



TUGAS AKHIR (AE43250)

**OPTIMALISASI SISTEM PENGUKUR TINGGI GELOMBANG AIR
PADA *WAVE TANK* MENGGUNAKAN KAMERA BERBASIS
PENGOLAHAN CITRA**

MOCH. FIRMAN FIRLANA
NRP. 0921040004

DOSEN PEMBIMBING :
II MUNADHIF, S.ST., M.T.
Dr. Eng MUHAMMAD ANIS MUSTAGHFIRIN, S.ST., M.T.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK OTOMASI
JURUSAN TEKNIK KELISTRIKAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2025



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (AE43250)

**OPTIMALISASI SISTEM PENGUKUR TINGGI GELOMBANG AIR
PADA WAVE TANK MENGGUNAKAN KAMERA BERBASIS
PENGOLAHAN CITRA**

MOCH FIRMAN FIRLANA
NRP. 0921040004

DOSEN PEMBIMBING :
II MUNADHIF, S.ST., M.T.
Dr. Eng MUHAMMAD ANIS MUSTAGHFIRIN, S.ST., M.T.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK OTOMASI
JURUSAN TEKNIK KELISTRIKAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2025

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

OPTIMALISASI SISTEM PENGUKUR TINGGI GELOMBANG AIR PADA WAVE TANK MENGGUNAKAN KAMERA BERBASIS PENGOLAHAN CITRA

Disusun Oleh:
Moch Firman Firlana
0921040004

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi Teknik Otomasi
Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 06 Agustus 2025
Periode Wisuda : Oktober 2025

Menyetujui,

Dosen Penguji

1. Ryan Yudha Adhitya, S.ST., M.T.
2. Dr. Eng. Mohammad Abu Jami'in, S.T., M.T.
3. Ii Munadhif, S.ST., M.T.
4. Zindhu Maulana Ahmad Putra, S.ST., M.Tr.T.

NUPTK

(9948769670130352)
(7862753654130072)
(7042769670130383)
(7255772673130273)

Tanda Tangan

(.....)
(.....)
(.....)
(.....)

Dosen Pembimbing

1. Ii Munadhif, S.ST., M.T.
2. Dr. Eng. Muh. Anis Mustaghfirin, S.T., M.T.

NUPTK

(7042769670130383)
(0137750651130173)

Tanda Tangan

(.....)
(.....)

Menyetujui
Ketua Jurusan,



Isa Rachman, S.T., M.T.
NIP. 198008162008121001

Mengetahui
Koordinator Program Studi,

Agus Khumaidi, S.ST., M.T.
NIP. 199308172020121004

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR BEBAS PLAGIAT

	<u>PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT</u>	No. : F.WD I. 021 Date : 3 Nopember 2015 Rev. : 01 Page : 1 dari 1
---	--	---

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Moch. Firman Firlana

NRP. : 0921040004

Jurusan/Prodi : Teknik Kelistrikan Kapal/D4 Teknik Otomasi

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

**OPTIMALISASI SISTEM PENGUKUR TINGGI GELOMBANG AIR PADA
WAVE TANK MENGGUNAKAN KAMERA BERBASIS PENGOLAHAN CITRA**

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut, maka saya bersedia menerima **sanksi** sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 16 Agustus 2025

Yang membuat pernyataan,



(Moch. Firman Firlana)

NRP. 0921040004

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur ke hadirat Allah SWT, atas rahmat, ridho, dan pertolongan-Nya, penulis dapat menyelesaikan penelitian Tugas Akhir berjudul **“Optimalisasi Sistem Pengukur Tinggi Gelombang Air pada *Wave Tank* Menggunakan Kamera Berbasis Pengolahan Citra”** yang disusun sebagai salah satu syarat kelulusan Program Studi D4 Teknik Otomasi, Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Dalam proses penyusunannya, penulis menghadapi berbagai tantangan dan kendala, serta menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari sempurna dan memiliki kekurangan, sehingga saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan. terselesaikannya penelitian ini tidak terlepas dari dukungan, bantuan, dan nasihat dari berbagai pihak yang telah memberikan semangat dan kontribusi, sehingga pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat, taufik, hidayat, serta pertolongannya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Syaiful dan Ibu Fitria selaku orang tua penulis yang telah rela berkorban memberikan semangat, dukungan, dan bantuan baik materiil maupun moral serta memberikan kepercayaan dan doa yang tiada hentinya untuk kesuksesan penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T. selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
4. Bapak Isa Rachman, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal.
5. Bapak Agus Khumaidi, S.ST., M.T. selaku Koordinator Program Studi Teknik Otomasi.
6. Bapak Ii Munadhif, S.ST., M.T., selaku Dosen Pembimbing I, yang telah memberikan arahan dan masukan demi kelancaran Penelitian Tugas Akhir ini.

7. Bapak Dr. Eng. Muhammad Anis Mustaghfirin, S.ST., M.T., selaku Dosen Pembimbing II, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas kepercayaan yang telah diberikan untuk mengerjakan penelitian terkait *wave maker* atau alat pembuat gelombang, yang merupakan bagian dari proyek berskala besar dalam bidang energi terbarukan berbasis gelombang air laut. Penulis merasa terhormat dapat berkontribusi pada salah satu aspek penting dari penelitian tersebut.
8. Seluruh dosen penguji, terima kasih atas kritik dan masukan berharga yang memperkaya perspektif saya dan mendorong saya untuk menyusun laporan ini dengan lebih baik.
9. Segenap tenaga pendidik Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah membagikan ilmu, administrasi, serta fasilitas yang dapat dimanfaatkan oleh penulis selama 4 tahun perkuliahan dan penelitian Tugas Akhir ini.
10. Teman-teman Teknik Otomasi angkatan 2021, kita memulai perjalanan ini dengan mimpi masing-masing dan kini bersiap melangkah di jalan yang berbeda. Terima kasih atas segala kebersamaan, dinamika perkuliahan, kerja sama dalam kelompok, perjuangan menyelesaikan tugas, serta semangat saling mendukung sepanjang perjalanan ini.

Sebagai penutup, penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih memiliki keterbatasan dan belum sempurna. Meskipun demikian, diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat, menjadi acuan bagi penelitian selanjutnya, serta memberikan kontribusi, meskipun kecil, bagi pengembangan teknologi sistem manajemen baterai dan energi terbarukan di Indonesia.

Surabaya, 06 Agustus 2025

Penulis,

Moch. Firman Firlana

OPTIMALISASI SISTEM PENGUKUR TINGGI GELOMBANG AIR PADA *WAVE TANK* MENGGUNAKAN KAMERA BERBASIS PENGOLAHAN CITRA

Moch. Firman Firlana

ABSTRAK

Pengukuran tinggi gelombang merupakan aspek penting dalam penelitian hidrodinamika, khususnya pada pengujian tangki gelombang. Penelitian ini mengembangkan sistem pengukuran tinggi gelombang berbasis pengolahan citra untuk mendeteksi variasi gelombang secara akurat tanpa mengubah bentuk aslinya. Kamera digunakan sebagai alat utama untuk menangkap data permukaan air, divalidasi menggunakan sensor ultrasonik JSN-SR04T. Pengolahan citra dengan metode *optical flow* terbukti mampu mendeteksi pergerakan dan tinggi gelombang dengan baik selama pencahayaan serta kontras latar belakang terjaga, kecuali pada aperture f/11 yang gagal mendeteksi gelombang. Dari tiga latar belakang (putih, hitam, kuning), diperoleh error 3,57% pada latar putih, 17,86% pada hitam, dan 21,43% pada kuning, sehingga latar putih menjadi yang paling optimal. Perbandingan kamera dengan sensor ultrasonik menghasilkan rata-rata error 33,38%, di mana data kamera lebih mendekati kondisi aktual. Selanjutnya, hasil frame yang diolah dengan FFT, IFFT, dan RMS serta divalidasi mistar menunjukkan rata-rata error 44,92%, dengan error terendah 0,29% dan tertinggi 134,40%. Secara keseluruhan, metode kamera terbukti lebih akurat dan andal dibanding sensor ultrasonik.

Kata Kunci : Kamera, Pengolahan Citra, Gelombang Air, *Optical Flow*, *Wave Tank*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

OPTIMIZATION OF WATER WAVE HEIGHT MEASURING SYSTEM IN WAVE TANK USING IMAGE PROCESSING-BASED CAMERA

Moch. Firman Firlana

ABSTRACT

Wave height measurement is an essential aspect of hydrodynamic studies, particularly in wave tank experiments. This research developed an image-processing-based system to measure wave height accurately without altering the original wave profile. A camera was employed as the main instrument to capture the water surface, validated using the JSN-SR04T ultrasonic sensor. Image processing with the optical flow method proved effective in detecting wave motion and height under sufficient lighting and background contrast, except at aperture $f/11$ where detection failed. Using three backgrounds (white, black, yellow), the error rates obtained were 3.57%, 17.86%, and 21.43%, respectively, with the white background yielding the most optimal results. Comparison between the camera and ultrasonic sensor produced an average error of 33.38%, where the camera data were closer to the actual conditions. Furthermore, frame analysis using FFT, IFFT, and RMS validated by a ruler showed an average error of 44.92%, with the lowest at 0.29% and the highest at 134.40%. Overall, the camera-based method proved more accurate and reliable than the ultrasonic sensor.

Keywords: Camera, Image Processing, Water Wave, Optical Flow, Wave Tank

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR NOTASI.....	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat Tugas Akhir	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Kajian Penelitian Terdahulu.....	5
2.2 Kajian Pustaka.....	13
2.2.1 Representasi Citra Digital	13
2.2.2 Jenis Citra Berdasarkan Warna	14
2.2.3 <i>Gaussian Blur</i>	16
2.2.4 <i>Threshold</i>	16
2.2.5 <i>Region of interest</i>	17
2.2.6 Deteksi kontur	18

2.2.7	Metode <i>Optical Flow</i>	18
2.2.8	Identifikasi Tinggi Gelombang.....	19
2.2.9	Kalibrasi Skala Piksel ke Dimensi Fisik	20
2.3	Tahapan Pengolahan Sinyal Gelombang	20
2.3.1	Ekstraksi 1000 Titik Amplitudo	21
2.3.2	<i>Fast Fourier Transform</i> (FFT)	21
2.3.3	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i> (IFFT)	22
2.3.4	<i>Root Mean Square</i> (RMS)	22
2.4	Perangkat Keras	23
2.4.1	Kamera.....	23
2.4.2	Ultrasonic	24
2.4.3	Motor 3 Phase.....	25
2.4.4	Pompa Air.....	26
2.4.5	<i>Pilot Lamp</i>	27
2.4.6	Selector Swicth	27
2.4.7	PC	28
2.4.8	PLC CP1E	29
2.4.9	ESP 32	30
2.4.10	LM 2596	30
2.5	Software.....	31
2.5.1	Visual Studio Code.....	31
2.5.2	CX Programer.....	31
2.5.3	QT Gui.....	32
2.5.4	Arduino IDE	32
BAB 3	METODE PENELITIAN	33
3.1	Tahapan Penelitian	33

3.2	Konsep Penelitian.....	35
3.3	Analisis Kebutuhan Sistem	39
3.4	Rancangan dan Desain	40
3.4.1	Perencanaan dan Desain Elektrik.....	40
3.4.2	Desain <i>Wave Tank</i>	43
3.4.3	Perencanaan Posisi Kamera Pada <i>Wave Tank</i>	44
3.4.4	Perencanaan Posisi Sensor Ultrasonic Pada <i>Wave Tank</i>	44
3.4.5	Perancangan GUI HMI	45
3.4.6	Desain Schematik Elektrik ESP 32	46
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	47
4.1	Pengujian Sensor dan Aktuator.....	47
4.1.1	Pengujian Kamera Visio Dantum Mars 640-815uc	47
4.1.2	Pengujian Sensor Ultrasonic	48
4.1.3	Pengujian <i>Selector Switch</i> dan <i>Pilot Lamp</i>	51
4.1.4	Pengujian Pompa Air	53
4.1.5	Pengujian Motor 3 Phase	55
4.2	Board PCB ESP 32	56
4.3	Desain GUI HMI.....	58
4.4	Pengujian Sistem Pengukur Tinggi Gelombang Air Pada <i>Wave Tank</i>	59
4.4.1	Pengujian Metode <i>Optical Flow</i>	60
4.4.2	Pengujian kamera dan JSN-SR04T pada <i>wave tank</i>	64
4.4.3	Analisis Visual terhadap Akurasi Kamera dan Sensor Ultrasonik....	77
4.5	Proses Pengolahan Data Per Frame	79
4.6	Hasil Validasi RMS Dengan Mistar.....	82
BAB 5	PENUTUPAN	83
5.1	Kesimpulan	83

5.2	Saran	84
DAFTAR PUSTAKA		85
LAMPIRAN		91
Lampiran 1	Hasil Deteksi Tinggi Gelombang Air Dengan Kamera.....	91
Lampiran 2	Hasil pengolahan sinyal	102
Lampiran 3	Gambar Hasil Proses 9 Hz	111
Lampiran 4	Gambar Hasil Proses 10 Hz	112
Lampiran 5	Gambar Hasil Proses 11 Hz	113
Lampiran 6	Gambar Hasil Proses 12 Hz	114
Lampiran 7	Gambar Hasil Proses 13 Hz	115
Lampiran 8	Biodata Mahasiswa	117

DAFTAR TABEL

Table 2. 1 Kajian Penelitian Terdahulu.....	8
Table 2. 2 Spesifikasi kamera	24
Table 2. 3 Spesifikasi Sensor Ultrasonic	25
Table 2. 4 Spesifikasi Motor 3 phasa	25
Table 2. 5 Spesifikasi Pompa Air.....	26
Table 2. 6 Spesifikasi Komputer atau PC	28
Table 2. 7 Spesifikasi PLC CP1E	29
Tabel 3. 1 Tabel Kebutuhan Sistem	39
Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Sensor Ultrasonic.....	49
Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Sensor Ultrasonic (Lanjutan).....	50
Tabel 4. 3 Hasil Pengujian <i>Selector Switch</i> dan <i>Pilot Lamp</i>	52
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Pompa Air.....	54
Tabel 4. 5 Hasil Motor 3 Phase	56
Tabel 4. 6 Pengujian Metode <i>Optical Flow</i>	60
Tabel 4. 7 Pengujian Metode <i>Optical Flow</i> (Lanjutan)	61
Tabel 4. 8 Pengujian Metode <i>Optical Flow</i> (Lanjutan)	62
Tabel 4. 9 Pengujian Metode <i>Optical Flow</i> (Lanjutan)	63
Tabel 4. 10 Pengujian sistem pada latar belakang hitam dengan frekuensi 9.....	65
Tabel 4. 11 Pengujian sistem pada latar belakang hitam dengan frekuensi 10.....	66
Tabel 4. 12 Pengujian sistem pada latar belakang hitam dengan frekuensi 11	67
Tabel 4. 13 Pengujian sistem pada latar belakang hitam dengan frekuensi 12.....	68
Tabel 4. 14 Pengujian sistem pada latar belakang kuning dengan frekuensi 9.....	69
Tabel 4. 15 Pengujian sistem pada latar belakang kuning dengan frekuensi 10... 70	
Tabel 4. 16 Pengujian sistem pada latar belakang kuning dengan frekuensi 11 ... 71	
Tabel 4. 17 Pengujian sistem pada latar belakang kuning dengan frekuensi 12... 72	
Tabel 4. 18 Pengujian sistem pada latar belakang putih dengan frekuensi 9..... 73	
Tabel 4. 19 Pengujian sistem pada latar belakang putih dengan frekuensi 10..... 74	
Tabel 4. 20 Pengujian sistem pada latar belakang putih dengan frekuensi 11	75
Tabel 4. 21 Pengujian sistem pada latar belakang putih dengan frekuensi 12.....	76
Tabel 4. 22 Persentase kesalahan sistem deteksi	78

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Gambar Koordinat Citra Digital.....	14
Gambar 2. 2 Konfigurasi Nilai <i>Grayscale</i>	14
Gambar 2. 3 Jenis Citra Berdasarkan Warna	15
Gambar 2. 4 Representasi Citra Biner 9×7 Piksel	15
Gambar 2. 5 Gambar hasil <i>Gaussian Blur</i>	16
Gambar 2. 6 Gambar hasil <i>Threshold</i>	17
Gambar 2. 7 ROI pada <i>frame</i>	17
Gambar 2. 8 Contoh ekstraksi latar depan gambar pendeteksian kontur.....	18
Gambar 2. 9 Pola aliran pada <i>optical flow</i>	19
Gambar 2. 10 Kamera Visio Dantum.....	23
Gambar 2. 11 Sensor Ultrasonic JSN-SR04T	24
Gambar 2. 12 Motor 3 Phase	25
Gambar 2. 13 Pompa Air	26
Gambar 2. 14 Pilot Lamp.....	27
Gambar 2. 15 Selector Swicth.....	27
Gambar 2. 16 PC.....	28
Gambar 2. 17 PLC CP1E	29
Gambar 2. 18 ESP 32	30
Gambar 2. 19 Modul LM2596	30
Gambar 3. 1 Tahapan Penelitian	33
Gambar 3. 2 Diagram blok konsep penelitian.....	35
Gambar 3. 3 Diagram Blok Sistem	36
Gambar 3. 4 Flowchart Kerja Sistem Pengolahan Citra	37
Gambar 3. 5 Flowchart Pengujian Sistem.....	38
Gambar 3. 6 Perencanaan Sistem elektrik.....	40
Gambar 3. 7 Desain <i>wave tank</i>	43
Gambar 3. 8 Posisi kamera saat pengukuran	44
Gambar 3. 9 Posisi ultrasonic saat pengukuran	44
Gambar 3. 10 Rencana Desain HMI	45
Gambar 3. 11 Desain Schematik Elektrik ESP 32	46

Gambar 4.1 Hasil Pengujian Kamera	48
Gambar 4.2 <i>Wiring</i> Sensor Ultrasonic.....	49
Gambar 4.3 Pengujian Sensor Ultrasonic.....	51
Gambar 4.4 <i>wiring Selector Switch</i> dan <i>Pilot Lamp</i>	51
Gambar 4.5 Pengujian <i>Selector Switch</i> dan <i>Pilot Lamp</i>	52
Gambar 4.6 <i>Wiring</i> Pompa Air.....	53
Gambar 4.7 Pengujian Pompa Air.....	54
Gambar 4.8 Pengujian Motor 3phase	55
Gambar 4.9 Pengujian Motor 3 Phase	56
Gambar 4.10 Board PCB ESP 32	56
Gambar 4.11 Hasil PCB ESP 32	57
Gambar 4.12 Desain GUI HMI	58
Gambar 4.13 pengukuran pencahayaan pada Lokasi <i>wave tank</i>	59
Gambar 4. 14 Pengujian sistem pada latar belakang hitam dengan frekuensi 9 ...	65
Gambar 4. 15 Pengujian sistem pada latar belakang hitam dengan frekuensi 10 .	66
Gambar 4. 16 Pengujian sistem pada latar belakang hitam dengan frekuensi 11 .	67
Gambar 4. 17 Pengujian sistem pada latar belakang hitam dengan frekuensi 12 .	68
Gambar 4. 18 Pengujian sistem pada latar belakang kuning dengan frekuensi 9 .	69
Gambar 4. 19 Pengujian sistem pada latar belakang kuning dengan frekuensi 10	70
Gambar 4. 20 Pengujian sistem pada latar belakang kuning dengan frekuensi 11	71
Gambar 4. 21 Pengujian sistem pada latar belakang kuning dengan frekuensi 12	72
Gambar 4. 22 Pengujian sistem pada latar belakang putih dengan frekuensi 9	73
Gambar 4. 23 Pengujian sistem pada latar belakang putih dengan frekuensi 10 ..	74
Gambar 4. 24 Pengujian sistem pada latar belakang putih dengan frekuensi 11 ..	75
Gambar 4. 25 Pengujian sistem pada latar belakang putih dengan frekuensi 12 ..	76
Gambar 4. 26 Tahapan Pengolahan Citra untuk Deteksi Gelombang	79
Gambar 4. 27 Hasil Ekstraksi 1.000 Titik Amplitudo dari Satu Frame	80
Gambar 4. 28 Spektrum Frekuensi Hasil FFT dengan Magnitudo Dominan.....	80
Gambar 4. 29 Sinyal Hasil IFFT dengan Nilai RMS sebagai Indikator Tinggi Gelombang Efektif	81

DAFTAR NOTASI

x	: Posisi piksel pada koordinat x
y	: Posisi piksel pada koordinat y
i_x	: Intensitas piksel pada sumbu x.
i_y	: Intensitas piksel pada sumbu y
i_t	: Intensitas piksel berbanding satuan waktu
H	: Tinggi gelombang air yang dihitung sebagai selisih H_{max} dan H_{min}
H_{max}	: Posisi tertinggi permukaan air pada citra.
H_{min}	: Posisi terendah permukaan air pada citra.
d	: Jarak antara kamera dan objek (permukaan air)
H_{real}	: Tinggi gelombang air dalam dimensi fisik.
H_{pixels}	: Jumlah piksel vertikal yang mencakup tinggi gelombang pada citra.
S	: Skala per piksel, perbandingan antara tinggi fisik (H_{real} dan H_{pixels})
$f \Delta$	: resolusi frekuensi (Hz)
f_s	: frekuensi <i>sampling</i> (Hz)
N	: jumlah titik sampel
$x[n]$	: sinyal hasil rekonstruksi di domain waktu
k	: indeks frekuensi
$X[k]$	: spektrum frekuensi
N	: indeks waktu

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi terbarukan kini menjadi perhatian utama dalam upaya mengatasi tantangan perubahan iklim dan memenuhi permintaan energi global yang terus bertambah. Indonesia, dengan melimpahnya sumber daya alam yang dimiliki, bertekad untuk mencapai target *Net Zero Emission* pada tahun 2060. Salah satu langkah penting menuju target ini adalah melalui implementasi energi baru dan terbarukan yang dapat menghasilkan *Green Products*. Dalam konsep *Net Zero* yang dicanangkan, salah satu komponen utamanya adalah *Net Zero Energy*, yang menuntut pengalihan sumber energi berbasis fosil ke energi terbarukan. Saat ini, Indonesia masih mengandalkan energi dari sumber bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara, dan gas alam untuk pembangkitan listrik (Hertadi et al., 2022). Meskipun energi terbarukan memiliki banyak jenis, potensi khusus pada energi terbarukan yang bersumber dari gelombang laut menjadikannya sangat menarik untuk dieksplorasi lebih jauh. Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan sekitar 70% wilayahnya berupa perairan, memiliki keuntungan geografis yang signifikan dalam memanfaatkan energi gelombang. Gelombang laut, yang dihasilkan dari pergerakan angin di atas permukaan laut, dapat diubah menjadi energi listrik menggunakan teknologi modern seperti *Oscillating Water Column* (OWC), turbin, dan generator. Teknologi ini memungkinkan gelombang laut tidak hanya menjadi sumber energi bersih yang berkelanjutan tetapi juga memberikan solusi terhadap ketergantungan energi fosil (Wulansari & Fisika, n.d., 2024).

Oscillating Water Column (OWC) merupakan salah satu teknologi untuk mengubah energi gelombang laut menjadi listrik. Teknologi ini bekerja dengan memanfaatkan gerakan naik turun gelombang air laut yang menggerakkan udara di dalam kolom OWC, hal ini menyebabkan turbin yang terhubung dengan generator berputar dan menghasilkan listrik. Teknologi ini ideal diterapkan di daerah dengan topografi dasar laut yang landai, gelombang laut yang stabil, serta tidak membutuhkan lahan konstruksi yang besar. (Jasron et al., 2022).

Wave maker atau alat pembuat gelombang merupakan salah satu alat yang dirancang untuk mensimulasikan gelombang air dalam skala laboratorium. *wave maker* juga dapat menciptakan gelombang buatan dengan parameter tertentu, seperti tinggi, panjang, dan frekuensi. (Hasil et al., 2019).

Dengan kemajuan teknologi di era modern, kemajuan teknologi kamera telah membawa inovasi signifikan dalam berbagai bidang teknik, dan salah satunya adalah sebagai alat ukur yang akurat dan efisien. Teknologi ini juga merupakan perangkat yang dapat memungkinkan untuk mengukur suatu objek tanpa harus melakukan kontak langsung dengan objek tersebut. dalam percobaan hidrodinamika, teknologi dari kamera mampu mengukur cepat rambat gelombang air. (Redor et al., 2020). Untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi analisis, penggunaan teknologi kamera dalam sistem *wave maker* dapat memberikan data visual secara langsung agar dapat diproses algoritma pengolah citra.

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS), merupakan institusi vokasi unggulan di bidang teknologi maritim. Selain itu, PPNS mulai berperan aktif dalam pengembangan energi terbarukan melalui inovasi teknologi. Salah satu fokusnya adalah pengembangan perangkat *wave maker* yang digunakan untuk simulasi gelombang air sebagai langkah mendukung penelitian energi gelombang laut. Namun, efektivitas penggunaan *wave maker* sangat bergantung pada ketersediaan alat ukur yang mampu mendeteksi tinggi gelombang secara akurat, efisien, dan tanpa mengganggu bentuk asli gelombang. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan merancang sistem alat ukur tinggi gelombang berbasis kamera yang dipasang sejajar horizontal dengan permukaan air dengan memanfaatkan teknologi pengolahan citra. Sistem ini diharapkan tidak hanya meningkatkan akurasi pengukuran tinggi gelombang, tetapi juga mendeteksi variasi ketinggian secara presisi, sehingga dapat mendukung pengembangan *wave maker* di PPNS dan menjadi solusi praktis untuk penelitian di bidang energi terbarukan.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana proses pengolahan citra dapat digunakan untuk mengukur tinggi gelombang dalam *wave tank* secara akurat?

2. Bagaimana efektivitas sensor ultrasonik JSN-SR04T dalam validasi hasil pengukuran tinggi gelombang menggunakan pengolahan citra?
3. Bagaimana integrasi antara pengolahan citra dengan metode *optical flow* dan sensor ultrasonik dapat meningkatkan akurasi pengukuran tinggi gelombang?

1.3 Batasan Masalah

1. Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan *wave tank* dengan kondisi lingkungan yang terkendali.
2. Pengolahan citra menggunakan metode *optical flow* berbasis *OpenCV* dan Python, tanpa membandingkan dengan metode pengolahan citra lainnya.
3. Penelitian ini hanya akan fokus pada pengukuran tinggi gelombang air yang dihasilkan oleh alat pembuat gelombang air.
4. Eksperimen dilakukan dengan kamera statis dan pencahayaan terkendali untuk menghindari variabel eksternal yang dapat mempengaruhi hasil pengolahan citra.

1.4 Tujuan

1. Mengembangkan sistem pengukuran tinggi gelombang berbasis kamera menggunakan metode *optical flow*.
2. Menganalisis akurasi pengukuran tinggi gelombang menggunakan *optical flow* dibandingkan dengan hasil pengukuran sensor ultrasonik JSN-SR04T.
3. Mengevaluasi integrasi *optical flow* dan sensor ultrasonik untuk meningkatkan keakuratan sistem pengukuran tinggi gelombang.

1.5 Manfaat Tugas Akhir

1. Mengembangkan metode pengukuran non-kontak yang lebih akurat dan dapat diandalkan untuk penelitian hidrodinamika.
2. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi pemantauan gelombang dalam skala laboratorium.
3. Mengintegrasikan metode optik dan sensor ultrasonik untuk mendapatkan data yang lebih presisi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Penelitian Terdahulu

Berikut ini adalah tinjauan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh berbagai peneliti terkait dengan Tugas Akhir ini :

1. Penelitian *wave maker* atau alat pembuat gelombang adalah perangkat yang dirancang untuk menghasilkan gelombang air secara buatan dalam skala laboratorium. baik untuk eksperimen laboratorium maupun simulasi perilaku gelombang terhadap struktur laut. Metode numerik dan simulasi telah menjadi bagian penting dalam pengembangan teknologi *wave maker*, seperti yang dikembangkan oleh (B. Sun et al., 2021) Alat ini mampu mensimulasikan berbagai jenis gelombang, dengan parameter seperti tinggi, panjang, amplitude dan frekuensi yang dapat disesuaikan. Dengan teknologi *wave maker* ini, para peneliti dapat mempelajari karakteristik gelombang secara mendalam. Penggunaan *wave maker* sangat penting dalam eksperimen hidrodinamika karena memberikan kontrol penuh terhadap kondisi gelombang, sehingga memungkinkan diperolehnya hasil penelitian yang konsisten dan dapat diulang kembali.
2. Dalam skala laboratorium, *wave maker* juga merupakan perangkat penting dalam eksperimen teknologi energi terbarukan, seperti pembangkit listrik tenaga gelombang laut. Dalam penelitian (Rohmaniatul et al., 2021) telah menunjukkan bahwa sistem *Oscillating Water Column* (OWC) sangat efektif dalam mengubah energi gelombang menjadi listrik. dalam studi ini, motor menggerakkan plat pembangkit gelombang secara maju mundur dan kemudian menghasilkan ombak yang menuju ujung akuarium kemudian menciptakan udara bertekanan di ruang tertutup. Setelah itu, udara ini digunakan untuk memutar turbin yang terhubung ke generator.
3. Penggunaan metode pengolahan citra dalam mendeteksi kecepatan dan ketinggian aliran, seperti metode *optical Flow* Pyramidal Lucas-Kanade dan teknik pendeteksian tepi, telah terbukti andal dalam aplikasi yang membutuhkan akurasi tinggi di lingkungan yang sulit. Metode ini

memungkinkan pengukuran tanpa kontak fisik dengan objek, sehingga aman diterapkan pada aliran berpotensi merusak, seperti aliran lahar dingin. Dengan memanfaatkan pemrosesan video dan teknik segmentasi berbasis *Region of Interest* (ROI), metode ini dapat secara efisien mendeteksi perubahan pada setiap frame video. Keunggulan ini diperkuat dengan pengujian yang menunjukkan simpangan baku rendah (0,033 untuk kecepatan dan 0,035 untuk ketinggian), menandakan presisi yang tinggi. Fadli, R., Syaputra, H., Mirza, H., & Oktaviani, N. (2022).

4. Penggunaan metode pengolahan citra berbasis *OpenCV* dan Python untuk mengukur parameter fisik seperti kecepatan dan posisi objek telah terbukti efektif dalam berbagai aplikasi. Studi yang mengembangkan perangkat lunak untuk mengukur kecepatan bola tenis meja menunjukkan bahwa metode ini dapat menghasilkan data kuantitatif yang akurat, meskipun terdapat batasan dalam menangani dimensi gerakan objek yang kompleks. Metode ini menggunakan algoritma deteksi kontur untuk mengidentifikasi posisi bola, serta konversi koordinat dan jumlah frame untuk menghitung jarak dan waktu tempuh (Mozef & Kurniati, 2022).
5. Berdasarkan penelitian (Amrullah, 2022) dilakukan perbandingan antara tiga sensor ultrasonik, yaitu HC-SR04, HY-SRF05, dan JSN-SR04T, dalam mengukur ketinggian air. Sensor ultrasonik bekerja dengan memancarkan gelombang suara berfrekuensi tinggi dan mengukur waktu yang diperlukan gelombang untuk dipantulkan kembali oleh permukaan air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor JSN-SR04T memiliki keunggulan dalam jangkauan pengukuran yang lebih luas dan ketahanan terhadap lingkungan basah, menjadikannya lebih sesuai untuk aplikasi pemantauan ketinggian air dalam *wave tank*. Dari segi akurasi, meskipun HC-SR04 memiliki rata-rata error terendah 1,03%, namun sensor ini memiliki keterbatasan dalam lingkungan dengan kelembaban tinggi dan tidak tahan air. Sementara itu, JSN-SR04T memiliki tingkat error tertinggi (8,5%) pada beberapa kondisi pengujian, namun keunggulannya terletak pada daya tahannya terhadap lingkungan basah serta kemampuannya bekerja pada jarak yang lebih panjang hingga 6 meter, dibandingkan HC-SR04 yang hanya mencapai 4 meter.

Dengan mempertimbangkan aspek jangkauan dan ketahanan lingkungan, JSN-SR04T tetap menjadi pilihan yang lebih tepat dalam sistem ini, terutama jika dikombinasikan dengan metode pengolahan citra berbasis *optical flow* untuk meningkatkan akurasi. Integrasi antara JSN-SR04T dan *optical flow* memungkinkan sistem untuk mengoreksi kesalahan pengukuran sensor ultrasonik dalam kondisi tertentu, sehingga menghasilkan data yang lebih akurat dan andal dalam mendeteksi tinggi gelombang air.

6. Penelitian ini mengusulkan sistem pengukuran tinggi gelombang air berbasis pengolahan citra dengan kamera, yang memungkinkan deteksi tinggi gelombang tanpa mengganggu bentuk aslinya. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh (Hotmartua Bagariang & Hendrick, 2022) dalam pengembangan alat ukur ketinggian air di landasan pacu pesawat menggunakan kamera dan sensor optik berbasis image processing. Studi tersebut menunjukkan bahwa kamera dapat digunakan sebagai alat ukur yang akurat untuk objek yang bergerak, dengan menerapkan metode deteksi kontur dan *threshold* HSV untuk mengidentifikasi tinggi air secara real-time. Implementasi teknologi ini dalam sistem *wave tank* berpotensi meningkatkan akurasi pemantauan tinggi gelombang, sekaligus memberikan solusi yang lebih praktis dan efisien dibanding metode konvensional. Oleh karena itu, penelitian ini mengadopsi konsep yang serupa, namun dengan fokus pada pengukuran tinggi gelombang menggunakan kamera yang terintegrasi dengan sensor ultrasonik sebagai alat validasi, serta menerapkan metode *optical flow* untuk menganalisis variasi tinggi gelombang secara lebih presisi.
7. Metode *optical flow* telah terbukti efektif dalam mendeteksi pergerakan objek dalam citra digital, seperti yang ditunjukkan dalam penelitian. (Kresna et al., 2021) yang mengembangkan sistem deteksi pergerakan kepala untuk pemilihan menu navigasi bagi penyandang disabilitas. Studi tersebut menunjukkan bahwa *optical flow* memiliki waktu komputasi yang lebih cepat dibanding metode pelacakan objek lainnya, serta mampu mendeteksi pergerakan dengan akurasi tinggi dalam kondisi pencahayaan berbeda. Dalam konteks penelitian ini, metode *Optical Flow* sangat relevan karena mampu

menganalisis pergerakan vertikal permukaan air dalam *wave tank*, yang diperlukan untuk menentukan tinggi gelombang. Keunggulan metode ini dalam melacak perubahan intensitas piksel antar frame tanpa dipengaruhi ukuran objek menjadikannya pilihan yang sesuai untuk mengukur tinggi gelombang air dengan akurasi tinggi dan pemrosesan real-time. Dengan mengadopsi pendekatan ini, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan sistem pengukuran tinggi gelombang berbasis kamera dengan pengolahan citra, serta memastikan akurasi yang lebih baik dibanding metode konvensional.

