

LAPORAN BKD BIDANG PENELITIAN

PERIODE SEMESTER GENAP 2025/2026

Kegiatan Penelitian Berjudul:

**“RANCANG BANGUN PROTOTYPE SISTEM PEMANTAUAN
LOKASI DAN PENGIRIMAN SINYAL DARURAT NELAYAN
BERBASIS GPS DAN LORA”**

LAMPIRAN KEGIATAN PENELITIAN :

- 1. SK.DEKAN FTI SEMESTER GENAP 2025/2026*
- 2. LAPORAN PENELITIAN*

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS SAINS TERAPAN DAN TEKNOLOGI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL**



YAYASAN PERGURUAN CIKINI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL
Jl. Moh. Kahfi II, Bhumi Srengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640
Telp. 021-7270090 (hunting), Fax 021-7866955, hp: 081291030024
Email: humas@istn.ac.id Website: www.istn.ac.id

SURAT PENUGASAN TENAGA PENDIDIK
Nomor : 109-IV/03.1-F/III/2026
SEMESTER GENAP TAHUN AKADEMIK 2025/2026

Nama	: Muhammad Ikrar Yamin	Status Pegawai	: Tetap
NIK/ NIDN/ NIDK	: 0328108303	Program Studi	: S1 Teknik Elektro
Jabatan Akademik	: Asisten Ahli		

Bidang	Perincian Kegiatan	Tempat	Jam	Kredit (SKS)	Hari
I. PENDIDIKAN & PENGAJARAN	1. Pengajaran di kelas termasuk laboratorium				
	1. Prak. Dasar Sistem Kendali (B)	S1 Teknik Elektro	15:00 s.d 16:40	1	Sabtu
	2. Prak. Dasar Telekomunikasi (B)	S1 Teknik Elektro	17:00 s.d 18:40	1	Sabtu
	3. Praktikum Antena dan Propagasi (B)	S1 Teknik Elektro	09:00 s.d 10:40	2	Sabtu
	4. Estimasi & Identifikasi (B)	S1 Teknik Elektro	19:00 s.d 20:40	2	Rabu
II. PENELITIAN	2. Pembimbing				
	1. Seminar				
	2. Kerja Praktek				
	3. Tugas Akhir/Tesis			1	
	4. Pembimbing Akademik			1	
	3. Penguji				
	1. Tugas Akhir/Tesis			1	
	2. Kerja Praktek				
	4. Tugas Tambahan				
	1. Menjabat Sebagai Ka. Prodi				
III. PENGABDIAN PADA MASYARAKAT	2. Menjabat Sebagai Ka. Lab Elektronika dan Telekomunikasi			2	
	1. Penelitian Ilmiah			1	
	2. Penulisan Karya Ilmiah			1	
	3. Penulisan Diktat Kuliah				
	4. Menerjemahkan Buku Kuliah				
	5. Pengembangan Program Kuliah Kurikulum				
IV. PENUNJANG	6. Pengembangan Bahan Ajar				
	1. Menduduki jabatan di Pemerintahan				
	2. Pengembangan Hasil Pendidikan dan Penelitian				
	3. Memberikan penyuluhan/pelatihan/penataran/ceramah				
	4. Memberikan Pelayanan Kepada Masyarakat			1	
	5. Menulis karya Pengmas yang tidak dipublikasikan				
	6. Pengelolaan Jurnal Ilmiah			1	
	1. Menjadi anggota/panitia pada badan/lembaga suatu PT				
	2. Menjadi anggota Badan Lembaga Pemerintah				
	3. Menjadi anggota organisasi profesi				
Jumlah Total	4. Mewakili PT/lembaga pemerintah, duduk dalam panitia antar lembaga				
	5. Menjadi anggota delegasi nasional ke pertemuan internasional				
	6. Berperan Serta Aktif dalam pertemuan ilmiah/seminar			1	
	7. Anggota dalam tim layanan pendidikan				

Kepada yang bersangkutan akan diberikan gaji/honorarium sesuai dengan peraturan penggajian yang berlaku di Institut Sains dan Teknologi Nasional.
Penugasan ini berlaku dari tanggal 09 Maret 2026 sampai dengan 04 Juli 2026

Tembusan :

1. Wakil Rektor 1 - ISTN
2. Wakil Rektor 2 - ISTN
3. Ka. Biro Sumber Daya Manusia - ISTN
4. Arsip



Jakarta, 09 Maret 2026
Dekan FSTT

Dr. Ir. Kun Wardana Abyoto, M.T.
NIDN. 0311086903

LAPORAN KEGIATAN PENELITIAN



RANCANG BANGUN PROTOTYPE SISTEM PEMANTAUAN LOKASI DAN PENGIRIMAN SINYAL DARURAT NELAYAN BERBASIS GPS DAN LORA

TIM PENELITIAN :

