

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di negara kepulauan seperti Indonesia, implementasi sistem pemantauan darat menghadapi kendala interkoneksi geografis [2]. Pembangunan infrastruktur komunikasi konvensional seperti menara seluler atau jaringan serat optik di wilayah pedalaman memerlukan biaya investasi yang sangat tinggi dan menyisakan banyak area tanpa sinyal, terutama di wilayah terdepan, terluar, dan tertinggal (3T). Sebagai langkah solutif, arsitektur komunikasi *Direct-to-Satellite* yang memanfaatkan konstelasi satelit *Low Earth Orbit* (LEO) mulai dikembangkan untuk menyediakan jangkauan global yang persisten [3]. Salah satu implementasi nyata dari teknologi ini adalah pengembangan ekosistem stasiun bumi untuk menunjang misi satelit orbit rendah Nusantara Earth Observation-1 (NEO-1) oleh Pusat Riset Teknologi Satelit, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) [4]. Urgensi pengembangan infrastruktur komunikasi nirkabel jarak jauh berdaya rendah serta optimasi desain antena planar berbasis substrat FR-4 telah dibuktikan keandalannya melalui berbagai studi terdahulu yang dilakukan di lingkungan Universitas Andalas [5-6].

Wahana satelit LEO yang beroperasi pada ketinggian nominal 500 km hingga 600 km menawarkan keuntungan berupa latensi komunikasi yang rendah, namun komunikasi data menuju perangkat di permukaan bumi dihadapkan pada kendala redaman ruang bebas (FSPL) yang tinggi serta efek *Doppler shift* akibat kecepatan orbital satelit [7-8]. Untuk menjembatani kondisi saluran propagasi tersebut, teknologi nirkabel *Long Range* (LoRa) digunakan sebagai standar komunikasi lapisan fisik [9]. Melalui teknik modulasi *Chirp Spread Spectrum* (CSS), protokol LoRa memiliki ketahanan bawaan terhadap intermodulasi dan pergeseran frekuensi [10], sekaligus memiliki kapabilitas melakukan proses decode sinyal secara akurat meskipun level daya sinyal berada di bawah batas *noise floor* [11]. Sistem telemetri dan kendali satelit berbasis LoRa pada stasiun bumi bergerak menuntut perangkat keras untuk beroperasi secara simultan pada pita frekuensi ganda [12]. Alokasi frekuensi pita bawah 433 MHz dimanfaatkan untuk komunikasi penetrasi jarak jauh dan jalur pemancaran data, sementara frekuensi pita atas 920 MHz dialokasikan untuk jalur penerimaan data dengan kapasitas lebar pita yang lebih luas untuk mengakomodasi data telemetri yang kompleks [13]. Selain pada stasiun bumi, pemanfaatan antena berbasis planar atau mikrostrip juga telah banyak diterapkan langsung pada wahana satelit itu sendiri karena profilnya yang tipis dan ringan sangat memenuhi kriteria *Size, Weight, and Power* (SWaP) [14].

Permasalahan krusial dalam implementasi ini kemudian mengerucut pada keterbatasan fisik perangkat keras antena di sisi stasiun bumi portabel [15]. Secara operasional, stasiun bumi yang digunakan oleh tim lapangan di wilayah 3T dituntut untuk memenuhi kriteria SWaP yang ketat guna mengakomodasi serta menyesuaikan dengan dimensi *casing* perangkat yang telah ditetapkan [16]. Penggunaan konfigurasi dua antena *monoband* terpisah untuk masing-masing frekuensi kerja akan memakan

ruang fisik yang besar, meningkatkan bobot muatan, dan menurunkan efisiensi integrasi sistem secara keseluruhan [17]. Sebaliknya, upaya menggabungkan dua frekuensi operasional tersebut ke dalam satu struktur penampang antenna mikrostrip tunggal menghadirkan tantangan teknis pada rekayasa medan elektromagnetik. Rasio antara kedua frekuensi target dalam penelitian ini adalah $920/433 \text{ MHz} \approx 2.12$. Nilai frekuensi pita atas 920 MHz bukan merupakan kelipatan harmonik alami dari frekuensi dasar 433 MHz [18], di mana kelipatan harmonik ketiga teoretisnya berada pada rentang 1299 MHz. Ketiadaan hubungan harmonik alami ini membatasi peluang resonansi kelipatan biasa untuk mengaktifkan pita ganda [19].

Pada metode perancangan antenna mikrostrip tradisional seperti *slotted patch*, perbandingan frekuensi yang berada di area *blind spot* harmonik ini menciptakan fenomena ketergantungan pada parameter geometri antenna [20]. Akibatnya, setiap modifikasi geometri yang dilakukan untuk menala nilai S_{11} pada satu pita frekuensi akan mendegradasi distribusi medan dan performa impedansi di pita frekuensi lainnya akibat munculnya *mutual coupling* pada struktur konduktor. Beberapa alternatif rekayasa telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan pemisahan frekuensi ganda ini. Sebagai contoh, penggunaan komponen tambahan seperti kapasitor eksternal dikombinasikan dengan metode *Defected Ground Structure* (DGS) telah diuji untuk memanipulasi titik resonansi ganda pada sistem radar sekunder [21], [22].