8. Salah satu parameter utama dalam penelitian ini adalah tinggi gelombang, karena tinggi gelombang pada *wave maker* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi konversi energi dalam sistem *Oscillating Water Column* (OWC). Energi gelombang laut merupakan sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkitan listrik, di mana variasi tinggi gelombang akan menentukan besarnya energi yang dapat dikonversi. Kajian ini berfokus pada analisis dampak tinggi gelombang terhadap performa *Wave Energy Converter* (WEC), khususnya dalam kaitannya dengan penggunaan sistem per atau pegas dengan konstanta tertentu. Dengan memahami hubungan antara tinggi gelombang dan *output* daya yang dihasilkan, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi konversi energi gelombang yang lebih efisien dan optimal untuk aplikasi di perairan Indonesia. (Muhamad Fadhil Faali et al., 2024)

Table 2. 1 Kajian Penelitian Terdahulu

Judul Jurnal	Author & Tahun	Hasil Penelitian	Relevansi dengan Penelitian
A simplified method and numerical simulation for wedge-shaped plunger wave	Bin Sun, Cheng Li, Shaolin Yang, Haijia Zhang	Mengembangkan metode numerik untuk mensimulasikan pembuatan gelombang menggunakan plunger berbentuk baji dengan model CFD	Studi ini relevan karena membahas metode pembangkitan gelombang yang dapat digunakan sebagai referensi dalam sistem pengukuran tinggi gelombang

<i>maker</i>	(2021)	(Fluent). Studi ini membandingkan hasil simulasi dengan solusi analitik serta mengeksplorasi karakteristik gelombang, medan kecepatan, dan lintasan partikel air.	berbasis kamera. Pemahaman tentang karakteristik gelombang yang dihasilkan alat pembuat gelombang ini akan membantu dalam validasi sistem berbasis pengolahan citra.
Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Menggunakan Sistem Oscillating Water Column	Siti Rohmania tul Adafiah, Artdhita Fajar Pratiwi, Saepul Rahmat (2021)	Mengembangkan sistem OWC untuk menghasilkan listrik dari gelombang laut buatan. Sistem ini menggunakan motor power window untuk menciptakan osilasi air yang menghasilkan udara bertekanan guna memutar turbin dan menggerakkan generator. Tegangan maksimum yang dihasilkan adalah 3,03 V DC dan arus 6,07 mA pada ketinggian air 17 cm.	Studi ini relevan karena menunjukkan bagaimana osilasi air dapat dikonversi menjadi energi listrik. Pemahaman tentang osilasi kolom air ini dapat digunakan dalam analisis pengukuran tinggi gelombang berbasis kamera, terutama dalam mengkaji pola osilasi gelombang yang terdeteksi oleh sistem pengolahan citra.
Pemrosesan Video Pendeteksi Kecepatan dan Ketinggian Aliran Lahar Dingin Pendukung Sistem	Lukman Awaludin , Agus Harjoko, Raden Sumiharto (2022)	Mengembangkan sistem pendeteksian kecepatan dan ketinggian aliran lahar dingin berbasis <i>Pyramidal Lucas-Kanade optical flow</i> . Sistem ini menggunakan pengolahan citra untuk mendeteksi perubahan posisi objek secara real-	Relevan karena metode <i>optical flow</i> dapat digunakan dalam penelitian ini untuk mendeteksi variasi tinggi gelombang pada <i>wave tank</i> secara visual. Studi ini memberikan wawasan tentang bagaimana pergerakan fluida dapat dianalisis secara optik,

Peringatan Dini		time. Standar deviasi 0,033 untuk kecepatan dan 0,035 untuk ketinggian, dengan akurasi 74,9%.	mendukung pengembangan sistem pengukuran tinggi gelombang berbasis kamera.
Aplikasi Pengukur Kecepatan Bola pada Video Pertandingan Tennis Meja Menggunakan <i>OpenCV</i> dan Python	Eril Mozef, Siti Kurniati (2022)	Mengembangkan aplikasi berbasis <i>OpenCV</i> dan Python untuk mengukur kecepatan bola dalam video pertandingan tenis meja. Sistem menggunakan metode frame extraction, contour detection, dan ROI tracking untuk mendeteksi lintasan bola dan mengukur kecepatannya dalam rentang 6-295 km/jam.	Studi ini relevan karena menunjukkan bagaimana pengolahan citra berbasis <i>OpenCV</i> dan Python dapat digunakan untuk mengukur parameter dinamis secara otomatis. Teknik frame extraction dan object tracking dapat diterapkan dalam sistem pengukuran tinggi gelombang berbasis kamera dalam penelitian ini.
Perbandingan Tingkat Akurasi Pengukuran Ketinggian Air pada Sensor HC-SR04, HY-SRF05, dan JSN-SR04T	Agit Amrullah (2022)	- Sensor JSN-SR04T memiliki jangkauan lebih luas (hingga 6 meter) dibandingkan HC-SR04 (4 meter). - Rata-rata error pengukuran HC-SR04 adalah 1,03%, sementara JSN-SR04T memiliki error tertinggi 8,5%. - Sensor HC-SR04 lebih akurat dalam kondisi ideal tetapi tidak tahan air. \n- JSN-SR04T lebih cocok untuk lingkungan basah meskipun memiliki error lebih tinggi.	Studi ini relevan karena membahas penggunaan sensor ultrasonik untuk pengukuran ketinggian air, yang menjadi bagian dari sistem validasi dalam penelitian ini. Sensor JSN-SR04T dipilih karena lebih tahan terhadap lingkungan basah dan memiliki performa lebih baik dalam pengukuran tinggi gelombang pada <i>wave tank</i> .

Alat Pengukur Ketinggian Air Pada Landasan Pacu Pesawat dengan metode Image Processing	Ivan Finiel Hotmartua Bagariang, Hendrick, Ifni Joi (2021)	Sistem pengukuran tinggi genangan air di landasan pacu pesawat dengan metode image processing dan sensor optik. Kamera digunakan untuk mendeteksi pelampung internal, sementara hasil pengukuran ditampilkan secara real-time melalui VNC Viewer.	- Membuktikan bahwa kamera dapat digunakan sebagai alat ukur untuk objek yang bergerak. - Menunjukkan keunggulan metode image processing dalam mendeteksi ketinggian air secara real-time. - Pendekatan ini dapat diadaptasi dalam pengukuran tinggi gelombang pada <i>wave tank</i> menggunakan teknik <i>optical flow</i> untuk meningkatkan akurasi. - Penggunaan sensor tambahan (optik/ultrasonik) sebagai validasi juga menjadi konsep yang relevan untuk penelitian ini.
Implementasi metode <i>optical flow</i> untuk Pemilihan Menu Display pada Rancang Bangun Sistem Deteksi Pergerakan Kepala	Nyoman Kresna Aditya Wiraatma ja, Fitri Utaminigrum (2021)	Mengembangkan sistem navigasi berbasis deteksi pergerakan kepala menggunakan <i>optical flow</i> . Hasil pengujian menunjukkan akurasi 94.6% dalam pencahayaan redup dan 98.6% dalam pencahayaan terang, dengan waktu komputasi rata-rata 2.43 detik.	- Menunjukkan bahwa <i>optical flow</i> dapat digunakan untuk mendeteksi dan menganalisis pergerakan objek secara akurat, yang relevan dengan penelitian ini dalam mengukur tinggi gelombang air pada <i>wave tank</i>. - Membuktikan bahwa metode ini memiliki respon real-time dan tingkat akurasi tinggi, sehingga cocok untuk sistem pengukuran berbasis kamera. - Dapat diterapkan dalam

			penelitian ini untuk menganalisis perubahan tinggi gelombang air dari frame ke frame secara efisien.
Analysis of the effect of a spring constant of 980 N/m on a <i>wave energy</i> converter device due to heaving	Muhamad Fadhil Faali, Dimas Suharto, Agung Dwi Prasetya, Abdul Hamid, Subekti (2024)	Hubungan antara konstanta pegas 980 N/m dengan tinggi gelombang terhadap <i>output</i> daya WEC diuji. Dengan planetary system, daya maksimal mencapai 698 W pada tinggi gelombang 0.35 m, sedangkan tanpa planetary hanya 0.0795 W.	Relevan dalam aspek analisis tinggi gelombang terhadap performa WEC. Data ini dapat menjadi dasar dalam memahami parameter yang mempengaruhi efisiensi sistem OWC dalam <i>wave maker</i> .

Berdasarkan penelitian diatas, Pengembangan teknologi energi terbarukan seperti pembangkit listrik tenaga gelombang laut telah menjadi fokus penelitian dalam upaya mencari sumber energi yang berkelanjutan. *Wave maker*, sebagai perangkat yang dirancang untuk menghasilkan gelombang air secara buatan, memainkan peran penting dalam mendukung penelitian terkait. Dengan menggunakan *wave maker*, para peneliti dapat mensimulasikan berbagai jenis gelombang dengan parameter yang dapat disesuaikan. Hal ini menjadikan *wave maker* alat yang sangat berguna untuk eksperimen teknologi energi terbarukan. Dalam konteks penelitian gelombang air untuk kebutuhan energi terbarukan, kamera merupakan alat ukur yang ideal untuk mengukur ketinggian gelombang. Sistem berbasis kamera tidak hanya memberikan akurasi tinggi dalam mengukur parameter gelombang, tetapi juga tidak mengganggu atau mengubah keaslian bentuk gelombang itu sendiri. Hal ini memungkinkan pengamatan karakteristik gelombang yang lebih alami dan detail. Penulis terinspirasi untuk membuat alat pengukur ketinggian gelombang air berbasis pengolah citra dengan metode

optical flow yang mampu mendeteksi variasi ketinggian gelombang secara akurat tanpa mengganggu keaslian bentuk gelombang air pada *wave tank*.

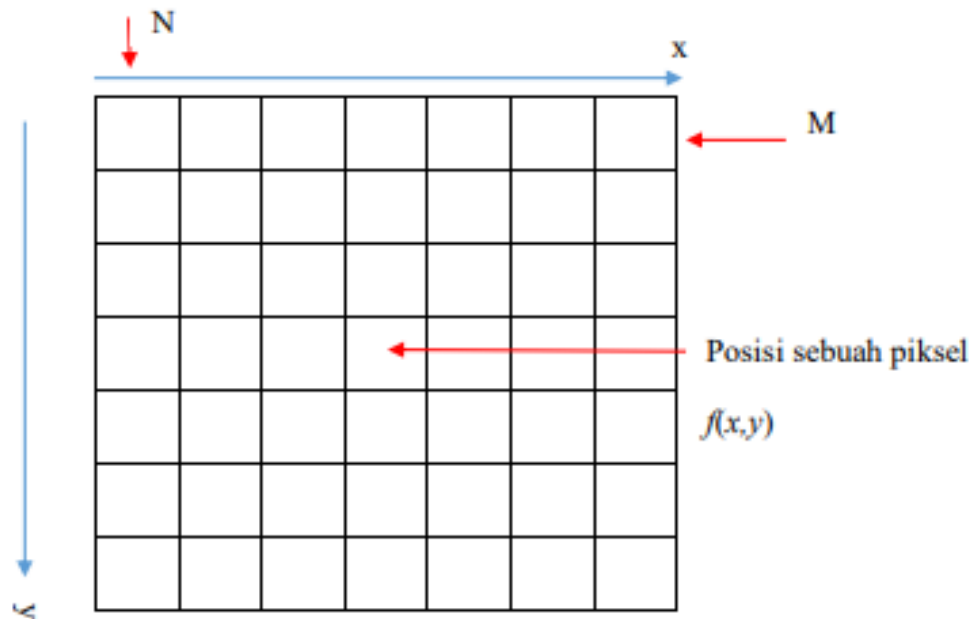
2.2 Kajian Pustaka

Bagian ini menjelaskan teori yang mendasari penelitian, termasuk rincian tentang penelitian yang akan dilakukan, metode yang diterapkan, serta perangkat keras yang digunakan dalam Tugas Akhir ini.

2.2.1 Representasi Citra Digital

Citra merupakan representasi gambar pada bidang dua dimensi yang merepresentasikan sebuah objek. Gambar dapat berbentuk analog atau digital, tergantung pada *output* sistem perekaman yang menggunakan metode fotografi. Sinyal citra analog umumnya terdapat pada layar televisi atau sinyal video, sedangkan citra digital memiliki keunggulan berupa kemampuan untuk disimpan dan ditransfer melalui berbagai media penyimpanan. Secara matematis, citra dapat didefinisikan sebagai distribusi intensitas cahaya yang terus menerus pada bidang dua dimensi, yang memantulkan bentuk objek dan kemudian ditangkap oleh alat optik seperti kamera atau mata manusia.

Citra dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu citra diam (gambar diam) dan citra bergerak (gambar bergerak). Citra diam merupakan gambar tunggal tanpa adanya pergerakan atau tidak bergerak, sedangkan citra bergerak terdiri dari rangkaian citra diam yang ditampilkan secara berurutan (sekuensial), menciptakan ilusi gerakan di mata manusia. Setiap gambar dalam rangkaian disebut sebagai frame. Secara umum, gambar-gambar yang ditampilkan pada film layar lebar atau televisi terdiri dari ratusan hingga ribuan frame citra digital diperoleh melalui proses akuisisi menggunakan sensor optik. Setelah akuisisi, citra digital membentuk bidang dua dimensi dengan koordinat (x,y) . Intensitas cahaya yang diterima sensor di setiap titik (x,y) dilambangkan dengan $f(x,y)$ di mana nilainya bergantung pada intensitas cahaya yang dipantulkan oleh objek. (Surya Saruman & Eka Susilawati, n.d., 2021).



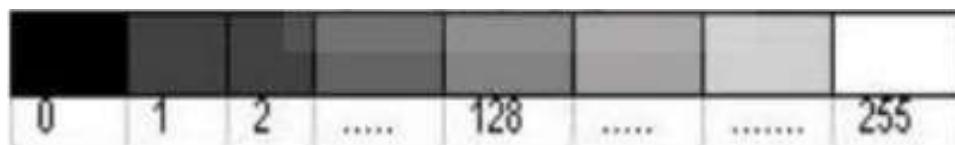
Gambar 2. 1 Gambar Koordinat Citra Digital
Budyanto, A. (2020).

2.2.2 Jenis Citra Berdasarkan Warna

Menurut (Faradilla et al., 2022) citra digital adalah data dalam bentuk dua dimensi yang memuat informasi mengenai intensitas warna. Citra digital terdiri dari *pixel-pixel* yang berukuran kecil dan membentuk sebuah gambar yang dapat dilihat oleh mata manusia. Jumlah piksel dalam sebuah gambar dikenal sebagai resolusi. Berikut adalah berbagai jenis citra digital:

1. Citra *Grayscale*

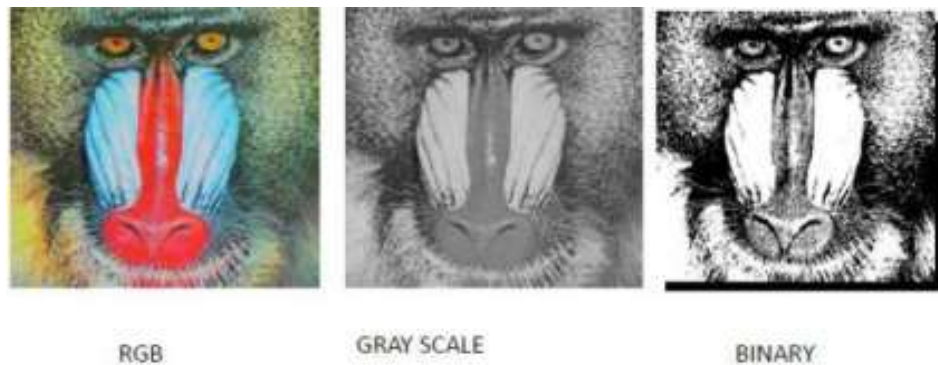
Citra *Grayscale* merupakan gambar yang terdiri dari 256 tingkatan keabuan. Biasanya, warna yang ditampilkan berkisar dari hitam sebagai nilai minimum hingga putih sebagai nilai maksimum, dengan gradasi abu-abu di antara keduanya.



Gambar 2. 2 Konfigurasi Nilai *Grayscale*
Budyanto, A. (2020).

2. Citra RGB

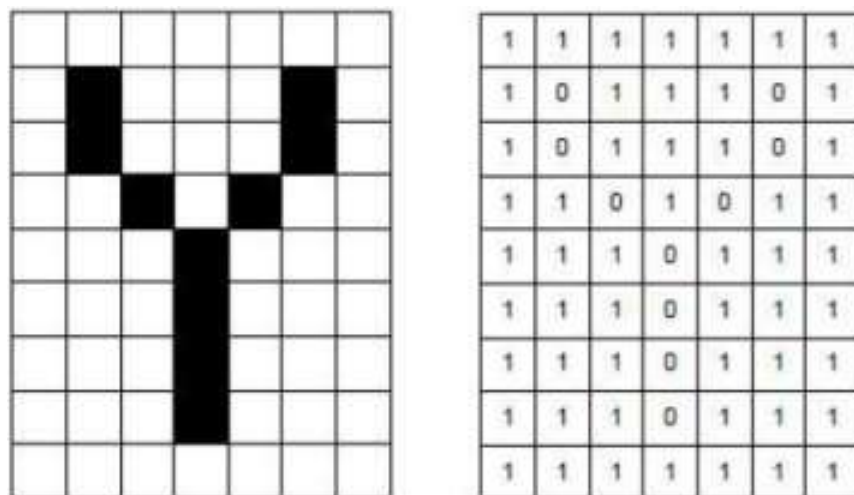
Citra RGB atau citra berwarna adalah gambar yang menampilkan warna berdasarkan tiga komponen utama yaitu R (*red*), G (*green*) dan B (*blue*). Setiap komponen warna memiliki intensitas yang bervariasi hingga nilai maksimum 255 (8 bit). Oleh karena itu, jumlah kombinasi warna yang dapat dihasilkan mencapai $255 \times 255 \times 255$ atau sebanyak 16.581.275 warna.



Gambar 2. 3 Jenis Citra Berdasarkan Warna
Budiyanto, A. (2020).

3. Citra Biner

Citra Biner adalah jenis citra yang hanya memiliki 2 warna, yaitu hitam dan putih. Dalam citra ini setiap *pixel* bernilai 0 dan 1. Nilai 0 diberikan untuk *pixel* dengan tingkat keabuan yang lebih rendah dari nilai batas yang ditentukan, atau mewakili warna hitam. Sebaliknya, nilai 1 diberikan pada *pixel* dengan tingkat keabuan yang lebih besar atau menyatakan warna putih.

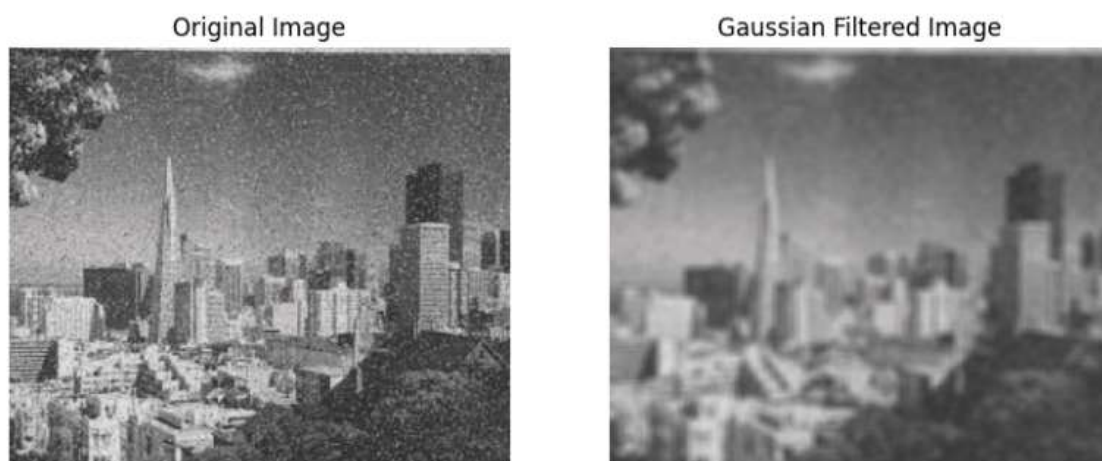


Gambar 2. 4 Representasi Citra Biner 9×7 Piksel
Budiyanto, A. (2020).

2.2.3 *Gaussian Blur*

Gaussian Blur adalah salah satu metode pra-pemrosesan citra yang digunakan untuk mengurangi noise dan detail halus dalam gambar. Metode ini bekerja dengan menerapkan filter Gaussian yang menghasilkan efek blur dengan distribusi normal, sehingga setiap piksel pada citra baru merupakan hasil rata-rata tertimbang dari piksel di sekitarnya.

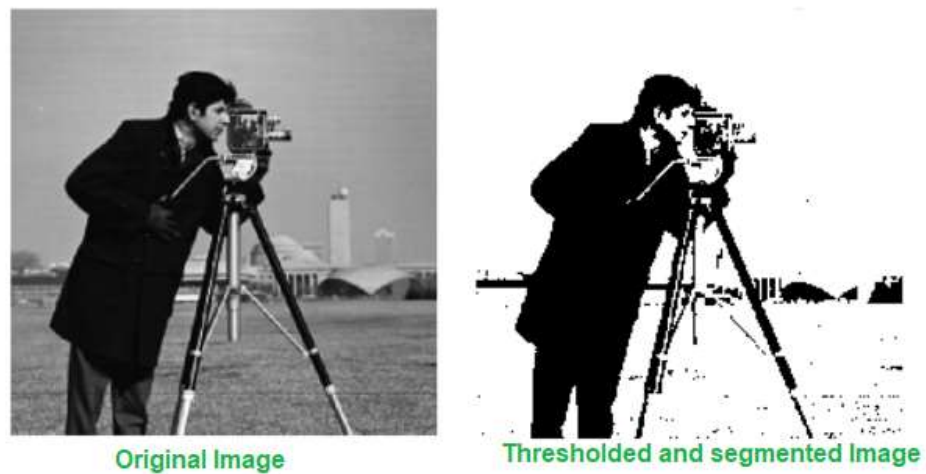
Dalam penelitian (Zikra et al., 2024) ,*Gaussian Blur* digunakan untuk menyaring noise sebelum proses ekstraksi fitur dilakukan dalam sistem deteksi objek berbasis visi komputer. Penggunaan *Gaussian Blur* terbukti mampu meningkatkan akurasi deteksi objek dengan menyederhanakan fitur-fitur pada citra dan meminimalkan gangguan yang tidak relevan.



Gambar 2. 5 Gambar hasil *Gaussian Blur*
<https://www.askpython.com/>

2.2.4 *Threshold*

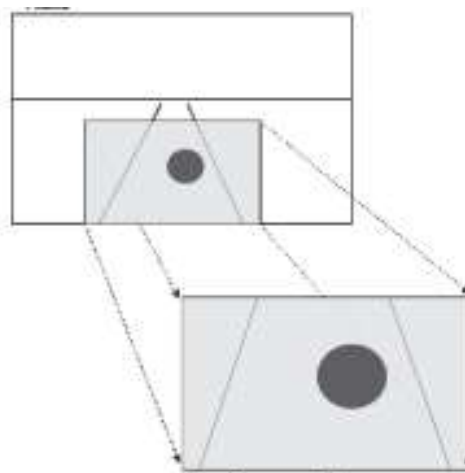
Threshold adalah teknik dalam pengolahan citra yang bertujuan untuk menyortir piksel dengan mempertahankan sebagian di antaranya, sehingga mempermudah proses penentuan tepi (edge) pada sebuah citra. Metode *threshold* mempermudah dalam proses mengidentifikasi antara dua atau lebih citra. Dalam penggunaannya, diperlukan nilai ambang keabuan yang sudah ditetapkan sebelumnya. Warna putih umumnya digunakan sebagai latar depan, sedangkan warna hitam berfungsi sebagai latar belakang. (Habibah et al., n.d., 2021) .



Gambar 2. 6 Gambar hasil *Threshold*
www.geeksforgeeks.org

2.2.5 *Region of interest*

Region of Interest (ROI) merupakan salah satu teknik dalam pengolahan citra yang digunakan untuk menandai atau membatasi area tertentu dari citra digital. Dengan ROI, hanya area yang dianggap relevan atau penting yang akan diproses, sedangkan bagian lain diabaikan (Pratomo et al., 2020). Dalam penelitian ini ROI adalah solusi yang efektif untuk mempercepat waktu pencatatan dan meningkatkan akurasi sistem deteksi gelombang air. Dengan hanya memproses bagian penting dari citra, ROI mengurangi beban komputasi, mempercepat waktu respon, dan menghasilkan data yang lebih akurat.



Gambar 2. 7 ROI pada *frame*
 (Pratomo et al., 2020)

2.2.6 Deteksi kontur

Deteksi kontur adalah kumpulan piksel tepi yang membentuk batas suatu area atau wilayah, yang dikenal sebagai kontur. Proses ini menghasilkan citra tepi dalam bentuk citra biner, di mana piksel yang berada di tepi berwarna putih, sementara piksel yang bukan tepi berwarna hitam. Namun, citra tepi belum memberikan informasi yang bermanfaat karena belum ada hubungan antara satu tepi dengan tepi lainnya. Karena itu, citra tepi perlu diproses lebih lanjut untuk menghasilkan informasi yang lebih signifikan, seperti mendeteksi bentuk-bentuk sederhana (garis lurus, lingkaran, elips, dan lain-lain) dalam analisis citra (Enggari et al., 2022).

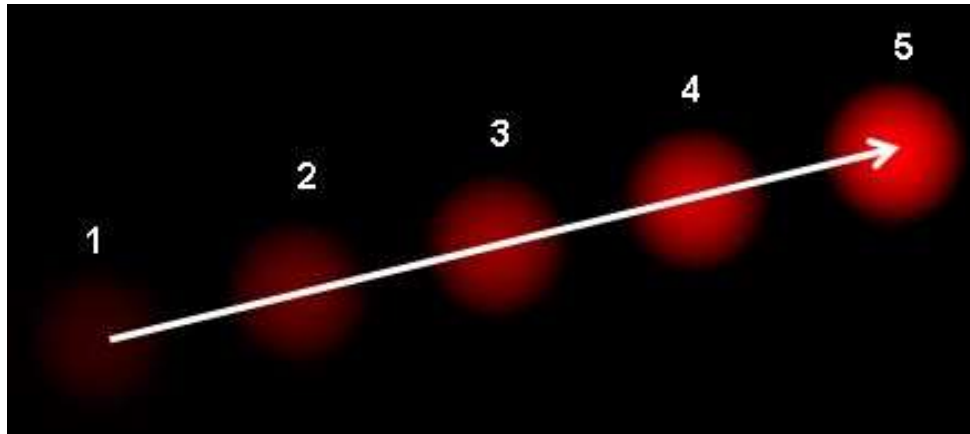


Gambar 2. 8 Contoh ekstraksi latar depan gambar pendeteksian kontur
OpenCV Contour Detection

2.2.7 Metode *Optical Flow*

Optical flow adalah metode untuk mendeteksi pergerakan objek dalam rangkaian citra secara berurutan. Hal ini bergantung pada perubahan intensitas cahaya di setiap frame dalam sebuah rekaman video. Perubahan intensitas cahaya tersebut dapat dipengaruhi oleh pergeseran sudut pandang akibat pergerakan kamera, perpindahan objek dari satu posisi ke posisi lainnya, atau perubahan lokasi sumber cahaya yang diamati. Pada koordinat 2 dimensi, dinyatakan sebagai jarak yang dicapai oleh sebuah piksel citra antara dua frame berurutan. Sementara itu, pada koordinat tiga dimensi, menggambarkan sejauh mana sebuah volume piksel

(*voxel*) bergerak di antara dua volume berturut-turut. Perubahan intensitas cahaya pada suatu bagian citra bisa terjadi akibat pergerakan objek, perubahan posisi sumber cahaya, atau pergeseran sudut pandang. Dalam implementasinya, *optical flow* digunakan sebagai pengenalan struktur gerakan dan penyeimbang video. (Zulfajri Syaharuddin et al., n.d., 2023).



Gambar 2. 9 Pola aliran pada *optical flow*
(Kresna et al., 2021)

Dalam penerapannya, seperti yang terlihat pada Persamaan 2.1, *optical flow* mendeteksi nilai konstan dari citra yang bergerak di suatu bidang berdasarkan turunan intensitas cahaya.

$$I(x, y, t) = I(x + dx, y + dy, t + dt) \quad (2.1)$$

Rumus tersebut menyatakan bahwa intensitas cahaya pada tiap koordinat titik (x, y) dan waktu (t) sama dengan intensitas cahaya pada titik yang berpindah ($x+dx, y+dy$) di waktu ($t+dt$) Dengan kata lain, meskipun objek berpindah posisi, intensitas pikselnya tidak berubah. Dengan demikian, *optical flow* digunakan untuk mendeteksi pergerakan objek.

2.2.8 Identifikasi Tinggi Gelombang

Untuk menentukan ketinggian gelombang air pada *wave tank* dapat dihitung dengan mencari posisi terendah pada permukaan air (H_{min}) dan mencari posisi tertinggi pada permukaan air (H_{max}) Dalam citra video, posisi (H_{max}) dan (H_{min})

ditentukan dengan memanfaatkan *optical flow* untuk mendeteksi gerakan vertikal piksel pada permukaan air. Matematis, tinggi gelombang dapat dihitung sebagai:

$$H = H_{max} - H_{min} \quad (2.2)$$

2.2.9 Kalibrasi Skala Piksel ke Dimensi Fisik

Untuk mengonversi hasil deteksi puncak dan dasar gelombang dalam satuan piksel ke dimensi fisik (cm atau mm), dilakukan kalibrasi antara dimensi nyata dan dimensi citra. Jika jarak kamera ke objek adalah d dan tinggi yang terlihat dalam gambar mencakup H_{real} , maka skala per piksel (S) dapat dihitung sebagai :

$$S = \frac{H_{real}}{H_{pixels}} \quad (2.3)$$

Dimana H_{real} merupakan tinggi fisik H_{pixels} jumlah piksel vertikal dalam citra, dan selanjutnya tinggi gelombang fisik dihitung dengan:

$$H_{real} = H_{pixels} \times S \quad (2.4)$$

2.3 Tahapan Pengolahan Sinyal Gelombang

Dalam penelitian ini, pemilihan empat tahapan utama, yaitu ekstraksi titik amplitudo, *Fast Fourier Transform* (FFT), *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT), dan *Root Mean Square* (RMS), didasarkan pada kebutuhan untuk memperoleh analisis sinyal gelombang yang komprehensif, akurat, dan representatif. Ekstraksi titik amplitudo diperlukan untuk mengubah sinyal kontinu hasil pengukuran menjadi data diskrit dengan resolusi tertentu sehingga siap dianalisis secara numerik. FFT dipilih karena kemampuannya memisahkan sinyal menjadi komponen-komponen frekuensi, memungkinkan identifikasi frekuensi dominan dan distribusi energi gelombang. IFFT digunakan untuk mengembalikan sinyal dari domain frekuensi ke domain waktu setelah dilakukan pemrosesan, sehingga efek dari *filtering* atau modifikasi spektrum dapat dievaluasi. Sementara itu, RMS diterapkan untuk menghitung nilai efektif amplitudo sebagai indikator energi rata-rata gelombang. Keempat tahapan ini saling melengkapi, memberikan perspektif

domain waktu dan frekuensi sekaligus, serta memastikan interpretasi data yang lebih tepat dalam konteks pengukuran tinggi gelombang berbasis pengolahan citra.

2.3.1 Ekstraksi 1000 Titik Amplitudo

Ekstraksi titik amplitudo merupakan tahap awal dalam proses pengolahan sinyal digital yang bertujuan untuk memperoleh representasi diskrit dari sinyal kontinu. Proses ini dilakukan melalui *sampling* dengan laju tertentu sesuai Teorema Nyquist–Shannon, yaitu frekuensi *sampling* minimal dua kali frekuensi tertinggi sinyal. Dalam penelitian ini, sinyal hasil pengukuran diekstraksi menjadi 1000 titik amplitudo per segmen pengamatan, sehingga diperoleh representasi sinyal diskrit $x[n]$ dengan resolusi temporal yang memadai untuk analisis frekuensi.

Pemilihan jumlah titik *sampling* yang konsisten (misalnya 1000 titik) tidak hanya mempermudah proses komputasi FFT, tetapi juga memastikan resolusi frekuensi yang seragam pada setiap segmen analisis. ($\Delta f = \frac{f_s}{N}$) di mana f_s adalah frekuensi *sampling* dan N jumlah titik sampel. Studi oleh (Liu et al., 2022) menunjukkan bahwa penentuan jumlah sampel yang konsisten meningkatkan akurasi estimasi spektrum pada analisis gelombang air (*wave signal processing*).

2.3.2 Fast Fourier Transform (FFT)

Fast Fourier Transform (FFT) adalah algoritma komputasi untuk menghitung *Discrete Fourier Transform* (DFT) secara efisien dengan kompleksitas $O(N \log N)$, di mana N adalah jumlah sampel sinyal. Transformasi ini digunakan untuk mengubah representasi sinyal dari domain waktu menjadi domain frekuensi sehingga komponen frekuensi dominan dapat diidentifikasi.

Secara matematis, DFT didefinisikan sebagai:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn} \quad (2.5)$$

FFT banyak digunakan dalam analisis spektrum gelombang laut karena kemampuannya mengekstrak amplitudo dan fase dari setiap komponen harmonik secara cepat. Penelitian oleh (Z. Sun et al., 2023) membuktikan bahwa FFT mampu mengidentifikasi puncak spektrum signifikan untuk estimasi tinggi gelombang signifikan (*significant wave height*) secara akurat.

2.3.3 Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)

Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) adalah operasi kebalikan dari FFT yang mengubah sinyal dari domain frekuensi kembali ke domain waktu. Fungsi ini bermanfaat untuk merekonstruksi sinyal asli setelah dilakukan modifikasi atau penyaringan pada domain frekuensi.

Rumus IFFT dinyatakan sebagai:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi}{N} kn} \quad (2.6)$$

Dalam konteks penelitian ini, IFFT dapat digunakan untuk mengembalikan sinyal hasil *filtering* pada domain frekuensi menjadi sinyal waktu yang telah tereduksi derau (*noise*). Studi oleh (Thakur et al., 2022) menunjukkan bahwa penerapan IFFT setelah *spectral filtering* meningkatkan rasio *signal-to-noise* (SNR) secara signifikan pada pengukuran gelombang berbasis pengolahan citra.

2.3.4 Root Mean Square (RMS)

Nilai *Root Mean Square* (RMS) adalah ukuran statistik yang merepresentasikan akar rata-rata kuadrat dari amplitudo sinyal. Nilai RMS digunakan untuk mengukur energi rata-rata sinyal dan sangat relevan untuk mengestimasi besaran fisik yang berhubungan dengan daya atau intensitas gelombang. Secara matematis, nilai RMS untuk sinyal diskrit $x[n]$ dengan panjang N didefinisikan sebagai:

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2[n]} \quad (2.7)$$

Pada pengukuran gelombang air, RMS digunakan untuk menentukan energi gelombang rata-rata yang berhubungan langsung dengan parameter seperti *significant wave height*. Penelitian oleh (Zaini et al., 2021) menunjukkan bahwa metode RMS berbasis data amplitudo hasil FFT memberikan estimasi tinggi gelombang yang lebih stabil pada kondisi perairan dengan derau tinggi.

