

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, simulasi, fabrikasi, dan pengujian prototipe antenna mikrostrip MIMO array 2×2 untuk aplikasi *Future Railway Mobile Communication System* (FRMCS), diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Keberhasilan Metodologi Perancangan: Integrasi teknik *inset feed* untuk pencocokan impedansi, pemotongan sudut (*truncated corner* dengan $T_c = 7,67$ mm), penyesuaian lebar *patch* ($W_p = 47$ mm), dan implementasi *Defected Ground Structure* (DGS) Model 3 pada substrat FR-4 berhasil direalisasikan. Kombinasi modifikasi geometri ini secara rancangan mampu mengompensasi pergeseran reaktansi alami antenna dan secara efektif memotong perambatan arus permukaan pada *ground plane*, sehingga respons frekuensi berhasil beresonansi secara presisi pada pita target FRMCS (1900–1910 MHz).
2. Validasi Kinerja Numerik / Simulasi: Pada kondisi simulasi ideal di frekuensi kerja 1900 MHz, karakteristik parameter antenna telah melampaui seluruh target spesifikasi awal dengan rincian: *return loss* (S_{11}) sebesar -37,93 dB, VSWR sebesar 1,03, *bandwidth* sebesar 61 MHz (kriteria $S_{11} \leq -10$ dB), gain sebesar 4,19 dBi, nilai isolasi antareleman (S_{21}) sebesar -44,87 dB, serta nilai *Envelope Correlation Coefficient* (ECC) = 0,0000000119 dan Diversity Gain (DG) = 10 dB yang menjamin independensi parameter diversitas spasial.
3. Validasi Kinerja Empiris / Pengukuran Aktual: Pengukuran prototipe fisik mengonfirmasi kelayakan operasional sistem antenna, meskipun terdapat deviasi pergeseran frekuensi resonansi terdalam ke arah atas (*upward shift*) sebesar 30 MHz (1,57%) ke titik 1930 MHz dengan nilai S mencapai -18,80 dB akibat toleransi manufaktur (dispersi *chemical etching* dan asimetri penyolderan konektor SMA). Pada frekuensi target komunikasi 1900 MHz, Port 2 berhasil memenuhi

spesifikasi impedansi dengan nilai S_{22} terukur sebesar -10,03 dB (VSWR 1,92), sementara Port 1 mencatatkan nilai S_{11} sebesar -9,50 dB (VSWR 2,00). Meskipun terjadi sedikit penyempitan rentang *bandwidth* menjadi 54 MHz, prototipe tetap bekerja memadai walaupun tidak sempurna pada spektrum FRMCS yang ditargetkan.

4. Kinerja Isolasi MIMO dan Karakteristik Pancaran: Implementasi struktur DGS pada prototipe fisik terbukti secara empiris sangat efektif dalam menekan interaksi elektromagnetik antarelemen. Hal ini divalidasi oleh tingkat isolasi aktual (S_{21}) yang mencapai -47,53 dB pada frekuensi kerja, menunjukkan peningkatan performa redaman sebesar 2,66 dB dibandingkan hasil simulasi. Selain itu, pengukuran pola radiasi menunjukkan profil keterarahan (*directivity*) *broadside* (Main Lobe = 0°) yang konsisten dengan simulasi, dengan *Half Power Beamwidth* (HPBW) yang lebih sempit secara empiris ($25,1^\circ$ dibandingkan $91,2^\circ$ pada simulasi) serta *Front-to-Back Ratio* yang lebih baik (16,8 dB dibandingkan 10,4 dB pada simulasi). Tingginya isolasi fisik dan keterarahan pola radiasi ini memberikan justifikasi ilmiah yang valid bahwa antenna memiliki performa diversitas yang andal untuk memitigasi efek *multipath fading* pada sistem komunikasi kereta kecepatan tinggi.

5.2 Saran

Berdasarkan kendala teknis dan observasi anomali yang ditemukan selama penelitian ini berlangsung, terdapat beberapa perbaikan yang direkomendasikan untuk pengembangan sistem selanjutnya:

1. Pengadaan Fasilitas Karakterisasi VNA Mandiri Laboratorium: Proses *fine-tuning* antenna frekuensi gelombang mikro mutlak menuntut validasi iteratif. Ketergantungan atau keterbatasan akses terhadap perangkat Vector Network Analyzer (VNA) menghambat progres pengujian prototipe pasca-fabrikasi. Sangat direkomendasikan agar institusi menjadikan pengadaan instrumen VNA (minimum kapasitas 1 GHz atau 6 GHz) sebagai investasi

strategis laboratorium guna mempercepat ritme kalibrasi dan kemandirian riset telekomunikasi di lingkungan kampus.

2. Kompensasi Parasitis dan Metode Penyolderan RF (*Soldering*): Pergeseran resonansi sebesar 30 MHz membuktikan bahwa perakitan mekanis terutama proses penyolderan konektor SMA secara manual menghasilkan reaktansi induktif eksternal yang langsung mendistorsi perhitungan matriks gelombang mikro. Pada riset mendatang, disarankan untuk mengadopsi teknik fabrikasi penyolderan presisi tinggi berbasis temperatur (seperti *reflow/hot air*), guna mengisolasi titik pencatu dari pengaruh impedansi parasitis tumpukan timah.
3. Karakterisasi Substrat dan Pemetaan Toleransi Mesin Vendor: Ketergantungan penuh pada datasheet material tanpa uji karakterisasi adalah sebuah celah analitis. Sebelum proses rancang bangun di *software* dilakukan, disarankan untuk mengukur dan memvalidasi konstanta dielektrik aktual (ϵ_r) material pada spektrum gelombang mikro untuk menghindari efek dispersi. Selain itu, eksekusi proses *dummy etching* mutlak diperlukan guna mengukur penyimpangan presisi (tingkat penyusutan celah struktur tembaga skala milimeter) dari mesin fabrikasi vendor, sehingga deviasi geometri tersebut dapat dimasukkan kembali ke dalam *software* sebagai nilai kompensasi (*offset margin*) sebelum desain akhir dicetak.