Oleh karena itu, diperlukan sebuah pendekatan geometri yang berpotensi memutuskan keterikatan parameter antar-frekuensi sekaligus mempertahankan kesederhanaan struktur arsitektur antenna. Sebagai solusi rekayasa elektromagnetik tersebut, penelitian ini mengajukan analisis dan perancangan antenna *dual-band* menggunakan metode *Asymmetric Dual-Branch* dengan sistem pencatutan berbasis *Grounded Coplanar Waveguide* (GCPW) [23]. Arsitektur GCPW dipilih karena berpotensi bertindak sebagai instrumen tuning reaktansi yang lebih stabil dan tidak sekompleks DGS [24]. Target S_{11} pada dua pita frekuensi dengan rasio 2.12 tersebut dapat dicapai tanpa memperbesar luasan substrat [25]. Karakteristik ini meniadakan kebutuhan struktur *ground plane* utuh di sisi bawah, menghilangkan kebutuhan *via-hole*, serta mematuhi prinsip kemudahan perakitan [26]. Sementara itu, pemisahan jalur arus radiator menjadi dua lengan percabangan asimetris bertindak sebagai isolator spasial yang memotong jalur distribusi medan elektromagnetik antar-frekuensi [27]. Mekanisme ini memungkinkan komponen reaktansi induktif dan kapasitif pada lengan frekuensi 433 MHz dan lengan frekuensi 920 MHz ditala secara independen sehingga interaksi antar-pita dapat direduksi [28].

Meskipun proses reduksi dimensi fisik lengan radiator pada frekuensi rendah (433 MHz) menggunakan material substrat FR-4 secara teoretis akan meningkatkan nilai *dielectric loss* dan menurunkan efisiensi radiasi alami antenna [29], pelemahan nilai Realized Gain akibat reduksi dimensi ini perlu dievaluasi terhadap keseluruhan sistem [30]. Kemampuan komunikasi menuju satelit LEO NEO-1 tidak dapat dijustifikasi hanya dari parameter antenna, melainkan membutuhkan perhitungan link budget menyeluruh yang mengakomodasi redaman ruang bebas dan sensitivitas transceiver (-137 dBm) [31]. Pendekatan ini ditujukan agar stasiun bumi berpotensi

beroperasi dengan baik tanpa harus mengorbankan parameter portabilitas, kesesuaian casing, dan kemudahan fabrikasi perangkat keras [32].

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah yang telah dipaparkan pada latar belakang, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan memodelkan geometri antenna *dual-band* dengan arsitektur *Asymmetric Dual-Branch Grounded Coplanar Waveguide* (GCPW) agar dapat menghasilkan resonansi pada dua pita frekuensi (433 MHz dan 920 MHz) dalam satu luasan substrat yang terbatas?
2. Bagaimana pengaruh modifikasi parameter fisik seperti lebar lengan radiator, dimensi celah isolasi GCPW, serta panjang cabang asimetris terhadap efektivitas *tuning* frekuensi secara independen dan optimasi nilai S_{11} pada kedua pita kerja?
3. Sejauh mana teknik rekayasa *Asymmetric Dual-Branch* berpotensi mengurangi efek *coupling* elektromagnetik antar pita frekuensi dan mengatasi kendala rendahnya efisiensi radiasi pada frekuensi rendah, serta mengkaji implikasinya terhadap performa sistem?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menghasilkan perancangan dan pemodelan antenna *dual-band* dengan arsitektur *Asymmetric Dual-Branch Grounded Coplanar Waveguide* (GCPW) yang memenuhi kriteria *Size, Weight, and Power* (SWaP) untuk aplikasi *ground station* pada pita frekuensi LoRa 433 MHz dan 920 MHz.
2. Menganalisis dan mengevaluasi parameter performansi antenna melalui perangkat lunak simulasi, yang mencakup nilai $S_{11} \leq -10dB$ dan $VSWR \leq 2.0$, serta mengestimasi capaian *Realized Gain* dan pola radiasi pada masing-masing pita frekuensi operasi.
3. Mengevaluasi efektivitas teknik *asymmetric dual-branch* dalam memberikan kendali frekuensi ganda secara independen, serta menganalisis viabilitas antenna dalam mengkaji implikasi perubahan dimensi tersebut terhadap performa sistem meskipun terjadi miniaturisasi dimensi pada substrat FR-4.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian dan pengembangan purwarupa lebih terarah, batasan masalah ditetapkan sebagai berikut:

