

**IMPLEMENTASI SIMULASI 3D GELOMBANG LAUT BERBASIS
FOURIER TRANSFORM UNTUK MONITORING KONDISI
PERAIRAN REAL-TIME**



**NOER FAUZAN DETYA GULFIAR
NIM. 2210511151**

**PROGRAM STUDI S1 INFORMATIKA
FAKULTAS ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL “VETERAN”
JAKARTA
2026**

**IMPLEMENTASI SIMULASI 3D GELOMBANG LAUT BERBASIS
FOURIER TRANSFORM UNTUK MONITORING KONDISI
PERAIRAN REAL-TIME**

**NOER FAUZAN DETYA GULFIAR
NIM. 2210511151**

SKRIPSI

**Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana
Komputer**

**PROGRAM STUDI S1 INFORMATIKA
FAKULTAS ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL “VETERAN”
JAKARTA
2026**

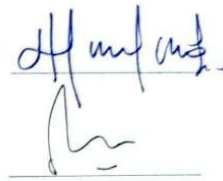
LEMBAR PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN

Judul : Implementasi Simulasi 3D Gelombang Laut Berbasis
FFT untuk Monitoring Kondisi Perairan Real-Time
Nama : Noer Fauzan Detya Gulfiar
NIM : 2210511151
Program Studi : SI Informatika

Disetujui oleh:

Penguji 1:
Dr. Ridwan Raafi'udin, S.Kom, M.Kom.
NIP. 198805022021211001



Penguji 2:
Nurhuda Maulana, S.T., M.T.
NIP. 199306152022031003

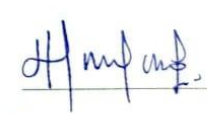


Pembimbing 1:
Dr. Didit Widiyanto, S.Kom., M.Si.
NIP. 197007142021211003

Pembimbing 2:
Muhammad Panji Muslim, S.Pd., M.Kom.
NIP. 199308312022031007

Diketahui oleh:

Koordinator Program Studi:
Dr. Ridwan Raafi'udin, S.Kom, M.Kom.
NIP. 198805022021211001



Dekan Fakultas Ilmu Komputer:
Prof. Dr. Ir. Supriyanto, M.Sc., IPM.
NIP. 197605082003121002




Tanggal Ujian Tugas Akhir:
7 Juli 2026

PERSYARATAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

PERSYARATAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul "Implementasi Simulasi 3D Gelombang Laut Berbasis Fourier Transform Untuk Monitoring Kondisi Perairan Real-Time" adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir proposal ini.

Jakarta, Juli 2026



Noer Fauzan Detya Gulfiar
2210511151

IMPLEMENTASI SIMULASI 3D GELOMBANG LAUT BERBASIS FOURIER TRANSFORM UNTUK MONITORING KONDISI PERAIRAN REAL-TIME

Noer Fauzan Detya Gulfiar

ABSTRAK

Penyajian data gelombang laut BMKG saat ini didominasi oleh teks numerik statis dan peta kontur 2D, sehingga membatasi pemahaman dinamika perairan secara intuitif. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem simulasi 3D gelombang laut secara real-time berbasis data observasi stasiun buoy dari Cloud Firestore. Metode simulasi menggunakan pendekatan spektral hibrida JONSWAP-TMA dan fungsi directional spreading Cosine-2s. Parameter fisik panjang embusan angin (fetch) dideduksi menggunakan iterasi Newton-Raphson pada CPU. Untuk mencapai visualisasi yang responsif, seluruh kalkulasi spektral dan algoritma IFFT 2D didelegasikan secara paralel ke GPU melalui Compute Shader (HLSL). Optimasi beban rendering mesh menggunakan teknik Geometric Clipmap dengan sembilan tingkatan Level of Detail (LOD). Sinkronisasi data dioptimalkan via AsyncGPUReadback dan in-memory caching. Hasil pengujian pasca-build pada grid kaskade 256×256 menunjukkan jalur GPU berjalan sangat stabil pada rata-rata 100,7 FPS (frame time 9,9 ms), mengungguli jalur sekuensial CPU yang jatuh hingga 6,6 FPS (frame time 150,8 ms). Pemanfaatan komputasi paralel GPU terbukti mampu menghasilkan visualisasi laut 3D yang realistis untuk mendukung sistem monitoring oseanografi modern.