2.4 Perangkat Keras

Dalam pelaksanaan tugas akhir ini, terdapat sejumlah perangkat keras yang digunakan untuk mendukung seluruh proses pengujian dan pengambilan data. Beberapa di antaranya meliputi:

2.4.1 Kamera

Kamera DANTUM Mars640-815UM merupakan kamera industrial vision yang dirancang untuk aplikasi pemrosesan citra berkecepatan tinggi. Kamera ini memiliki resolusi 640×512 piksel dengan kecepatan hingga 815 fps, serta menggunakan *Global Shutter CMOS* untuk menghindari distorsi akibat pergerakan cepat. Keunggulan ini menjadikannya ideal untuk pengukuran tinggi gelombang air, di mana perubahan bentuk gelombang harus dideteksi secara presisi dan real-time. Selain itu, kamera ini kompatibel dengan berbagai perangkat lunak pengolahan citra seperti *OpenCV* yang mendukung penerapan metode *thresholding*, *optical flow*, dan deteksi kontur dalam sistem pengukuran non-kontak. Dalam penelitian terkait, penggunaan kamera vision dalam pengukuran gelombang air telah dikaji dalam studi "*Computer Vision Applied to Wave Flume Measurements*" yang menunjukkan bahwa visi komputer mampu menangkap karakteristik gelombang secara akurat dalam skala laboratorium. (Iglesias et al., 2009)



Gambar 2. 10 Kamera Visio Dantum
www.alibaba.com

Table 2. 2 Spesifikasi kamera

No	Spesifikasi	Spesifikasi
1.	Model	Mars640-815UM
2.	Tipe Kamera	Industrial Vision Camera
3.	Resolusi	640 × 512 piksel
4.	Frame Rate (FPS)	Hingga 815 fps
5.	Sumber Daya	5V (USB) atau PoE (Power over Ethernet)
6.	Kompatibel	- Windows 10, 11 - <i>OpenCV</i>

2.4.2 Ultrasonic

JSN-SR04T adalah sensor ultrasonik yang merupakan versi pengembangan dari HC-SR04, dengan keunggulan tahan air dan kemampuan pengukuran hingga 500 cm. Sensor ini dirancang agar aman digunakan di lingkungan berair tanpa risiko korsleting listrik, asalkan tidak ditempatkan terlalu dalam. Sensor JSN-SR04T dilengkapi dengan kabel bawaan sepanjang 2,5 meter yang menghubungkannya ke modul, serta mendukung tegangan operasi 3-5 Volt untuk pemrosesan sinyal. Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip pemantulan gelombang suara, di mana sensor memancarkan gelombang ultrasonik yang akan dipantulkan oleh objek, kemudian pantulan tersebut diterima kembali oleh sensor untuk mengukur jarak (Hasna et al., 2022).



Gambar 2. 11 Sensor Ultrasonic JSN-SR04T
bahamas.desertcart.com

Table 2. 3 Spesifikasi Sensor Ultrasonic

No	Spesifikasi	Spesifikasi
1.	Model	JSN-SR04T
2.	Jenis Sensor	Ultrasonik (Tahan Air)
3.	Rentang Pengukuran	25 cm hingga 500 cm
4.	Tegangan Operasi	3V – 5V
5.	Arus Operasi	≤ 8 mA
6.	Frekuensi Ultrasonik	40 kHz

2.4.3 Motor 3 Phase

Motor listrik yang umum digunakan di pabrik sebagai penggerak adalah motor induksi tiga fasa, karena motor jenis ini memiliki konstruksi yang sangat sederhana, sehingga mudah dalam perawatan dan perbaikannya. Motor induksi adalah motor arus bolak-balik (AC) yang paling sering digunakan. Nama motor ini berasal dari karakteristiknya, yaitu arus pada rotor tidak berasal dari sumber eksternal, melainkan terinduksi akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dan medan magnet berputar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus pada stator. (Gautama et al., 2024). Dalam penelitian ini motor 3 phase digunakan untuk menggerakkan *plunger wave maker*.



Gambar 2. 12 Motor 3 Phase
inverterdrive.com

Table 2. 4 Spesifikasi Motor 3 phasa

No	Spesifikasi	Spesifikasi
1.	Daya	10 HP/7,5 Kw
2.	Speed	1500 RPM
3.	Jumlah Pole	4 Pole
4.	Tegangan	380 V
5.	Power Faktor	0,85

2.4.4 Pompa Air

Pompa air merupakan komponen utama dalam sistem sirkulasi dan pengisian tangki air. Untuk mengatur kinerjanya secara efisien, sering digunakan sistem PWM (*Pulse Width Modulation*) yang mampu mengatur aliran dan tekanan air melalui kontrol kecepatan motor. PWM bekerja dengan mengubah sinyal DC tetap menjadi sinyal pulsa berfrekuensi, di mana perubahan frekuensi dan duty cycle berpengaruh langsung terhadap kecepatan motor dan laju aliran air, terutama saat terjadi variasi beban hidrolik. Berdasarkan hal tersebut, tulisan ini membahas pengaruh variasi duty cycle dan frekuensi terhadap performa pompa air yang dikendalikan oleh sistem PWM menggunakan rangkaian DC Chopper. Rangkaian ini berfungsi sebagai konverter tegangan DC ke DC yang dapat diatur, sehingga memungkinkan kontrol presisi terhadap motor penggerak pompa. Sistem ini dirancang untuk mengisi *wave tank* dengan volume air yang terkontrol secara akurat, guna menunjang stabilitas dan efisiensi proses pengujian tinggi gelombang air.



Gambar 2. 13 Pompa Air
nbkomputer.com

Table 2. 5 Spesifikasi Pompa Air

No	Spesifikasi	Spesifikasi
1.	Jenis Pompa	Pompa Sentrifugal 3 Fasa
2.	Daya Listrik	750W - 2.200W (1HP - 3HP)
3.	Kapasitas Aliran	Kapasitas Aliran
4.	Tekanan Maksimum	4 - 6 bar
5.	Voltase	380V (3 Fasa)

2.4.5 Pilot Lamp

Lampu pilot adalah komponen penting yang memberikan tanda visual tentang status atau kondisi perangkat. Biasanya kecil dan dipasang dekat kontrol utama, lampu ini menyala saat perangkat dihidupkan, menandakan bahwa sistem aktif. Selain sebagai penunjuk daya, lampu pilot juga menunjukkan proses koneksi, status operasi, dan potensi bahaya. Lampu ini banyak digunakan dalam berbagai bidang seperti kelistrikan, telekomunikasi, mesin, perkapalan, tekstil, percetakan, dan pertambangan. (Widiastuti, 2023).



Gambar 2. 14 Pilot Lamp
electroncart.in

2.4.6 Selector Swicth

Selector switch adalah perangkat dengan beberapa posisi pengaturan, umumnya terdiri dari tiga mode: Manual, Off, dan Auto. Saklar ini memungkinkan pengguna memilih mode operasi sesuai kebutuhan. Pada posisi Manual, mesin dikendalikan langsung oleh operator; pada posisi Auto, sistem berjalan otomatis sesuai logika kontrol; sedangkan posisi Off mematikan sistem sepenuhnya. Meski tampak sederhana, saklar ini penting untuk fleksibilitas dan keamanan operasi di lingkungan industri. (Nursoparisa, 2019)



Gambar 2. 15 Selector Swicth
electroncart.in

2.4.7 PC

Komputer merupakan perangkat teknologi yang memberikan kemudahan bagi penggunaanya dalam menyelesaikan berbagai pekerjaan, baik untuk pembelajaran maupun aktivitas lainnya. terdiri dari tiga komponen utama, yaitu perangkat keras, perangkat lunak, dan pengguna. Ketiga komponen ini saling terkait, dan jika salah satu mengalami masalah, proses kerja komputer tidak akan berjalan dengan baik. Perangkat keras mencakup komponen fisik seperti CPU, memori, perangkat *input*, perangkat *output*, dan media penyimpanan. CPU berfungsi sebagai pusat pengolahan data, Sementara itu, perangkat *input* seperti keyboard dan mouse memungkinkan pengguna untuk memberikan masukan data. Perangkat *output* seperti monitor dan printer menampilkan hasil proses komputer. Dengan perkembangan teknologi, komputer semakin menjadi alat penting dalam mendukung aktivitas manusia, terutama di era digital saat ini Barokah, A., Anti, D. V., & Pratama, R. (2021).



Gambar 2. 16 PC
www.animalia-life.club

Table 2. 6 Spesifikasi Komputer atau PC

No	Spesifikasi	Spesifikasi
1.	Procesor	intel core i7 12700F
2.	Motherboard	MSI H610
3.	Ram	32gb ddr4
4.	SSD	VENOM 256gb
5.	Hdd	seagate 2tb
6.	Vga	nvidia gt 610 2GB

2.4.8 PLC CP1E

Programmable Logic Controller (PLC) adalah perangkat elektronik yang berfungsi sebagai pusat kendali dalam otomasi industri, menggantikan kontrol relai konvensional. PLC menerima input dari sensor, memprosesnya sesuai program, dan mengendalikan output seperti motor atau katup. Terdiri dari CPU, memori, dan modul I/O, PLC mampu mengatur waktu dan urutan kerja. Sistemnya bisa besar untuk otomasi pabrik atau kecil untuk kontrol mesin. Fungsi utamanya meliputi menerima sinyal, memproses logika kontrol, dan berkomunikasi dengan perangkat eksternal seperti HMI. Keunggulan PLC adalah fleksibilitas pemrograman ulang, memungkinkan penyesuaian tanpa mengganti perangkat keras, sehingga menjadi komponen penting dalam otomasi industri modern. (Hidayat Kurniawan et al., 2024).



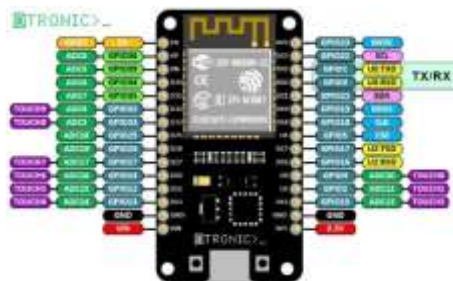
Gambar 2. 17 PLC CP1E
monotaro

Table 2. 7 Spesifikasi PLC CP1E

No	Spesifikasi	Spesifikasi
1.	Model	CP1E
2.	Catu daya	24VDC/100-240VAC
3.	Rentang tegangan operasi	20,4 hingga 26,4 VDC
4.	Data memori	8kb hingga 16 kb
5.	Jumlah I/O Maksimum	Hingga 180 I/O dengan modul tambahan

2.4.9 ESP 32

ESP32 adalah modul mikrokontroler SoC dari Espressif Systems dengan fitur utama Wi-Fi, Bluetooth, dan prosesor dual-core Tensilica LX6 hingga 240 MHz. Modul ini populer untuk pengembangan IoT karena mendukung berbagai antarmuka seperti GPIO, ADC, DAC, PWM, SPI, I2C, dan UART. ESP32 juga efisien daya, cocok untuk aplikasi monitoring dan kendali otomatis jangka panjang. Dengan dukungan pemrograman melalui Arduino IDE, ESP32 memudahkan integrasi dengan sensor, aktuator, dan komunikasi jarak jauh, menjadikannya pilihan fleksibel dan hemat biaya untuk berbagai aplikasi industri dan akademik. (Aghenta & Iqbal, 2019)



Gambar 2. 18 ESP 32
<https://www.otronic.nl/>

2.4.10 LM 2596

Modul LM2596 adalah regulator buck DC-DC yang efisien untuk menurunkan tegangan input ke output yang lebih rendah dan stabil. Modul ini mendukung arus hingga 3A dengan efisiensi tinggi, cocok untuk aplikasi catu daya yang membutuhkan pengaturan tegangan yang presisi dan konsumsi daya rendah. Modul ini banyak digunakan dalam proyek elektronik dan sistem tertanam karena mudah digunakan, dapat disesuaikan dengan potensiometer, serta tahan terhadap panas dan gangguan listrik.



Gambar 2. 19 Modul LM2596
<https://shop.stemplabs.edu.lk/>

2.5 Software

Software atau perangkat lunak adalah komponen digital komputer yang berisi data dan program untuk menjalankan berbagai fungsi. Berbeda dengan perangkat keras yang fisik, software tidak berwujud fisik namun penting untuk mengoperasikan komputer. Contohnya sistem operasi seperti Windows atau Linux. Software berperan mengolah data, menjalankan perintah, serta menghubungkan pengguna dengan perangkat keras. Di era digital, penguasaan software menjadi keterampilan penting untuk mendukung efisiensi kerja dan belajar. (Fauzi et al., 2022).

2.5.1 Visual Studio Code

Visual Studio Code (VS Code) adalah editor kode sumber yang ringan dan multifungsi, mendukung berbagai bahasa pemrograman. Dikembangkan oleh Microsoft, VS Code tersedia secara gratis dan kompatibel dengan sistem operasi Windows, macOS, dan Linux. Fitur utama VS Code meliputi editor teks yang kaya fitur, terminal terintegrasi, manajemen file, serta dukungan ekstensif melalui ekstensi. Selain itu, VS Code memiliki integrasi Git dan berbagai alat pengembangan yang memudahkan proses coding dan debugging.

2.5.2 CX Programmer

CX-Programmer adalah perangkat lunak dari Omron untuk pemrograman dan konfigurasi PLC. Bagian dari suite CX-One, software ini mendukung pengembangan sistem otomasi dengan memungkinkan pengguna membuat, menguji, dan memodifikasi program PLC menggunakan berbagai bahasa pemrograman seperti Ladder Diagram (LD) dan Structured Text (ST). CX-Programmer memudahkan proses pemrograman, pengujian, dan pemeliharaan sistem kontrol otomatis pada berbagai tipe PLC Omron. (Yudha Hartawan & Galina, 2022).

2.5.3 QT Gui

Qt adalah framework lintas platform untuk mengembangkan aplikasi perangkat lunak dan antarmuka grafis (GUI). Dikembangkan oleh Qt Company, Qt memungkinkan pembuatan aplikasi untuk Windows, macOS, Linux, Android, dan iOS dengan satu kode sumber. Dalam otomatisasi sistem, Qt menyediakan pustaka seperti Qt Serial Port untuk komunikasi perangkat melalui port serial, dan Qt Network untuk protokol jaringan TCP/IP. Fitur ini menjadikan Qt pilihan tepat untuk solusi otomatisasi yang mengintegrasikan perangkat lunak dan perangkat keras. (Nabijonovich & Najmaddin, 2024)

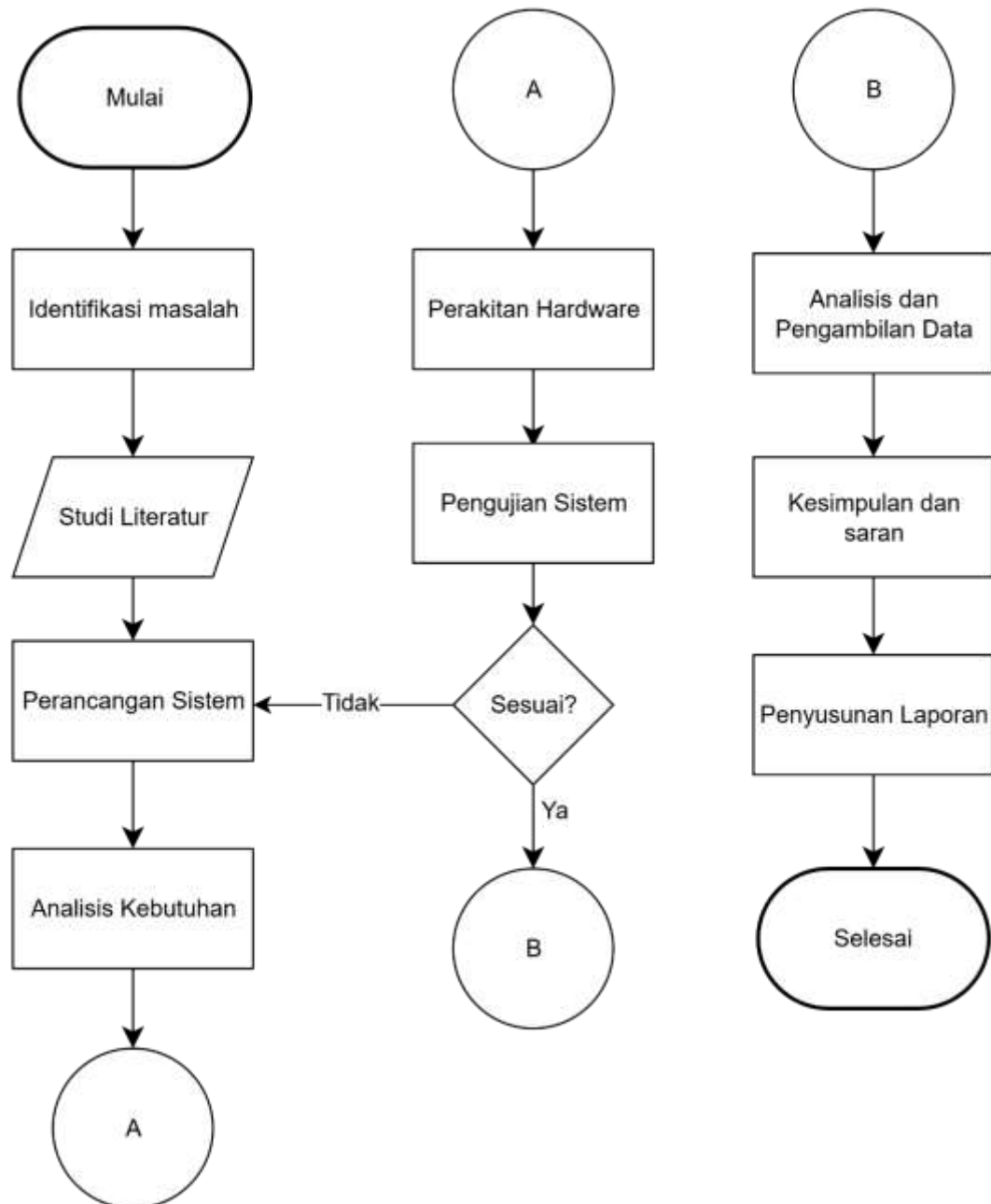
2.5.4 Arduino IDE

Arduino IDE adalah perangkat lunak open-source yang memudahkan pemrograman mikrokontroler seperti Arduino UNO dan ESP32. Dengan antarmuka sederhana, pengguna dapat menulis, mengompilasi, dan mengunggah kode C/C++. Untuk ESP32, Arduino IDE menyediakan Board Support Package (BSP) yang memungkinkan akses fitur seperti Wi-Fi, Bluetooth, dan komunikasi lainnya. Karena kemudahan ini, Arduino IDE populer untuk prototipe dan aplikasi IoT di akademik maupun industri. Menurut (Aghenta & Iqbal, 2019), penggunaan Arduino IDE pada sistem monitoring lingkungan berbasis ESP32 terbukti efisien, terutama dalam integrasi protokol MQTT.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian



Gambar 3. 1 Tahapan Penelitian
Dokumen penulis

Gambar 3.1 menjelaskan, tahapan yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian ini. Langkah pertama adalah mengidentifikasi masalah berdasarkan

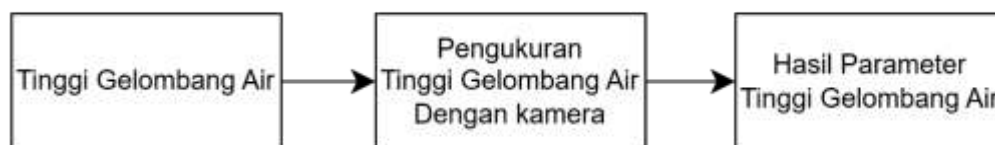
kebutuhan otomatisasi pada suatu sistem atau alat, yang telah dijelaskan dalam BAB 1. Selanjutnya, dilakukan pencarian literatur yang relevan secara sistematis sebagaimana dijelaskan pada BAB 2. Setelah itu, dilakukan perancangan sistem dan analisis kebutuhan yang diperlukan untuk pengembangan sistem. Proses ini dilanjutkan dengan merancang perangkat keras sesuai kebutuhan sistem, diikuti dengan perancangan mekanik untuk mendukung penelitian. Kemudian, dilakukan perancangan perangkat lunak untuk melakukan simulasi guna memperoleh pemrograman yang akurat dan formula yang sesuai untuk diterapkan pada sistem. Tahapan berikutnya adalah implementasi dan pengujian untuk memastikan sistem berfungsi dengan baik. Hasil dari pengujian tersebut akan dianalisis secara detail dan disajikan dalam laporan Tugas Akhir.

1. Identifikasi masalah dalam penelitian ini muncul ketika *wave maker* yang digunakan untuk simulasi gelombang air di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS), sangat bergantung pada alat ukur yang mampu mendeteksi tinggi gelombang secara akurat, efisien, dan tanpa mengganggu bentuk keaslian gelombang air. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem alat ukur tinggi gelombang berbasis kamera yang dipasang sejajar horizontal dengan permukaan air dengan memanfaatkan teknologi pengolahan citra.
2. Studi literatur pada penelitian ini berfokus kepada kajian terhadap penelitian alat ukur tinggi gelombang yang menggunakan kamera, dengan menggunakan pengolahan citra dan metode *optical flow* sebagai proses untuk mengukur tinggi gelombang air pada *wave tank*.
3. Perancangan sistem dalam penelitian ini dilakukan melalui analisis kebutuhan berdasarkan permasalahan yang ada dan dirancang sebagai solusi utama. Hal ini menjadi landasan penting yang mendasari penelitian ini sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya.
4. Analisis kebutuhan sistem dalam penelitian ini bertujuan untuk merencanakan dan menentukan komponen yang tepat sesuai dengan kebutuhan perancangan sistem.
5. Perancangan perangkat keras dilakukan untuk merencanakan proses perakitan berdasarkan komponen yang telah ditetapkan melalui analisis kebutuhan sistem.

6. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian sistem yang telah diimplementasikan dengan perancangan sistem yang telah dirancang sebelumnya.
7. Analisis sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam mencapai tujuan penelitian, serta untuk memberikan solusi terhadap permasalahan yang diangkat.

3.2 Konsep Penelitian

Konsep penelitian ini menjadi dasar utama yang digunakan oleh penulis dalam menyelesaikan tugas akhir yang sedang dikerjakan. Penelitian ini fokus pada optimalisasi sistem untuk mengukur tinggi gelombang air di tangki gelombang dengan memanfaatkan kamera berbasis teknik pengolahan citra.



Gambar 3. 2 Diagram blok konsep penelitian
Dokumen penulis

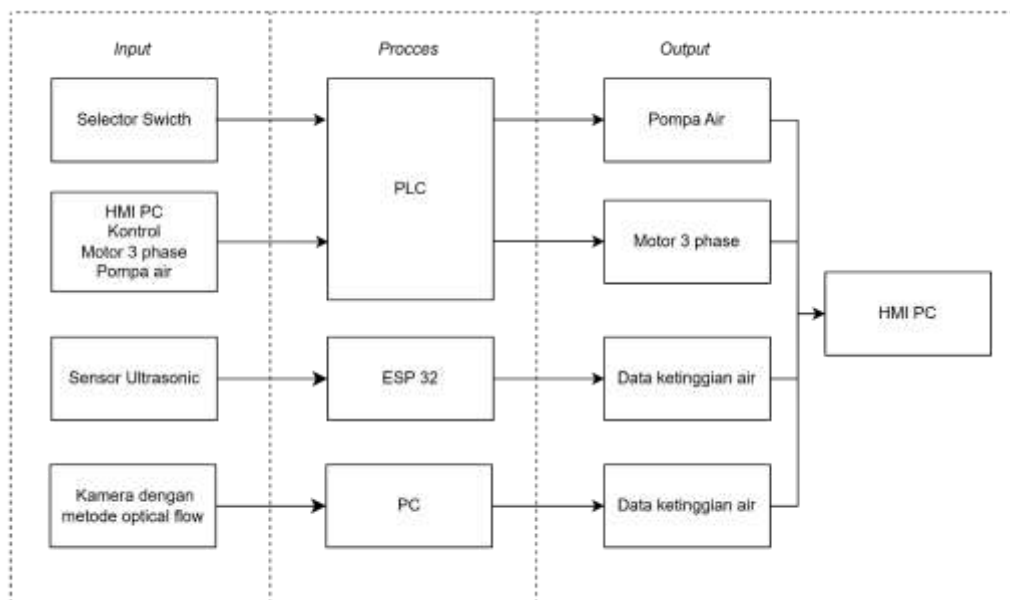
Gambar 3.2 adalah mengambil permasalahan dari *wave maker* yang di selesaikan dengan mengimplementasikan kamera sebagai alat ukur ketinggian gelombang air dengan metode *optical flow* tanpa mengganggu keaslian bentuk gelombang air.

Pengembangan teknologi energi terbarukan, seperti pembangkit listrik tenaga gelombang laut, menjadi fokus penting dalam mencari solusi energi berkelanjutan. *Wave maker*, sebagai perangkat penghasil gelombang buatan, memainkan peran kunci dalam penelitian ini dengan kemampuannya mensimulasikan berbagai jenis gelombang melalui parameter yang dapat disesuaikan. Kamera sebagai alat ukur telah terbukti efektif dalam mengukur ketinggian gelombang tanpa mengganggu keaslian bentuknya, memungkinkan pengamatan yang lebih alami dan akurat terhadap karakteristik gelombang air. (Redor et al., 2020) Hal ini menjadikan kombinasi *wave maker* dan teknologi berbasis kamera sebagai pendukung utama dalam eksperimen hidrodinamika dan energi terbarukan.

Penulis terinspirasi untuk mengembangkan alat pengukur ketinggian

gelombang berbasis pengolahan citra menggunakan metode *optical flow*, yang mampu mendeteksi variasi ketinggian gelombang secara akurat tanpa mengganggu bentuk aslinya. Dengan alat ini, penulis berharap dapat mendukung penelitian di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS) pada pengembangan *wave maker* untuk energi terbarukan. Selain itu, inovasi ini diharapkan dapat membantu kelanjutan penelitian terkait pembangkit listrik tenaga gelombang air, sehingga memberikan kontribusi nyata bagi kemajuan teknologi energi terbarukan.

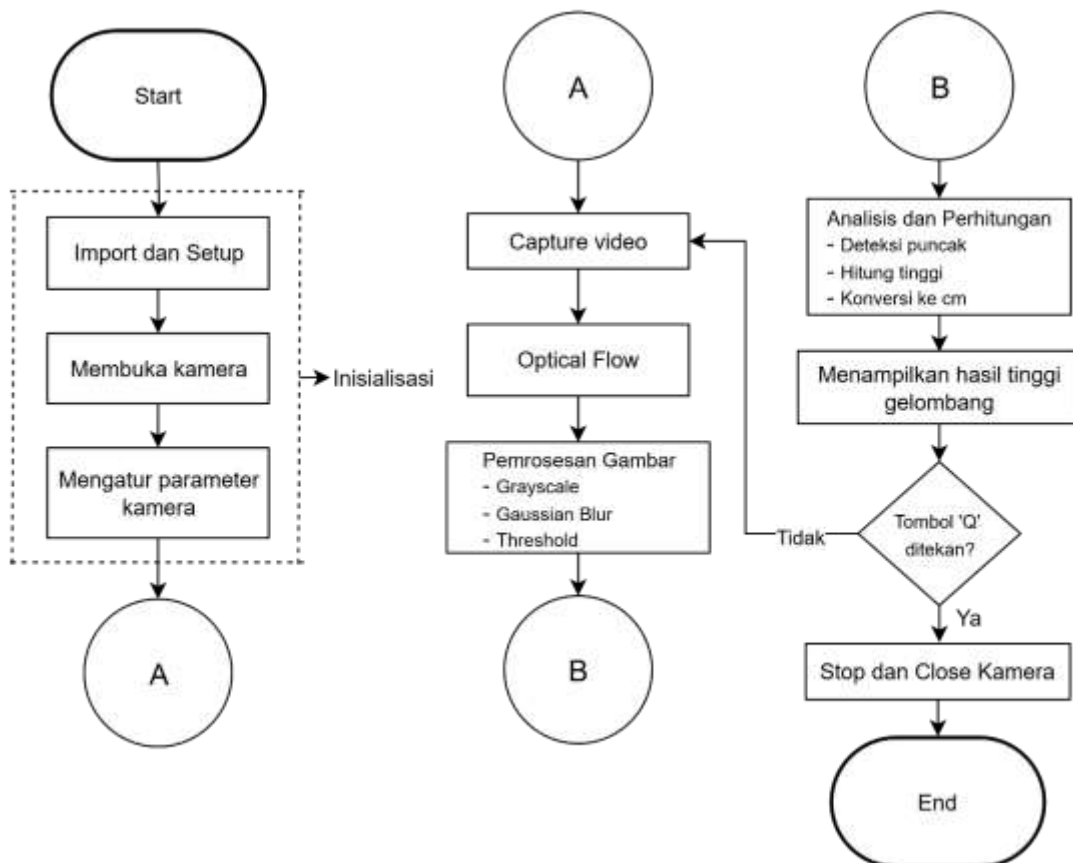
Prinsip kerja sistem menggambarkan gambaran secara umum mengenai cara kerja sistem yang akan di rancang.



Gambar 3. 3 Diagram Blok Sistem
Dokumen penulis

Gambar 3.3 diagram blok sistem menunjukkan arsitektur pemantauan ketinggian gelombang air yang mengintegrasikan PLC (Programmable Logic Controller), ESP32, dan PC. PLC berfungsi sebagai pusat kendali utama untuk mengatur operasi pompa air dan motor 3 phase, berdasarkan input dari selector switch serta kontrol melalui HMI PC. Untuk proses pengisian *wave tank*, PLC mengaktifkan pompa air, sedangkan motor 3 phase digunakan untuk membangkitkan gelombang. Sensor ultrasonik yang terhubung ke ESP32 mengukur ketinggian air secara real-time dan mengirimkan data ke PC untuk dianalisis. Selain itu, kamera dengan metode *optical flow* mendeteksi ketinggian

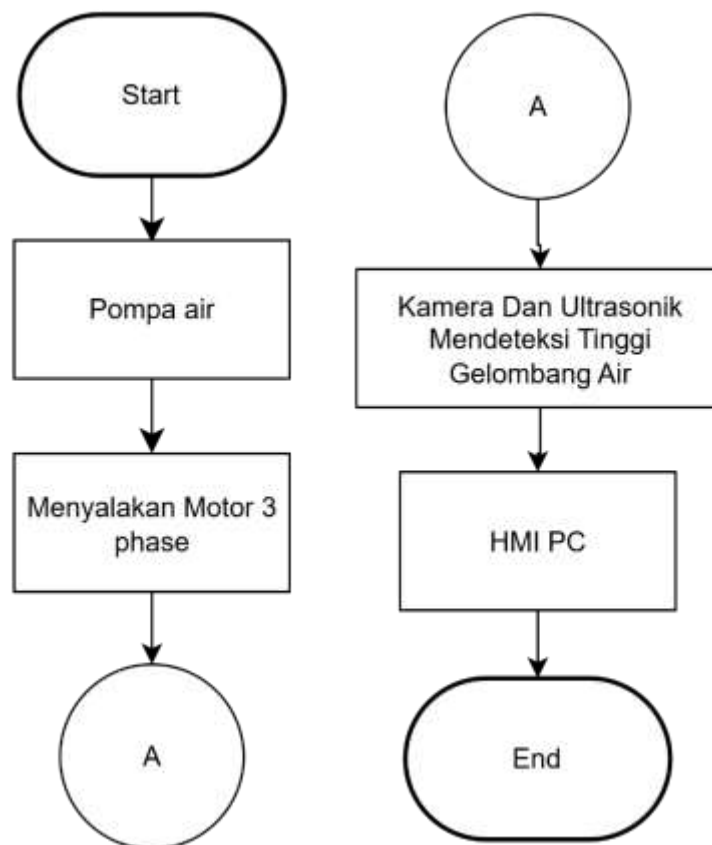
gelombang secara visual dan juga mengirimkan datanya ke PC untuk pengolahan lebih lanjut. Data ketinggian air dari kedua sumber tersebut ditampilkan melalui HMI PC, sehingga pengguna dapat memantau kondisi secara real-time. Sistem ini dirancang agar bekerja secara terintegrasi dan efisien untuk mendukung pemantauan dan pengendalian gelombang air secara akurat.



Gambar 3. 4 Flowchart Kerja Sistem Pengolahan Citra
Dokumen penulis

Flowchart pada gambar 3.4 menggambarkan alur sistem deteksi tinggi gelombang air secara real-time menggunakan kamera industri. Proses dimulai dengan Start, lalu masuk ke tahap import dan setup perangkat lunak dan pustaka, diikuti dengan pembukaan kamera dan pengaturan parameter kamera seperti eksposur dan format piksel. Setelah itu, sistem masuk ke blok A yang terdiri dari tiga tahap utama: video capture (ambil frame dari kamera), *optical flow* untuk mendeteksi arah pergerakan air, dan pemrosesan gambar menggunakan teknik grayscale, *Gaussian blur*, dan thresholding. Proses ini berlanjut ke blok B, yaitu analisis dan perhitungan, meliputi deteksi puncak gelombang, penghitungan tinggi

gelombang dari dasar ke puncak, serta konversi dari piksel ke satuan sentimeter berdasarkan hasil kalibrasi. Hasil tinggi gelombang kemudian ditampilkan secara visual. Sistem kemudian mengecek apakah tombol Q ditekan. jika tidak, sistem kembali ke proses capture frame (loop), dan jika ya, maka kamera akan dihentikan dan ditutup, lalu sistem masuk ke tahap akhir yaitu End. Alur ini menggambarkan proses iteratif yang berjalan secara real-time dengan loop pengolahan video yang terus berlangsung hingga dihentikan oleh pengguna.



Gambar 3. 5 Flowchart Pengujian Sistem
Dokumen penulis

Flowchart pada gambar 3.5 menunjukkan alur proses pengujian sistem deteksi tinggi gelombang air. Proses dimulai dari tahap awal Start, kemudian sistem mengaktifkan pompa air untuk mengisi *wave tank* sebagai media pembangkit gelombang. Setelah itu, motor 3 fasa dinyalakan untuk menghasilkan gelombang pada permukaan air. Selanjutnya, sistem berpindah ke bagian A, yaitu tahap pengukuran, di mana kamera dan sensor ultrasonik digunakan untuk mendeteksi tinggi gelombang air secara real-time. Hasil pengukuran ini kemudian ditampilkan

dan dipantau melalui HMI (*Human-Machine Interface*) pada PC. Setelah semua proses selesai dilakukan dan data berhasil ditampilkan. Pengujian selesai Flowchart ini mencerminkan integrasi antara proses mekanik (pompa dan motor), sistem sensorik (kamera dan ultrasonik), serta tampilan hasil melalui HMI, sebagai satu rangkaian sistem uji.

3.3 Analisis Kebutuhan Sistem

Analisis kebutuhan sistem merupakan tahap penting untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi segala kebutuhan yang harus dipenuhi oleh sistem agar dapat berfungsi dengan baik. Berikutnya, daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini akan dirinci lebih lanjut untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai kebutuhan sistem.

