

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Elektromagnetika merupakan ilmu yang mempelajari interaksi antara medan listrik dan medan magnet, yang dijelaskan melalui persamaan Maxwell, salah satunya adalah gelombang elektromagnetik. Gelombang elektromagnetik adalah salah satu jenis gelombang yang tersusun dari medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus (Jin, 2023). Eksperimen fisik tentang gelombang elektromagnetik telah dilakukan seperti oleh Ma dkk. (2024) yang meneliti tentang material penyerap gelombang berupa komposit *graphene oxide* atau penelitian oleh Chen dkk. (2023) tentang pengembangan bahan baru untuk penyerapan gelombang elektromagnetik, yang berfokus pada dua fase maksimum material magnetik baru. Namun dengan seiring berkembangnya metode penelitian, simulasi berbasis komputasi numerik mulai diminati untuk meneliti gelombang elektromagnetik.

Dalam simulasi, akurasi perhitungan dan efisiensi penggunaan sumber daya komputasi merupakan aspek utama yang sangat penting. Kedua aspek ini berperan penting dalam meminimalkan kesalahan perhitungan serta mengurangi dampak kerugian penelitian gelombang elektromagnetik, yang sering kali melibatkan biaya tinggi dan waktu panjang untuk persiapan bahan eksperimen (Teixeira et al., 2023). Metode simulasi yang umum digunakan adalah *Finite Difference Method* (FDM), baik dalam domain waktu, yaitu *Finite Difference Time-Domain* (FDTD), yang diterapkan oleh Rahmi (2017) untuk menghitung energi gelombang elektromagnetik dalam medium kaca, maupun dalam domain frekuensi, yaitu *Finite Difference Frequency-Domain* (FDFD), yang digunakan oleh Wu dkk. (2018) untuk analisis optik dan plasmonik, yang menghasilkan respons waktu dan frekuensi dengan akurasi tinggi.

Metode lainnya adalah *Method of Lines* (MoL), seperti laporannya Helfert (2013) untuk menyelesaikan masalah elektromagnetik 1D, termasuk untuk material dispersi. Kemudian *Finite Element Method* (FEM) seperti yang dilaporkan oleh Liu dkk. (2024) untuk Ground-Penetrating Radar (GPR) pada media dispersif dan lossy

dengan syarat batas *Perfectly Matched Layer* (PML). Metode lainnya yaitu *Method of Moment* (MoM) seperti laporan dari Fauziah dkk. (2022), untuk memodelkan hamburan gelombang mikro pada medium silinder dielektrik. Selain itu, ada metode lainnya seperti *Finite Volume Method* (FVM), seperti laporan dari Jahandari dan Farquharson (2015) yang melakukan pemodelan elektromagnetik dengan jaringan tak terstruktur untuk mengkonstruksi medan listrik dan magnetik melalui pendekatan potensial. Atau metode *Transmission Line Matrix* (TLM) seperti laporan dari Oraizi dan Afsahi (2007) yang menganalisis koefisien refleksi, transmisi, absorpsi, distribusi medan, dan aliran daya melalui struktur dielektrik berlapis sebagai *frequency selective surfaces* (FSS).

Dari beberapa metode yang telah dideskripsikan, metode FDM terutama *Finite Difference Time Domain* (FDTD) merupakan metode yang populer karena keunggulannya untuk memodelkan gelombang elektromagnetik dibandingkan metode lainnya (Teixeira dkk., 2023). Metode FDTD unggul karena mudah untuk mensimulasikan gelombang elektromagnetik dengan mengacu pada persamaan Maxwell dalam domain waktu untuk medan listrik dan magnet (Teixeira dkk., 2023). Selain itu metode FDTD dapat dipantau secara langsung, kompleksitasnya rendah, dan lebih hemat daya komputasi dibanding mayoritas metode lain. Dalam menjalankan simulasi, metode ini mempertimbangkan efek elemen dalam sistem sehingga cocok untuk simulasi gelombang elektromagnetik dalam medium. Hambatan dari metode FDTD adalah simulasinya berada di ruang terbatas sehingga memerlukan syarat batas di tepi ruang komputasi (Zygidis, dkk., 2023).