Kata Kunci: Simulasi 3D, JONSWAP, IFFT, Compute Shader, Firestore.

IMPLEMENTASI SIMULASI 3D GELOMBANG LAUT BERBASIS FOURIER TRANSFORM UNTUK MONITORING KONDISI PERAIRAN REAL-TIME

Noer Fauzan Detya Gulfiar

ABSTRACT

BMKG's ocean wave data presentation is currently dominated by static numerical text and 2D contour maps, limiting intuitive understanding of marine dynamics. This research aims to design and implement a real-time 3D ocean wave simulation system based on buoy observation data from Cloud Firestore. The simulation utilizes a hybrid JONSWAP-TMA spectral approach and Cosine-2s directional spreading function. The physical fetch parameter is numerically deduced using Newton-Raphson iteration on the CPU. To achieve responsive visualization, all spectral calculations and the 2D IFFT algorithm are delegated in parallel to the GPU via Compute Shaders (HLSL). Mesh rendering optimization employs the Geometric Clipmap technique with nine Level of Detail (LOD) tiers. Data synchronization is optimized via AsyncGPUReadback and local in-memory caching. Post-build evaluation on a 256×256 cascade grid demonstrates that the GPU path runs stably at an average of 100.7 FPS (9.9 ms frame time), significantly outperforming the sequential CPU path which drops to 6.6 FPS (150.8 ms frame time). Leveraging parallel GPU computing effectively delivers realistic 3D ocean visualizations for modern oceanographic monitoring.

Keyword: 3D Simulation, JONSWAP, IFFT, Compute Shader, Firestore.

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai civitas akademika Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jakarta, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Noer Fauzan Detya Gulfiar
NIM : 2210511151
Fakultas : Fakultas Ilmu Komputer
Program Studi : S1 Informatika

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta Hak Bebas Royalti Non eksklusif (Non - exclusive Royalty Free Right) atas skripsi saya yang berjudul:

Implementasi Simulasi 3D Gelombang Laut Berbasis Fourier Transform Untuk Monitoring Kondisi Perairan Real-Time

Dengan Hak Bebas Royalti ini Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jakarta berhak menyimpan, mengalih media atau memformatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (basis data), merawat dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Jakarta
07 Juli 2026
Yang menyatakan,



Noer Fauzan Detya Gulfiar

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer pada Program Studi Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jakarta.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dukungan, serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Orang tua dan keluarga penulis yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, dukungan, serta motivasi baik secara moral maupun material selama proses penyusunan skripsi.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Supriyanto, M.Sc., IPM. selaku Dekan Fakultas Ilmu Komputer Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jakarta.
3. Bapak Dr. Ridwan Raafi'udin, S.Kom., M.Kom. selaku Koordinator Program Studi Informatika Fakultas Ilmu Komputer Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jakarta.
4. Bapak Dr. Didit Widiyanto, S.Kom., M.Si. selaku Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktu, memberikan arahan, bimbingan, serta masukan yang sangat bermanfaat selama proses penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Muhammad Panji Muslim, S.Pd., M.Kom. selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, motivasi, serta saran yang membangun sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
6. Bapak Jayanta, S.Kom., M.Si. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan arahan, perhatian, dan bimbingan selama penulis menempuh pendidikan di Program Studi Informatika.
7. Seluruh teman-teman penulis yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas dukungan, semangat, bantuan, serta kebersamaan yang telah diberikan selama masa perkuliahan maupun dalam proses penyusunan skripsi.
8. Semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki berbagai kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan karya ini. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, dunia akademik, serta pihak-pihak yang membutuhkan.

