–438 MHz) dan VHF untuk telemetri dan telekomando dengan polarisasi sirkular; sains atmosfer melalui misi QB50 di ketinggian 320–380 km yang memerlukan link stabil; demonstrasi teknologi (Tech Demo) seperti PhoneSat yang menggunakan perangkat COTS; serta misi navigasi, scientific relay, dan IoT Satelit yang menggunakan UHF atau S-Band berdaya rendah dengan antenna omnidireksional. Kebutuhan antenna dalam misi CubeSat mencakup dimensi kompak, impedance matching baik, bandwidth cukup untuk mengantisipasi Doppler, pola radiasi sesuai strategi link, serta polarisasi yang kompatibel dengan ground station. Tantangan komunikasi CubeSat antara lain keterbatasan daya (1–2 W total, hanya 0,5–1 W untuk komunikasi), volume fisik terbatas (10x10x10 cm untuk 1U) yang menyulitkan integrasi antenna besar, dan absennya attitude control aktif yang menyebabkan rotasi tidak terkendali sehingga polarisasi linear rentan mismatch [10] - [12]. Regulasi frekuensi mengikuti ITU dan IARU, dengan VHF (144–148 MHz) untuk uplink, UHF (435–438 MHz, khususnya 437 MHz) sebagai frekuensi utama [13], dan S-Band (2,4–2,45 GHz) untuk data rate tinggi. Arsitektur komunikasi CubeSat terdiri dari transceiver module (contoh ISIS TRX-UV, 2 W UHF, sensitivitas –116 dBm), RF Front-End (LNA, PA, filter matching dengan NF<3 dB dan efisiensi PA>60%) [14] - [15], subsistem antenna (matching, pola radiasi, polarisasi), serta OBC interface via UART/SPI dengan data rate 1200–9600 bps.

B. Antena dalam Satelit

Antena berperan kritis dalam komunikasi CubeSat karena menjadi interface elektromagnetik yang mengubah sinyal listrik menjadi gelombang radio dan sebaliknya [16]. Kinerjanya menentukan kualitas komunikasi, dimana peningkatan gain 1 dB dapat menghemat daya transmisi 25% atau meningkatkan data rate hingga 58% [17]. Parameter desain utama meliputi return loss (S11), VSWR, gain, bandwidth, polarisasi, dan pola radiasi. Standar CubeSat mengatur integrasi struktural, keandalan mekanis, konsumsi daya, serta kepatuhan EMI/EMC. Jenis antenna UHF yang umum digunakan mencakup monopole/dipole deployable, turnstile/crossed-dipole dengan polarisasi sirkular, serta quadrifilar helix antenna (QHA).

C. Antena Non-Deployable untuk CubeSat

Antena non-deployable dirancang untuk aktif tanpa mekanisme pembukaan, sehingga mengurangi kompleksitas mekanis, meningkatkan reliability, dan menghemat volume CubeSat [18]. Swartwout mencatat 23% kegagalan CubeSat akibat deployment failure, sehingga antenna non-deployable meningkatkan mission success [19]. Jenisnya meliputi patch antenna mikrostrip dengan teknik miniaturisasi (shorting pin, high permittivity substrate, slot loading, metamaterial), slot antenna yang flush mount, dual-band, circular polarization, serta chip antenna keramik dengan dimensi kecil, impedansi 50 Ω, gain 0–1 dBi, bandwidth 10–50 MHz, seperti Johanson 0435AT43A0070E yang mendukung integrasi CubeSat 1U [20] - [21].

D. Polarisasi Sirkular dalam Komunikasi Satelit

Polarisasi gelombang elektromagnetik menggambarkan orientasi vektor medan listrik (E) terhadap arah rambat gelombang, yang dapat dinyatakan dengan persamaan $E(z,t) = E_x \cos[\omega t - \beta z] + E_y \cos[\omega t - \beta z + \phi]$, dengan E_x dan E_y sebagai amplitudo, ω kecepatan sudut, β konstanta propagasi, dan ϕ beda fasa. Kualitas polarisasi diukur dengan Axial Ratio (AR) yang merupakan perbandingan sumbu mayor dan minor. Polarisasi sirkular diperoleh ketika dua komponen ortogonal memiliki amplitudo sama dan beda fasa 90°.