Tabel 3. 1 Tabel Kebutuhan Sistem

NO	Kebutuhan	Komponen	Jumlah
1.	Kebutuhan Proses	PLC Omron CP1E	1
		Personal Computer	1
		ESP 32	1
2	Kebutuhan <i>Input</i>	Kamera	1
		Ultrasonic	1
		<i>Selector Swicth</i>	1
3.	Kebutuhan <i>output</i>	Motor 3 Phase	1
		Pompa air	1
		<i>Pilot lamp</i>	1
4.	Kebutuhan tambahan komponen	Relay	1
		Kontaktor	1
		VFD	1
		Power Suplay	1

3.4 Rancangan dan Desain

Untuk membangun sistem yang ingin dibuat, perlu dilakukan perencanaan dan desain dari sistem tersebut. Perencanaan dan desain sistem meliputi tata letak kamera dan rangkaian elektriknya.

3.4.1 Perencanaan dan Desain Elektrik



Gambar 3. 6 Perencanaan Sistem elektrik
Dokumen Pribadi

Gambar 3.6 menunjukkan diagram sistem otomasi industri yang melibatkan berbagai perangkat kontrol, aktuator, dan sensor yang berinteraksi dengan Programmable Logic Controller (PLC). Berikut adalah penjelasan fungsional dari setiap komponen dalam gambar:

1. PLC (Programmable Logic Controller)

PLC berperan sebagai pusat kendali utama dalam sistem otomasi ini. PLC yang digunakan memiliki port komunikasi RS232, digital input/output, serta analog input. Fungsinya adalah untuk menerima sinyal dari perangkat input seperti sensor, memproses logika kendali, lalu mengaktifkan perangkat output seperti motor, relay, dan lampu indikator. PLC ini tidak mendukung koneksi USB langsung, sehingga integrasi dilakukan melalui modul tambahan untuk komunikasi jaringan.

2. PC/Komputer

PC digunakan sebagai alat pemrograman dan antarmuka pemantauan sistem. Terhubung ke PLC melalui Ethernet (dengan bantuan modul CP1W-CIF41), PC berfungsi untuk mengunggah program ke PLC, menjalankan sistem image

processing dari kamera, dan menampilkan hasil analisis tinggi gelombang secara real-time.

3. Kamera Industri

Kamera ini digunakan untuk mendeteksi tinggi gelombang air dalam *wave tank* secara visual. Terhubung langsung ke PC via USB, kamera ini mendukung akurasi tinggi dalam pengukuran dan menjadi bagian dari sistem image processing.

4. *Selector Switch* (Saklar Putar)

Berfungsi sebagai saklar untuk mengaktifkan atau menonaktifkan pompa air. Saklar ini terhubung ke input PLC dan digunakan untuk mengendalikan logika start/stop sistem.

5. Lampu Indikator

Memberikan informasi visual mengenai status sistem, seperti apakah mesin sedang berjalan, berhenti, atau terjadi kesalahan.

6. Sensor Ultrasonik

Digunakan untuk mengukur tinggi gelombang air secara non-kontak. Sensor ini terhubung langsung ke mikrokontroler ESP32 sebagai kontroler untuk mengelolah data dari sensor ultrasonik.

7. Relay

Untuk mengendalikan perangkat dengan daya tinggi, sistem ini dilengkapi dengan relay, yang terkoneksi ke PLC melalui digital output. Relay ini memungkinkan PLC mengontrol perangkat eksternal dengan daya yang lebih besar, seperti aktuator atau motor listrik.

8. Kontaktor

digunakan sebagai pengendali daya utama untuk motor atau perangkat listrik lainnya. Kontaktor ini bekerja dengan sinyal dari relay dan terhubung melalui kontak bantu relay, sehingga sistem dapat mengontrol daya listrik ke beban besar dengan lebih aman dan efisien.

9. Pompa

Digunakan untuk mengisi air pada *wave tank*. Pompa ini dikendalikan oleh PLC berdasarkan input dari sensor atau program yang dijalankan.

10. VFD

Agar motor dapat dikontrol dengan fleksibel, digunakan VFD (*Variable Frequency Drive*) yang terkoneksi dengan PLC melalui RS232. VFD memungkinkan sistem untuk mengatur kecepatan dan torsi motor secara otomatis, sehingga konsumsi energi lebih efisien dan sistem dapat bekerja dengan presisi tinggi sesuai dengan parameter yang ditentukan dalam program PLC.

11. Motor Listrik

Motor yang digunakan dalam sistem ini adalah motor listrik 3 fasa, yang dihubungkan ke *Variable Frequency Drive* (VFD) melalui koneksi listrik 3 fasa (R, S, T). Motor ini digunakan untuk menggerakkan mekanisme utama dalam proses, dengan kecepatan yang dapat disesuaikan sesuai kebutuhan.

12. Modul CP1W

Modul CP1W-CIF41 merupakan modul komunikasi tambahan yang digunakan pada PLC Omron seri CP1E untuk menambahkan konektivitas Ethernet. Fungsi utama modul ini adalah memungkinkan PLC untuk terhubung ke perangkat lain seperti HMI PC melalui jaringan Ethernet. Modul ini tidak digunakan untuk pengolahan data atau pemrosesan sensor, melainkan murni sebagai antarmuka komunikasi berbasis TCP/IP untuk kebutuhan monitoring dan kontrol jarak jauh dari perangkat antarmuka seperti HMI atau SCADA.

13. ESP32

Berfungsi sebagai mikrokontroler untuk membaca data dari sensor ultrasonik dan mengubahnya menjadi sinyal PWM atau data digital lainnya. ESP32 memproses data pengukuran tinggi gelombang secara terpisah dari PLC untuk mengurangi beban kerja PLC dan meningkatkan responsivitas sistem.

14. PWM to Voltage Converter

Modul ini merupakan step-down (buck) converter yang digunakan untuk menurunkan tegangan dari 24V menjadi 5V atau 3.3V, sesuai kebutuhan ESP32 dan sensor ultrasonik.

15. Power Supply 220V ke 24VDC

Power supply ini mengubah sumber listrik utama (AC 220V) menjadi DC 24V untuk memberikan catu daya ke PLC dan perangkat lainnya yang menggunakan tegangan kerja 24VDC.

16. HMI PC

HMI PC berperan sebagai antarmuka manusia dan mesin (Human Machine Interface) yang memungkinkan operator memantau dan mengontrol sistem PLC secara langsung. Dalam sistem ini, HMI PC terhubung ke PLC melalui modul Ethernet (CP1W-CIF41) dan digunakan untuk menampilkan status operasional, menjalankan perintah start/stop, serta memberikan umpan balik visual kepada operator mengenai kondisi sistem. HMI PC tidak berperan dalam image processing atau perhitungan tinggi gelombang, tetapi lebih berfokus pada fungsi kontrol dan pemantauan sistem berbasis PLC.

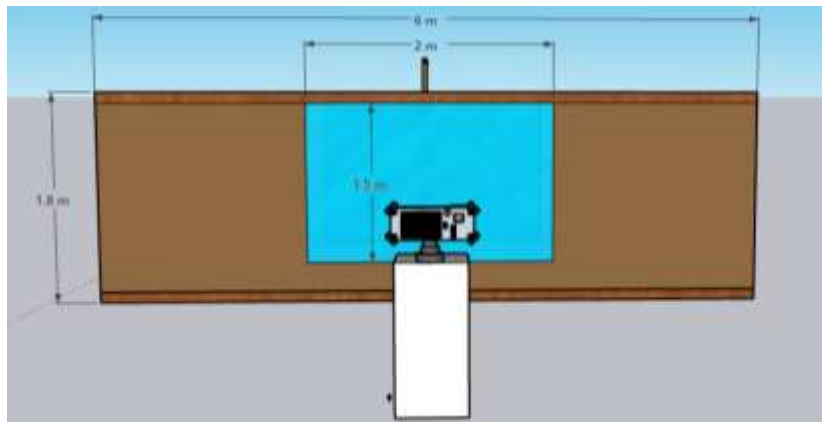
3.4.2 Desain *Wave Tank*



Gambar 3. 7 Desain *wave tank*
Dokumen Pribadi

Gambar 3.7 merupakan tangki atau wadah khusus yang dirancang untuk menciptakan dan mempelajari gelombang air secara terkendali. Alat ini sering digunakan dalam penelitian dan pengujian untuk mensimulasikan berbagai kondisi gelombang, seperti yang terjadi di laut atau perairan lainnya. *Wave tank* dilengkapi dengan mekanisme *wave maker*, yang menghasilkan gelombang melalui gerakan piston, flap, atau metode lainnya, sehingga memungkinkan analisis interaksi gelombang dengan struktur, dinamika fluida, atau fenomena lainnya dalam lingkungan yang terkontrol.

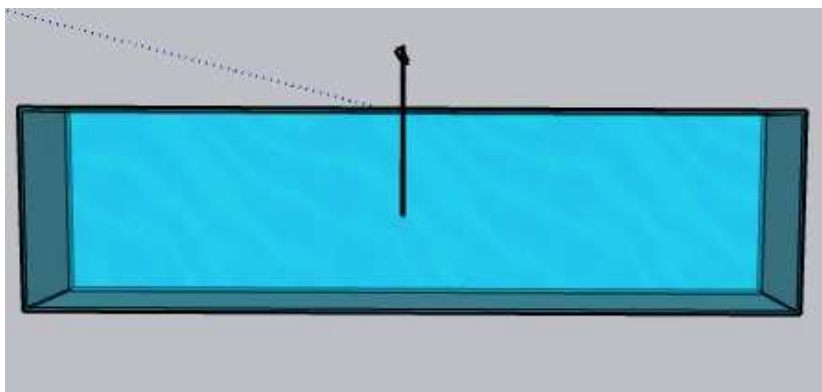
3.4.3 Perencanaan Posisi Kamera Pada *Wave Tank*



Gambar 3. 8 Posisi kamera saat pengukuran
Dokumen Pribadi

Gambar 3.8 tersebut menunjukkan skema pengujian sistem pengukuran tinggi gelombang pada *wave tank* dengan dimensi kaca memiliki tinggi 1,5 meter dan lebar 2 meter. Kamera yang diposisikan secara horizontal di samping akuarium sejajar dengan permukaan air bertujuan untuk menangkap visualisasi gelombang secara lateral. Posisi ini memungkinkan kamera merekam pergerakan gelombang. Penempatan sejajar dengan permukaan air juga membantu mengurangi distorsi visual, sehingga data yang dihasilkan lebih akurat untuk kebutuhan analisis.

3.4.4 Perencanaan Posisi Sensor Ultrasonic Pada *Wave Tank*



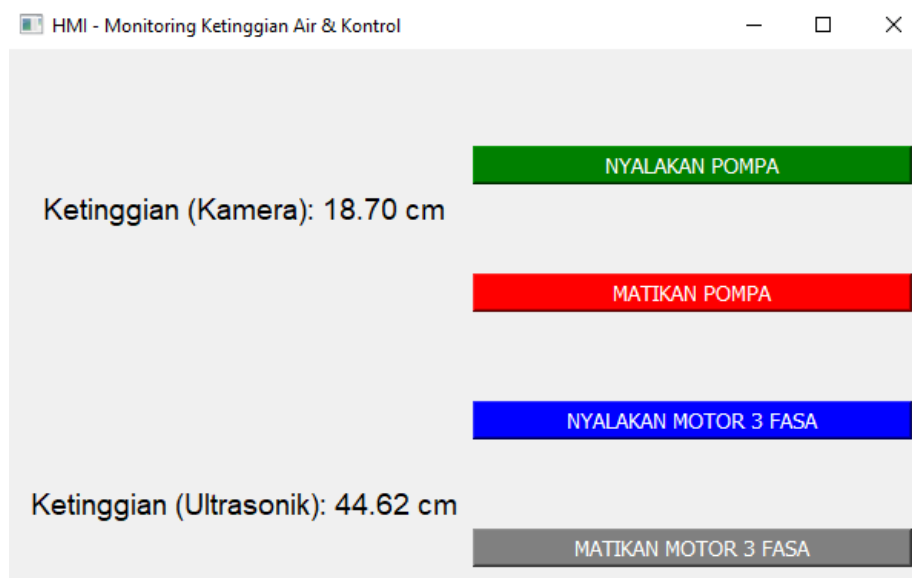
Gambar 3. 9 Posisi ultrasonic saat pengukuran
Dokumen Pribadi

Ultrasonik yang dipasang di atas bagian tengah akuarium yang berukuran panjang 6 meter dan lebar 2 meter, posisi ultrasonic memiliki ketinggian sesuai dengan tinggi *wave tank* yaitu 1,8 meter berfungsi untuk mengukur jarak antara

sensor dan permukaan air, yang merepresentasikan ketinggian gelombang yang dihasilkan oleh *wave maker*. Dengan memanfaatkan prinsip pantulan gelombang suara, sensor ultrasonik mengirimkan sinyal ultrasonik ke arah permukaan air. Ketika sinyal tersebut memantul kembali ke sensor, perangkat menghitung waktu tempuh sinyal tersebut. Data waktu ini kemudian diolah untuk menentukan jarak antara sensor dan permukaan air secara akurat.

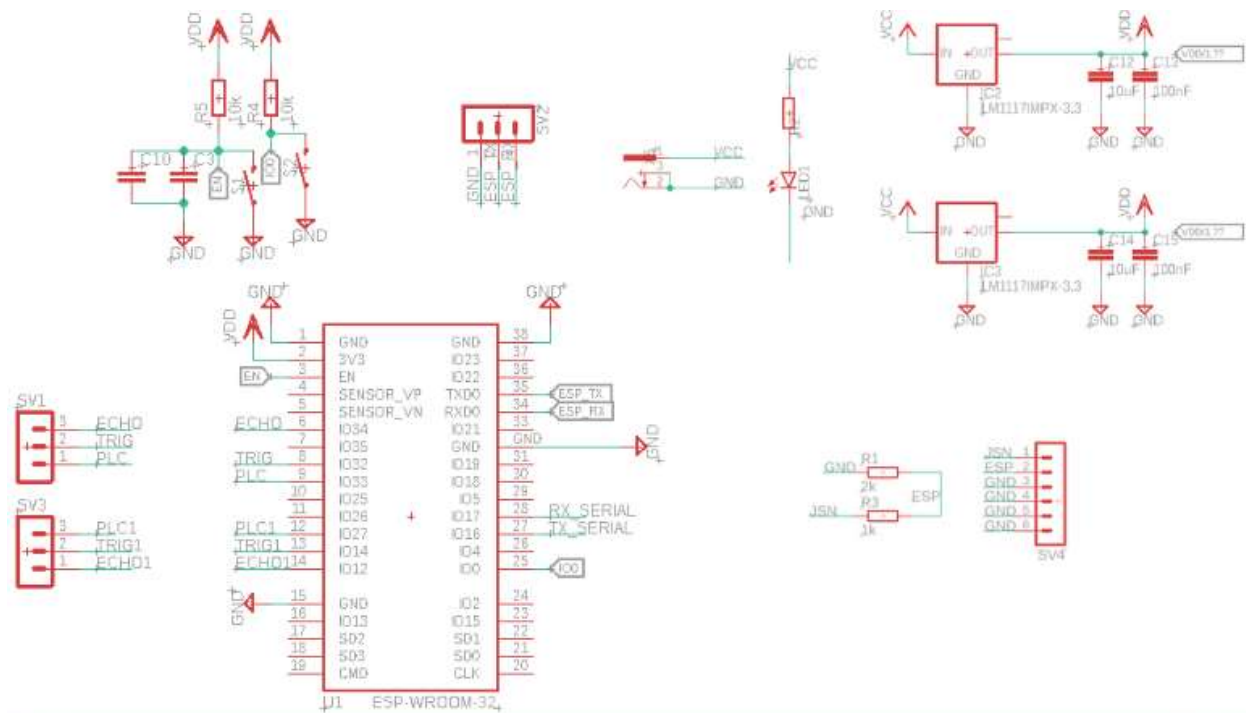
3.4.5 Perancangan GUI HMI

Perencanaan perangkat lunak untuk antarmuka antara sistem kontrol dan operator memiliki peran utama untuk memastikan bahwa sistem berjalan sesuai harapan, memungkinkan operator untuk mengendalikan sistem operasi dengan efisien. Dalam tahap ini, integritas dan fungsionalitas antarmuka menjadi krusial. Hal ini melibatkan penggunaan berbagai framework dan perpustakaan yang terintegrasi dari berbagai bahasa pemrograman untuk mengembangkan backend dan frontend dari GUI HMI. Selain itu, aspek penting lainnya adalah mengatur komunikasi yang efektif antara PLC dan PC, yang memerlukan penerapan teknologi yang mendukung transmisi data yang stabil dan realtime.



Gambar 3. 10 Rencana Desain HMI
Dokumentasi Pribadi

3.4.6 Desain Schematik Elektrik ESP 32



Gambar 3. 11 Desain Schematik Elektrik ESP 32
Dokumentasi Pribadi

Skematik ini menunjukkan sebuah rangkaian berbasis mikrokontroler ESP-WROOM-32 yang dirancang khusus untuk membaca data dari sensor ultrasonik. Sensor dihubungkan melalui header SV1 yang menyediakan pin TRIG dan ECHO untuk mengukur jarak. Untuk melindungi ESP32 dari tegangan tinggi, sinyal ECHO diturunkan menggunakan rangkaian pembagi tegangan resistor 2kΩ dan 1kΩ, karena ESP32 hanya menerima input maksimal 3.3V. Mikrokontroler ini diberi catu daya dari regulator LM1117-3.3V, yang menstabilkan tegangan dengan bantuan kapasitor. Komunikasi dan pemrograman dilakukan melalui jalur serial UART (TX/RX) yang tersedia di header SV4. Selain itu, tersedia juga LED indikator dan push-button untuk fungsi kontrol manual, serta beberapa header tambahan untuk distribusi daya dan koneksi eksternal.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang hasil pengujian serta pembahasan yang berkaitan dengan pelaksanaan Tugas Akhir. Di dalamnya akan diuraikan berbagai pengujian yang telah dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem secara menyeluruh. Pengujian mencakup pengujian sensor dan aktuator guna memastikan perangkat keras bekerja sesuai fungsi, pengujian terhadap metode yang digunakan dalam sistem, serta pengujian dan validasi sistem secara real-time ketika semua komponen telah diintegrasikan. Selain itu, akan disajikan analisis terhadap parameter yang diamati serta rekapitulasi hasil pengujian.

4.1 Pengujian Sensor dan Aktuator

Proses pengujian pada Tugas Akhir ini dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi tingkat akurasi kinerja alat serta menghitung persentase kesalahan dari setiap komponen yang digunakan dalam sistem. Pengujian ini menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa seluruh bagian perangkat bekerja sesuai dengan fungsinya. Berikut ini dijelaskan bentuk dan metode pengujian yang dilakukan pada masing-masing komponen dalam Tugas Akhir ini.

4.1.1 Pengujian Kamera Visio Dantum Mars 640-815uc

Kamera Visio DANTUM Mars 640-815UC digunakan sebagai perangkat utama dalam sistem pengukuran tinggi gelombang berbasis pengolahan citra. Kamera ini berfungsi menangkap citra permukaan air secara real-time yang kemudian dianalisis menggunakan metode *optical flow*. Penggunaan kamera industri dipilih karena menawarkan kestabilan dan resolusi tinggi yang mendukung akurasi pengukuran.

Pengaturan kamera meliputi frame rate 30–100 fps, exposure time 3000–10000 μ s, gain 2.00–4.00, gamma 1.20, brightness 60, dan digital shift 1. Mode auto exposure dinonaktifkan untuk menjaga konsistensi pencahayaan. Kamera diposisikan sejajar permukaan air agar memperoleh sudut pandang optimal dalam mendeteksi tinggi gelombang. Hasil citra selanjutnya diproses menggunakan *OpenCV* untuk mendapatkan data ketinggian gelombang secara akurat.

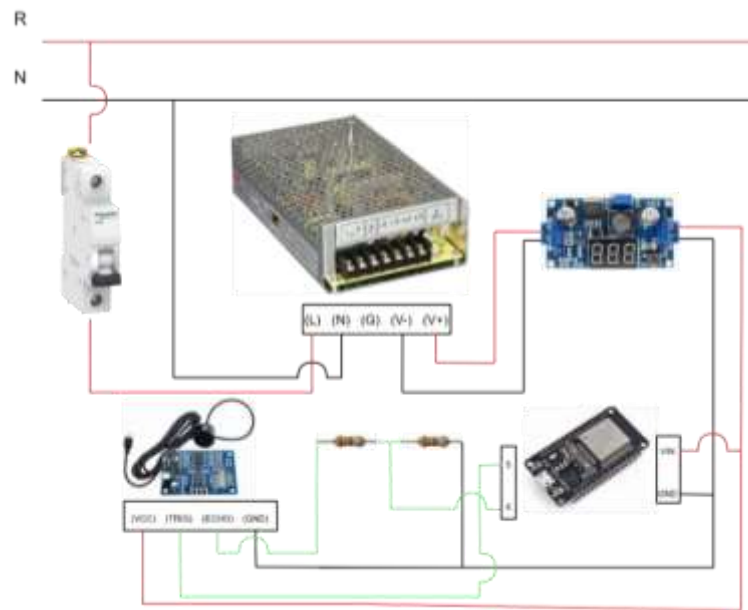


Gambar 4.1 Hasil Pengujian Kamera
Dokumentasi Pribadi

Selain pengaturan teknis pada kamera, dilakukan pula pengecekan terhadap indikator operasional kamera. Kamera Visio DANTUM Mars 640-815UC dilengkapi dengan lampu indikator berwarna biru yang terletak di bagian belakang perangkat. Indikator ini akan menyala saat kamera aktif.

4.1.2 Pengujian Sensor Ultrasonic

Pengujian sensor ultrasonik JSN-SR04T dilakukan untuk memperoleh data ketinggian gelombang air sebagai validasi terhadap hasil pengolahan citra kamera. Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip pantulan gelombang ultrasonik dan terhubung ke mikrokontroler ESP32 untuk proses pembacaan data jarak. Gambar 4.2 menunjukkan diagram wiring yang digunakan dalam pengujian sensor ultrasonik. Sistem terdiri dari beberapa komponen utama, antara lain sensor JSN-SR04T, modul buck converter LM2596 sebagai regulator tegangan 24V ke 5V, mikrokontroler ESP32, serta power supply 220VAC ke 24VDC sebagai sumber utama sistem.



Gambar 4.2 *Wiring Sensor Ultrasonic*
Dokumentasi Pribadi

Pengujian sensor ultrasonik JSN-SR04T dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi pembacaan jarak terhadap permukaan air di dalam *wave tank*. Sensor ini bekerja dengan mengukur waktu pantulan gelombang ultrasonik dari permukaan air ke sensor, kemudian dihitung sebagai nilai jarak dalam satuan sentimeter. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap pengukuran manual menggunakan penggaris sebagai referensi standar. Hasil pengujian Sensor Ultrasonic dapat dilihat pada Tabel 4.1

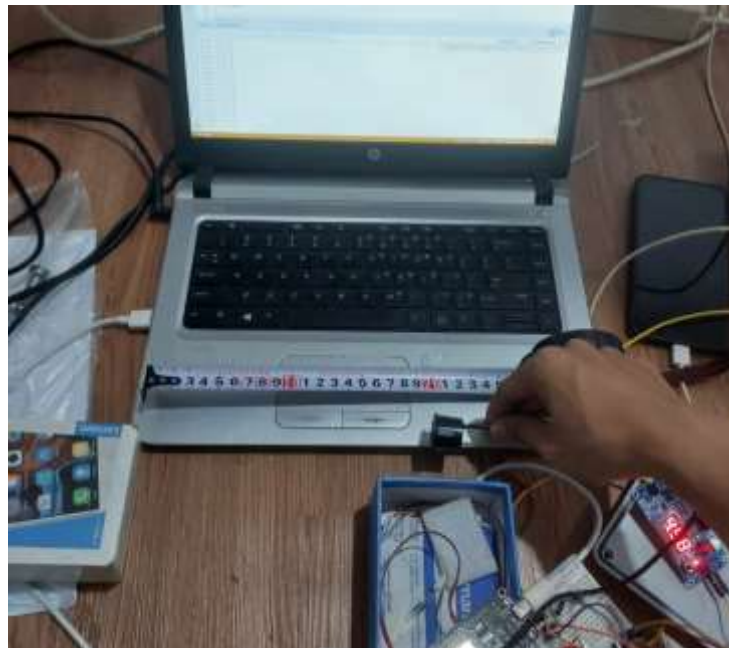
Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Sensor Ultrasonic

No	Jarak objek (cm)	Pembacaan Sensor (cm)	Rata-rata (cm)	Selisih (cm)	Error %
1.	25	26.51, 26.51, 26.58	26.53	1.53	6.12
2.	30	30.2, 30.2, 30,1	30.2	0.2	0.67
3.	35	35.2, 34.9, 35.3	35.1	0.1	0.29
4.	40	40.8, 39.9, 39.9	40.2	0.2	0.50
5.	45	45.8, 45.4, 44.8	45.3	0.3	0.67
6.	50	50.3, 49.8, 49.8	50.0	0.0	0.00
7.	55	55.1, 54.1, 54.1	54.4	0.6	1.09
8.	60	59.7, 59.5, 60.2	59.8	0.2	0.33
9.	65	64.5, 64.3, 65.7	64.8	0.2	0.31

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Sensor Ultrasonic (Lanjutan)

No	Jarak objek (cm)	Pembacaan Sensor (cm)	Rata-rata (cm)	Selisih (cm)	Error %
10.	70	69.9, 70.0, 69.3	69.7	0.3	0.43
11.	75	74.7, 75.1, 74.4	74.7	0.3	0.40
12.	80	80.2, 79.7, 79.9	79.9	0.1	0.12
13.	85	84.7, 85.9, 85.0	85.2	0.2	0.24
14.	90	89.5, 90.4, 89.4	89.8	0.2	0.22
15.	95	95.1, 94.0, 94.3	94.5	0.5	0.53
16.	100	100.1, 100.4, 100.1	100.2	0.2	0.20
17.	105	104.9, 104.8, 104.3	104.7	0.3	0.29
18.	110	109.6, 109.8, 110.5	110.0	0.0	0.00
19.	115	115.2, 114.1, 115.2	114.8	0.2	0.17
20.	120	119.8, 119.7, 120.3	119.9	0.1	0.08
21.	125	125.5, 125.5, 124.6	125.2	0.2	0.16
22.	130	129.8, 130.2, 130.5	130.2	0.2	0.15
23.	135	134.8, 134.9, 134.4	134.7	0.3	0.22
24.	140	139.4, 140.4, 140.7	140.2	0.2	0.14
25.	145	145.0, 145.5, 145.2	145.2	0.2	0.14
26.	150	149.7, 150.2, 150.8	150.2	0.2	0.13
27.	155	155.0, 155.8, 153.7	154.8	0.2	0.13
28.	160	160.4, 160.0, 159.9	160.1	0.1	0.06
29.	165	165.0, 164.0, 164.9	164.6	0.4	0.24
30.	170	170.2, 170.7, 169.7	170.2	0.2	0.12
31.	175	174.6, 174.7, 175.5	174.9	0.1	0.06
32.	180	179.8, 179.7, 179.9	179.8	0.2	0.11
Rata – Rata Error					0.43

Berdasarkan hasil pengujian terhadap 32 data, diperoleh rata-rata error sebesar 0.43%, menunjukkan akurasi sensor sangat baik dan layak digunakan untuk pengukuran tinggi air. Namun, pada jarak 5, 10, 15, dan 20 cm tidak dimasukkan karena sensor ultrasonik mengalami penurunan akurasi pada jarak dekat. hal ini disebabkan oleh waktu respon sensor yang sangat singkat pada jarak pendek, sehingga pulsa ultrasonik yang dipancarkan belum sempat meredam sepenuhnya saat gema kembali diterima. Akibatnya, terjadi overlap antara sinyal pemancar dan penerima, yang menyebabkan pembacaan menjadi tidak stabil dan error besar.



Gambar 4.3 Pengujian Sensor Ultrasonic
Dokumentasi Pribadi

4.1.3 Pengujian *Selector Switch* dan *Pilot Lamp*

Pengujian *selector switch* dilakukan untuk memastikan bahwa sinyal *input* dari saklar dapat diterima dengan benar oleh sistem, serta memicu *output* berupa nyala lampu indikator (*pilot lamp* hijau). Dalam pengujian ini, *selector switch* memiliki tiga posisi yang digunakan, yaitu OFF, ON (Manual) dan (Auto). *Pilot lamp* berfungsi sebagai indikator bahwa sinyal dari *selector* telah aktif dan diteruskan ke *output*.



Gambar 4.4 wiring *Selector Switch* dan *Pilot Lamp*
Dokumentasi Pribadi

Pada Gambar 4.4 sumber daya utama sistem berasal dari MCB yang menghubungkan tegangan ke rangkaian. Ketika *selector* berada di posisi ON, pilot lamp akan menyala menandakan bahwa sistem aktif. Sebaliknya, saat *switch* berada pada posisi OFF, lampu indikator akan mati. Pengujian dilakukan beberapa kali untuk memastikan kestabilan fungsi dan keandalan respon rangkaian terhadap perubahan posisi *selector*.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian *Selector Switch* dan *Pilot Lamp*

No	Posisi <i>Selector</i>	Kondisi <i>Pilot Lamp</i>	Status Sistem	Keterangan
1.	OFF	Mati	Nonaktif	Sistem dalam keadaan mati
2.	MANUAL	Menyala	Aktif (Manual)	Sistem menyala secara manual
3.	AUTO	Menyala	Aktif (Auto)	Sistem dikendalikan otomatis

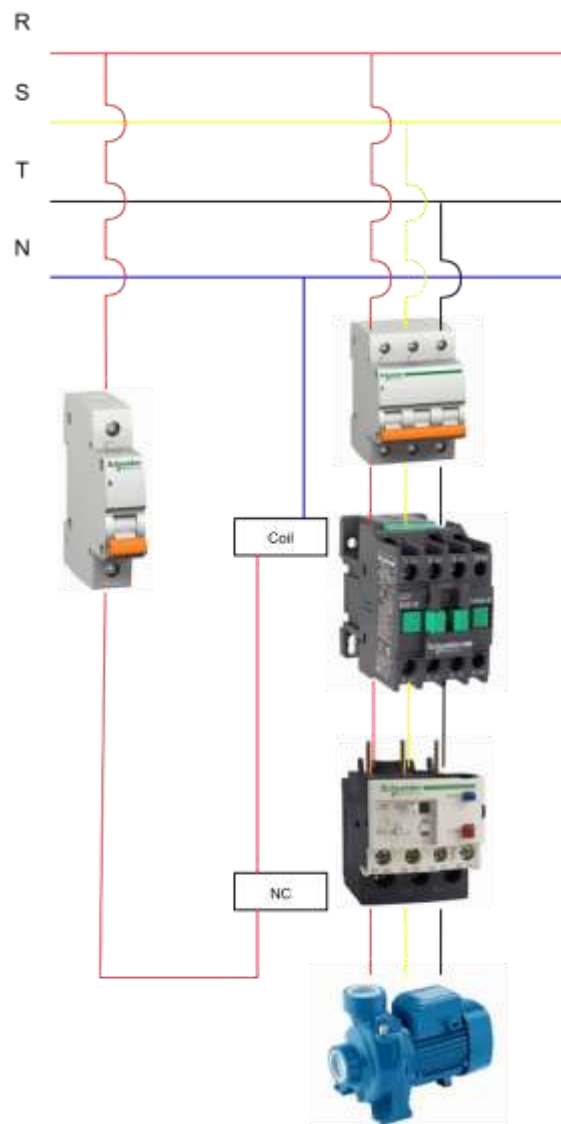
Berdasarkan tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa selector switch bekerja sesuai dengan logika yang dirancang. Pilot lamp hijau menyala ketika selector berada di posisi MANUAL maupun AUTO, menandakan bahwa sistem dalam kondisi aktif. Posisi OFF memutus rangkaian dan menyebabkan lampu mati, menunjukkan sistem tidak aktif.



Gambar 4.5 Pengujian *Selector Switch* dan *Pilot Lamp*
Dokumentasi Pribadi

4.1.4 Pengujian Pompa Air

Pengujian pompa air dilakukan untuk memastikan bahwa sistem kelistrikan dapat mengaktifkan dan menonaktifkan pompa sesuai alur kontrol yang dirancang. Rangkaian penggerak pompa terdiri dari komponen utama berupa MCB, kontaktor, overload relay, dan motor pompa 3 fasa, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.6 Pompa dikendalikan secara langsung melalui aktivasi coil kontaktor, dan keberadaan putaran pompa dikonfirmasi menggunakan tachometer sebagai indikator.



Gambar 4.6 *Wiring* Pompa Air
Dokumentasi Pribadi

Dalam pengujian ini, tachometer digunakan untuk mendeteksi apakah motor pompa berputar saat sistem diaktifkan. Tidak dilakukan pengukuran aliran air karena fokus pengujian hanya pada aspek kelistrikan dan respon aktuator terhadap sinyal kontrol.

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Pompa Air

No	Posisi Rangkaian	Status Kontaktor	Pembacaan Tachometer	Keterangan
1.	OFF	Mati	0 RPM	Pompa dalam kondisi mati
2.	ON	Menyala	2660 RPM	Pompa menyala dan berputar

Berdasarkan pengujian, sistem bekerja sesuai fungsinya. Ketika rangkaian diaktifkan, kontaktor menyalurkan daya ke pompa dan putaran terdeteksi oleh tachometer. Sebaliknya, saat rangkaian dinonaktifkan, kontaktor terputus dan pompa berhenti. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh komponen pada wiring kontrol pompa berfungsi dengan baik.



Gambar 4.7 Pengujian Pompa Air
Dokumentasi Pribadi

4.1.5 Pengujian Motor 3 Phase

Pengujian motor 3 phase dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu mengendalikan motor secara tepat melalui rangkaian kontrol berbasis Variable Frequency Drive (VFD). Rangkaian terdiri dari sumber daya tiga fasa yang dialirkan melalui MCB menuju VFD, dan selanjutnya menggerakkan motor. Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi fungsionalitas VFD dalam menyalakan motor serta mengatur kecepatan putaran.



Gambar 4.8 Pengujian Motor 3phase
Dokumentasi Pribadi

Dalam pengujian, motor diaktifkan melalui VFD dengan frekuensi 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz, 50 Hz. Aktivitas motor diamati secara langsung, dan keberadaan putaran dikonfirmasi menggunakan tachometer. Belum dilakukan pengujian beban, sehingga fokus utama adalah memastikan sistem kontrol bekerja dengan baik dan motor merespons sesuai perintah.

Tabel 4. 5 Hasil Motor 3 Phase

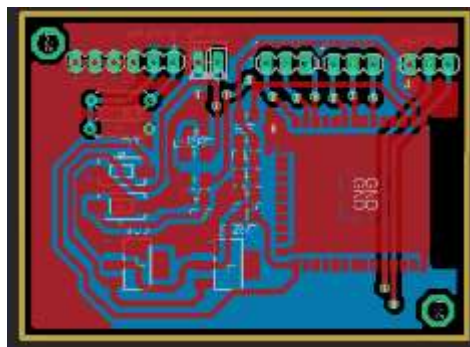
No	Posisi Rangkaian	Frekuensi (Hz)	Pembacaan Tachometer	Keterangan
1.	OFF	0	0 RPM	Motor mati, sistem tidak aktif
2.	ON	10	77 RPM	Motor berputar sangat lambat
3.	ON	20	155 RPM	Motor mulai berputar dengan stabil
4.	ON	30	232 RPM	Putaran meningkat seiring frekuensi
5.	ON	40	310 RPM	Motor berputar mendekati normal
6.	ON	50	387 RPM	Putaran maksimal

Hasil pengujian pada mototr 3 phase menunjukkan bahwa motor merespons secara linier terhadap kenaikan frekuensi dari VFD. Ini membuktikan bahwa sistem kontrol kecepatan motor melalui VFD berjalan dengan baik dan sesuai perancangan.



