

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Hybrid coupler merupakan komponen pasif RF berempat *port* yang berfungsi membagi satu sinyal masukan menjadi dua sinyal keluaran dengan besar daya yang sama namun berbeda fase 90° , dan berperan penting dalam mendukung sistem *balanced amplifier*, *balanced mixer*, serta jaringan *beamforming* pada teknologi 5G. Rentang 1,8–2,7 GHz dipilih sebagai target perancangan agar satu rancangan *coupler* berpotensi mencakup frekuensi operasi yang relevan dari pita N3, N1, N40, N38, dan N41.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa *coupler* konvensional hanya menghasilkan *impedance bandwidth* sebesar 761 MHz (33,82%), masih di bawah target 900 MHz yang ditetapkan untuk mencakup rentang frekuensi 1,8–2,7 GHz. Setelah dimodifikasi menjadi bentuk *two-section*, *impedance bandwidth* meningkat menjadi 1.285 MHz berdasarkan kriteria $VSWR \leq 2$ dan telah mencakup rentang frekuensi target tersebut. Pencapaian *impedance bandwidth* ini tidak menunjukkan bahwa seluruh parameter *quadrature hybrid coupler* memenuhi spesifikasi secara simultan di sepanjang rentang 1,8–2,7 GHz.

Ditinjau dari pemenuhan spesifikasi parameter *quadrature hybrid coupler*, rancangan *broadband two-section* menghasilkan S_{11} sebesar -27,21 dB, S_{41} sebesar -22,78 dB, S_{21} sebesar -3,78 dB, S_{31} sebesar -3,87 dB, dan *phase coupling* $89,40^\circ$ pada frekuensi tengah 2,25 GHz. Pada frekuensi tengah 2,25 GHz, nilai S_{11} , S_{41} , dan *phase coupling* memenuhi spesifikasi yang ditetapkan, sedangkan S_{21} dan S_{31} masih berada di luar toleransi $\pm 0,5$ dB terhadap nilai ideal -3 dB. Pada bagian tepi rentang frekuensi mendekati 1,8 GHz dan 2,7 GHz, beberapa parameter seperti S_{41} mengalami perubahan kinerja. Oleh karena itu, karakteristik *quadrature coupler* belum dapat dinyatakan memenuhi seluruh spesifikasi secara seragam pada rentang frekuensi target. Hasil pengujian menggunakan VNA pada frekuensi tengah 2,25 GHz menunjukkan bahwa S_{11} sebesar -15,23 dB, S_{41} sebesar -21,44 dB, dan *phase coupling* sebesar $91,5^\circ$ telah memenuhi target spesifikasi yang ditetapkan. Namun, S_{21} sebesar -4,25 dB dan S_{31} sebesar -5,53 dB menunjukkan deviasi terhadap nilai ideal -3 dB yang melebihi batas toleransi $\pm 0,5$ dB, sehingga S_{21} dan S_{31} belum memenuhi toleransi $\pm 0,5$ dB terhadap nilai ideal -3 dB. Meskipun evaluasi *impedance bandwidth* berdasarkan kriteria $S_{11} < -10$ dB menunjukkan cakupan frekuensi yang cukup lebar, kesesuaian seluruh parameter secara simultan di sepanjang rentang 1,8–2,7 GHz belum dapat dinyatakan berdasarkan hasil pengukuran yang tersedia.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat menjadi pertimbangan untuk pengembangan penelitian selanjutnya, antara lain:

1. Optimasi lebih lanjut disarankan untuk memperkecil deviasi antara hasil simulasi dan fabrikasi, khususnya pada parameter S_{21} dan S_{31} . Upaya yang dapat dipertimbangkan antara lain meningkatkan presisi proses *etching* dan memperketat kontrol toleransi dimensi lengan *coupler* selama proses fabrikasi.
2. Penggunaan substrat dengan karakteristik dielektrik yang lebih stabil dan toleransi material yang lebih kecil dibandingkan FR-4 Epoxy dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan konsistensi antara hasil simulasi dan fabrikasi. Selain itu, substrat dengan *loss tangent* yang lebih rendah berpotensi mengurangi rugi-rugi dielektrik dan meningkatkan performa transmisi *coupler*.
3. Pengujian sebaiknya dilakukan menggunakan VNA 4-port agar seluruh parameter S dapat diukur secara langsung dan bersamaan, sehingga dapat mengurangi potensi kesalahan akibat pengukuran bertahap dan penggantian beban (*load*) pada tiap *port*.
4. Penelitian selanjutnya dapat mengeksplorasi teknik lain untuk memperlebar *bandwidth* sekaligus memperbaiki pemerataan performa parameter di seluruh rentang frekuensi, misalnya dengan pendekatan *multi-section* lebih dari dua bagian, *defected ground structure* (DGS), atau teknik *fractal*, agar diperoleh *coupler* yang tidak hanya memiliki *impedance bandwidth* yang lebar berdasarkan kriteria VSWR, tetapi juga memenuhi spesifikasi parameter *quadrature hybrid coupler* secara simultan di sepanjang rentang frekuensi kerja yang ditargetkan.
5. Fabrikasi dan pengujian sebaiknya dilakukan pada beberapa purwarupa dengan rancangan yang sama sehingga konsistensi hasil pengukuran antar-purwarupa dapat dievaluasi secara statistik dan tingkat *repeatability* proses fabrikasi dapat diketahui dengan lebih jelas.
6. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan analisis sensitivitas terhadap variasi dimensi dan karakteristik material secara kuantitatif, misalnya dengan memvariasikan lebar saluran mikrostrip serta nilai konstanta dielektrik substrat sesuai toleransi material yang digunakan.
7. Untuk memperkuat validitas perbandingan konvensional dengan *broadband*, penelitian selanjutnya dapat memfabrikasi juga rancangan *coupler* konvensional sebagai pembanding empiris, mengingat keterbatasan biaya dapat disiasati dengan memfabrikasi kedua rancangan pada satu papan PCB yang sama untuk efisiensi biaya produksi.

DAFTAR PUSTAKA