E. Propagasi Gelombang di Atmosfer

Pada pita frekuensi UHF, ionosfer memengaruhi kualitas propagasi sinyal satelit melalui variasi Total Electron Content (TEC) yang menimbulkan delay propagasi, dispersi sinyal, dan perubahan polarisasi akibat Faraday rotation. Delay ionosferik yang terbagi menjadi fase delay dan group delay lebih signifikan pada frekuensi rendah seperti 437 MHz yang umum digunakan CubeSat, sehingga dapat menimbulkan kesalahan fasa dan mismatch polarisasi. Faraday rotation terjadi akibat interaksi gelombang dengan plasma elektron dan medan magnet bumi, menyebabkan rotasi polarisasi sinyal linear. Selain itu, Doppler shift akibat kecepatan relatif LEO mencapai ±10 kHz sehingga memerlukan kompensasi frekuensi di ground station.

F. Antena UHF Chip untuk Aplikasi CubeSat

Antena chip menggunakan material keramik berpermittiviti tinggi untuk miniaturisasi, dengan conductive traces sebagai resonator yang dienkapsulasi dalam ceramic body untuk stabilitas. Dibuat dengan teknologi Low Temperature Co-fired Ceramic (LTCC), antenna ini mendukung integrasi multilayer presisi, produksi massal konsisten, serta stabilitas temperatur yang baik.

G. KiCad

KiCad adalah perangkat lunak open-source Electronic Design Automation (EDA) yang mendukung perancangan skematik, tata letak Printed Circuit Board (PCB), hingga ekspor file manufaktur. Dengan fitur Design Rule Check (DRC), Electrical Rule Check (ERC), serta visualisasi tiga dimensi, KiCad memungkinkan verifikasi desain sebelum produksi. Gratis, lintas platform, dan diperbarui komunitas, KiCad populer untuk prototyping maupun produksi elektronik berbiaya rendah [22].

H. Printed Circuit Board

Printed Circuit Board (PCB) adalah papan sirkuit yang menghubungkan komponen elektronik melalui jalur konduktif berbahan tembaga pada substrat non-konduktif, seperti fiberglass atau resin. PCB berfungsi sebagai platform fisik utama sistem rangkaian elektronik, tersedia dalam satu hingga multilayer sesuai kompleksitas desain [23].

a. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan perancangan dan implementasi antenna non-deployable berbasis antenna chip UHF untuk aplikasi CubeSat 1U pada frekuensi 437 MHz. Metode yang digunakan meliputi pemilihan antenna chip, desain skematik dan layout PCB, simulasi elektromagnetik, serta pengujian parameter antenna menggunakan Vector Network Analyzer (VNA) dan Spectrum Analyzer.

1. Pemilihan Antena Chip

Pemilihan antenna chip didasarkan pada kriteria ukuran, frekuensi operasi, gain, dan kemampuan mendukung polarisasi sirkular. Antena chip 0433AT62A0020 dipilih dengan rentang frekuensi 423–443 MHz, peak gain -4 dBi, dan impedansi 50 Ω , yang sesuai kebutuhan komunikasi CubeSat.

2. Desain Skematik dan Layout PCB

Desain skematik melibatkan penggabungan dua antenna chip dengan jalur mikrostrip yang memiliki perbedaan fasa 90° untuk menghasilkan polarisasi sirkular. Jalur mikrostrip dirancang dengan impedansi karakteristik 50 Ω menggunakan rumus:

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff} \left[\frac{W}{H} + 1.393 + \frac{2}{3} \ln \left(\frac{W}{H} + 1.444 \right) \right]}}$$

Dimana:

- Z_0 = Impedansi karakteristik (ohm)
- ϵ_{eff} = Efektif konstanta dielektrik
- W = Lebar jalur mikrostrip (mm)
- H = Ketebalan substrat PCB (mm)

Efektif konstanta dielektrik dihitung dengan rumus:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \left[\frac{\epsilon_r - 1}{2 \sqrt{1 + 12 \left(\frac{H}{W} \right)}} \right]$$

Dimana ϵ_r adalah konstanta dielektrik material PCB (FR-4 dengan $\epsilon_r=4.75$).