Gambar 4.9 Pengujian Motor 3 Phase
Dokumentasi Pribadi

4.2 Board PCB ESP 32



Gambar 4.10 Board PCB ESP 32
Dokumentasi Pribadi

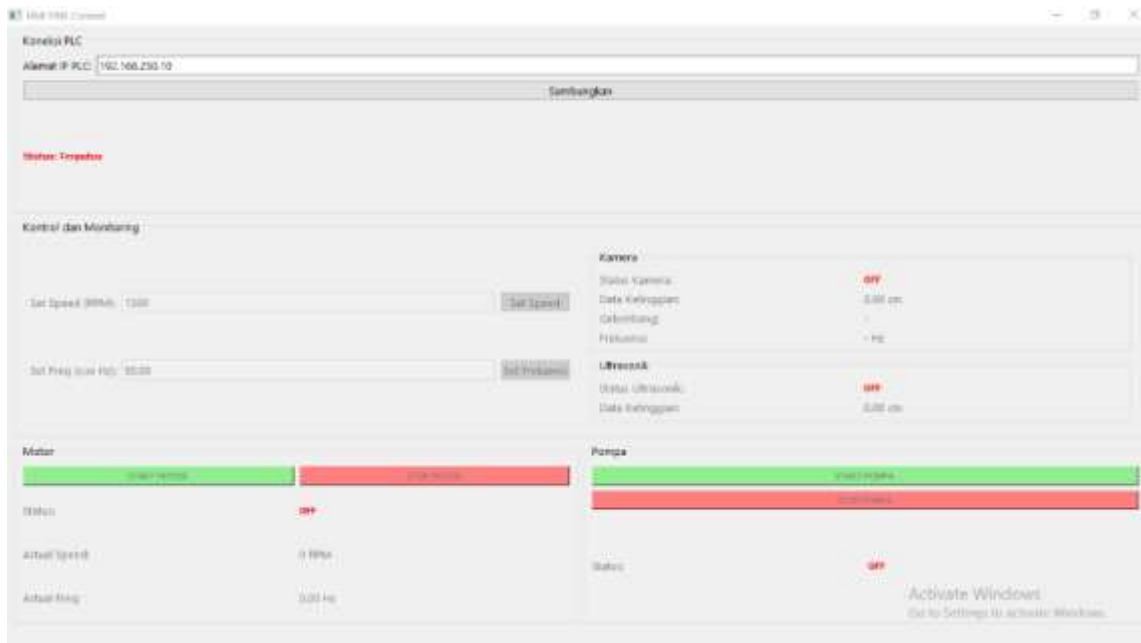
Gambar di atas merupakan tampilan layout PCB dua layer top merah, bottom biru yang dirancang untuk modul ESP32. Desain ini menampilkan jalur-jalur sinyal yang terkoneksi ke header pin ESP32 di sisi kiri papan, dengan komponen-komponen pasif seperti resistor dan kapasitor tersusun di tengah papan. Area ground (GND) didistribusikan luas melalui *fill plane* di kedua layer untuk mengurangi noise dan menjaga kestabilan sinyal. Regulator tegangan dan beberapa komponen proteksi juga terlihat terintegrasi di bagian bawah tengah, kemungkinan untuk mengatur pasokan daya ke ESP32 dan sensor. Jalur-jalur sinyal dirancang dengan lebar yang cukup dan menggunakan via untuk menghubungkan antara layer atas dan bawah secara efisien.



Gambar 4.11 Hasil PCB ESP 32
Dokumentasi Pribadi

Gambar 4.11 menunjukkan hasil akhir dari modul PCB ESP32 yang dirancang khusus untuk membaca sensor ultrasonik, dengan komponen yang telah terpasang secara fungsional. Modul ini dilengkapi dengan konektor header yang berlabel jelas seperti GND, VCC, ECHO, TRIG, TX, dan RX, memudahkan integrasi dengan sensor ultrasonik dan perangkat lain. Terdapat LED indikator, resistor, kapasitor, dan regulator tegangan (IC2) yang telah disusun sesuai skematik. Modul ESP32 terpasang pada sisi kanan papan dan siap digunakan dalam aplikasi pengukuran ketinggian gelombang atau sistem kontrol lainnya yang membutuhkan akuisisi data jarak berbasis mikrokontroler dan komunikasi serial.

4.3 Desain GUI HMI



Gambar 4.12 Desain GUI HMI
Dokumentasi Pribadi

Gambar 4.12 menampilkan antarmuka HMI (Human Machine Interface) berbasis aplikasi FINS yang dirancang untuk memantau dan mengendalikan sistem otomasi secara real-time. Aplikasi ini menggunakan protokol FINS (Factory Interface Network Service) dari Omron untuk menjalin komunikasi antara PC dan PLC melalui jaringan Ethernet. Protokol ini memungkinkan pengiriman data secara langsung ke memory area PLC seperti input, output, atau internal relay, tanpa memerlukan perangkat tambahan. Tampilan ini menyediakan komunikasi antara manusia (operator) dan mesin secara langsung melalui jaringan Ethernet menggunakan alamat IP.

1. Status Koneksi PLC

Di bagian atas, terdapat kolom pengisian alamat IP PLC dan tombol Sambungkan untuk menjalin koneksi dengan PLC. Status koneksi ditampilkan secara real-time, dalam gambar ini berwarna merah dengan keterangan Status Terputus, menandakan bahwa PLC belum terhubung.

2. Kontrol dan Monitoring

Kontrol motor memungkinkan operator untuk mengatur kecepatan melalui parameter Set Speed (RPM) dan Set Freq (Hz), yang kemudian dikirim ke PLC

menggunakan tombol Set Speed dan Set Frekuensi. Antarmuka ini juga menampilkan indikator status motor (ON/OFF), nilai kecepatan aktual (RPM), dan frekuensi aktual (Hz). Pada kondisi yang ditampilkan.

Kontrol pompa dilakukan melalui dua tombol yaitu START POMPA (berwarna hijau) untuk menyalakan dan STOP POMPA (berwarna merah) untuk mematikan pompa, dengan status operasional pompa ditampilkan tepat di bawah tombol.

3. Monitoring Kamera dan Sensor Ultrasonik

Kamera menampilkan status ON/OFF, data ketinggian gelombang dalam cm, klasifikasi gelombang, dan frekuensi gelombang.

Sensor Ultrasonik: Menampilkan status sensor dan data ketinggian permukaan air dalam cm.

4.4 Pengujian Sistem Pengukur Tinggi Gelombang Air Pada *Wave Tank*

Pengujian sistem pengukur tinggi gelombang dilakukan dalam dua tahap utama yang bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas metode pengolahan citra dan akurasi sistem secara keseluruhan. Sebelum dilakukan pengambilan data, intensitas pencahayaan lingkungan terlebih dahulu diukur menggunakan lux meter, guna memastikan bahwa setiap kombinasi pengujian dilakukan dalam kondisi pencahayaan yang dapat dikontrol. Penggunaan lux meter ini bertujuan untuk mendukung konsistensi hasil pengujian dengan menetapkan parameter pencahayaan sebagai variabel terukur.

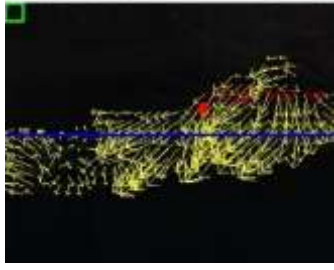
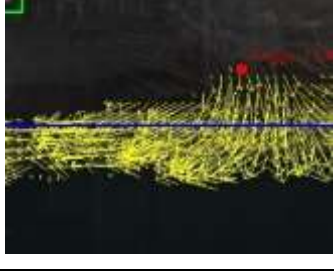


Gambar 4.13 pengukuran pencahayaan pada Lokasi *wave tank*
Dokumentasi Pribadi

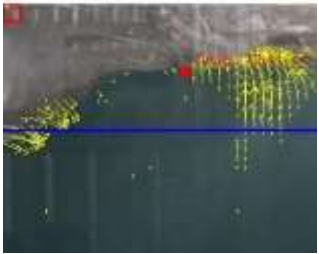
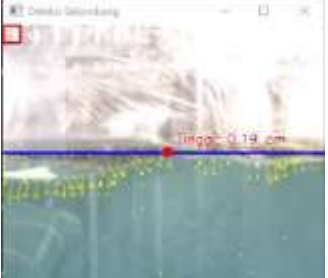
4.4.1 Pengujian Metode *Optical Flow*

Tahap pertama adalah pengujian metode *optical flow*, sistem diuji untuk mendeteksi pergerakan gelombang berdasarkan kombinasi variable warna, latar belakang dan pengaturan aperture pada lensa kamera. Tiga warna latar belakang dalam pengujian ini adalah hitam, kuning, dan putih, dan variasi aperture pada lensa 4 mm disesuaikan melalui pengaturan bukaan dari nilai 11, 8, 5.6, 4, 2.8, hingga 2. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui konfigurasi terbaik dari metode *optical flow*, dengan visualisasi yang jelas dan deteksi pergerakan gelombang.

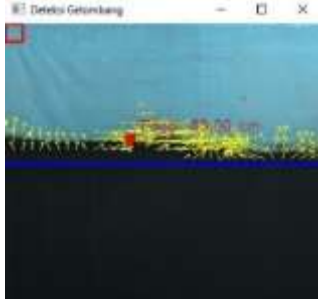
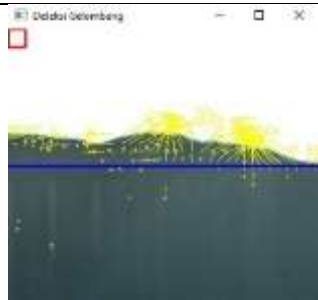
Tabel 4. 6 Pengujian Metode *Optical Flow*

NO	Latar belakang	Aperture	Lux (lx)	Metode Berjalan	Dokumentasi
1.	Hitam	11	289	Tidak	
2.	Hitam	8	311	Ya	
3.	Hitam	5.6	350	Ya	

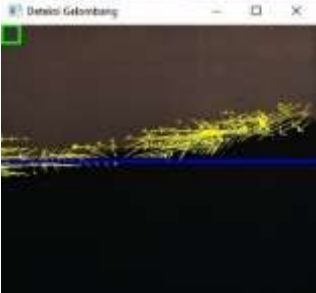
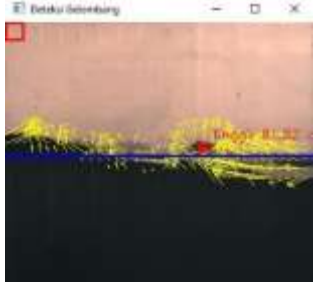
Tabel 4. 7 Pengujian Metode *Optical Flow* (Lanjutan)

NO	Latar belakang	Aperture	Lux (lx)	Metode Berjalan	Dokumentasi
4.	Hitam	4	354	Ya	
5.	Hitam	2.8	309	Ya	
6.	Hitam	2	308	Ya	
7.	Kuning	11	307	Tidak	
8.	Kuning	8	322	Ya	

Tabel 4. 8 Pengujian Metode *Optical Flow* (Lanjutan)

NO	Latar belakang	Aperture	Lux (lx)	Metode Berjalan	Dokumentasi
9.	Kuning	5.6	325	Ya	
10.	Kuning	4	312	Ya	
11.	Kuning	2.8	315	Ya	
12.	Kuning	2	319	Ya	
13.	Putih	11	330	Tidak	

Tabel 4. 9 Pengujian Metode *Optical Flow* (Lanjutan)

NO	Latar belakang	Aperture	Lux (lx)	Metode Berjalan	Dokumentasi
14.	Putih	8	310	Ya	
15.	Putih	5.6	318	Ya	
16.	Putih	4	303	Ya	
17.	Putih	2.8	340	Ya	
18.	Putih	2	329	Ya	

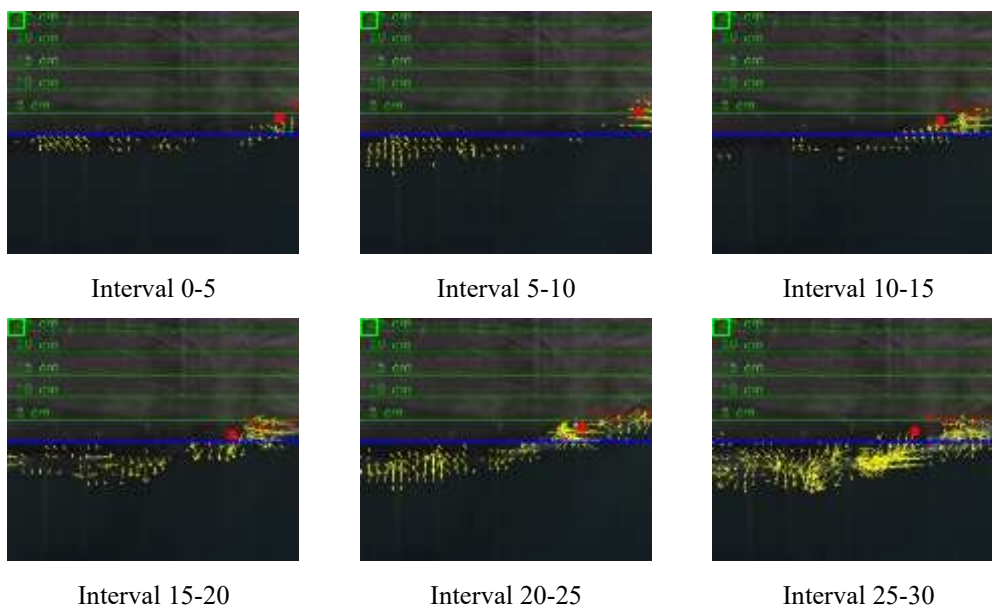
Pengujian metode *optical flow* dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas sistem dalam mendeteksi pergerakan gelombang berdasarkan variasi 3 warna latar belakang yaitu hitam, kuning, putih dan pengaturan aperture lensa kamera f/11 hingga f/2. Dari 18 kombinasi yang diuji, terdapat tiga konfigurasi yang gagal menjalankan metode, yaitu pada seluruh kombinasi dengan aperture f/11 untuk ketiga warna latar belakang. Hal ini menunjukkan bahwa aperture yang terlalu kecil membatasi jumlah cahaya yang masuk ke sensor kamera, sehingga citra yang dihasilkan menjadi gelap dan menyulitkan deteksi gerakan oleh metode *optical flow*. Nilai lux yang dicantumkan dalam tabel hanya sebagai informasi kondisi pencahayaan saat pengambilan data, bukan sebagai faktor yang diuji. Sebaliknya, kombinasi aperture f/8 hingga f/2 pada semua latar belakang berhasil menjalankan metode dengan baik, menunjukkan bahwa pencahayaan yang cukup dan kualitas visual citra yang baik menjadi faktor utama keberhasilan sistem. Oleh karena itu, pemilihan aperture yang tepat dan latar belakang yang memberikan kontras visual yang cukup sangat penting dalam penerapan metode *optical flow* untuk deteksi gelombang.

4.4.2 Pengujian kamera dan JSN-SR04T pada *wave tank*

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi akurasi sistem pengukur tinggi gelombang berbasis kamera dibandingkan dengan sensor ultrasonik JSN-SR04T, dengan mempertimbangkan pengaruh kontras visual dari tiga variasi latar belakang hitam, kuning, dan putih. Setiap latar belakang diuji pada 8 variasi frekuensi motor (9–13 Hz), dengan durasi pengambilan data selama 30 detik yang dilakukan secara sinkron antara sistem kamera dan sensor ultrasonik. Data dibagi ke dalam enam interval waktu tetap, yaitu 0–5, 5–10, 10–15, 15–20, 20–25, dan 25–30 detik, di mana pada setiap interval dihitung rata-rata tinggi gelombang dari kedua sistem, serta selisih dan persentase error sebagai indikator akurasi. Hasil pengujian disajikan dalam 15 tabel terpisah berdasarkan kombinasi latar belakang dan frekuensi, sehingga memungkinkan analisis terhadap pengaruh visual dan kestabilan performa sistem seiring waktu.

Tabel 4. 10 Pengujian sistem pada latar belakang hitam dengan frekuensi 9

NO	Lux (lx)	10 cm (px)	Interval Waktu (s)	Rata-Rata Kamera (cm)	Rata-Rata Ultrasonic (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
1.	322	55,78	0-5	83.82	123.05	39.23	31.88
2.	322	55,78	5-10	85.27	122.25	36.98	30.20
3.	322	55,78	10-15	83.09	124.38	41.29	33.20
4.	322	55,78	15-20	81.45	122.46	41.01	33.52
5.	322	55,78	20-25	83.27	123.04	39.77	32.23
6.	322	55,78	25-30	82.36	119.25	36.89	30.27
Rata-Rata Error							31.88

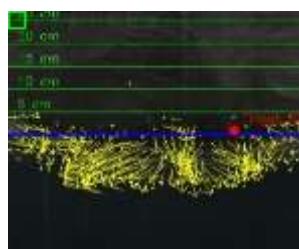


Gambar 4. 14 Pengujian sistem pada latar belakang hitam dengan frekuensi 9

Hasil pengukuran menunjukkan rata-rata error sebesar 31,88%. Berdasarkan analisis, sistem kamera menunjukkan kinerja yang lebih akurat karena hasil deteksi tinggi gelombang konsisten dengan visual, sedangkan sensor ultrasonik cenderung memberikan pembacaan lebih tinggi akibat pantulan dan tidak mampu untuk mendeteksi objek pada kondisi dinamis. Untuk menguji akurasi deteksi puncak, digunakan latar belakang hitam sebagai acuan. Dari 6 sampel citra yang dipilih secara acak oleh program pada setiap interval 5 detik, 4 berhasil mendeteksi puncak dengan tepat, sementara itu terdapat 2 kesalahan deteksi terhadap latar belakang.

Tabel 4. 11 Pengujian sistem pada latar belakang hitam dengan frekuensi 10

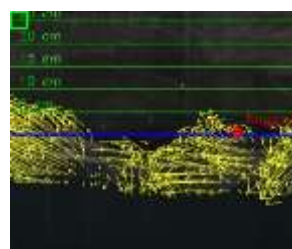
NO	Lux (lx)	10 cm (px)	Interval Waktu (s)	Rata-Rata Kamera (cm)	Rata-Rata Ultrasonic (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
1.	335	56,12	0-5	80.89	130.3	49.41	37.92
2.	335	56,12	5-10	92.14	130.3	38.16	29.29
3.	335	56,12	10-15	80.71	130.15	49.44	37.98
4.	335	56,12	15-20	94.28	128.66	34.38	26.71
5.	335	56,12	20-25	83.75	130.61	46.86	35.88
6.	335	56,12	25-30	92.67	129.92	37.25	28.66
Rata-Rata Error							32.74



Interval 0-5



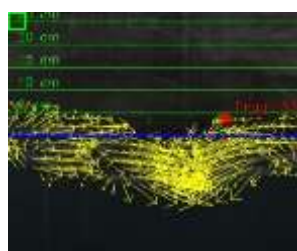
Interval 5-10



Interval 10-15



Interval 15-20



Interval 20-25



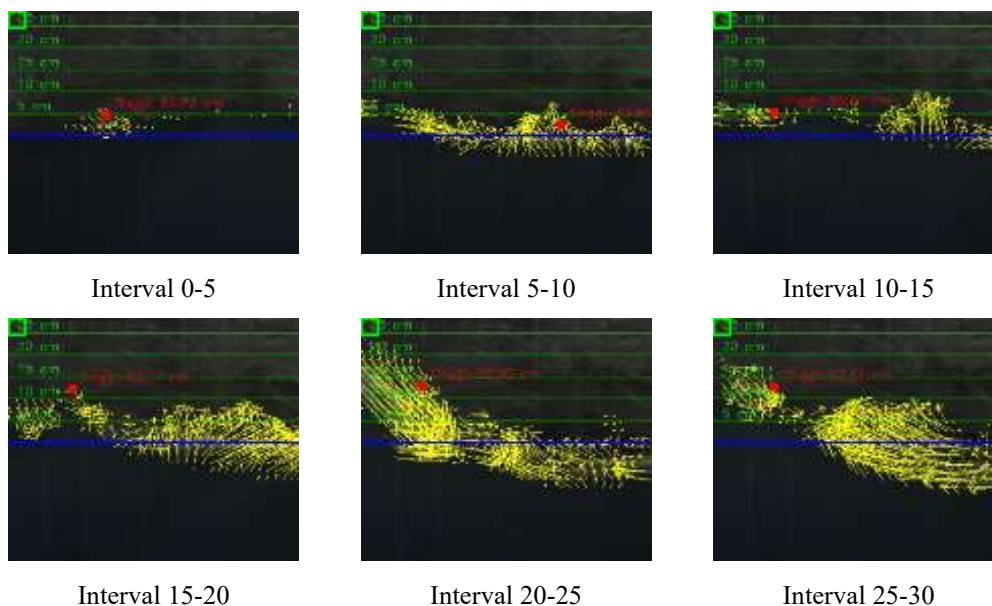
Interval 25-30

Gambar 4. 15 Pengujian sistem pada latar belakang hitam dengan frekuensi 10

Hasil pengukuran menunjukkan rata-rata error sebesar 32,74%. Berdasarkan analisis, sistem kamera menunjukkan kinerja yang lebih akurat karena hasil deteksi tinggi gelombang konsisten dengan visual, sedangkan sensor ultrasonik cenderung memberikan pembacaan lebih tinggi akibat pantulan dan tidak mampu untuk mendeteksi objek pada kondisi dinamis. Untuk menguji akurasi deteksi puncak, digunakan latar belakang hitam sebagai acuan. Dari 6 sampel citra yang dipilih secara acak oleh program pada setiap interval 5 detik, 5 berhasil mendeteksi puncak dengan tepat, sementara itu terdapat 1 kesalahan deteksi terhadap latar belakang.

Tabel 4. 12 Pengujian sistem pada latar belakang hitam dengan frekuensi 11

NO	Lux (lx)	10 cm (px)	Interval Waktu (s)	Rata-Rata Kamera (cm)	Rata-Rata Ultrasonic (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
1.	335	55,87	0-5	84.72	124.76	40.04	32.10
2.	335	55,87	5-10	82.54	130.69	48.15	36.83
3.	335	55,87	10-15	85.27	128.98	43.71	34.98
4.	335	55,87	15-20	92.17	131	38.83	29.52
5.	335	55,87	20-25	92.9	130.46	37.56	28.74
6.	335	55,87	25-30	92.54	130.86	38.32	29.33
Rata-Rata Error							31.92

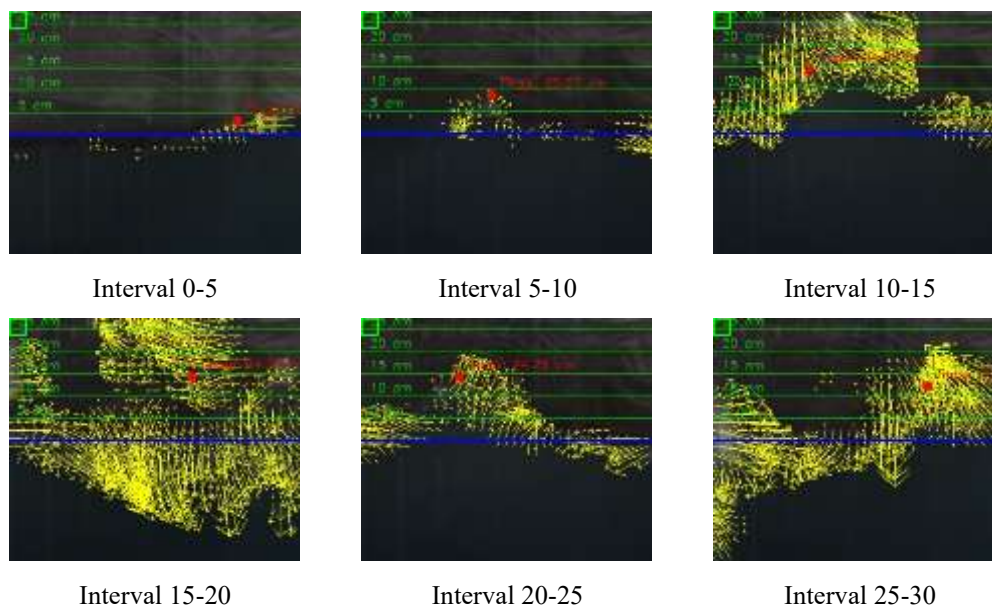


Gambar 4. 16 Pengujian sistem pada latar belakang hitam dengan frekuensi 11

Hasil pengukuran menunjukkan rata-rata error sebesar 31,92%. Berdasarkan analisis, sistem kamera menunjukkan kinerja yang lebih akurat karena hasil deteksi tinggi gelombang konsisten dengan visual, sedangkan sensor ultrasonik cenderung memberikan pembacaan lebih tinggi akibat pantulan dan tidak mampu untuk mendeteksi objek pada kondisi dinamis. Untuk menguji akurasi deteksi puncak, digunakan latar belakang hitam sebagai acuan. Dari 6 sampel citra yang dipilih secara acak oleh program pada setiap interval 5 detik, 5 berhasil mendeteksi puncak dengan tepat, sementara itu terdapat 1 kesalahan deteksi terhadap latar belakang.

Tabel 4. 13 Pengujian sistem pada latar belakang hitam dengan frekuensi 12

NO	Lux (lx)	10 cm (px)	Interval Waktu (s)	Rata-Rata Kamera (cm)	Rata-Rata Ultrasonic (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
1.	311	55,92	0-5	83.93	117.49	33.56	28.55
2.	311	55,92	5-10	88.57	131.85	43.28	32.82
3.	311	55,92	10-15	94.28	131.84	37.56	28.82
4.	311	55,92	15-20	94.28	131.56	37.28	28.46
5.	311	55,92	20-25	94.28	131.85	37.57	28.63
6.	311	55,92	25-30	92.14	131.84	39.70	30.12
Rata-Rata Error							29.90

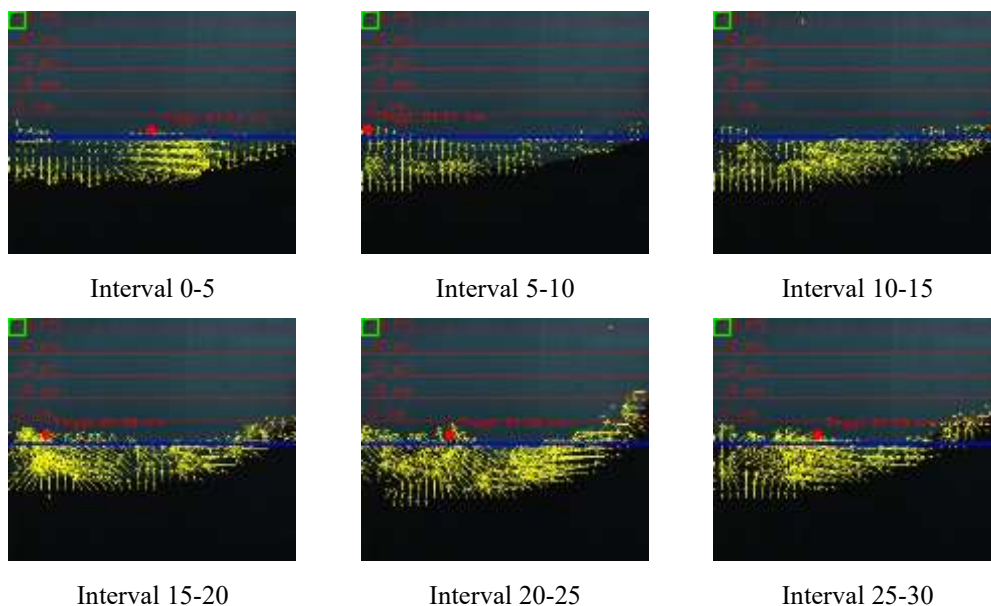


Gambar 4. 17 Pengujian sistem pada latar belakang hitam dengan frekuensi 12

Hasil pengukuran menunjukkan rata-rata error sebesar 29,90%. Berdasarkan analisis, sistem kamera menunjukkan kinerja yang lebih akurat karena hasil deteksi tinggi gelombang konsisten dengan visual, sedangkan sensor ultrasonik cenderung memberikan pembacaan lebih tinggi akibat pantulan dan tidak mampu untuk mendeteksi objek pada kondisi dinamis. Untuk menguji akurasi deteksi puncak, digunakan latar belakang hitam sebagai acuan. Dari 6 sampel citra yang dipilih secara acak oleh program pada setiap interval 5 detik, 5 berhasil mendeteksi puncak dengan tepat, sementara itu terdapat 1 kesalahan deteksi terhadap belakang.

Tabel 4. 14 Pengujian sistem pada latar belakang kuning dengan frekuensi 9

NO	Lux (lx)	10 cm (px)	Interval Waktu (s)	Rata-Rata Kamera (cm)	Rata-Rata Ultrasonic (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
1.	325	55,99	0-5	82.43	126.28	43.85	34.73
2.	325	55,99	5-10	82.61	129.71	47.10	36.31
3.	325	55,99	10-15	83.14	128.5	45.36	35.29
4.	325	55,99	15-20	84.96	129.64	44.68	34.47
5.	325	55,99	20-25	83.7	128.75	45.05	34.98
6.	325	55,99	25-30	85.6	126.8	41.20	32.49
Rata-Rata Error							34.71

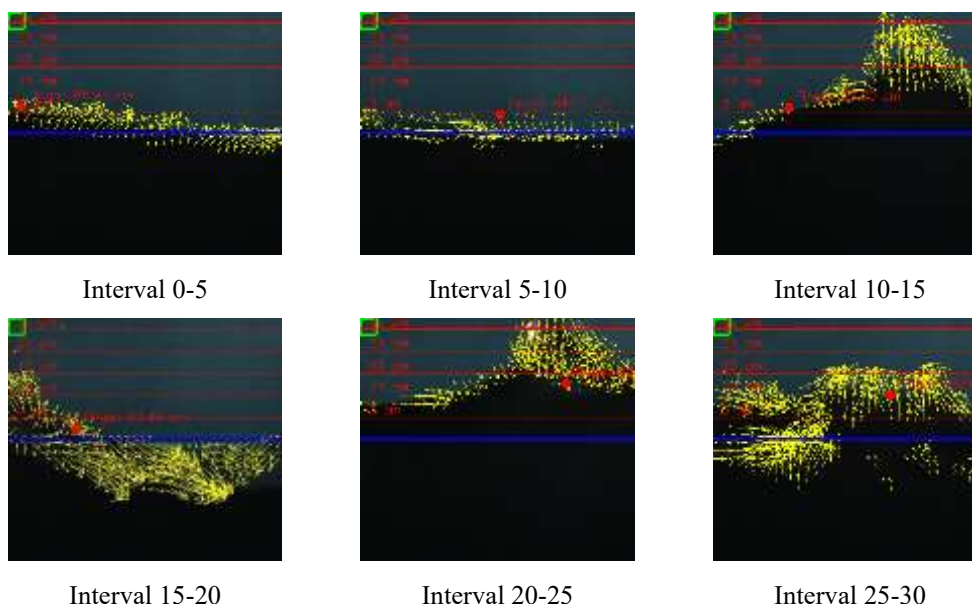


Gambar 4. 18 Pengujian sistem pada latar belakang kuning dengan frekuensi 9

Hasil pengukuran menunjukkan rata-rata error sebesar 34,71%. Berdasarkan analisis, sistem kamera menunjukkan kinerja yang lebih akurat karena hasil deteksi tinggi gelombang konsisten dengan visual, sedangkan sensor ultrasonik cenderung memberikan pembacaan lebih tinggi akibat pantulan dan tidak mampu untuk mendeteksi objek pada kondisi dinamis. Untuk menguji akurasi deteksi puncak, digunakan latar belakang kuning sebagai acuan. Dari 6 sampel citra yang dipilih secara acak oleh program pada setiap interval 5 detik, seluruhnya berhasil mendeteksi puncak gelombang dengan tepat.

Tabel 4. 15 Pengujian sistem pada latar belakang kuning dengan frekuensi 10

NO	Lux (lx)	10 cm (px)	Interval Waktu (s)	Rata-Rata Kamera (cm)	Rata-Rata Ultrasonic (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
1.	319	55,85	0-5	85.96	129.49	43.53	33.61
2.	319	55,85	5-10	84.21	131	46.79	35.70
3.	319	55,85	10-15	85.79	130.93	45.14	34.47
4.	319	55,85	15-20	82.46	131.03	48.57	37.06
5.	319	55,85	20-25	92.63	131.31	38.68	29.46
6.	319	55,85	25-30	90	130.75	40.75	31.18
Rata-Rata Error							33.91

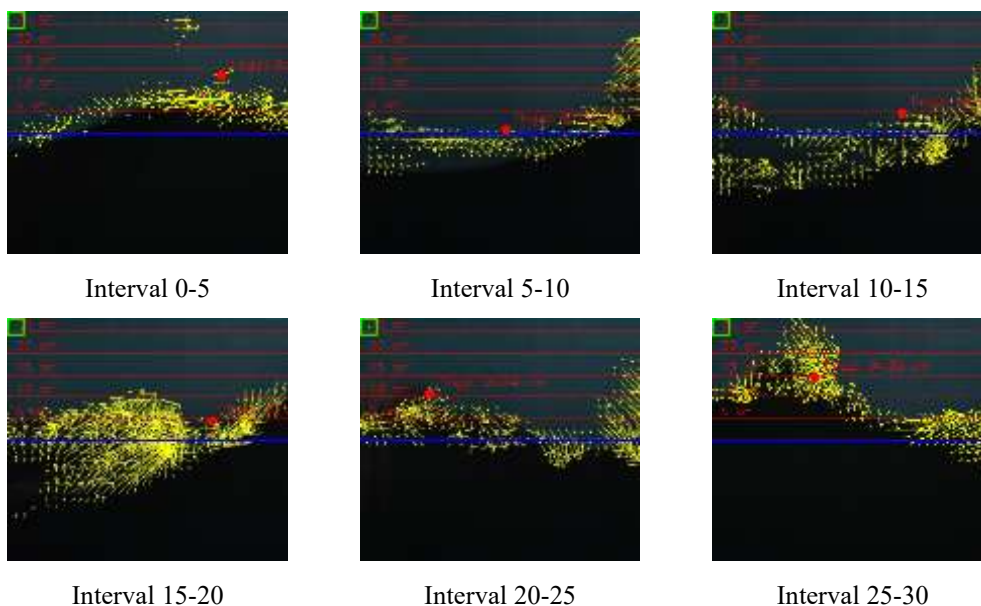


Gambar 4. 19 Pengujian sistem pada latar belakang kuning dengan frekuensi 10

Hasil pengukuran menunjukkan rata-rata error sebesar 33,91%. Berdasarkan analisis, sistem kamera menunjukkan kinerja yang lebih akurat karena hasil deteksi tinggi gelombang konsisten dengan visual, sedangkan sensor ultrasonik cenderung memberikan pembacaan lebih tinggi akibat pantulan dan tidak mampu untuk mendeteksi objek pada kondisi dinamis. Untuk menguji akurasi deteksi puncak, digunakan latar belakang kuning sebagai acuan. Dari 6 sampel citra yang dipilih secara acak oleh program pada setiap interval 5 detik, seluruhnya berhasil mendeteksi puncak gelombang dengan tepat.