Jakarta, 1 Juli 2026

Noer Fauzan Detya Gulfiar

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR RUMUS	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah.....	4
1.4. Tujuan dan Manfaat Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Gelombang Laut.....	6
2.1.1. Sifat Dasar Dalam Ruang.....	6
2.1.2. Sifat Dasar dalam Waktu	7
2.1.3. Frekuensi Temporal dan Bilangan Gelombang	7
2.1.4. Kinematika Gelombang (1D).....	8
2.1.5. Perambatan Gelombang Bidang (2D)	9
2.2. Monitoring Gelombang Laut.....	11
2.3. Drifting Buoy	12
2.4. Fast Fourier Transform (FFT).....	13
2.5. Oceanographic Spectra.....	14
2.5.1. Vektor Gelombang	14
2.5.2. Relasi Dispersi	16
2.5.3. Model Spektrum JONSWAP	17
2.5.4. Directional Spread.....	19
2.5.5. Random Ocean Wave Height Field.....	20
2.5.6. Model Gelombang Statistik	21
2.6. Simulasi 3D.....	23
2.7. Unity Engine	23
2.8. Penelitian Terdahulu	24
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	27
3.1. Tahapan Penelitian	27

3.1.1.	Identifikasi Masalah	29
3.1.2.	Studi Literatur	30
3.1.3.	Pengumpulan Data	31
3.1.4.	Simulasi Matematis Gelombang Laut.....	32
3.1.5.	Pengujian.....	38
3.1.6.	Deployment.....	40
3.1.7.	Evaluasi	41
3.2.	Alat dan Bahan Penelitian.....	41
3.2.1.	Perangkat Keras	42
3.2.2.	Perangkat Lunak.....	42
3.4.	Jadwal Penelitian.....	44
BAB 4.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	45
4.1.	Lingkup Penelitian	45
4.2.	Rancangan Sistem	45
4.2.1.	Arsitektur Sistem.....	45
4.2.1.1.	Diagram Aliran Utama Simulasi Gelombang	45
4.2.1.2.	Rancangan Struktur Kelas.....	47
4.2.1.3.	Rancangan Logika Kerja.....	49
4.2.1.4.	Rancangan Interaksi Objek	51
4.2.1.5.	Rancangan Topologi Infrastruktur Perangkat Lunak	53
4.2.2.	Simulasi dan Pemodelan Spektral Gelombang	54
4.2.2.1.	Pembangkitan Spektrum Gelombang (JONSWAP).....	54
4.2.2.2.	Transformasi Domain (IFFT 2D).....	58
4.2.2.3.	Deformasi Geometri dan Shading (<i>Vertex & Fragment Shader</i>).....	62
4.2.3.	Integrasi Data Lingkungan Laut.....	68
4.2.3.1.	Skema Basis Data (<i>NoSQL Cloud Firestore</i>)	68
4.2.3.2.	Alur Akuisisi Data secara Asinkron (REST API Client)	70
4.2.3.3.	Manajemen Cache Data Klien	71
4.2.3.4.	Algoritma Deduksi Parameter (Newton-Raphson)	72
4.2.4.	Optimasi dan Paralelisasi GPU (<i>Compute Shader</i>).....	75
4.2.4.1.	Arsitektur Compute Shader (GPU Pipeline)	75
4.2.4.2.	Pengalihan Beban Komputasi GPU	77
4.2.4.3.	Optimasi Geometri Mesh (<i>LOD / Level of Detail</i>)	78
4.3.	Pengujian Sistem.....	81

4.3.1.	Lingkungan Pengujian	82
4.3.2.	Pengujian Unit dan Integrasi API (<i>Pra-Build</i>)	82
4.3.2.1.	Pengujian Kueri REST API Firestore	82
4.3.2.2.	Pengujian Unit Logika Fungsi C#.....	86
4.3.3.	Pengujian Kinerja Real-Time (Pasca-Build).....	89
4.3.3.1.	Profiling Sistem dan Beban Kerja CPU dan GPU	89
4.3.3.2.	Analisis Rendering dan Alokasi Memori	93
BAB 5.	PENUTUP	96
5.1.	Kesimpulan	96
5.2.	Keterbatasan Penelitian	96
5.3.	Saran.....	97
	DAFTAR PUSTAKA	98
	LAMPIRAN.....	101