1. Substrat yang digunakan untuk perancangan dan fabrikasi adalah material FR-4 Epoxy standar dengan spesifikasi ketebalan dielektrik (h) 1,6 mm, ketebalan

- tembaga (t) 0,035 mm, dan diasumsikan memiliki nilai konstanta dielektrik (ϵ_r) sebesar 4,3 pada proses komputasi.
2. Modifikasi arsitektur antenna dibatasi secara eksklusif pada teknik *Asymmetric Dual-Branch* dengan metode pencatutan *Grounded Coplanar Waveguide* (GCPW), di mana arsitektur ini memadukan bidang ground koplanar di lapisan atas dan partial ground plane di lapisan bawah secara bersamaan untuk membantu proses tuning reaktansi parasitik antenna.
 3. Proses desain, pemodelan parametrik, dan optimasi arsitektur elektromagnetik dilakukan sepenuhnya menggunakan perangkat lunak komputasi CST Studio Suite.
 4. Target frekuensi kerja dikunci pada pita 433 MHz (profil EU433) dan 920 MHz (profil AS923-2), yang dioptimalkan secara spesifik untuk ekosistem operasional *ground station* LoRa menuju satelit LEO.
 5. Verifikasi pengujian fisik purwarupa dibatasi pada ekstraksi parameter impedansi, yaitu S_{11} dan VSWR, menggunakan instrumen *Vector Network Analyzer* (VNA) di fasilitas Laboratorium Telekomunikasi Universitas Andalas. Analisis performa *farfield* seperti *Realized Gain*, *Directivity*, dan Pola Radiasi dibatasi pada hasil komputasi perangkat lunak, mengingat keterbatasan alat untuk pengukuran.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat yang terbagi ke dalam dua aspek, yaitu:

1. Manfaat Teoretis: Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat teoretis secara spesifik yang mencakup validasi efektivitas arsitektur *Asymmetric Dual-Branch* pada sistem *Grounded Coplanar Waveguide* (GCPW) sebagai solusi untuk mengendalikan dua frekuensi resonansi secara independen. Selain itu, penelitian ini memberikan pemahaman mendalam mengenai pemanfaatan *partial ground plane* pada lapisan bawah substrat sebagai mekanisme *tuning* reaktansi fisis untuk mengatasi pergeseran impedansi pada desain antenna miniaturisasi.
2. Manfaat Praktis: Secara praktis, penelitian ini menghasilkan purwarupa perangkat keras antenna stasiun bumi berbasis LoRa yang ringkas dan memenuhi kriteria *Size, Weight, and Power* (SWaP). Penggunaan arsitektur GCPW memberikan keseimbangan antara kemudahan portabilitas perangkat keras dan ketangguhan kontrol impedansi saluran.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I Bab ini menguraikan latar belakang urgensi perancangan antenna *dual-band* berdimensi ringkas untuk perangkat *ground station* satelit LEO. Selain itu, bab ini juga memuat rumusan masalah, tujuan penelitian,

batasan masalah yang memfokuskan ruang lingkup perancangan pada arsitektur *Asymmetric Dual-Branch GCPW*, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan laporan.

- BAB II Bab ini memaparkan landasan teori dan tinjauan studi terdahulu yang mendukung penelitian. Materi yang dibahas meliputi sistem komunikasi satelit LEO, protokol LoRaWAN, parameter dasar antena (S_{11} , VSWR, Impedansi, *realized gain*, Pola Radiasi), teori dasar saluran transmisi *Grounded Coplanar Waveguide* (GCPW), serta prinsip kerja rekayasa *Asymmetric Branch* dalam menghasilkan resonansi ganda secara independen.
- BAB III Bab ini menjelaskan alur dan tahapan rekayasa perangkat keras yang dilakukan. Tahapan ini mencakup penentuan spesifikasi target, proses pemodelan parametrik dan optimasi menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite, prosedur fabrikasi menggunakan substrat FR-4, hingga skenario pengujian parameter impedansi antena secara fisik menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA).
- BAB IV Bab ini menyajikan data komparatif hasil rancangan, baik dari tahap simulasi komputasi maupun pengukuran fisik. Fokus pembahasan mencakup analisis terhadap pergeseran frekuensi, kedalaman parameter S_{11} , VSWR, pola radiasi, *Realized Gain*, serta efektivitas modifikasi dimensi lengan asimetris dan celah isolasi GCPW dalam melakukan *tuning* impedansi pada frekuensi 433 MHz dan 920 MHz.
- BAB V Bab ini berisi kesimpulan yang merangkum jawaban atas rumusan masalah dan pencapaian tujuan penelitian berdasarkan hasil analisis di Bab IV. Selain itu, bab ini juga memberikan saran-saran teknis dan rekomendasi untuk pengembangan penelitian atau perbaikan purwarupa antena di masa mendatang.