Tabel 4. 16 Pengujian sistem pada latar belakang kuning dengan frekuensi 11

NO	Lux (lx)	10 cm (px)	Interval Waktu (s)	Rata-Rata Kamera (cm)	Rata-Rata Ultrasonic (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
1.	312	56,05	0-5	93.27	131.49	38.22	29.06
2.	312	56,05	5-10	80.73	131.18	50.45	38.45
3.	312	56,05	10-15	84.54	131.57	47.03	35.74
4.	312	56,05	15-20	84.36	130.7	46.34	35.45
5.	312	56,05	20-25	90.54	131.37	40.83	31.08
6.	312	56,05	25-30	94.36	131.29	36.93	28.13
Rata-Rata Error							32.65

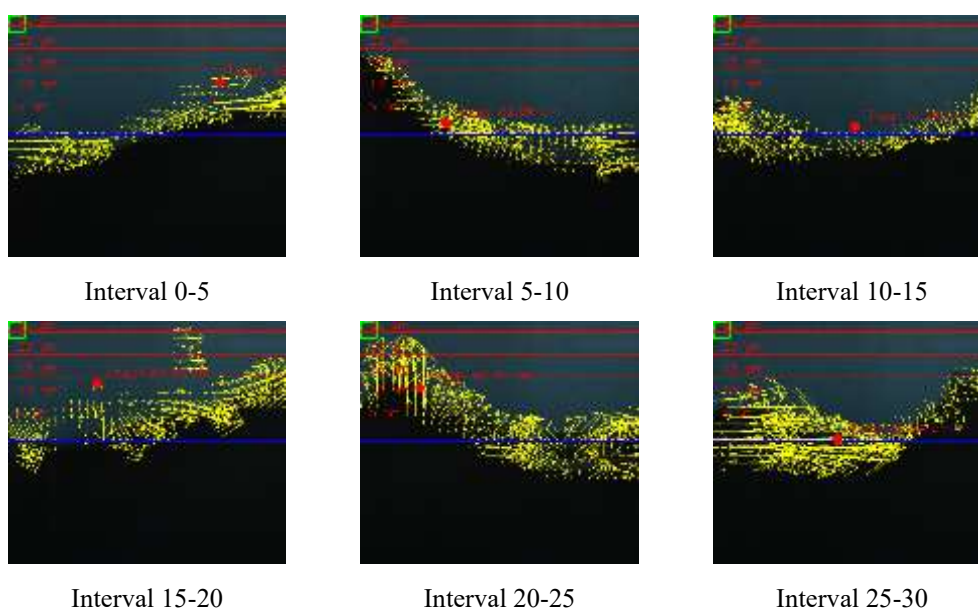


Gambar 4. 20 Pengujian sistem pada latar belakang kuning dengan frekuensi 11

Hasil pengukuran menunjukkan rata-rata error sebesar 32,65%. Berdasarkan analisis, sistem kamera menunjukkan kinerja yang lebih akurat karena hasil deteksi tinggi gelombang konsisten dengan visual, sedangkan sensor ultrasonik cenderung memberikan pembacaan lebih tinggi akibat pantulan dan tidak mampu untuk mendeteksi objek pada kondisi dinamis. Untuk menguji akurasi deteksi puncak, digunakan latar belakang kuning sebagai acuan. Dari 6 sampel citra yang dipilih secara acak oleh program pada setiap interval 5 detik, 3 berhasil mendeteksi puncak dengan tepat, sementara itu terdapat 3 kesalahan deteksi terhadap latar belakang.

Tabel 4. 17 Pengujian sistem pada latar belakang kuning dengan frekuensi 12

NO	Lux (lx)	10 cm (px)	Interval Waktu (s)	Rata-Rata Kamera (cm)	Rata-Rata Ultrasonic (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
1.	312	55,73	0-5	92.14	131.82	39.68	30.10
2.	312	55,73	5-10	82.86	131.77	48.91	37.12
3.	312	55,73	10-15	81.96	131.93	49.97	37.88
4.	312	55,73	15-20	93.39	131.96	38.57	29.23
5.	312	55,73	20-25	92.32	131.85	39.53	29.98
6.	312	55,73	25-30	80.54	131.84	51.30	38.91
Rata-Rata Error							33.87

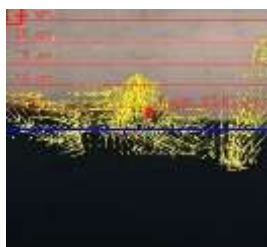


Gambar 4. 21 Pengujian sistem pada latar belakang kuning dengan frekuensi 12

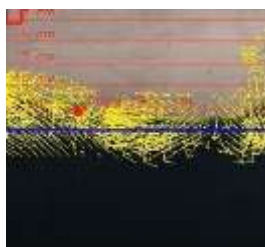
Hasil pengukuran menunjukkan rata-rata error sebesar 33,87%. Berdasarkan analisis, sistem kamera menunjukkan kinerja yang lebih akurat karena hasil deteksi tinggi gelombang konsisten dengan visual, sedangkan sensor ultrasonik cenderung memberikan pembacaan lebih tinggi akibat pantulan dan tidak mampu untuk mendeteksi objek pada kondisi dinamis. Untuk menguji akurasi deteksi puncak, digunakan latar belakang kuning sebagai acuan. Dari 6 sampel citra yang dipilih secara acak oleh program pada setiap interval 5 detik, 3 berhasil mendeteksi puncak dengan tepat, sementara itu terdapat 3 kesalahan deteksi terhadap latar belakang.

Tabel 4. 18 Pengujian sistem pada latar belakang putih dengan frekuensi 9

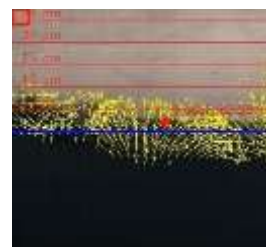
NO	Lux (lx)	10 cm (px)	Interval Waktu (s)	Rata-Rata Kamera (cm)	Rata-Rata Ultrasonic (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
1.	319	56,10	0-5	82.36	121.7	39.34	32.33
2.	319	56,10	5-10	82.91	127.83	44.92	35.15
3.	319	56,10	10-15	80.91	126.12	45.21	35.84
4.	319	56,10	15-20	80.91	128.78	47.87	37.18
5.	319	56,10	20-25	81.09	128.26	47.17	36.77
6.	319	56,10	25-30	80.91	128.66	47.75	37.12
Rata-Rata Error							35.73



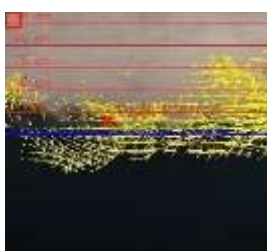
Interval 0-5



Interval 5-10



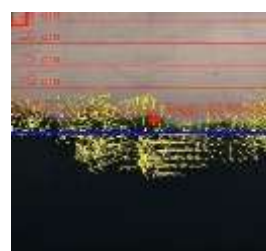
Interval 10-15



Interval 15-20



Interval 20-25



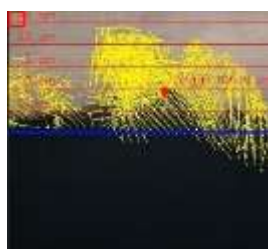
Interval 25-30

Gambar 4. 22 Pengujian sistem pada latar belakang putih dengan frekuensi 9

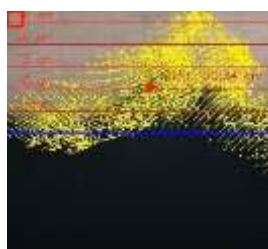
Hasil pengukuran menunjukkan rata-rata error sebesar 35,73%. Berdasarkan analisis, sistem kamera menunjukkan kinerja yang lebih akurat karena hasil deteksi tinggi gelombang konsisten dengan visual, sedangkan sensor ultrasonik cenderung memberikan pembacaan lebih tinggi akibat pantulan dan tidak mampu untuk mendeteksi objek pada kondisi dinamis. Untuk menguji akurasi deteksi puncak, digunakan latar belakang putih sebagai acuan. Dari 6 sampel citra yang dipilih secara acak oleh program pada setiap interval 5 detik, seluruhnya berhasil mendeteksi puncak gelombang dengan tepat.

Tabel 4. 19 Pengujian sistem pada latar belakang putih dengan frekuensi 10

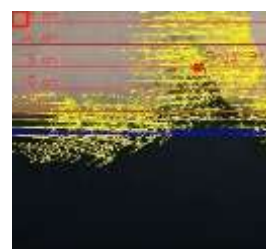
NO	Lux (lx)	10 cm (px)	Interval Waktu (s)	Rata-Rata Kamera (cm)	Rata-Rata Ultrasonic (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
1.	304	55,93	0-5	82.32	130.69	48.37	37.00
2.	304	55,93	5-10	80.18	130.52	50.34	38.56
3.	304	55,93	10-15	83.39	130.83	47.44	36.26
4.	304	55,93	15-20	82.67	130.69	48.02	36.74
5.	304	55,93	20-25	94.27	130.65	36.38	27.85
6.	304	55,93	25-30	91.59	130.52	38.93	29.83
Rata-Rata Error							34.71



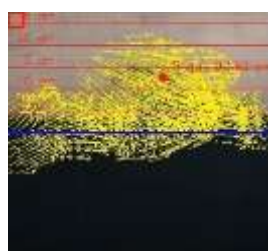
Interval 0-5



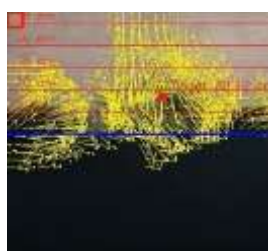
Interval 5-10



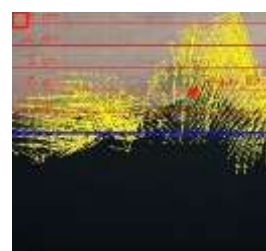
Interval 10-15



Interval 15-20



Interval 20-25



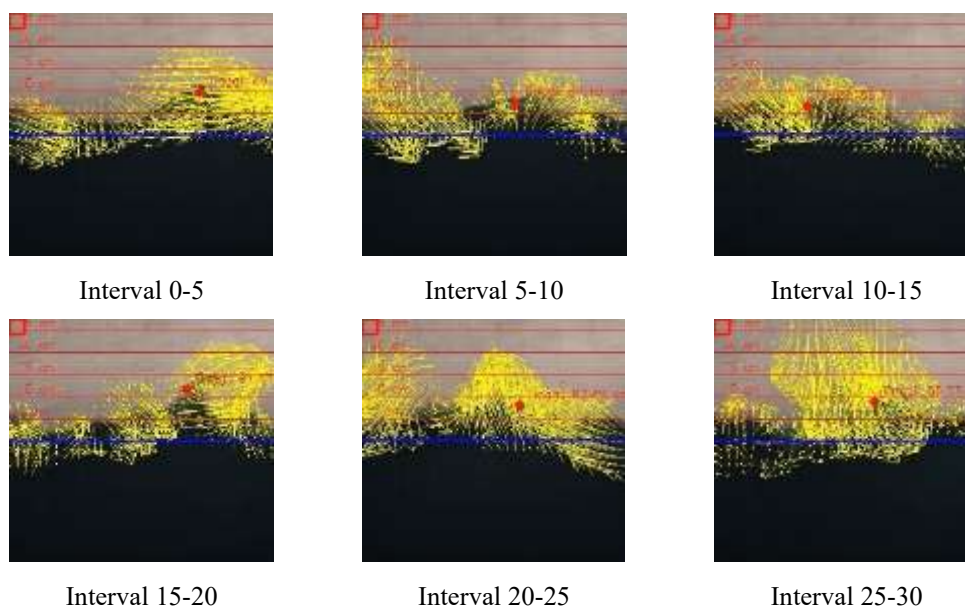
Interval 25-30

Gambar 4. 23 Pengujian sistem pada latar belakang putih dengan frekuensi 10

Hasil pengukuran menunjukkan rata-rata error sebesar 34,71%. Berdasarkan analisis, sistem kamera menunjukkan kinerja yang lebih akurat karena hasil deteksi tinggi gelombang konsisten dengan visual, sedangkan sensor ultrasonik cenderung memberikan pembacaan lebih tinggi akibat pantulan dan tidak mampu untuk mendeteksi objek pada kondisi dinamis. Untuk menguji akurasi deteksi puncak, digunakan latar belakang putih sebagai acuan. Dari 6 sampel citra yang dipilih secara acak oleh program pada setiap interval 5 detik, 5 berhasil mendeteksi puncak dengan tepat, sementara itu terdapat 1 kesalahan deteksi terhadap latar belakang.

Tabel 4. 20 Pengujian sistem pada latar belakang putih dengan frekuensi 11

NO	Lux (lx)	10 cm (px)	Interval Waktu (s)	Rata-Rata Kamera (cm)	Rata-Rata Ultrasonic (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
1.	323	56,00	0-5	94.28	130.62	36.34	27.83
2.	323	56,00	5-10	84.28	130.75	46.47	35.53
3.	323	56,00	10-15	80.36	130.58	50.22	38.47
4.	323	56,00	15-20	90.35	130.38	40.03	30.70
5.	323	56,00	20-25	84.46	130.75	46.29	35.40
6.	323	56,00	25-30	84.1	130.44	46.34	35.52
Rata-Rata Error							33.91

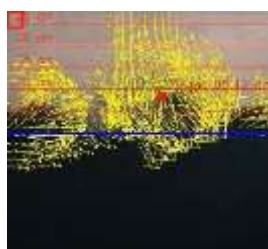


Gambar 4. 24 Pengujian sistem pada latar belakang putih dengan frekuensi 11

Hasil pengukuran menunjukkan rata-rata error sebesar 33,91%. Berdasarkan analisis, sistem kamera menunjukkan kinerja yang lebih akurat karena hasil deteksi tinggi gelombang konsisten dengan visual, sedangkan sensor ultrasonik cenderung memberikan pembacaan lebih tinggi akibat pantulan dan tidak mampu untuk mendeteksi objek pada kondisi dinamis. Untuk menguji akurasi deteksi puncak, digunakan latar belakang putih sebagai acuan. Dari 6 sampel citra yang dipilih secara acak oleh program pada setiap interval 5 detik, seluruhnya berhasil mendeteksi puncak gelombang dengan tepat.

Tabel 4. 21 Pengujian sistem pada latar belakang putih dengan frekuensi 12

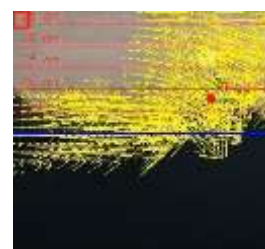
NO	Lux (lx)	10 cm (px)	Interval Waktu (s)	Rata-Rata Kamera (cm)	Rata-Rata Ultrasonic (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
1.	307	56,17	0-5	83.09	131.92	48.83	37.00
2.	307	56,17	5-10	86.72	131.74	45.02	34.17
3.	307	56,17	10-15	84.36	131.87	47.51	36.03
4.	307	56,17	15-20	82.72	131.94	49.22	37.30
5.	307	56,17	20-25	86.35	132.02	45.67	34.60
6.	307	56,17	25-30	82.36	132.05	49.69	37.63
Rata-Rata Error							36.12



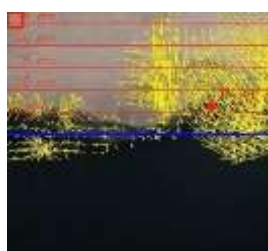
Interval 0-5



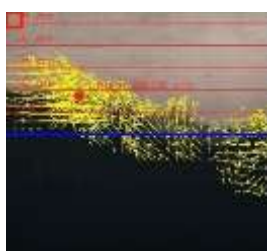
Interval 5-10



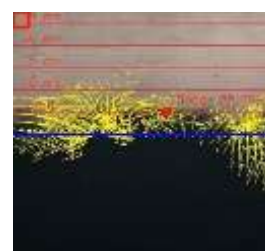
Interval 10-15



Interval 15-20



Interval 20-25



Interval 25-30

Gambar 4. 25 Pengujian sistem pada latar belakang putih dengan frekuensi 12

Hasil pengukuran menunjukkan rata-rata error sebesar 36,12%. Berdasarkan analisis, sistem kamera menunjukkan kinerja yang lebih akurat karena hasil deteksi tinggi gelombang konsisten dengan visual, sedangkan sensor ultrasonik cenderung memberikan pembacaan lebih tinggi akibat pantulan dan tidak mampu untuk mendeteksi objek pada kondisi dinamis. Untuk menguji akurasi deteksi puncak, digunakan latar belakang putih sebagai acuan. Dari 6 sampel citra yang dipilih secara acak oleh program pada setiap interval 5 detik, seluruhnya berhasil mendeteksi puncak gelombang dengan tepat.

4.4.3 Analisis Visual terhadap Akurasi Kamera dan Sensor Ultrasonik

Pengujian terhadap sistem pengukuran tinggi gelombang dilakukan dengan pendekatan komparatif antara hasil kamera berbasis pengolahan citra, sensor ultrasonik JSN-SR04T, dan pengamatan visual langsung sebagai acuan utama. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menilai tingkat akurasi masing-masing metode dalam mendeteksi tinggi dan bentuk gelombang air yang dihasilkan oleh *wave maker*. Pengamatan visual diposisikan sebagai acuan utama karena representasi citra secara langsung memungkinkan penilaian nyata terhadap puncak dan bentuk gelombang. Oleh karena itu, kesesuaian hasil dari kamera dan sensor ultrasonik dibandingkan terhadap kondisi visual aktual. Dan di bawah adalah Kesimpulan Hasil Komparatif:

1. Sistem kamera berbasis pengolahan citra menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap kondisi visual. Kamera mampu merekam dan menganalisis bentuk gelombang secara utuh, termasuk posisi puncak dan titik 0 yang dianggap dasar gelombang oleh sistem yang sudah disesuaikan. Hasil pengukuran dari kamera secara umum sesuai atau sejalan dengan tinggi gelombang yang terlihat secara visual, baik dalam hal pola maupun variasi dalam bentuk tinggi gelombang yang di deteksi oleh kamera.
2. Sensor ultrasonik JSN-SR04T menunjukkan ketidaksesuaian terhadap kondisi visual, khususnya dalam merepresentasikan puncak gelombang. Data yang dihasilkan oleh sensor sering mengalami deviasi dan cenderung fluktuatif, terutama saat permukaan air mengalami perubahan cepat. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun sensor dapat memberikan data tinggi gelombang air, namun nilai yang di berikan sering kali tidak mencerminkan kondisi gelombang yang sebenarnya.
3. Jika dibandingkan terhadap kondisi visual, kamera memiliki akurasi yang lebih sesuai daripada sensor ultrasonik. Hal ini membuktikan bahwa metode pengukuran berbasis kamera lebih andal untuk mendeteksi tinggi gelombang secara real-time tanpa mengganggu bentuk alami gelombang.

Selain pengujian berdasarkan perbandingan sensor, dilakukan pula evaluasi terhadap performa deteksi kamera berdasarkan warna latar belakang yang digunakan. Tujuannya adalah untuk menilai sejauh mana faktor visual eksternal memengaruhi akurasi sistem dalam mengenali gelombang air.

Tabel 4. 22 Persentase kesalahan sistem deteksi

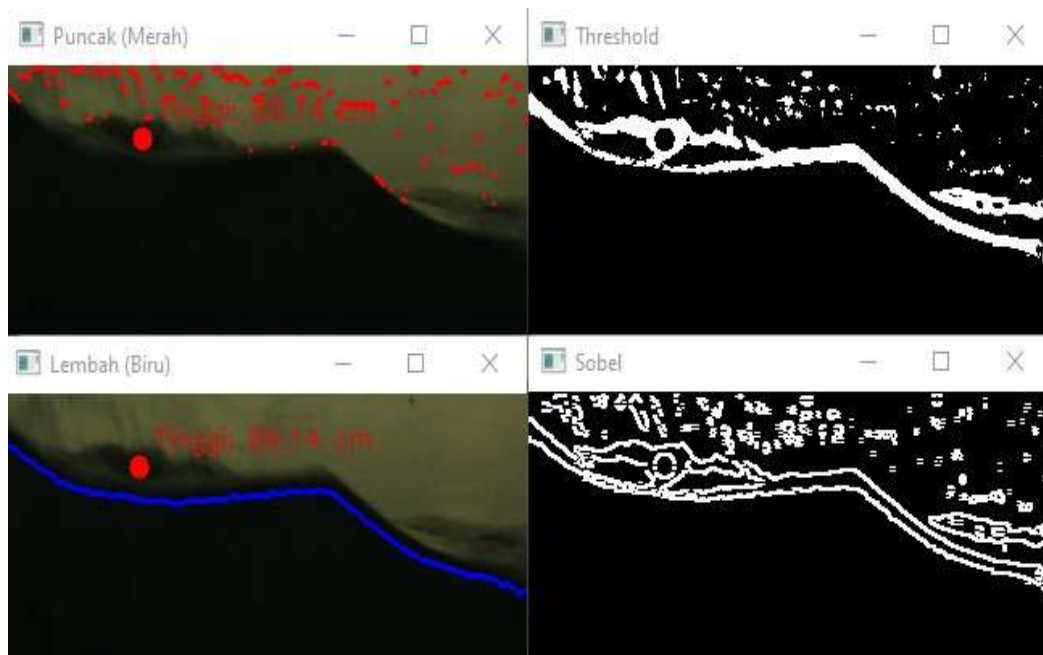
Latar Belakang	Jumlah Pengujian	Gambar per pengujian	Total Gambar	Total Kesalahan	Persentase Kesalahan (%)	Jenis kesalahan dominan
Hitam	4	6	28	5	17,86	Mendeteksi latar belakang
Kuning	4	6	28	6	21,43	Mendeteksi latar belakang
Putih	4	6	28	1	3,57	Mendeteksi latar belakang

Dari hasil tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa latar belakang putih memberikan performa terbaik dalam hal deteksi visual dengan tingkat kesalahan paling rendah yaitu sebesar 3,57%. Sebaliknya, latar belakang kuning menunjukkan tingkat kesalahan tertinggi sebesar 21,43% yang disebabkan oleh kemiripan warna antara latar dan objek gelombang air. Latar belakang hitam berada di posisi tengah dengan persentase kesalahan sebesar 17,86%, namun cukup stabil hingga frekuensi tertentu. Secara umum, pemilihan warna latar memiliki pengaruh signifikan terhadap akurasi sistem kamera dalam mendeteksi tinggi gelombang secara visual.

Dalam proses pengukuran tinggi gelombang berbasis kamera, konversi dari satuan piksel ke satuan fisik (cm) dilakukan dengan pendekatan kalibrasi manual. Berdasarkan data yang tercantum dalam Tabel 4.6 hingga Tabel 4.17, diperoleh bahwa panjang 10 cm dalam citra digital setara dengan sekitar 26 piksel. Nilai ini digunakan sebagai acuan untuk mengubah hasil deteksi vertikal pada citra menjadi tinggi gelombang dalam satuan sentimeter.

4.5 Proses Pengolahan Data Per Frame

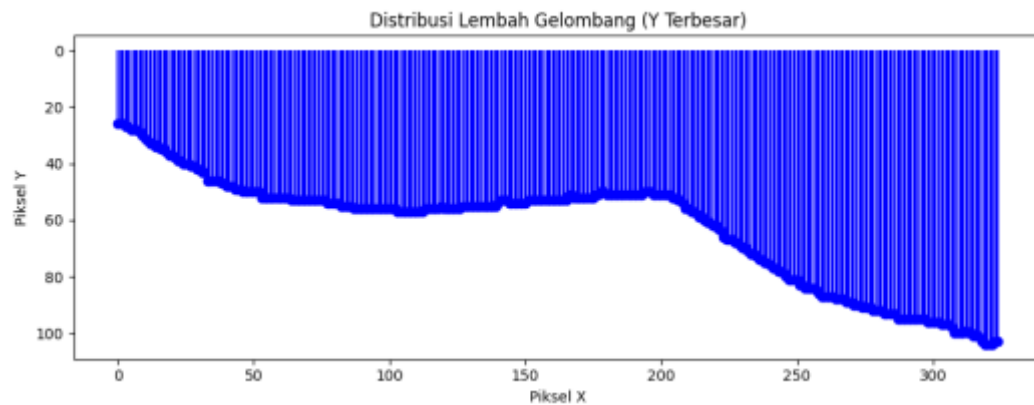
Pengolahan data pada penelitian ini diawali dengan mengekstraksi 1.000 titik amplitudo dari setiap frame citra permukaan gelombang, guna memastikan sinyal terekam detail dan konsisten. Data hasil ekstraksi dianalisis menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk mengubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi dan mengidentifikasi frekuensi dominan. Selanjutnya, *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) digunakan untuk merekonstruksi sinyal ke domain waktu, sehingga dapat dibandingkan dengan sinyal asli. Tahap akhir adalah perhitungan *Root Mean Square* (RMS) dari hasil IFFT sebagai indikator tinggi gelombang efektif, karena nilai RMS merepresentasikan energi gelombang yang berkaitan dengan ketinggian air. Proses ini diulang untuk semua data pengujian pada frekuensi 9–13 Hz.



Gambar 4. 26 Tahapan Pengolahan Citra untuk Deteksi Gelombang
Dokumentasi Pribadi

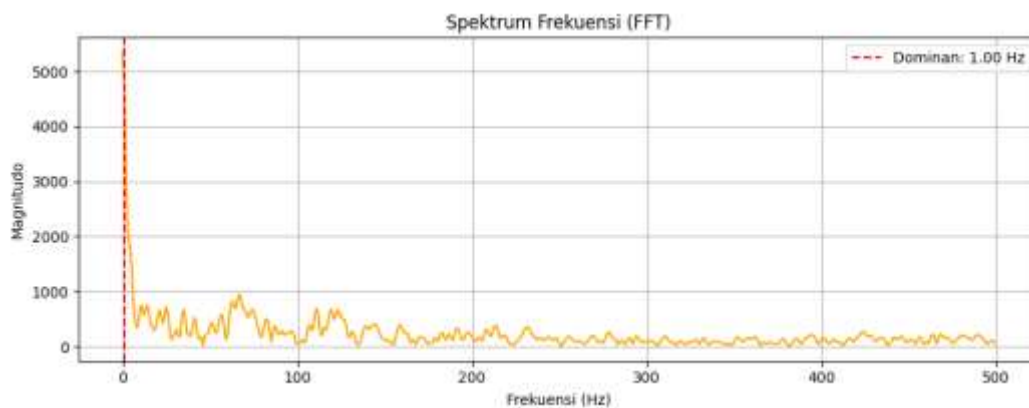
Gambar 4.26 memperlihatkan tahapan pengolahan citra untuk mengekstraksi titik amplitudo. Kiri atas menampilkan deteksi puncak gelombang (titik merah) beserta ketinggiannya, sedangkan kiri bawah menunjukkan deteksi lembah (garis biru). Kanan atas adalah hasil thresholding untuk memisahkan

permukaan gelombang dari latar belakang, dan kanan bawah merupakan deteksi tepi dengan operator Sobel guna menonjolkan kontur air. Seluruh tahapan ini diterapkan pada setiap frame sebelum ekstraksi 1.000 titik amplitudo untuk analisis.



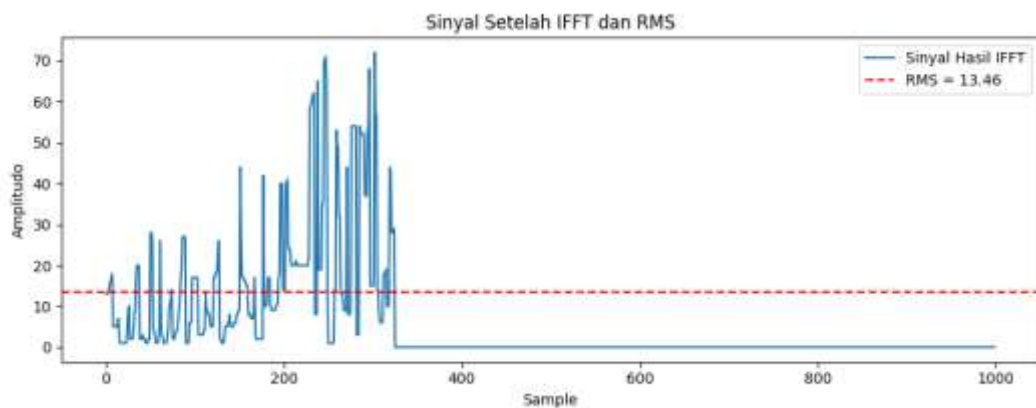
Gambar 4. 27 Hasil Ekstraksi 1.000 Titik Amplitudo dari Satu Frame Dokumentasi Pribadi

Gambar 4.27 menampilkan hasil ekstraksi 1.000 titik amplitudo dari satu frame citra permukaan gelombang. Sumbu X merepresentasikan posisi piksel secara horizontal, sedangkan sumbu Y menunjukkan posisi piksel vertikal yang terdeteksi sebagai lembah gelombang. Titik biru menggambarkan distribusi ketinggian lembah di setiap posisi X, dengan garis vertikal yang menghubungkan titik tersebut ke sumbu atas untuk memperjelas variasi ketinggian sepanjang profil gelombang. Data ini menjadi dasar analisis lanjutan menggunakan FFT, IFFT, dan perhitungan RMS guna memperoleh karakteristik gelombang secara kuantitatif.



Gambar 4. 28 Spektrum Frekuensi Hasil FFT dengan Magnitudo Dominan Dokumentasi Pribadi

Gambar 4.28 memperlihatkan spektrum frekuensi hasil *analisis Fast Fourier Transform* (FFT) terhadap sinyal amplitudo lembah gelombang yang telah diekstraksi sebelumnya. Sumbu horizontal merepresentasikan frekuensi (Hz), sedangkan sumbu vertikal menunjukkan nilai magnitudo pada setiap komponen frekuensi. Dari hasil analisis terlihat bahwa puncak spektrum terjadi pada frekuensi 1,00 Hz yang ditandai dengan garis putus-putus berwarna merah. Nilai ini merupakan magnitude dominan, yaitu amplitudo tertinggi pada domain frekuensi yang menunjukkan komponen frekuensi utama pada sinyal gelombang. Besarnya magnitude dominan ini menjadi indikator kuatnya energi gelombang pada frekuensi tersebut, dan nilai inilah yang selanjutnya digunakan pada tahap rekonstruksi sinyal melalui *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) sebelum dilakukan perhitungan RMS.



Gambar 4. 29 Sinyal Hasil IFFT dengan Nilai RMS sebagai Indikator Tinggi Gelombang Efektif
Dokumentasi Pribadi

Gambar 4.29 menampilkan sinyal hasil rekonstruksi menggunakan *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) dari komponen frekuensi dominan yang diperoleh pada tahap FFT sebelumnya. Sumbu horizontal menunjukkan indeks sampel 1.000 titik, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan amplitudo sinyal. Garis biru merepresentasikan bentuk sinyal setelah proses IFFT, sedangkan garis putus-putus merah menunjukkan nilai *Root Mean Square* (RMS) sebesar 13,46. Nilai RMS ini menggambarkan tinggi gelombang efektif yang merepresentasikan besarnya energi gelombang pada frame tersebut. Perhitungan RMS dilakukan berdasarkan keseluruhan sampel sinyal hasil IFFT, sehingga memberikan ukuran yang konsisten terhadap karakteristik gelombang di domain waktu.

Dari tahapan yang ditunjukkan pada Gambar 4.26 hingga Gambar 4.29, dapat disimpulkan bahwa proses ekstraksi 1.000 titik amplitudo, analisis spektrum menggunakan FFT, rekonstruksi sinyal dengan IFFT, dan perhitungan RMS telah berhasil dilakukan pada satu frame sebagai contoh. Proses ini mampu mengidentifikasi komponen frekuensi dominan pada gelombang sekaligus menghitung tinggi gelombang efektif yang merepresentasikan energi gelombang. Metode yang sama diterapkan pada seluruh data pengujian dengan frekuensi 9 Hz, 10 Hz, 11 Hz, 12 Hz, dan 13 Hz.

4.6 Hasil Validasi RMS Dengan Mistar

Tabel 4. 23 Hasil validasi RMS dengan mistar

No	Frekuensi Moror	Hasil Tinggi Gelombang RMS (cm)	Hasil Tinggi Gelombang Mistar (cm)	Error (%)
1.	9 Hz	10.18	10	1.80
2.	10 Hz	9.93	6	65.50
3.	11 Hz	11.72	5	134.40
4.	12 Hz	9.49	8	18.63
5.	13 Hz	6.98	7	0.29
Rata – Rata Error				44.92

Berdasarkan Tabel 4.23, perbandingan tinggi gelombang hasil perhitungan RMS dengan pengukuran mistar menunjukkan akurasi yang bervariasi di setiap frekuensi. Pada 9 Hz, error hanya 1,80%, sedangkan pada 10 Hz dan 11 Hz meningkat tajam menjadi 65,50% dan 134,40%. Pada 12 Hz dan 13 Hz, error kembali rendah, yakni 18,63% dan 0,29%. Rata-rata error adalah 44,92%. Perbedaan ini turut dipengaruhi oleh ketidaksamaan titik nol antara pengukuran mistar dan hasil pengolahan citra, di mana pengolahan citra tidak menggunakan acuan titik nol yang sama seperti, sehingga memengaruhi selisih hasil pengukuran.

BAB 5

PENUTUPAN

Bagian ini menyajikan ringkasan hasil dan temuan utama dari penelitian yang telah dilakukan. Kesimpulan yang disampaikan merupakan hasil analisis terhadap pengujian sistem, mencakup efektivitas metode yang digunakan serta evaluasi kinerja sistem secara keseluruhan.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis pada sistem pengukur tinggi gelombang air menggunakan kamera berbasis pengolahan citra, dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Pengolahan citra dengan metode *optical flow* pada penelitian ini terbukti mampu mendeteksi pergerakan dan tinggi gelombang dengan baik selama pencahayaan serta kontras latar belakang terjaga. Dari enam kali percobaan, hanya pada aperture f/11 yang gagal mendeteksi gelombang. Dengan tiga latar belakang (putih, hitam, dan kuning), diperoleh tingkat error sebesar 16,67% dan tingkat keberhasilan 83,33%. Hasil deteksi tinggi gelombang dengan pengolahan citra menunjukkan bahwa tingkat kesalahan bervariasi pada setiap latar belakang. Pada latar belakang hitam, tercatat 5 kesalahan dari 28 data atau sebesar 17,86%. Pada latar belakang kuning, terdapat 6 kesalahan dari 28 data dengan persentase 21,43%. Sementara itu, latar belakang putih memberikan hasil terbaik dengan hanya 1 kesalahan dari 28 data, yaitu sebesar 3,57%. Hal ini menunjukkan bahwa latar belakang putih lebih mendukung sistem kamera dalam mendeteksi tinggi gelombang dengan akurasi yang lebih baik dibandingkan latar belakang hitam maupun kuning.
2. Sensor ultrasonik JSN-SR04T pada penelitian ini menghasilkan rata-rata error sebesar 33,38% dibandingkan hasil kamera dan pengamatan visual. Data kamera lebih mendekati kondisi aktual, sedangkan pembacaan ultrasonik sering lebih tinggi dan tidak stabil. Ketidakakuratan ini terutama disebabkan oleh pantulan gelombang suara serta gangguan interferensi elektromagnetik motor 3-phase, sehingga sensor ultrasonik kurang efektif digunakan sebagai alat validasi utama pada kondisi gelombang dinamis.