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Basic Properties in Space	7
Gambar 2.2 Basic Properties in Time	7
Gambar 2.3 Gelombang 1 dimensi	9
Gambar 2.4 Gelombang 2 dimensi	10
Gambar 2.5 Peta Informasi Tinggi Gelombang BMKG 26 Oktober 2025	11
Gambar 2.6 Drifting buoy	12
Gambar 2.7 Drifting buoy data	13
Gambar 2.8 <i>Graph</i> spektrum JONSWAP	17
Gambar 2.9 Antarmuka Unity Engine	24
Gambar 3.1 Flowchart Tahapan Penelitian	28
Gambar 3.2 Peta Informasi Tinggi Gelombang BMKG	30
Gambar 3.3 Data perairan harian BMKG	30
Gambar 3.4 Standard Meteorological Data for Drifting Buoys	31
Gambar 3.5 Data Prakiraan Cuaca Maritim BMKG	31
Gambar 4.1 Simulation Flow Diagram	46
Gambar 4.2 Class Diagram	47
Gambar 4.3 Activity Diagram	50
Gambar 4.4 Sequence Diagram	52
Gambar 4.5 Deployment Diagram	53
Gambar 4.6 Tampilan struktur dokumen dan field pada cloud firestore	68
Gambar 4.7 Pipeline <i>Compute shader</i> GPU	76
Gambar 4.8 Perbandingan Performa Visual dan Nilai FPS pada CPU dan GPU	78
Gambar 4.9 Visualisasi Pembagian Kerapatan Grid Mesh Berdasarkan Tingkat LOD dari Pusat ke Luar	80
Gambar 4.10 Tampilan Pengujian REST API Firestore Tanpa Token	83
Gambar 4.11 Tampilan Pengujian REST API Firestore Token Kedaluwarsa	84
Gambar 4.12 Tampilan Pengujian REST API Firestore Otentikasi Berhasil	84
Gambar 4.13 Tampilan Hasil Eksekusi Unit Test <i>CompassToDegree</i>	87
Gambar 4.14 Tampilan Hasil Eksekusi Unit Test <i>FetchInverseSMB</i>	88
Gambar 4.15 Tampilan Hasil Eksekusi <i>Unit Test</i> <i>NormalRandom</i>	88
Gambar 4.16 Tampilan Rangkuman Analisis Kinerja Sistem pada Unity Profiler	90
Gambar 4.17 Tampilan Rendering dan Alokasi Memori pada Unity Profiler	93

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Ringkasan penelitian terdahulu	24
Tabel 3.1 Tahapan dan Target Pengujian Simulasi Gelombang Laut.....	39
Tabel 3.2 Alat dan bahan perangkat keras	42
Tabel 3.3 Alat dan bahan perangkat lunak.....	42
Tabel 3.4 Rencana jadwal penelitian	44
Tabel 4.1 Pembagian resolusi dan jarak masing masing tingkat LOD	79
Tabel 4.2 Spesifikasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak.....	82
Tabel 4.3 Hasil Pengujian REST API dengan POSTMAN	85
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Unit dengan Unity Test Framework	89
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Waktu Pemrosesan CPU dan GPU dengan Profiler ...	90
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Memori dengan Profiler.....	92
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Data Render dengan Profiler	94
Tabel 4.8 Hasil Pengujian Alokasi Memori dengan Profiler	94

