

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, simulasi, fabrikasi, dan pengujian antenna mikrostrip multiband dengan metode dual slit dan slot L sebagai sensor untuk mendeteksi kualitas susu pasteurisasi, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Antena mikrostrip rectangular patch multiband berhasil dirancang menggunakan substrat FR-4 dengan penerapan kombinasi metode pergeseran feed line, *inset feed*, *dual rectangular slit*, *L-shaped slot*, dan *Defected Ground Structure (DGS)* berbentuk *dumbell*. Rancangan ini menghasilkan empat titik frekuensi resonansi yang seluruhnya beroperasi di bawah 2,4 GHz, yaitu pada frekuensi 882,5 MHz, 1238 MHz, 1598 MHz, dan 1737,5 MHz pada hasil simulasi.
2. Pengujian antenna fabrikasi terhadap tujuh variasi konsentrasi larutan susu-air (100%-70%) menunjukkan bahwa seluruh keempat band mengalami pergeseran frekuensi resonansi yang konsisten dan searah seiring bertambahnya kandungan air dalam larutan. Band Kedua (f_2) mencatat pergeseran frekuensi terbesar sebesar 37,24 MHz dengan PRFS kumulatif 2,9762%, menjadikannya band dengan sensitivitas tertinggi.
3. Seluruh parameter antenna yaitu return loss (seluruhnya di bawah -10 dB), VSWR (seluruhnya di bawah 2), dan Q-factor (seluruhnya di atas 100) tetap memenuhi spesifikasi pada seluruh konsentrasi pengujian, mengkonfirmasi bahwa antenna multiband yang dirancang mampu beroperasi secara efektif sebagai sensor untuk mendeteksi perubahan kualitas susu pasteurisasi.
4. Evaluasi linearitas menunjukkan bahwa parameter frekuensi resonansi memiliki tingkat linearitas terbaik di antara parameter yang dianalisis, dengan nilai koefisien determinasi R^2 berkisar antara 0,7224 pada Band Keempat hingga 0,9293 pada Band Kedua.
5. Evaluasi sensitivitas menggunakan pendekatan *Percentage Relative Frequency Shift (PRFS)* menghasilkan nilai sensitivitas model tertinggi pada Band Kedua sebesar 1,253 %/MHz, diikuti Band Keempat (0,770 %/MHz), Band Pertama (0,424 %/MHz), dan Band Ketiga (0,272 %/MHz). Keberadaan empat band dengan karakteristik sensitivitas yang berbeda memungkinkan pembacaan sensor yang lebih komprehensif dan saling melengkapi dibandingkan sensor single-band.
6. Evaluasi akurasi berdasarkan lima kali pengujian berulang menghasilkan nilai *Mean Absolute Error (MAE)* rata-rata sebesar 7,29% dari seluruh band, dengan Band Kedua sebagai band dengan akurasi terbaik (MAE = 6,49%). Nilai R^2 model regresi eksponensial yang digunakan sebagai model

kalibrasi mencapai 0,9607, yang berarti model mampu menjelaskan lebih dari 96% variasi data konsentrasi.

7. Evaluasi presisi menggunakan *Coefficient of Variation (CV)* menghasilkan rata-rata global sebesar 5,79% dari lima kali percobaan, dengan Band Keempat sebagai band paling presisi (CV rata-rata 4,70%). Nilai CV rata-rata di bawah 7,2% pada semua band menunjukkan bahwa antenna memiliki konsistensi pengukuran yang baik untuk aplikasi sensor deteksi kualitas susu pasteurisasi secara non-destruktif.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan lebih lanjut adalah sebagai berikut.

1. Untuk meningkatkan akurasi model kalibrasi, disarankan untuk menggunakan model regresi nonlinear yang lebih sesuai dengan karakteristik data, terutama untuk parameter return loss yang menunjukkan tingkat linearitas rendah pada beberapa band. Pendekatan seperti model eksponensial atau polinomial berderajat dua berpotensi menurunkan nilai MAE secara signifikan dari nilai rata-rata 7,29% yang diperoleh pada penelitian ini.
2. Pengujian sebaiknya dilakukan dengan alat bantu posisi antenna yang terstandarisasi dan media penampung larutan yang presisi serta konsisten antarsesi, guna mengurangi variasi kondisi pengukuran yang menjadi salah satu penyebab utama ketidakmonotonan data dan menurunnya nilai presisi, khususnya pada konsentrasi di ujung rentang (75% dan 100%).
3. Perluasan rentang konsentrasi pengujian ke bawah 70% atau ke atas dengan variasi interval yang lebih kecil (misalnya 2,5%) akan memberikan data kalibrasi yang lebih rapat dan representatif, sehingga model regresi yang dibangun memiliki kemampuan interpolasi yang lebih baik dan menghasilkan sensor dengan resolusi deteksi yang lebih tinggi.
4. Hasil penelitian ini dapat dijadikan referensi dan titik awal untuk pengembangan sensor antenna mikrostrip multiband berbasis bahan substrat lain dengan nilai konstanta dielektrik yang lebih rendah seperti RT/Duroid, yang berpotensi menghasilkan sensitivitas sensor yang lebih tinggi sekaligus mengurangi rugi-rugi dielektrik dibandingkan substrat FR-4 yang digunakan pada penelitian ini.