3. Kamera berbasis pengolahan citra digunakan untuk mengukur tinggi gelombang, sedangkan metode optical flow dipakai untuk mendeteksi pergerakan gelombang. Proses optimasi sistem menunjukkan bahwa latar belakang putih memberikan hasil paling baik dengan tingkat kesalahan terendah sebesar 3,57%. Perbandingan hasil kamera dengan sensor ultrasonik menghasilkan rata-rata error 33,38%. Selanjutnya, data dari frame diolah dengan mengambil 1.000 titik gelombang, dianalisis menggunakan FFT, IFFT, dan RMS, lalu divalidasi dengan mistar. Hasilnya menunjukkan rata-rata error 44,92%, dengan error terendah 0,29% dan error tertinggi 134,40%. Secara keseluruhan, metode kamera terbukti lebih akurat dibandingkan sensor ultrasonik.

5.2 Saran

Dalam penelitian ini masih terdapat beberapa keterbatasan, oleh karena itu perlu adanya pengembangan pada penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Penelitian ini menunjukkan bahwa pengujian pada *wave tank* dengan lingkungan terkendali menghasilkan kesalahan terendah 3,57% pada latar belakang putih. Karena area pengujian masih terbatas, penelitian berikutnya disarankan mencakup seluruh bidang pandang kamera dengan pengaturan pencahayaan yang lebih optimal.
2. Metode *optical flow* berbasis OpenCV dan Python terbukti cukup efektif dalam mendeteksi pergerakan serta mengukur tinggi gelombang. Walaupun belum dibandingkan dengan metode citra lain, performanya sudah baik dan dapat dijadikan dasar pengembangan dengan menambahkan metode deteksi lain sebagai pembanding.
3. penelitian difokuskan pada pengukuran tinggi gelombang. Hasil menunjukkan kamera mampu mendeteksi dan mengukur tinggi dengan baik, namun parameter lain seperti panjang gelombang dan kecepatan rambat belum dikaji dan direkomendasikan untuk penelitian lanjutan.
4. Hasil pengujian menguatkan bahwa kamera statis dan pencahayaan yang dikendalikan memberikan hasil deteksi yang stabil. Namun, penelitian menyarankan pengembangan fitur kompensasi pencahayaan otomatis dan filter adaptif agar sistem lebih andal terhadap perubahan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

1593. (n.d.).
- Aghenta, L. O., & Iqbal, M. T. (2019). Design and implementation of a low-cost, open source IoT-based SCADA system using ESP32 with OLED, ThingsBoard and MQTT protocol. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, 4(1), 57–86. <https://doi.org/10.3934/ElectrEng.2020.1.57>
- Amrullah, A. (2022). Perbandingan Tingkat Akurasi Pengukuran Ketinggian Air pada Sensor HC-SR04, HY-SRF05, dan JSN-SR04T. *Jurnal Infomedia*, 7(1), 31. <https://doi.org/10.30811/jim.v7i1.2955>
- Enggari, S., Ramadhanu, A., & Marfalino, H. (2022). Peningkatan Digital Image Processing Dalam Mendeskripsikan Tumbuhan Jamur Dengan Segmentasi Warna, Deteksi Tepi Dan Kontur. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis*, 4(1), 70–75. <https://doi.org/10.47233/jteksis.v4i1.358>
- Faradilla, P., Fadillah Rezky, S., Hamdani, R., Informasi, S., & Triguna Dharma, S. (2022). Implementasi Metode Kernel Konvolusi Dan Contrast Stretching Untuk Perbaikan Kualitas Citra Digital. *JURNAL SISTEM INFORMASI TGD*, 1(6), 865. <https://ojs.trigunadharma.ac.id/index.php/jsi>
- Fauzi, R. A., Dwi Hestiani, M., Suciati, D., Saputra, R. A., Pratama Juniar, R., Himawan, T., Pratama, H., Sahrul, M., Alfiansyah, K., Setiabudi, D. P., Kunci, K., & Abstrak, : (2022). Pengenalan Software dan Hardware Komputer Guna Meningkatkan Wawasan Teknologi Kepada Siswa/I SDN Iwul 3 Kecamatan Parung Kabupaten Bogor-Jawa Barat. In *Praxis: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat* (Vol. 2, Issue 2). <http://pijarpemikiran.com/>
- Gautama, P., Ardiansya, R., & Sulistyono, A. B. (2024). Analisis Kerusakan Motor Listrik di Unit Pemurnian Brine PT. XYZ dengan Metode FMEA. In *IMTechno: Journal of Industrial Management and Technology* (Vol. 5, Issue 2). <http://jurnal.bsi.ac.id/index.php/imtechno>
- Habibah, M. U., Kurniawan, M., & Korespondensi, P. (n.d.). *SEGMENTASI*

CITRA WAJAH DENGAN IMPLEMENTASI ADAPTIF THRESHOLD-INTEGRAL IMAGE FACE IMAGE SEGMENTATION WITH IMPLEMENTATION OF ADAPTIVE THRESHOLD-INTEGRAL IMAGE. <https://doi.org/10.25126/jtiik.202183840>

- Hasil, J., Ilmiah, K., Gelombang, P., Dengan, R., Kecepatan, V., Berbasis, M., Open, M., Ramadhan Kopayona, A., Hadi, S., & Chrismianto, D. (2019). JURNAL TEKNIK PERKAPALAN. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 7(4). <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- Hasna, G., Apsari, I., Pramono, S., & Zen, N. A. (2022). *Implementasi Regresi Linier Menggunakan Sensor JSN-SR04T Untuk Monitoring Ketinggian Air Pada Tandon Air Melalui Antares.*
- Hertadi, C. D. P., Sulaiman, M., & Anwar, P. G. P. (2022). Kajian Industri Energi Terbarukan Tenaga Listrik di Indonesia Berdasarkan Arah Kebijakan dan Potensi Alam. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 6(2), 276–283. <https://doi.org/10.33379/gtech.v6i2.1690>
- Hidayat Kurniawan, I., Haryanto, A., Hayat, L., Studi, P. S., Elektro, T., Teknik dan Sains, F., & Muhammadiyah Purwokerto Jl Raya Dukuh Waluh, U. (2024). Penerapan Otomasi Industri Berbasis Programmable Logic Controller untuk Penyortiran Barang Berdasarkan Warna Menggunakan Sensor Vision Implementation of Industrial Automation Based on Programmable Logic Controller for Sorting Goods Based on Color Using Vision Sensor. In *Hal* (Vol. 6, Issue 2). <http://jurnalnasional.ump.ac.id/index.php/JRRE>
- Hotmartua Bagariang, I. F., & Hendrick, H. (2022). Alat Pengukur Ketinggian Air Pada Landasan Pacu Pesawat Dengan Metode Image Processing. *Elektron : Jurnal Ilmiah*, 74–78. <https://doi.org/10.30630/eji.13.2.255>
- Iglesias, G., Ibáñez, O., Castro, A., Rabuñal, J. R., & Dorado, J. (2009). Computer vision applied to wave flume measurements. *Ocean Engineering*, 36(14), 1073–1079. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.06.012>
- Jasron, J. U., Pulo Mangesa, D., Boimau, K., Tarigan, B. V, Maliwemu, E. U. K., & Salombe, M. (2022). *Analisa Potensi Gelombang Laut sebagai*

Sumber Energi Terbarukan Menggunakan Perangkat Oscillating Water Column (OWC) Di Wilayah Perairan Laut Timor.
<http://ejurnal.undana.ac.id/index.php/LJTMU>

kajian terdahulu 3. (n.d.).

KECEPATAN KENDARAAN BERBASIS PEMROSESAN CITRA
Pembimbing, K., Budiyanto, A., & Elvira Sukma Wahyuni, Me. (n.d.).
LEMBAR PENGESAHAN.

Kresna, N., Wiraatmaja, A., & Utaminingrum, F. (2021). *Implementasi Metode Optical Flow untuk Pemilihan Menu Display pada Rancang Bangun Sistem Deteksi Pergerakan Kepala* (Vol. 5, Issue 9). <http://j-ptiik.ub.ac.id>

Liu, Y., Wang, C., Sun, J., Du, S., & Hong, Q. (2022). One-Step Calculation Circuit of FFT and Its Application. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 69(7), 2781–2793.
<https://doi.org/10.1109/TCSI.2022.3159803>

Mozef, E., & Kurniati, S. (2022). Aplikasi pengukur kecepatan bola pada video pertandingan tenis meja menggunakan OpenCV dan Python. *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, Dan Listrik Tenaga)*, 2(1), 11–24. <https://doi.org/10.35313/jitel.v2.i1.2022.11-24>

Muhamad Fadhil Faali, Dimas Suharto, Agung Dwi Prasetya, Abdul Hamid, & Subekti, S. (2024). Analysis of the effect of a spring constant of 980 N/m on a wave energy converter device due to heaving. *JTTM: Jurnal Terapan Teknik Mesin*, 5(2), 208–215.
<https://doi.org/10.37373/jttm.v5i2.1104>

Nabijonovich, S. B., & Najmiddin, G. (2024). *OPTIMIZING PYQT5 DEVELOPMENT WITH QT DESIGNER* (Vol. 2, Issue 4).

Nursoparisa, A. (2019). Perancangan Sistem Kendali Automatisasi Control Debit Air pada Pengisian Galon Menggunakan Modul Arduino. *Media Jurnal Informatika*, 11(1). <http://jurnal.unsur.ac.id/mjinformatika>

Pratomo, A. H., Kaswidjanti, W., & Mu'arifah, S. (2020). *IMPLEMENTASI ALGORITMA REGION OF INTEREST (ROI) UNTUK MENINGKATKAN PERFORMA ALGORITMA DETEKSI DAN*

- KLASIFIKASI KENDARAAN IMPLEMENTATION OF REGION OF INTEREST (ROI) ALGORITHM TO IMPROVE CAR DETECTION AND CLASSIFICATION ALGORITHM.* 7(1), 155–162.
<https://doi.org/10.25126/jtiik.202071718>
- Redor, I., Barthélemy, E., Mordant, N., & Michallet, H. (2020). *Analysis of soliton gas with large-scale video-based wave measurements.*
<https://doi.org/10.1007/s00348-020-03049-8>
- Rohmaniatul, S., Pratiwi, A. F., & Rahmat, S. (2021). Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Menggunakan Sistem Oscillating Water Column. *Infotekmesin*, 12(1), 42–49.
<https://doi.org/10.35970/infotekmesin.v12i1.412>
- Sun, B., Li, C., Yang, S., & Zhang, H. (2021). A simplified method and numerical simulation for wedge-shaped plunger wavemaker. *Ocean Engineering*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110023>
- Sun, Z., Fan, Y., & Wang, G. (2023). An Intelligent Algorithm for USVs Collision Avoidance Based on Deep Reinforcement Learning Approach with Navigation Characteristics. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/jmse11040812>
- Surya Saruman, A., & Eka Susilawati, F. (n.d.). *Konferensi Nasional Ilmu Komputer (KONIK) 2021 Deteksi Pengurangan Noise pada Citra Digital menggunakan Metode Frequency Domain Code Matlab.*
- Thakur, P., Kizielewicz, B., Gandotra, N., Shekhovtsov, A., Saini, N., & Sałabun, W. (2022). The Group Decision-Making Using Pythagorean Fuzzy Entropy and the Complex Proportional Assessment. *Sensors*, 22(13). <https://doi.org/10.3390/s22134879>
- Widiastuti, S. (2023). Analisa Efisiensi Biaya di Rumah Susun pada Pemakaian Lampu LED. *Elektriese: Jurnal Sains Dan Teknologi Elektro*, 13(01), 95–106. <https://doi.org/10.47709/elektriese.v13i01.3059>
- Wulansari, R., & Fisika, P. (n.d.). *Menggali Potensi : Transformasi Energi dari Air Laut sebagai Sumber Terbarukan untuk Ketahanan Energi Global.*
- Yudha Hartawan, F., & Galina, M. (2022). IMPLEMENTASI

PROGRAMMABLE LOGIC CONTROL (PLC) OMRON CP1E PADA SISTEM KENDALI MOTOR INDUKSI STAR-DELTA UNTUK KEBUTUHAN INDUSTRI. *Jurnal Teknologi Terapan* |, 8(2).

- Zaini, M. A. H. P., Saari, M. M., Nadzri, N. A. I., Aziz, Z., Ramlan, N. H., & Tsukada, K. (2021). Extraction of Flux Leakage and Eddy Current Signals Induced by Submillimeter Backside Slits on Carbon Steel Plate Using a Low-Field AMR Differential Magnetic Probe. *IEEE Access*, 9, 146755–146770. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3123421>
- Zikra, M., Utami, W., Paotonan, C., & Ikhwani, H. (2024). Real time water surface elevation using video camera. *BIO Web of Conferences*, 89. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248902003>
- Zulfajri Syaharuddin, A., Hutami Endang, A., & Aditya Alfarizi, D. (n.d.). *Rancang Bangun Sistem Monitoring Aktivitas Pelanggan berbasis Citra Menggunakan Optical Flow*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Deteksi Tinggi Gelombang Air Dengan Kamera

Hasil Deteksi Tinggi Gelombang Air (cm) pada frekuensi motor				
9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
80	80	83.75	80	80
80	80	80	80	80
80	80	80.18	87.14	80
80	80	81.43	82.68	80
80	80	80.71	81.07	81.43
80	80	81.25	81.96	84.46
80	80	80.36	81.61	84.82
80	80	80	86.25	82.14
80	80	80	86.25	84.82
80	83.16	80	85.18	85
80	83.33	80	86.61	84.1
83.51	81.75	80	80	89.46
80	80.35	84.1	80	89.28
80.88	82.1	82.14	80	88.92
81.23	83.33	83.21	80	89.1
80.35	81.93	85.18	80	88.39
80.88	81.4	87.14	80	86.78
81.4	80.18	88.21	84.11	80
80	80	87.5	80.89	80.89
80	80	80.36	82.5	83.57
80	80	83.03	83.39	83.93
80	80	80.18	83.21	80.18
80	80	80	84.82	83.75
80	80	80	80	83.75
80	80	86.42	86.07	82.86
80	80	86.6	80	88.92
80	80	86.6	80	90.71
80	80	85	80	91.24
80.88	82.63	80	80	90.71
82.28	80.88	80	80	91.06
81.23	80.53	80	81.61	80
80.88	83.16	83.75	81.96	81.78
80.35	81.75	96.06	82.5	85.35
80.7	82.63	88.74	81.43	85
81.4	81.75	87.67	84.11	84.82
80	80	81.43	84.11	82.68

9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
80	80	88.03	83.57	84.46
80	80	80.54	84.11	83.75
93.68	80	80	80	85.89
94.21	80	80	80	86.25
80	80	85.18	98.75	80
80	80	85.89	101.07	92.14
80	80	91.24	100	80
80.53	80	87.85	80	94.28
82.63	80	81.61	86.78	80
80.35	80.88	81.43	80	81.96
81.58	80.88	83.21	86.25	82.32
80.7	82.81	83.75	80.36	80.18
80	84.91	89.1	84.82	84.28
80	81.4	91.78	83.93	84.64
80	84.39	86.96	80.89	84.28
80.7	80.88	81.78	82.32	84.46
80	82.1	93.03	82.5	84.82
80	80	80	80	82.14
80	80	82.5	80	80
93.33	80	83.39	80	80
87.89	80	86.6	80	80
93.16	80	86.25	80	80
80	80	85.35	80	80
80	80	83.03	80	80
81.23	80	81.25	80	83.93
80.7	80	80	80.36	80.36
82.46	80.35	80	83.04	81.25
82.28	81.4	84.82	86.43	81.25
80	80.7	89.28	86.78	83.93
80.53	80.7	90.17	82.14	86.42
80	80.35	95.53	85.36	91.24
80	84.03	80.89	84.11	93.74
80	80.35	88.39	85.36	86.6
80	81.23	89.1	89.28	80
80	82.1	83.93	80	80
80	85.09	87.14	96.6	80
80	80	87.32	80	85.89
80	80	86.96	80	82.32
80	80	85.35	80	80.18
91.23	80	81.78	86.25	83.39
91.05	80	81.61	86.96	80.71

9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
90	80	80	80.89	80.54
80	80	85.89	83.57	81.25
80.88	80	88.74	86.25	85.18
80.7	80.53	90.17	83.57	85.89
80.7	80.18	89.64	80	96.6
80.88	84.91	87.85	80	97.49
80	80.18	85.71	80	84.1
80	81.93	88.92	80.36	87.32
80	81.93	88.92	80	96.24
80.7	82.63	87.32	80	94.28
80	82.98	88.39	81.07	94.46
80	84.74	88.03	80.36	83.75
80	80	87.32	80.36	84.1
80	80	85.53	81.79	80
80	80	83.93	81.79	97.49
80	102.1	84.46	83.93	99.63
80	98.24	80	83.39	103.91
80	80	86.42	82.86	102.84
94.03	80	89.99	80	102.13
84.74	80	89.64	80	91.78
89.12	81.23	88.39	80	91.42
88.42	82.98	86.6	80	80.71
85.09	84.39	85.89	80	94.28
83.68	81.05	82.14	80.36	80.36
81.05	87.02	83.93	80	82.14
81.23	81.4	87.14	82.68	82.86
80.88	80.7	88.03	81.07	86.25
80	84.56	89.1	81.25	88.03
80	84.21	87.85	84.29	93.56
80	85.79	86.42	83.93	96.24
84.74	80	81.61	82.32	96.06
80	80	85.53	84.46	93.03
80	96.49	80	80	89.28
80	80	81.43	80	88.39
80	80	85.89	99.82	85
80	80	86.6	98.39	82.5
80	80	88.21	95	84.46
82.46	80	83.75	80.36	86.07
84.21	80.7	85.53	86.61	85.71
86.14	83.33	88.21	81.43	93.21
91.58	81.23	83.93	82.14	94.46

9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
88.07	89.12	87.5	83.93	91.78
86.84	88.95	87.32	84.11	89.64
82.98	84.91	91.6	86.43	85.53
81.75	87.37	91.78	83.93	85.71
81.05	80	96.78	85.71	86.6
80.53	80	94.99	80	81.25
80.7	102.98	87.32	91.61	83.21
80.53	105.26	88.57	106.42	80.18
83.33	98.59	86.25	104.46	81.25
84.21	80	88.92	103.21	84.1
80.35	80	88.21	106.42	84.82
80	80	86.07	96.6	87.67
82.46	83.33	85.35	80.36	94.99
81.93	82.46	88.39	81.25	97.67
84.91	84.03	82.68	84.29	95.7
80	82.81	84.28	85.36	85.89
80.7	81.23	85.71	88.57	86.07
86.31	82.98	86.25	85.36	84.64
88.95	83.68	87.5	85.18	90.71
92.45	86.14	106.77	85.36	80
92.45	86.31	102.49	80	83.39
80.53	84.03	104.98	100.53	80.54
86.14	80	96.24	104.28	82.32
84.56	80	87.14	103.92	84.1
80.88	105.26	80	101.43	84.64
83.51	106.14	82.14	94.46	92.85
82.63	103.68	101.59	81.07	96.95
83.16	95.26	102.31	87.14	97.67
82.28	80	80.18	81.79	94.99
82.63	80	81.78	83.57	89.1
80	80	82.68	88.21	85.53
80	83.51	85.53	89.46	88.57
80.7	81.05	85.89	85.53	85.53
80.35	84.56	86.96	80	83.93
82.1	81.23	86.25	80	84.1
82.28	82.1	85.18	102.14	82.86
84.91	84.91	84.46	106.42	81.25
91.58	85.61	86.6	106.42	86.07
88.95	85.61	88.57	106.42	86.78
95.44	82.28	88.92	101.78	85.89
92.98	80	87.14	93.93	89.82

9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
87.37	80	87.5	82.5	100.52
84.91	106.14	85.53	83.04	103.02
83.33	104.91	86.42	81.79	100.88
80.18	102.1	83.93	80.71	95.35
80.35	80	81.25	81.61	88.03
83.86	80	93.03	85	88.39
80	80	86.96	86.61	84.46
84.39	82.98	90.53	80	91.96
83.68	80	83.39	88.39	80.36
80	80.7	87.5	98.93	80.54
81.4	83.68	84.28	106.07	81.78
89.65	86.14	91.78	103.03	83.93
80.53	84.56	87.32	95.89	85
84.03	83.33	86.6	81.43	85.35
93.68	80	87.14	80	87.32
101.75	105.96	86.6	80	102.31
105.96	105.96	88.74	83.04	103.91
105.96	103.15	89.1	80.36	99.99
102.8	105.96	88.57	87.86	90.17
87.02	96.14	80.71	88.21	89.82
84.03	80	80.18	90.36	92.67
81.58	83.33	90.17	87.32	104.98
80.88	83.16	80	103.39	103.56
83.16	80.53	91.6	95.18	96.95
83.33	82.46	92.67	103.21	83.21
80.53	85.26	91.42	94.82	83.93
80	85.26	89.64	81.07	84.82
87.72	85.26	85	83.57	85
81.4	80	85	87.32	102.31
84.21	80	86.07	85.18	104.98
81.93	80	85.53	83.21	102.31
96.49	104.91	85.71	86.07	86.96
102.1	106.14	87.67	88.03	91.96
99.47	80	88.57	88.75	93.92
92.63	80	89.28	97.14	100.7
83.68	81.05	85.35	106.42	104.98
87.37	83.68	96.06	104.46	104.98
86.14	85.61	86.42	106.42	84.28
85.44	86.84	86.78	103.75	84.28
82.28	87.72	85.53	95	86.07
81.23	86.84	91.78	86.96	84.64

9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
81.23	83.68	88.03	80.36	89.28
83.51	80	86.42	80.89	104.63
86.31	105.26	88.03	81.96	104.98
82.63	101.05	85.18	82.86	101.59
80	104.91	85	82.5	86.78
80	106.14	86.25	83.21	89.46
80	106.14	85.53	84.82	89.46
80.88	105.26	87.14	87.14	82.68
80	97.37	87.67	87.68	83.39
80	96.31	91.96	94.28	83.93
82.63	83.51	84.64	99.46	83.93
83.68	80.18	83.39	95.71	87.85
92.28	87.54	80.89	91.43	90.35
93.86	84.21	83.75	93.57	93.03
92.63	85.09	85.89	90.89	91.06
87.72	86.67	85.89	83.75	86.25
85.26	89.65	86.25	81.43	80
85.61	87.19	86.78	81.07	90.89
81.93	86.49	85.35	80.54	82.86
80.88	95.26	84.82	82.14	81.96
83.33	105.43	84.64	86.07	80.89
82.81	105.61	84.82	87.68	88.03
81.23	106.14	85.89	88.75	81.61
81.05	105.43	85.71	80	84.64
80	105.43	94.63	80	86.25
80	97.19	100.17	80.36	85.71
80.53	80.7	98.92	80	88.03
80	82.98	95.53	80	90.71
84.56	82.81	82.5	89.11	91.24
86.49	83.68	82.32	83.39	86.6
90.7	86.31	85	83.57	89.28
89.82	88.07	85.89	82.14	94.46
93.68	90.7	86.6	82.14	84.46
99.82	91.75	86.78	83.93	83.57
100.35	90	86.07	86.25	81.07
96.14	89.47	84.82	85.36	80.54
83.86	80	84.46	91.43	83.03
83.16	102.63	85.35	80	87.14
82.46	105.26	85.35	98.39	86.78
82.28	106.14	81.78	94.64	88.74
83.86	106.14	88.57	80	93.21

9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
85.09	104.21	88.03	83.57	89.1
80	100.52	87.85	83.39	91.42
80	94.03	84.28	82.14	89.82
80	80	84.1	82.68	85.53
80	82.81	90.53	83.75	84.64
81.4	81.23	89.82	82.86	81.07
80	84.91	85.89	83.57	102.31
86.67	89.3	87.32	84.64	81.25
84.03	90.88	96.78	88.93	86.25
85.96	91.93	85.18	90	84.28
89.47	88.95	87.32	96.25	85
90.7	87.19	88.57	97.85	86.25
90.52	85.26	80.89	97.32	88.03
87.89	80	83.93	86.07	91.06
85.44	100.87	82.86	83.39	86.07
83.33	106.14	83.75	81.61	85.53
82.81	102.98	85.18	80.89	84.46
82.28	97.54	83.03	81.43	91.06
81.4	94.03	86.78	81.25	80.54
80.7	90.35	88.57	83.75	82.32
83.16	83.68	87.5	93.57	80.18
83.33	83.51	84.1	93.39	83.93
80.88	83.68	84.1	80	86.6
81.75	81.4	82.14	101.96	83.93
92.28	82.98	84.28	106.42	84.28
80.18	82.28	104.63	99.64	85.18
80.7	94.21	101.77	80	86.25
84.39	89.82	90.35	80	93.74
81.58	85.96	92.67	84.64	90.71
86.67	80	95.88	91.07	83.93
90	98.24	93.74	81.79	80
90.52	95.79	83.75	80.54	84.1
88.77	101.22	81.78	81.96	81.43
89.65	90	85	85.18	81.07
85.79	80	87.32	87.86	82.32
84.21	80	102.13	87.32	85.71
82.46	91.05	106.59	88.93	86.25
81.93	83.51	105.34	94.1	85.53
80.35	86.49	100.17	102.14	95.7
80.18	80.88	88.57	102.32	96.06
81.23	80.88	85.89	97.85	89.82

9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
85.96	83.51	86.07	80	91.24
84.56	90	80.36	85.71	94.63
80	90.52	85.71	84.46	80
80.88	92.45	91.6	83.04	81.25
80.18	92.28	88.74	91.43	82.5
80.88	89.47	81.78	81.07	83.57
82.98	80	80.71	80.54	85.53
84.21	101.05	83.75	84.11	85.35
86.14	98.94	91.78	85.18	87.14
88.42	90.88	106.59	88.03	87.32
87.02	80	106.77	80	88.39
88.07	90.35	106.77	80	86.78
88.42	92.81	106.77	97.32	85.89
86.31	83.16	106.77	98.75	90.17
83.16	86.49	104.45	95	90.53
82.81	86.31	90.17	80	90.71
82.28	80.35	86.42	81.79	84.28
80.53	82.98	94.46	81.07	80.36
82.1	87.02	99.63	81.79	80.89
80.18	88.42	94.63	81.25	81.61
82.98	97.19	83.03	81.96	82.5
83.68	97.54	83.75	81.43	85.35
80	80	87.5	83.21	86.6
95.26	102.8	88.03	86.61	86.96
96.84	105.26	99.27	86.07	89.99
92.28	102.45	98.56	80	91.6
85.79	97.19	96.95	80	93.38
87.54	87.19	91.78	80.71	93.74
96.31	80	85.35	90.89	91.42
85.79	80	84.82	80.71	82.32
86.67	81.75	85.53	80	80.18
84.74	83.51	80	81.07	81.07
83.33	85.96	94.63	81.25	81.96
83.68	83.51	83.03	81.61	82.68
83.33	83.86	106.05	81.79	83.93
80.7	84.56	101.06	85.36	86.42
81.05	88.24	102.84	85.18	86.25
83.33	90.52	83.75	85.18	85.18
85.26	91.23	85.89	83.93	103.38
92.28	80	84.28	87.14	101.95
96.31	95.44	86.07	80	98.2

9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
94.21	80	84.64	81.61	89.82
87.37	80	85.53	99.82	86.96
91.75	80	92.49	104.46	99.09
87.72	84.56	100.88	106.42	85.53
83.33	81.4	105.88	101.07	85.35
82.28	83.33	106.59	89.46	104.98
83.51	84.74	103.38	87.32	101.77
82.1	84.56	96.24	87.32	94.1
81.4	85.79	95.88	85.36	83.75
82.1	81.4	88.21	80	85.18
80	83.51	87.14	89.82	92.67
81.05	85.79	84.82	104.64	102.31
80.7	85.26	80.36	106.42	100.52
81.4	91.75	87.67	106.42	102.66
84.91	82.63	85.18	106.42	88.57
84.74	80	92.67	106.42	86.96
88.95	80	92.49	101.6	85.18
89.65	80	85	85.71	84.28
89.12	98.42	80	80.54	80.54
85.96	80	85.89	80.89	80.18
87.54	80	103.56	81.25	83.21
84.91	83.51	105.16	82.68	84.82
82.98	80.18	106.05	84.46	85.71
80.88	83.68	105.52	88.21	82.32
84.39	86.31	89.99	87.86	89.64
84.39	82.63	98.74	93.21	92.49
80	84.21	90.17	103.57	92.67
81.05	86.84	92.14	105.89	91.24
80	87.19	89.1	106.42	91.78
80.88	87.54	105.16	103.75	84.1
81.23	84.03	100.88	99.46	83.03
83.86	100.7	95.35	87.68	81.07
83.68	80	88.21	80.71	81.07
84.91	103.51	89.64	80.36	80.71
85.61	102.45	91.78	81.96	82.32
92.45	80	98.02	84.46	84.64
92.63	80	102.66	83.93	83.39
87.89	80	103.91	83.39	89.46
88.42	80.88	105.16	88.75	95.7
84.56	83.16	102.31	92.5	90.17
82.98	80.18	98.38	103.21	87.5

9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
82.81	83.51	90.17	106.42	83.21
82.46	80.18	88.74	106.07	84.82
83.33	83.86	91.96	106.42	80.54
84.03	85.96	90.71	106.25	81.78
80	87.37	87.5	98.21	83.39
80.7	88.24	85.71	87.32	86.42
83.51	86.31	92.85	80.89	86.96
80.18	100.87	88.92	81.07	87.5
81.05	101.75	91.42	80.54	86.96
84.74	103.33	90.53	81.07	86.6
80	102.8	87.14	82.5	102.84
84.39	97.72	106.41	83.75	88.21
84.39	80	105.7	89.64	89.1
93.33	80	102.49	94.28	88.57
94.91	80	80.89	95.35	96.06
94.91	82.46	85.18	104.64	92.14
88.42	83.16	86.96	104.82	81.78
88.07	81.05	91.06	106.07	80.36
84.56	80.35	94.1	106.42	83.93
82.46	83.16	97.31	101.96	85
82.81	86.14	94.28	93.57	85.35
81.23	85.61	84.28	80.54	86.96
84.39	86.31	83.93	81.61	85.53
80	85.61	84.46	80.54	90.17
80	80	87.85	82.68	102.84
80	103.86	80	80.54	102.31
80.35	106.14	100.34	83.57	95.17
80.18	106.14	81.61	87.32	87.85
82.46	100.17	83.75	92.32	82.86
83.33	80	80	95.35	82.14
83.33	80	86.96	96.6	82.32
82.28	83.33	87.14	95.71	80.54
85.79	80.7	88.74	90.71	82.5
90.35	83.51	90.35	85.71	85
90.88	84.74	83.57	87.14	86.78
88.77	85.96	85.71	81.79	83.03
84.91	81.05	85.35	82.5	98.74
84.03	85.96	90.35	82.68	101.95
82.98	86.84	89.82	82.86	100.7
82.1	87.19	90.17	83.04	95.35
83.51	87.02	85.35	81.43	87.32

9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
84.74	80	91.6	83.39	85.71
80	98.94	80.18	80	84.82
80	105.61	98.38	93.57	81.43
80	103.51	92.49	99.82	80.54
80.18	105.79	96.42	99.28	81.78
81.23	103.15	97.67	96.78	82.5
83.68	98.42	98.74	89.46	87.14
85.61	91.05	98.56	83.75	86.07
85.26	88.24	97.49	89.46	86.42
84.03	80.7	91.24	82.14	83.93
86.49	83.33	82.68	83.04	96.24
92.81	80.18	84.82	83.57	94.46
90.7	82.98	85.35	86.25	86.96
95.96	84.03	85.35	85.18	86.96
84.74	87.19	92.31	85	91.78
83.68	85.61	88.74	88.03	88.74
84.03	87.02	92.85	94.82	83.21
82.28	83.68	93.56	102.67	94.63
82.81	80	80.36	97.5	81.96
84.56	100	87.5	90.36	83.93
83.16	80	86.6	80.71	86.25
80	105.26	80	80.89	85.18
80	104.03	94.1	80	84.82
80	100.52	97.13	86.78	84.64
80	92.81	96.78	87.86	87.14
82.28	84.21	94.63	91.43	92.14
84.03	81.23	85.18	87.86	87.14
86.49	82.63	83.21	84.64	88.21
86.49	83.68	82.5	85	100.34
87.72	82.1	86.96	86.25	104.27
87.89	85.44	89.28	80.71	100.17
85.79	89.47	93.56	81.25	93.21
83.86	89.82	95.35	80	83.93
88.07	87.89	83.57	95.89	85.35
87.89	88.95	82.86	98.03	85.53
84.39	90.35	82.14	97.14	90.53
84.03	101.58	86.25	80.36	100.7
82.98	104.38	90.35	81.61	100.52
82.63	106.14	92.85	90	97.85
85.44	105.79	93.03	84.46	90.17
80	105.96	90.53	83.75	95.35

Lampiran 2 Hasil pengolahan sinyal

RMS Amplitudo (px) pada frekuensi motor				
9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
10.18	9.93	11.72	9.49	6.98
9.98	9.40	11.36	13.13	6.70
12.12	12.61	12.45	12.55	6.27
12.57	9.98	12.60	10.43	6.66
9.56	10.03	12.46	10.88	6.74
11.34	10.63	12.32	9.57	6.60
10.38	10.93	11.04	10.23	6.87
11.06	10.18	11.09	9.89	6.48
13.42	9.87	11.30	12.71	7.36
10.87	10.20	13.18	11.23	6.99
10.67	9.14	11.12	11.27	6.64
9.90	8.59	13.29	10.43	6.59
10.15	10.29	13.41	11.43	6.97
10.76	9.75	9.62	10.32	7.21
10.59	10.08	12.52	11.10	7.10
12.06	10.87	14.14	11.59	7.69
10.66	10.81	14.55	9.69	6.75
10.60	13.63	12.13	11.30	6.85
10.07	10.40	11.89	8.92	6.60
11.16	10.51	10.97	8.60	7.04
9.81	8.90	10.66	9.83	6.95
11.14	9.89	9.47	11.59	6.48
8.93	10.24	11.12	9.99	6.82
10.01	9.39	11.35	9.80	6.76
10.32	10.41	9.89	10.06	6.71
10.37	9.84	13.50	9.01	6.63
9.66	9.92	11.44	7.59	7.02
10.65	11.62	10.37	10.91	6.44
10.13	8.76	11.93	9.10	6.72
10.42	9.91	10.50	9.42	6.55
9.56	11.58	12.81	9.77	6.51
9.66	10.56	11.32	9.67	6.74
11.41	9.79	9.57	9.26	7.63
13.45	9.35	11.63	8.75	6.92
10.48	10.43	10.78	9.32	6.67
10.00	10.97	10.87	9.53	6.43
9.95	9.72	11.89	9.49	6.57
11.93	9.57	11.46	9.16	6.69