Perbedaan panjang jalur mikrostrip untuk menghasilkan pergeseran fasa 90° adalah $\lambda/4\sqrt{\epsilon_{eff}}$, dimana panjang gelombang pada media dispersif dihitung:

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

3. Simulasi Elektromagnetik

Simulasi menggunakan CST Studio Suite untuk menganalisis parameter antenna seperti VSWR, return loss, pola radiasi, polarisasi, bandwidth, dan gain. Simulasi ini membantu memvalidasi desain sebelum fabrikasi PCB.

4. Pengujian Parameter Antena

Pengujian parameter antenna non-deployable untuk CubeSat dilakukan dengan menggunakan beberapa peralatan dan metode yang sesuai guna memastikan kinerja antenna sesuai

spesifikasi teknis. Pengukuran Return Loss, VSWR, dan Bandwidth dilakukan dengan menggunakan alat NanoVNA. NanoVNA disambungkan ke antenna melalui kabel koaksial bertipe SMA dan akan menampilkan grafik serta nilai dari ketiga parameter tersebut secara real-time. Parameter VSWR diukur untuk memastikan pencocokan impedansi antenna terhadap saluran transmisi dengan nilai ideal di bawah 2, sedangkan Return Loss menunjukkan efisiensi transfer daya dari antenna dengan nilai yang harus rendah (≤ -10 dB). Bandwidth diukur sebagai rentang frekuensi di mana Return Loss masih memenuhi batas kriteria tersebut.

Untuk pengujian polarisasi dan pola radiasi, digunakan kombinasi NanoVNA sebagai sumber sinyal, Spectrum Analyzer sebagai penerima, serta antenna referensi yang memiliki karakteristik polarisasi dan gain diketahui. Antena referensi memancarkan gelombang elektromagnetik ke antenna rancangan yang diuji, kemudian Spectrum Analyzer menganalisis daya terima untuk mengevaluasi jenis polarisasi (linear atau sirkular) serta pola radiasi antenna di berbagai sudut putar. Pengujian dilakukan dengan memutar antenna rancangan untuk mendapatkan distribusi pola radiasi omnidirectional yang merata. Sedangkan pengukuran gain antenna dilakukan secara tidak langsung dengan menggunakan rumus link budget yang menghitung neraca daya antara antenna pemancar dan penerima.

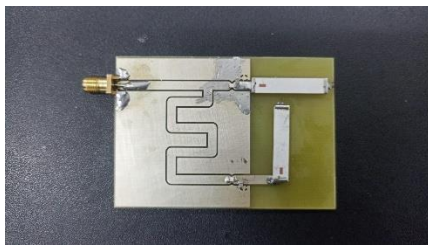
Dalam perhitungan ini, nilai daya pancar, gain antenna pemancar, serta loss dalam jalur transmisi diperoleh dari datasheet dan hasil pengujian Spectrum Analyzer dan NanoVNA. Dari nilai daya yang diterima, gain antenna penerima dapat dihitung untuk mengetahui kemampuan antenna dalam menguatkan sinyal pada arah tertentu. Dengan metode pengujian ini, semua parameter penting antenna dapat dianalisis secara komprehensif untuk menjamin keandalan komunikasi CubeSat di orbit.

II. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian parameter antenna menunjukkan VSWR 1,33 dan return loss -16,83 dB, menandakan pencocokan impedansi yang baik dan sedikit refleksi daya. Bandwidth mencapai ± 40 MHz yang cukup melebihi target 10 MHz, memberikan fleksibilitas frekuensi dengan kompromi terhadap gain. Polarisasi berhasil berubah menjadi sirkular dengan axial ratio 1,6, memenuhi kriteria komunikasi CubeSat yang membutuhkan ketahanan orientasi antenna. Pola radiasi bersifat omnidirectional pada bidang horizontal, menjaga komunikasi stabil meskipun satelit berotasi acak.

Namun, gain antenna yang dihasilkan rendah yaitu -20,754 dBi, mengindikasikan kerugian daya yang signifikan. Hal ini menjadi tantangan utama dalam pengembangan antenna non-deployable untuk CubeSat yang mengutamakan kualitas sinyal dan efisiensi energi. Keterbatasan ini dipengaruhi oleh dimensi fisik kecil antenna chip dan material FR-4 yang memiliki rugi-rugi dielektrik lebih tinggi dibandingkan substrat khusus seperti Rogers.

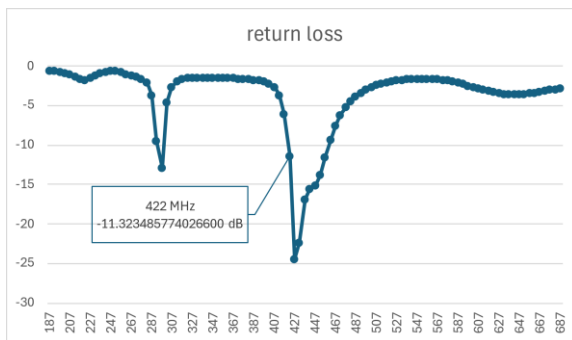
Optimasi lebih lanjut dapat dilakukan dengan pemilihan material substrat berkualitas lebih baik, pengaturan ground plane dan feedline yang lebih presisi, serta desain antenna chip yang meningkatkan efisiensi radiasi. Pengujian lanjutan di ruang anechoic dan simulasi kondisi orbit juga disarankan untuk verifikasi performa dalam lingkungan aktual.



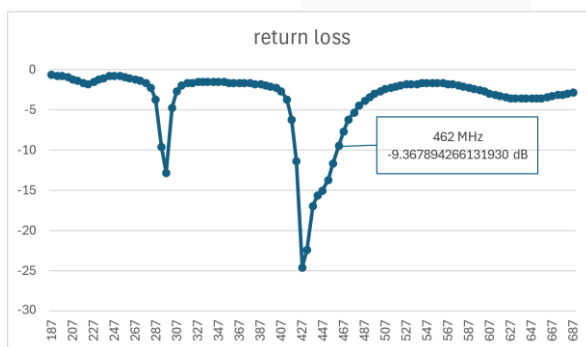
GAMBAR 1
(Antena Hasil Implementasi)



GAMBAR 2
(Grafik Hasil Pengujian Return Loss)



GAMBAR 3
(Grafik Nilai Frekuensi Bawah)



GAMBAR 4
(Grafik Nilai Frekuensi Atas)

TABEL 1.
Hasil Pengujian Antena

No	Spesifikasi	Hasil Pengujian
1	VSWR	1.33
2	Return Loss	-16.83 dB
3	Bandwidth	± 40 MHz
4	Polarisasi	Sirkular
5	Pola Radiasi	Omnidirectional

6	Gain	-20.754
---	------	---------

III. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan antenna non-deployable berbasis antenna chip keramik UHF pada frekuensi 437 MHz untuk CubeSat 1U. Antena yang dirancang memenuhi sebagian besar parameter desain penting seperti VSWR, return loss, polarisasi sirkular, dan pola radiasi omnidirectional. Namun, gain antenna masih sangat rendah sehingga perlu optimasi guna meningkatkan performa komunikasi satelit. Dengan desain yang ringkas, integrasi PCB, dan tanpa mekanisme deploy, antenna ini menawarkan keandalan lebih tinggi dan pengurangan kompleksitas sistem komunikasi CubeSat. Pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan efisiensi radiasi antenna demi mendukung misi komunikasi satelit miniatur secara efektif dan stabil di orbit rendah bumi.

