

BAB 5. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan pada sistem "Implementasi Simulasi 3D Gelombang Laut Berbasis Fourier Transform untuk Monitoring Kondisi Perairan Real-Time", dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem berhasil merancang dan mengimplementasikan simulasi gelombang laut 3D yang dinamis menggunakan pendekatan spektrum hibrida JONSWAP-TMA serta fungsi penyebaran arah (*directional spreading*) Cosine-2s. Proses dekomposisi dimensi horizontal dan vertikal melalui algoritma *Inverse Fast Fourier Transform* 2D (IFFT 2D) pada GPU terbukti efektif mentransformasikan data domain frekuensi menjadi *displacement map*, *derivatives map*, dan *turbulence map* untuk mendeduksi efek *choppy waves* dan buih laut (*foam*) secara realistis pada vertex mesh.
2. Sistem mampu melakukan integrasi data parameter lingkungan laut dari stasiun *buoy* secara *asynchronous* melalui REST API Cloud Firestore. Mekanisme *in-memory caching* berbasis standarisasi string penanda waktu (YYYYMMDDHH) berhasil mengeliminasi panggilan API yang redundan (*cache hit*) dengan waktu respons pembaruan data di bawah 1 ms. Selain itu, CPU berhasil mendeduksi nilai lintasan embusan angin (*Fetch*) secara presisi melalui metode numerik Newton-Raphson untuk menyuplai parameter input bagi spektrum JONSWAP di GPU.
3. Pengujian performa pasca-build membuktikan bahwa paralelisasi menggunakan *Compute Shader* (HLSL) pada GPU sangat optimal. Pemrosesan kaskade grid berukuran 256×256 pada GPU mampu mempertahankan stabilitas *frame rate* rata-rata pada **100.7 FPS** dengan *frame time* hanya **9.9 ms**, jauh mengungguli performa pemrosesan sekuensial CPU (*fallback path*) yang mengalami degradasi performa ekstrem hingga **6.6 FPS (150.8 ms)**. Sistem simulasi ini terbukti memenuhi kriteria kelulusan performa real-time grafis standar (≥ 60 FPS).

5.2. Keterbatasan Penelitian

Berdasarkan keterbatasan sistem yang ditemukan selama penelitian dan pengujian, beberapa saran yang dapat diajukan untuk pengembangan sistem di masa mendatang adalah:

1. Sistem simulasi ini tidak melakukan akuisisi data secara langsung dari perangkat keras *wave buoy* fisik di laut, melainkan mengekstrak dokumen sekunder dari situs resmi BMKG untuk disinkronisasikan ke dalam basis data *Cloud Firestore* mandiri.

2. Implementasi fungsi gelombang laut pada penelitian ini masih berdasar pada teori linear. Fenomena non-linear yang terjadi di laut nyata seperti pecahnya ombak (*wave breaking*) serta turbulensi skala besar tidak direpresentasikan secara fisik.
3. Simulasi lingkungan hanya berfokus pada dinamika gelombang, sehingga kondisi cuaca visual (seperti hujan atau kabut) maupun efek pencahayaan bawah air (*caustics*) belum terintegrasi mengikuti parameter cuaca pada lokasi.

5.3. Saran

Berdasarkan keterbatasan sistem yang ditemukan selama penelitian dan pengujian, beberapa saran yang dapat diajukan untuk pengembangan sistem di masa mendatang adalah:

4. Disarankan untuk mengembangkan model gelombang non-linear pada penelitian selanjutnya, seperti mengintegrasikan efek *wave breaking* yang lebih kompleks, turbulensi tingkat lanjut, serta interaksi dinamis antara gelombang laut dengan objek padat di sekitarnya secara lebih mendalam.
5. Sistem dapat dikembangkan lebih lanjut agar mendukung platform berbasis web (WebGL) atau diintegrasikan ke dalam ekosistem *Digital Twin* maritim yang lebih luas. Selain itu, aspek visualisasi dapat ditingkatkan dengan menambahkan simulasi pembiasan cahaya bawah air (*caustics*) dan perubahan cuaca (seperti kabut dan hujan) yang tersinkronisasi otomatis dengan parameter kelembapan serta temperatur riil dari *database* stasiun *buoy*.