DAFTAR RUMUS

2.1 Tinggi Gelombang	6
2.2 Hubungan Frekuensi terhadap Periode	8
2.3 Frekuensi Sudut Gelombang	8
2.4 Persamaan Perpindahan Gelombang terhadap Waktu	8
2.5 Bilangan Gelombang Spasial	8
2.6 Persamaan Perpindahan Gelombang terhadap Ruang.....	8
2.7 Persamaan Dasar Ketinggian Gelombang 1 Dimensi	9
2.8 Kecepatan Rambat Fase Gelombang	9
2.9 Persamaan Propagasi Gelombang Bidang 2 Dimensi.....	10
2.10 Proyeksi Sudut Arah Rambat Gelombang Horizontal	10
2.11 Formulasi Komponen Discrete Fourier Transform (DFT)	13
2.12 Definisi Spasial Vektor Gelombang Horizontal	15
2.13 Pemetaan Grid Diskrit Indeks Bilangan Gelombang	15
2.14 Magnitudo Panjang Vektor Gelombang Bidang	15
2.15 Relasi Dispersi Gravitasi Perairan Dangkal Terbatas	16
2.16 Penyederhanaan Relasi Dispersi Kondisi Laut Dalam.....	16
2.17 Kecepatan Grup Rambat Energi Gelombang	16
2.18 Densitas Spektrum Energi Klasik Model JONSWAP	17
2.19 Persamaan Empiris Konstanta Skala Energi Alfa	18
2.20 Persamaan Empiris Frekuensi Sudut Puncak Spektrum	18
2.21 Fungsi Batas Asimetris Lebar Puncak Sigma	19
2.22 Modulasi Spektrum Energi Dua Dimensi dengan Fungsi Sebaran Arah	20
2.23 Formulasi Amplitudo Kompleks Awal Domain Frekuensi	20
2.24 Persamaan Evolusi Temporal Spektrum Gelombang	21
2.25 Rekonstruksi Tinggi Permukaan Laut Domain Spasial (Inverse Fourier)	22
2.26 Identitas Persamaan Euler untuk Osilasi Fase Kompleks	22
2.27 Vektor Kemiringan Permukaan Gradien Medan Tinggi	22
3.1 Transformasi Box-Muller Komponen Kosinus.....	32
3.2 Transformasi Box-Muller Komponen Sinus	32
3.3 Persamaan Pertumbuhan Gelombang Empiris SMB	33
3.4 Fungsi Pembatas Non-Linear Variabel Tak Berdimensi	33
3.5 Persamaan Turunan Pertama Fungsi Pembatas Gradien Newton-Raphson....	33
3.6 Formula Pembaruan Akar Iteratif Metode Newton-Raphson	34
3.7 Pemetaan Koordinat Integer Grid ke Vektor Gelombang Diskrit.....	35

3.8 Komputasi Panjang Vektor Teorema Pythagoras Kaskade	35
3.9 Formulasi Modifikasi Kedalaman Spektrum Energi TMA.....	35
3.10 Fungsi Transformasi Kitaygorodskii Faktor Pelemahan Fluida	35
3.11 Pembangkitan Amplitudo Spektral Diskrit Grid GPU.....	36
3.12 Regulasi Batas Konjugat Kompleks Simetri Hermitian.....	36
3.13 Kombinasi Fase Eksponensial Waktu Dinamis	36
3.14 Rekonstruksi Spasial Ketinggian Vertikal Permukaan Air (Y)	37
3.15 Medan Pergeseran Spasial Horizontal Sumbu X (Choppy Waves).....	37
3.16 Medan Pergeseran Spasial Horizontal Sumbu Z.....	37
3.17 Determinan Matriks Jacobian Penentu Kompresi Spasial Grid.....	37
4.1 Akumulasi Multi-Cascade Jacobian pada Fragment Shader.....	63
4.2 Persamaan Pertumbuhan Gelombang SMB Inversi	74
4.3 Estimasi Tebakan Awal Variabel Tak Berdimensi (Inverse Tanh)	74
4.4 Algoritma Loop Inti Konvergensi Galat Newton-Raphson CPU	74

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Antarmuka dan Hasil Implementasi Sistem.....	101
Lampiran 2 Hasil Turnitin.....	103