9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
9.98	9.75	13.21	8.13	6.35
9.98	9.62	13.53	9.05	6.55
9.88	9.58	12.98	9.68	6.77
10.60	11.69	12.87	9.76	7.02
10.49	10.30	14.48	8.70	6.47
10.71	9.12	14.96	8.66	6.68
11.26	9.71	12.11	9.38	6.32
10.75	10.67	10.03	8.61	6.16
10.05	10.16	13.34	10.39	6.34
10.67	11.58	12.02	8.75	6.53
10.29	11.39	11.15	11.41	6.59
10.40	10.50	12.83	8.69	6.57
9.05	10.83	13.00	9.13	6.96
10.55	9.39	11.74	7.66	6.82
10.25	9.76	12.92	9.67	7.16
11.20	9.65	11.21	9.72	6.56
10.46	10.58	11.94	8.96	6.92
10.64	9.56	11.11	11.47	7.13
11.42	9.89	14.15	7.97	6.69
9.02	10.78	10.51	9.77	6.16
11.05	11.35	10.76	8.76	6.91
11.13	9.93	11.17	8.99	6.23
12.40	10.85	12.39	8.84	6.99
9.30	9.98	12.55	8.58	6.24
10.79	10.28	11.14	9.29	6.92
11.13	9.61	10.08	8.12	6.50
10.70	8.94	12.00	8.74	6.34
10.79	10.72	12.51	9.02	6.98
10.41	9.92	13.32	8.49	6.27
9.47	9.28	11.56	8.74	6.12
9.95	9.75	11.46	9.34	6.30
7.94	9.99	13.41	9.77	6.14
9.76	10.59	11.78	9.45	6.86
8.92	9.57	10.85	8.60	6.44
9.92	12.19	11.84	9.02	6.67
10.19	10.50	11.32	9.37	6.49
10.43	9.28	11.97	9.47	5.75
11.12	9.71	11.67	8.99	5.93
12.01	10.00	12.54	8.55	5.84
12.06	7.83	12.37	7.96	6.75
11.39	7.54	12.07	7.54	5.67

9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
10.26	7.11	12.04	8.72	7.06
10.95	10.83	10.32	9.52	7.08
10.86	10.52	10.21	9.03	8.06
10.56	9.88	13.11	7.60	8.22
9.56	11.33	10.75	8.68	7.02
8.95	10.86	10.68	8.85	7.28
10.21	10.14	13.59	9.49	8.49
8.58	10.88	9.19	10.02	7.14
8.94	12.58	11.29	9.05	7.87
7.83	10.82	10.56	9.56	6.39
12.88	7.84	12.32	9.38	7.21
10.03	4.86	11.07	8.74	6.69
10.27	4.65	11.07	8.47	7.20
9.85	8.19	11.47	8.40	6.95
9.83	9.59	11.67	8.71	7.39
10.31	11.63	11.69	8.86	7.24
9.29	10.01	12.35	8.94	6.39
9.92	8.68	9.48	8.00	6.36
8.65	9.34	10.03	7.20	5.79
9.41	8.57	13.31	8.52	5.85
10.48	6.96	12.87	9.56	5.76
8.47	3.96	11.62	12.19	5.96
9.95	3.47	10.63	8.56	6.45
8.55	4.87	10.20	8.81	6.27
8.68	10.70	8.99	9.52	6.72
7.93	8.28	13.09	8.69	7.67
7.27	9.38	10.55	9.39	7.05
9.14	9.51	9.92	9.37	6.89
8.83	14.20	9.27	9.00	6.79
9.75	9.87	10.80	8.32	5.96
9.94	9.58	12.09	7.26	6.52
8.65	6.17	9.58	9.27	6.22
9.14	3.54	9.50	7.81	6.50
10.12	10.85	10.12	9.69	5.86
9.18	13.28	10.16	9.36	4.82
9.08	11.78	11.18	10.63	6.39
8.64	9.98	11.40	8.52	5.85
11.19	10.10	9.99	9.22	6.19
8.63	9.87	9.11	9.59	6.67
7.60	9.66	6.80	8.03	6.30
7.91	9.47	7.94	10.22	7.89

9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
8.66	8.38	10.57	9.06	6.34
8.73	6.45	11.24	9.58	6.33
8.96	4.41	11.36	8.47	6.79
9.07	3.90	10.14	10.68	5.91
8.37	3.12	9.76	9.35	6.74
10.40	6.35	10.57	9.29	5.78
9.26	11.86	10.19	8.95	6.29
10.88	9.37	8.90	8.50	5.84
8.06	10.39	8.75	7.55	6.42
8.35	9.45	12.01	9.12	6.11
8.65	11.08	10.19	7.83	6.12
8.82	13.09	11.29	8.62	6.50
9.03	10.83	9.15	8.55	6.36
9.34	10.25	7.84	8.91	6.00
9.19	9.55	8.51	9.27	5.94
9.02	11.78	9.87	10.38	6.53
8.94	11.45	10.44	9.16	6.29
10.08	11.64	10.81	9.30	6.51
9.53	7.88	10.44	8.62	7.00
9.53	6.42	11.97	8.80	6.56
7.82	7.14	9.68	9.70	5.17
9.11	4.71	9.18	8.85	5.59
8.58	7.85	11.03	10.96	6.32
9.35	10.45	10.63	7.66	6.73
9.36	10.52	9.31	9.25	6.55
9.32	9.35	10.66	9.70	6.57
8.73	11.04	10.37	8.41	6.56
11.53	9.96	10.12	10.49	6.75
10.06	12.02	9.87	9.05	5.92
8.78	11.02	10.68	9.37	5.64
8.60	11.38	10.88	9.26	5.95
8.50	8.62	10.00	9.27	5.68
7.76	10.80	12.63	8.40	6.13
7.49	11.71	12.98	9.18	6.92
10.21	9.16	11.35	8.36	5.64
8.28	8.64	12.41	9.86	3.49
9.55	6.16	12.24	9.07	5.47
10.83	5.27	11.89	9.31	5.76
9.50	3.85	12.02	9.98	5.31
8.08	6.64	10.73	9.05	6.81
9.64	11.68	12.93	7.94	6.36

9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
9.11	15.00	11.56	9.25	7.01
9.94	11.23	9.36	8.83	6.61
10.47	10.74	9.09	8.45	5.50
8.20	12.20	9.57	8.84	5.85
10.81	10.58	10.92	8.46	5.93
9.53	10.17	11.62	8.83	6.45
9.28	10.44	10.45	9.16	5.05
8.01	10.97	8.81	9.68	3.30
8.61	9.51	13.41	8.32	3.83
9.26	10.07	11.25	8.60	5.54
10.24	10.43	11.72	9.44	6.84
8.67	9.41	11.55	9.01	7.08
9.49	9.95	13.27	9.90	6.98
8.33	9.64	11.93	8.56	7.24
10.32	9.32	10.41	11.37	6.75
8.78	7.97	10.99	9.04	6.60
9.07	10.81	11.41	7.88	7.73
9.17	11.78	10.13	11.08	8.00
9.84	11.55	11.55	9.47	7.63
9.74	12.89	9.20	9.27	6.05
9.72	10.48	11.16	10.69	5.12
9.54	11.79	12.06	9.15	5.15
8.73	10.01	10.29	9.00	4.65
8.99	12.15	15.13	8.80	6.42
8.46	11.82	11.11	10.32	6.51
8.82	10.60	11.10	9.34	6.57
8.64	9.89	11.45	10.57	6.25
8.91	10.63	10.59	9.55	6.69
8.16	9.43	11.25	9.16	6.90
11.91	10.99	12.43	7.94	6.09
8.86	9.15	11.35	9.17	6.41
9.22	9.29	11.78	9.90	6.74
8.98	8.53	11.81	9.52	6.09
9.78	8.54	10.93	8.28	5.50
9.51	9.29	11.64	9.15	5.91
8.83	7.99	10.58	8.24	6.67
9.77	9.47	12.85	7.74	6.38
12.04	8.91	11.45	8.72	5.93
9.43	9.72	9.59	10.80	6.78
9.31	9.93	11.07	9.16	6.92
9.88	8.58	14.05	9.80	6.35

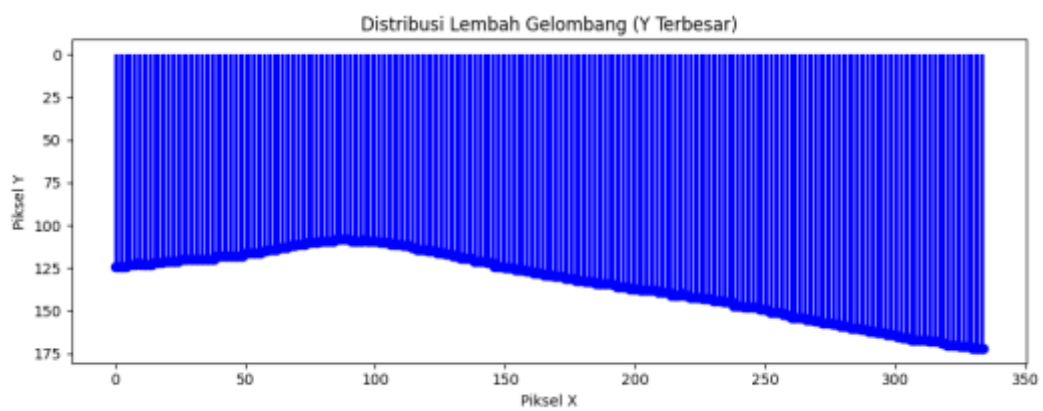
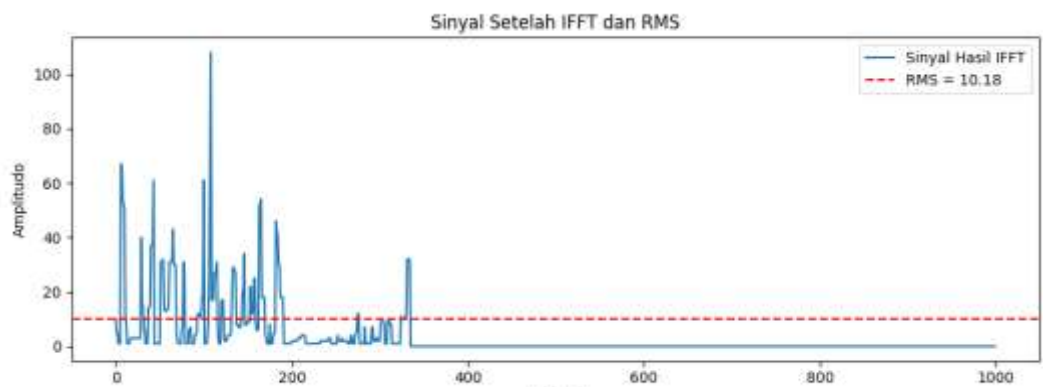
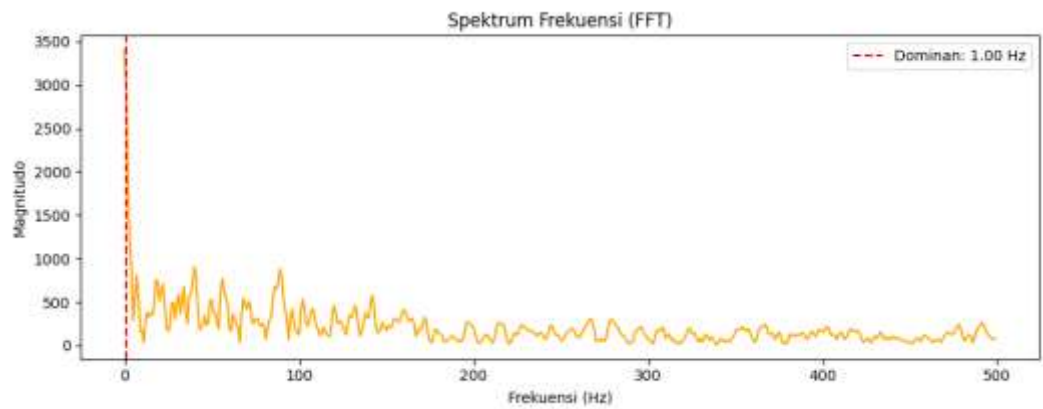
9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
8.95	9.71	10.99	8.70	6.31
8.75	9.25	12.81	8.84	6.53
9.40	9.53	10.56	9.47	6.26
9.06	9.51	11.96	9.49	5.77
7.83	10.70	12.02	10.07	6.05
7.61	8.03	11.55	11.27	6.43
7.93	9.20	11.76	8.65	6.41
6.77	10.95	13.31	8.44	6.28
9.75	9.24	14.34	10.28	6.24
8.82	10.80	12.00	9.29	7.13
9.19	9.32	11.76	8.56	6.17
9.25	11.43	12.05	8.69	7.62
8.04	10.26	11.77	10.42	6.05
9.93	10.58	12.20	10.09	7.57
9.98	9.26	10.99	8.76	6.35
8.96	9.70	13.73	11.46	8.60
8.60	9.47	11.17	7.67	6.95
9.03	10.98	10.76	9.21	6.53
9.67	8.67	11.14	9.75	6.50
10.95	11.12	12.83	6.74	5.89
9.89	12.47	10.34	6.42	5.86
10.18	9.85	11.81	8.66	6.65
9.40	9.70	11.95	7.90	6.81
9.06	9.26	11.53	8.96	6.98
9.90	8.50	10.14	8.31	6.62
8.70	9.54	9.00	7.56	6.11
12.64	9.65	11.62	6.73	6.50
9.35	12.75	10.06	7.20	6.06
11.29	12.06	11.17	9.25	6.34
9.55	9.31	10.82	8.74	6.48
10.16	9.69	12.74	8.72	6.03
9.64	12.03	10.63	8.37	6.06
9.90	11.81	11.52	7.55	6.78
8.07	10.22	9.03	8.19	6.96
8.97	10.96	12.66	7.36	6.39
9.82	10.80	11.89	9.12	6.64
10.01	9.03	14.58	7.59	6.94
10.41	11.54	11.22	8.14	7.38
8.64	11.81	13.64	9.10	6.56
9.76	11.80	12.22	7.23	6.40
10.27	10.86	10.31	8.12	6.99

9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
9.37	13.79	7.55	7.49	6.03
8.63	12.76	8.96	8.32	6.77
10.31	11.14	5.32	10.31	6.66
9.82	12.68	9.09	8.69	6.16
10.25	12.55	12.17	8.00	6.27
8.40	10.16	13.31	7.60	6.85
9.01	10.91	11.81	8.80	7.40
8.58	11.71	12.14	7.32	6.33
10.06	13.42	11.73	8.56	7.16
9.08	10.64	13.66	7.72	6.30
9.90	9.14	10.85	8.65	7.03
8.54	12.06	11.16	7.77	6.89
9.59	11.79	6.91	9.11	6.56
9.35	11.51	7.00	8.12	6.23
11.28	12.98	5.90	6.95	7.04
11.37	12.67	10.00	7.60	6.33
10.50	11.42	10.32	6.13	7.07
10.20	12.30	9.06	8.87	6.87
10.79	10.35	12.87	8.92	6.84
10.66	11.34	11.16	11.74	6.69
10.59	13.41	11.30	10.55	6.88
9.36	9.76	9.94	8.99	6.85
10.48	9.83	11.46	7.99	6.67
9.57	10.51	11.12	8.83	6.44
8.61	11.05	11.22	7.34	6.23
9.84	9.09	12.40	7.75	6.94
9.35	11.74	9.07	6.30	6.65
7.99	12.98	8.47	5.97	6.25
10.36	10.03	5.33	5.25	6.07
10.08	14.65	4.06	5.23	6.61
8.41	12.48	12.03	10.88	6.59
10.73	10.98	4.35	9.08	6.47
7.69	10.32	6.55	12.16	6.86
9.07	9.75	13.57	9.83	6.82
7.55	9.90	10.35	11.30	5.92
8.45	10.69	13.54	8.16	6.73
10.72	9.29	16.90	6.90	6.60
10.07	10.09	18.09	9.60	5.51
9.57	8.84	13.69	10.63	5.44
8.16	10.84	16.14	8.18	5.66
9.65	9.16	12.77	7.72	5.94

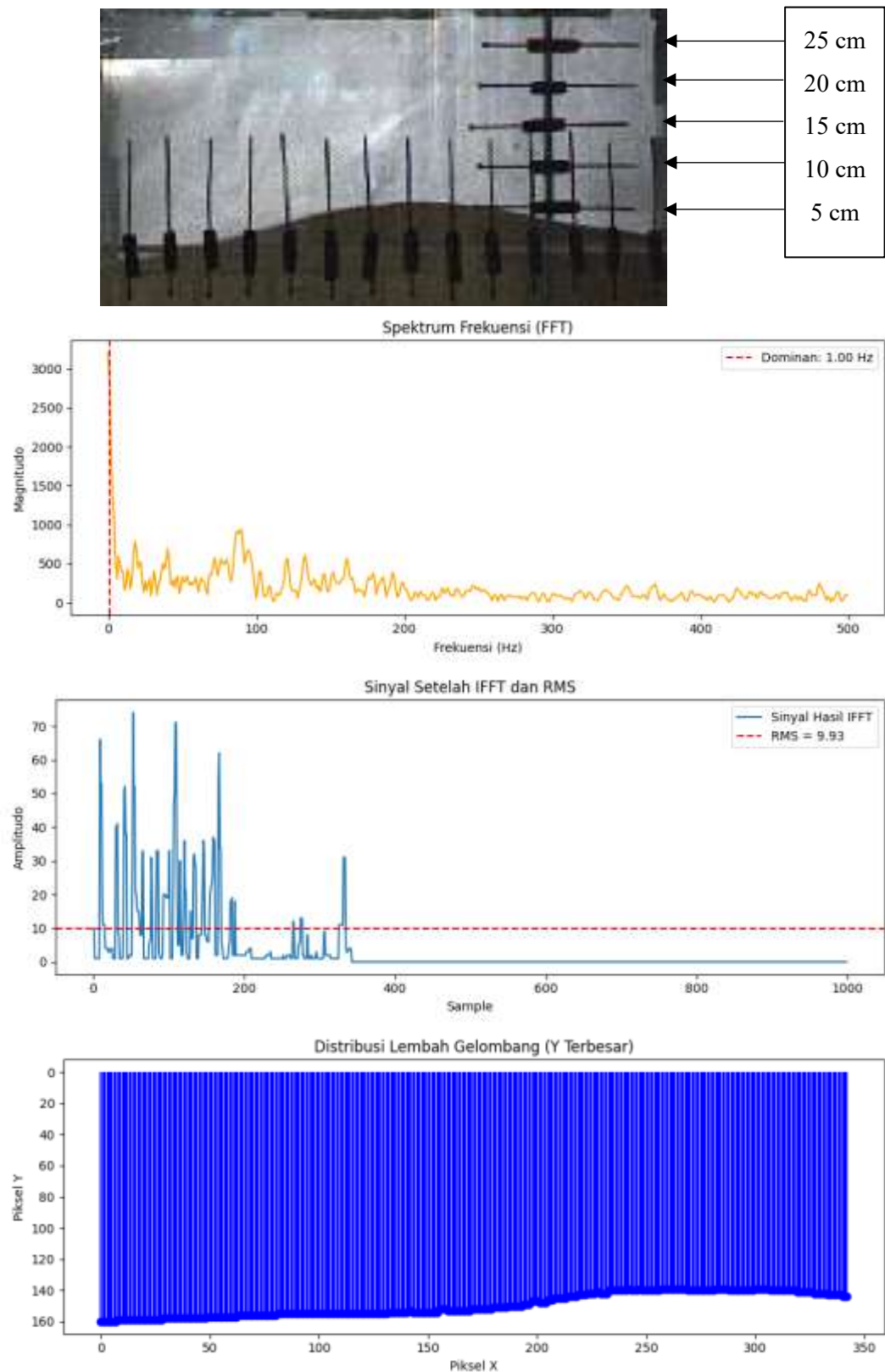
9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
8.54	12.09	12.59	8.74	5.31
9.09	11.82	7.48	8.95	5.47
9.50	12.04	7.83	10.55	4.51
9.79	11.02	12.89	10.35	7.36
8.98	11.88	11.39	9.57	6.39
10.73	14.00	9.97	9.93	8.43
9.51	10.35	12.37	10.22	7.43
8.35	11.63	11.60	10.31	7.81
12.01	10.29	9.97	9.11	8.45
10.34	9.36	10.52	8.15	7.08
11.53	9.68	10.98	9.49	7.19
9.88	10.29	9.89	8.62	7.58
8.39	9.88	9.22	8.61	6.42
10.59	10.67	11.08	9.86	5.50
11.24	11.51	14.49	9.25	3.25
9.55	11.14	12.61	9.38	4.46
8.86	11.89	11.04	9.72	5.24
9.23	10.67	11.61	9.84	6.08
9.10	11.59	9.66	10.82	7.81
8.93	14.05	12.36	9.32	5.72
9.75	12.42	12.41	10.85	6.40
11.24	10.75	10.57	9.15	5.66
8.51	9.46	10.97	10.73	5.28
11.26	10.79	9.32	9.04	5.70
10.26	9.44	11.13	10.28	7.17
8.93	10.99	8.58	9.85	7.90
8.58	10.04	11.67	9.27	6.53
8.32	9.05	10.69	10.28	6.29
10.42	9.74	10.27	8.52	4.43
8.53	10.53	12.55	10.21	5.02
8.88	11.37	12.49	9.50	3.49
8.55	11.26	10.96	12.12	6.68
9.50	11.09	11.29	9.62	6.89
10.33	9.88	10.15	8.84	6.68
9.09	13.10	10.96	9.05	7.07
8.11	10.82	13.02	9.60	6.76
10.06	10.81	11.66	9.41	6.75
10.57	12.38	13.45	9.96	6.52
11.75	8.90	9.68	9.57	6.55
9.02	9.56	10.95	10.27	6.72
9.83	11.13	11.93	10.27	6.80

9 Hz	10 Hz	11 Hz	12 Hz	13 Hz
9.29	11.62	11.71	8.41	6.91
9.21	10.36	10.68	11.01	6.41
8.39	9.77	10.48	9.15	6.60
10.58	10.00	9.36	9.62	6.32
9.06	8.57	6.38	9.12	6.38
10.58	8.84	8.11	10.46	6.29
10.06	10.51	10.55	10.59	6.14
10.50	10.74	13.23	9.38	6.30
9.78	9.59	11.07	8.82	6.67
9.54	13.13	10.64	9.70	6.96
10.70	12.69	10.26	8.62	7.05
8.80	11.63	8.29	8.91	5.93
10.91	10.05	10.82	9.34	6.13

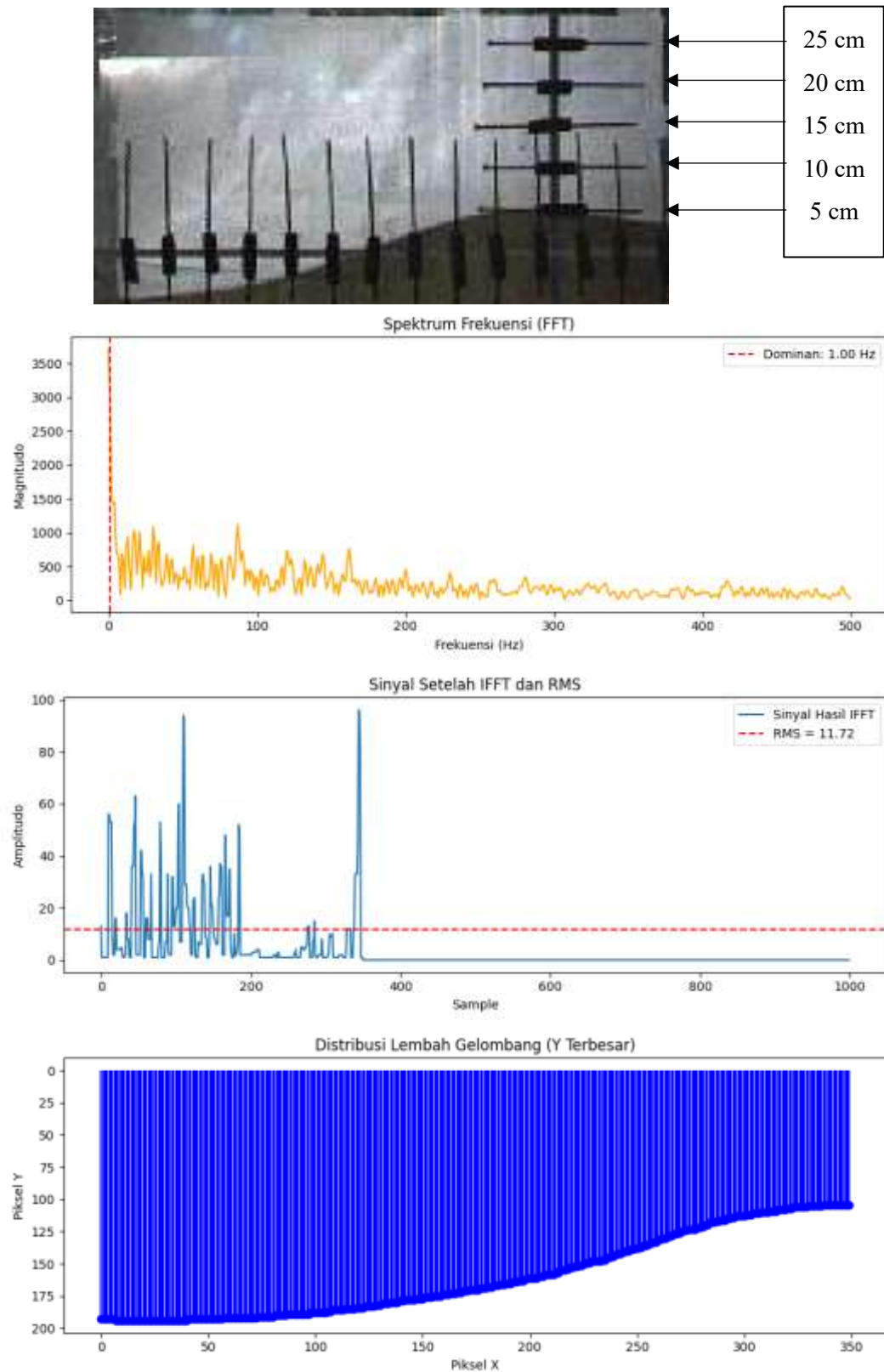
Lampiran 3 Gambar Hasil Proses 9 Hz



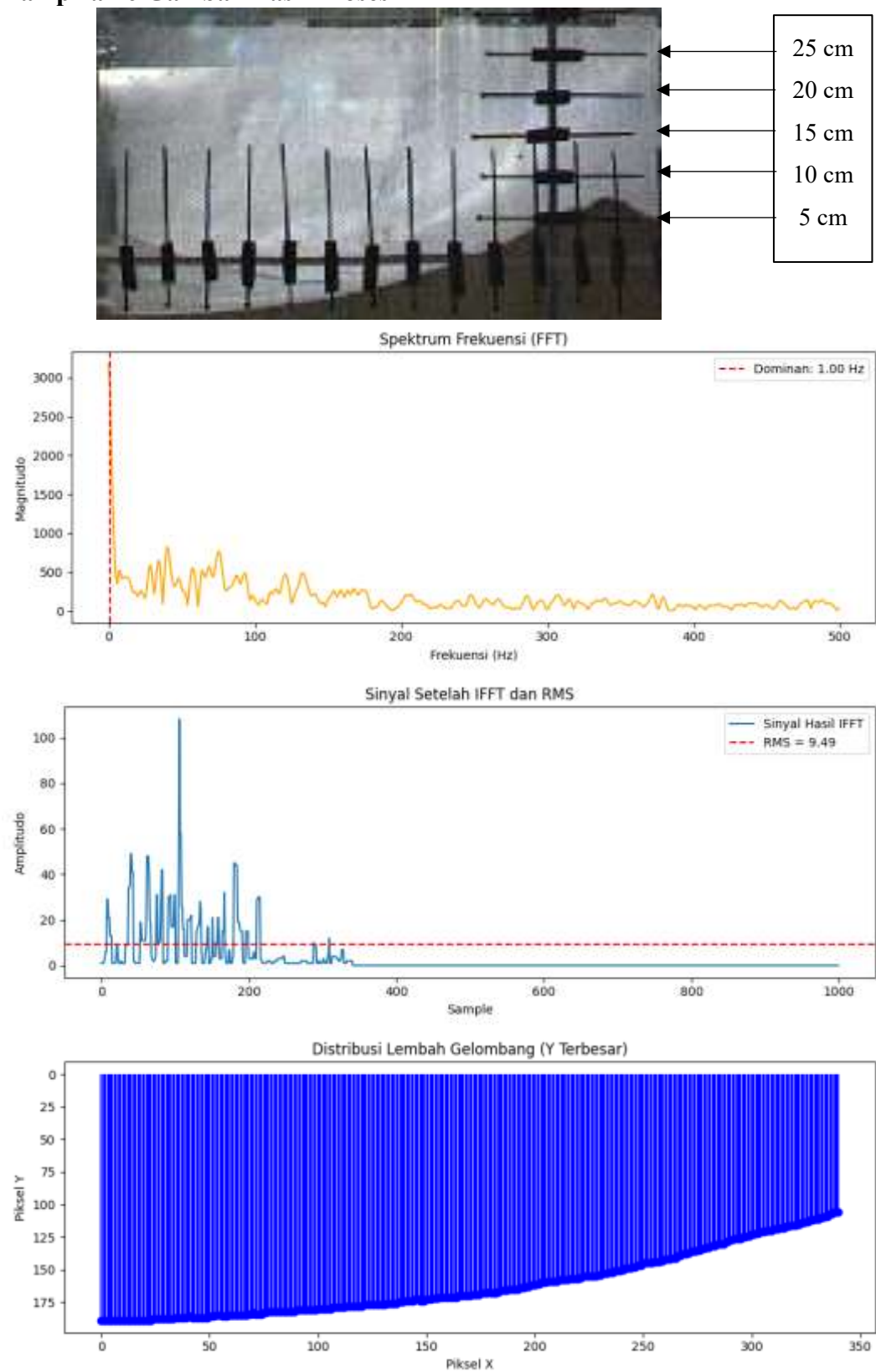
Lampiran 4 Gambar Hasil Proses 10 Hz



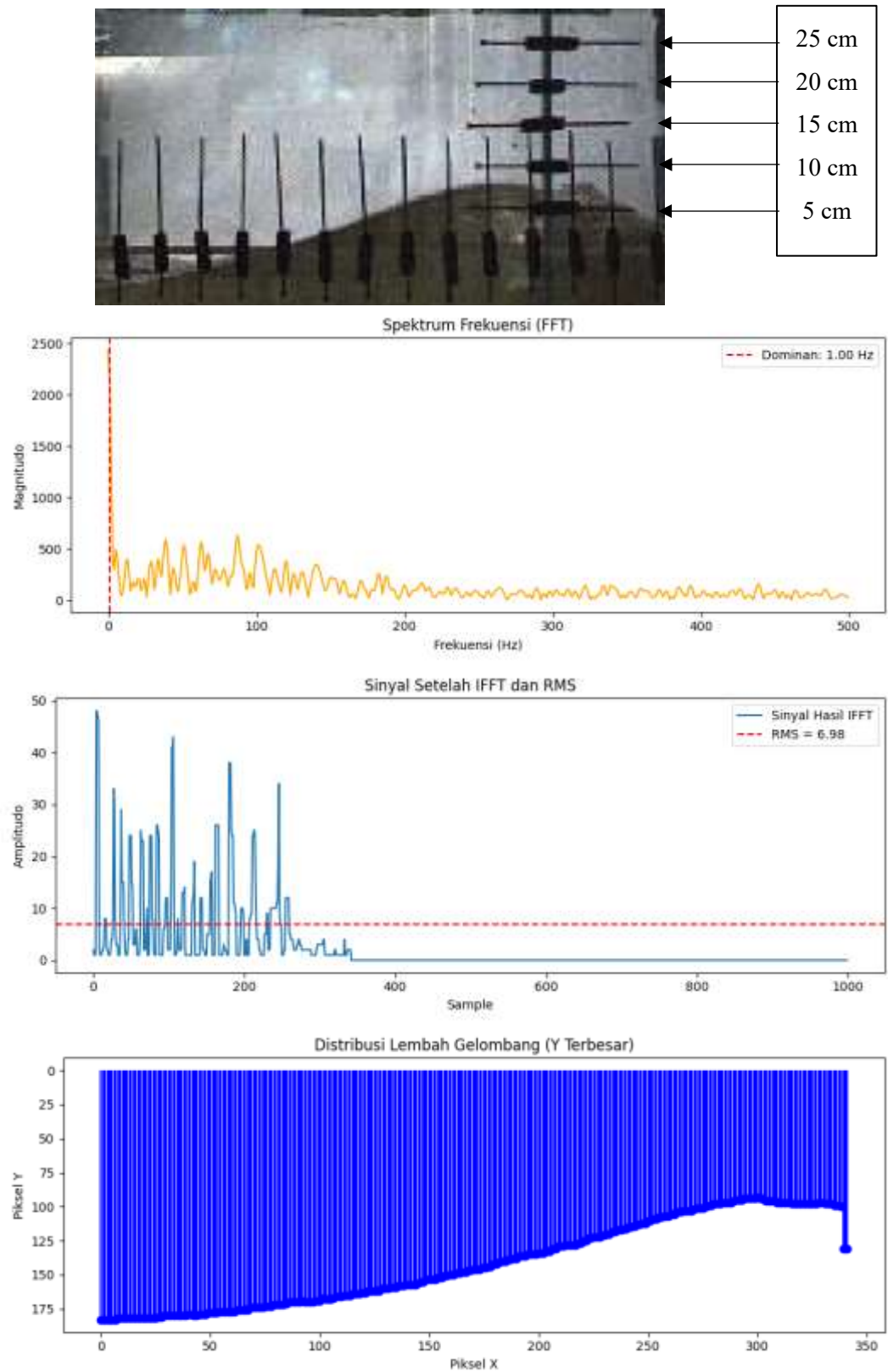
Lampiran 5 Gambar Hasil Proses 11 Hz



Lampiran 6 Gambar Hasil Proses 12 Hz



Lampiran 7 Gambar Hasil Proses 13 Hz



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Lampiran 8 Biodata Mahasiswa

Nama : Moch. Firman Firlana
NRP : 0921040004
Program Studi : D4 Teknik Otomasi
Agama : Islam
Status : Belum Menikah
Alamat Asal : Gelam RT. 012/ RW. 003, Candi , Sidoarjo
Nomor Telepon : 087850015819
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Email : firmanfirlana953@gmail.com
Tempat, Tanggal Lahir : Sidoarjo, 09 Mei 2003
Nama Orang Tua/ Wali : Syaiful Rochim
Alamat Orang Tua / Wali : Gelam RT. 012/ RW. 003, Candi , Sidoarjo
Telepon Orang Tua / Wali : 085236049877
Riwayat Pendidikan



PENDIDIKAN FORMAL			
Pendidikan	Tahun	Tempat Pendidikan	Jurusan
Diploma 4	2021-Sekarang	Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya	Teknik Otomasi
SMA	2018-2021	SMKN 3 Buduran	Teknik Pendingin dan Tatat Udara
SMP	2015-2018	SMP Muhammadiyah 8	-
SD	2009-2015	Mi Darussalam	-