Beberapa metode syarat batas telah diajukan untuk menangani tepi domain dalam simulasi FDTD, yang dikategorikan menjadi syarat batas reflektif, *Periodic Boundary Condition* (PBC), dan *Absorbing Boundary Condition* (ABC). Syarat batas reflektif, seperti *Perfect Electric Conductor* (PEC) dan *Perfect Magnetic Conductor* (PMC), mengembalikan gelombang dengan amplitudo yang sama, tetapi dengan perubahan fase 180° (Taflov dan Hagness, 2005). PBC menghubungkan sisi domain yang berlawanan, memungkinkan gelombang keluar dari satu sisi dan masuk kembali dari sisi lainnya (Mazumder, 2016). Syarat batas absorptif (ABC)

digunakan untuk menyerap gelombang elektromagnetik sehingga gelombang tampak merambat keluar domain tanpa pantulan.

Metode syarat batas paling sederhana adalah Dirichlet, yang menetapkan nilai nol pada iterasi medan di tepi domain (Mazumder, 2016), dan Neumann, yang menetapkan nilai turunan pertama medan di batas domain (Utomo, 2016). Sementara itu, metode Dirichlet dapat digunakan juga untuk merumuskan ABC, dengan memaksa gelombang untuk menjadi nol pada tepi domain. ABC lain dapat berupa ABC Mur, yang didasarkan pada konsep gelombang satu arah, dilaporkan efektif menyerap gelombang dalam ruang satu dan dua dimensi, meski tidak efektif untuk untuk dimensi kompleks, frekuensi tinggi, atau media non-homogen (Mur, 1981; Tay, 2010). Selain yang telah disebutkan, ABC yang saat ini paling populer digunakan adalah *Perfectly Matched Layer* (PML), yang diusulkan oleh Berenger pada tahun 1994. PML adalah metode syarat batas dengan mekanisme penyerapan gelombang mulai dari tepi dalam medium PML dengan konduktivitas nol hingga tepi luar PML dengan konduktivitas maksimum (Berenger, 1994).

Metode PML telah dilaporkan oleh beberapa peneliti, termasuk Berenger. Berdasarkan laporan oleh Berenger (1994), perumusan ini sangat efektif untuk menghilangkan gelombang dalam ruang 2 dan 3 dimensi pada semua sudut datang gelombang. Dengan menetapkan parameter R_0 (refleksi bidang datar teoritis) dari 10^{-3} hingga 10^{-10} , tebal medium $4 * \Delta x$, dan *grading order* $0 \leq m \leq 2$. Hasilnya, gelombang dapat dihilangkan dengan *error* refleksi hingga 0,0001 untuk gelombang bidang datar dan hingga 0,0085 untuk gelombang sudut 45° (Berenger, 1994). Zheng dkk. (2006) juga melaporkan bahwa *error* refleksi PML mencapai 0,0008 untuk gelombang sudut datar dan 0,008 untuk gelombang sudut 45° . Sementara itu, penelitian lain oleh Rickhard dan Nikolova (2005) dengan $d = 20 * \Delta x$, *error* refleksi PML sebesar 0,0001 untuk frekuensi 5,5 – 9,5 GHz. Hal ini menunjukkan bahwa PML mampu bekerja secara efektif menyerap gelombang.

Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan kinerja penyerapan gelombang antar ABC, yaitu metode PML dengan metode Dirichlet dalam ruang 1 dimensi. Perbandingan ini dilakukan karena metode Dirichlet adalah metode yang paling sering digunakan karena kemudahan implementasinya pada ruang satu

dimensi. Variasi yang diberikan pada kedua metode berupa medium, yaitu medium hampa dan medium dielektrik dengan variasi nilai permitivitas relatif (ϵ_r). Hal ini dilakukan karena perumusan konduktivitas pada PML memiliki keterkaitan langsung dengan parameter medium sehingga perubahan kinerjanya dapat dipertimbangkan. Simulasi dilakukan dengan metode *Finite-Difference Time-Domain* satu dimensi dan menggunakan gelombang Gaussian yang dirambatkan pada sumbu- x di arah kanan ($+x$).

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah mengimplementasikan simulasi gelombang elektromagnetik menggunakan metode *Finite Difference Time Domain* (FDTD) satu dimensi untuk mengukur *error* refleksi pada *Absorbing Boundary Condition* (ABC) *Perfectly Matched Layer* (PML) dan membandingkannya dengan ABC Dirichlet, serta mengevaluasi kinerja keduanya dalam medium ruang hampa dan dielektrik melalui variasi nilai permitivitas relatif (ϵ_r).

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah mengevaluasi kinerja ABC PML dengan ABC Dirichlet, yang dianalisis dalam medium ruang hampa dan dielektrik menggunakan metode FDTD satu dimensi. Analisis tersebut selanjutnya dapat digunakan sebagai dasar dalam mengimplementasikan ABC PML pada metode FDTD dengan dimensi yang lebih tinggi.