REFERENSI

- [1] A. Poghosyan and A. Golkar, "CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 88, pp. 59–83, Jan. 2017.
- [2] S. Gao, et al., "Antennas for modern small satellites," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 51, no. 4, pp. 40–56, Aug. 2009.
- [3] Y. Rahmat-Samii, V. Manohar, and J. M. Kovitz, "For satellites, think small, dream big: A review of recent antenna developments for CubeSats," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 59, no. 2, pp. 22–30, Apr. 2017.
- [4] ISISPACE, *Deployable Antenna System Datasheet*, Version 4.0, 2020. [Online]. Available: https://www.isispace.nl/wp-content/uploads/2021/01/ISIS-ANTS-DSH-0001-Antenna_System_Datasheet-04_00.pdf
- [5] F. Rizqa, D. Arseno, and T. Yunita, "Analisis dan desain antenna mikrostrip untuk komunikasi satelit pada frekuensi Ka-band," *AVITEC*, vol. 1, no. 2, Jan. 2020, doi: 10.28989/avitec.v2i1.590.
- [6] H. Heidt, J. Puig-Suari, A. Moore, S. Nakasuka, and R. Twiggs, "CubeSat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation," in *Proc. 14th Annu. AIAA/USU Conf. Small Satellites*, Logan, UT, USA, 2000.
- [7] J. Puig-Suari, C. Turner, and W. Ahlgren, *CubeSat Design Specification Rev. 13*, The CubeSat Program, California Polytechnic State University, 2020. [Online]. Available: https://www.cubesat.org/s/CubeSat-Design-Specification-Rev-13_Final-1.pdf
- [8] GomSpace, "Nanosatellite Platform – GomSpace," 2024. [Online]. Available: <https://gomspace.com/Shop/subsystems/platforms/>
- [9] NASA, "ASTERIA (Arcsecond Space Telescope Enabling Research in Astrophysics)," 2020. [Online].
- [10] B. Klofas, J. Anderson, and K. Leveque, "A survey of CubeSat communication systems," in *Proc. 5th Workshop Satellite Constellations*, Palo Alto, CA, USA, 2015.
- [11] F. Tubbal, R. Raad, and K. I. Chin, "A survey and study of planar antennas for pico-satellites," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 2590–2612, 2015.
- [12] N. Murata, K. Fujita, and S. Nakasuka, "Attitude control system for CubeSat using magnetic torquer," in *Proc. IEEE Aerosp. Conf.*, Big Sky, MT, USA, 2017.
- [13] International Amateur Radio Union, *Amateur Radio*

Frequency Coordination for CubeSat Missions, IARU Technical Report, 2020.

[14] C. Pomalaza-Raez, D. Zeppettella, and M. Currier, "RF front-end design considerations for CubeSat applications," in *Proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propag.*, Fajardo, Puerto Rico, 2016.

[15] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2016.

[16] J. R. Wertz, D. F. Everett, and J. J. Puschell, *Space Mission Engineering: The New SMAD*, Hawthorne, CA, USA: Microcosm Press, 2011.

[17] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2012.

[18] R. Bancroft and B. Bateman, "Slot antenna design for CubeSat applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 8, pp. 4305–4312, 2018.

[19] A. Singh, S. Sharma, and V. K. Singh, "Comparative analysis of non-deployable antennas for CubeSat applications," *Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng.*, vol. 31, no. 9, p. e22742, 2021.

[20] T. A. Milligan, *Modern Antenna Design*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2005.

[21] K. Davies, *Ionospheric Radio*. London, UK: Peter Peregrinus Ltd, 1990.

[22] KiCad Project, *KiCad - A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite*, 2023.

[23] C. Dwigista, D. Nataliana, and S. Anwari, "Perancangan dan implementasi printed circuit board (PCB) ramah lingkungan menggunakan conductive ink," Institut Teknologi Nasional Bandung, 2022.