Ketua : M. Ikrar Yamin, S.T, M.T

Anggota : 1. Harlan Effendi, S.T, M.T

2. Alisa

**LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA
MASYARAKAT PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI
NASIONAL
JAKARTA
2026**

LEMBAR LAPORAN PENGESAHAN PENELITIAN

Judul : **RANCANG BANGUN PROTOTYPE SISTEM PEMANTAUAN LOKASI DAN PENGIRIMAN SINYAL DARURAT NELAYAN BERBASIS GPS DAN LORA**

Ketua Tim

a. Nama Lengkap dan Gelar : M. Ikrar Yamin, S.T, M.T
b. Jenis Kelamin : Laki-laki
c. NIDN : 0328108303
d. Pangkat Akademik : Asisten Ahli
e. Prodi : Teknik Elektro S1
f. Fakultas : Fakultas Teknik
g. No. Hp/Wa : 081382299894
h. Email : ikrar@istn.ac.id
i. Bidang Keahlian : Otomasi, Robotika, Internet of Things
j. Alamat Kantor : Jl. Moh Kahfi II Jagakarsa Jakarta Selatan

Anggota Tim

1. a. Nama Lengkap dan Gelar : Harlan Effendi, S.T, M.T
b. Jenis Kelamin : Laki-laki
c. NIDN : 0306106602
d. Pangkat Akademik : Lektor
e. Prodi : Teknik Elektro S1
f. Fakultas : Fakultas Teknik
g. No. Hp/Wa : 085715333839
h. Email : harlan@istn.ac.id
i. Bidang Keahlian : Teknik Elektronika
j. Alamat Kantor : Jl. Moh Kahfi II Jagakarsa Jakarta Selatan
2. a. Nama Lengkap : Alisa
b. Jenis Kelamin : Perempuan
c. Fakultas : Teknik
d. Perguruan Tinggi : Institut Sains dan Teknologi Nasional
a. Tempat/Lokasi : Cikarang, Kabupaten Bekasi
b. Lama Kegiatan : 6 (enam) bulan
c. Biaya Kegiatan : Rp. 5.000.000,00
d. Tahun Pelaksanaan : 2025-2026

Mengetahui,
Dekan Fakultas Sains Terapan Dan Teknologi

Jakarta, 20 Agustus 2026
Ketua

Dr. Ir. Kun Wardana Abyoto, M.T
NIDK : 0311086903


M. Ikrar Yamin, S.T, M.T.
NIDN : 0328108303

Menyetujui
Pjs. Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LPPM)

Dr. Musfirah Cahya Fajrah, S.Si., M.Si..
NIDN : 0004067109

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan kemudahan dan kelancaran bagi kami Program Studi Teknik Elektro S1 Institut Sains dan Teknologi Nasional, Jakarta dalam melaksanakan penelitian Hibah Internal yang berjudul :

**“Rancang Bangun Prototype Sistem Pemantauan Lokasi Dan Pengiriman
Sinyal Darurat Nelayan Berbasis Gps Dan Lora“**

Kegiatan penelitian tersebut dapat terlaksana berkat dukungan dari berbagai pihak dan kesempatan ini perkenankanlah kami menyampaikan terimakasih kepada :

1. Rektor Institut Sains dan Teknologi Nasional
2. Wakil Rektor Bidang Akademik
3. Wakil Rektor Bidang Sumber Daya
4. Dekan Fakultas Teknik
5. Ka. Program Studi Teknik Elektro
6. Kepala Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat

Demikian laporan pelaksanaan penelitian ini yang telah dilakukan. Harapan kami semoga laporan ini dapat memperlihatkan kegiatan yang telah dilaksanakan dan hasilnya dapat bermanfaat.

Jakarta, 18 Agustus 2026

Penyusun



M. Ikrar Yamin, S.T, M.T

NIDN: 0328108303

ABSTRAK

Penelitian ini membahas rancang bangun *prototype* sistem pemantauan lokasi dan pengiriman sinyal darurat nelayan berbasis GPS dan LoRa. Aktivitas nelayan skala kecil memiliki tingkat fatalitas tinggi akibat cuaca ekstrem, ketiadaan alat deteksi darurat otomatis, serta hilangnya sinyal seluler (*blank spot*) di lautan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem keselamatan maritim berdaya rendah dengan fitur redundansi deteksi bahaya dan antarmuka pemantauan ganda secara *real-time*.

Sistem dikembangkan menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan arsitektur *node-gateway*. Mikrokontroler ESP32 DevKit V1 bertindak sebagai pusat kendali yang mengintegrasikan titik koordinat dari modul GPS Neo-M8 serta parameter kedaruratan kapal dari sensor kemiringan MPU6050, sensor rembesan air (*water level*), dan tombol SOS manual. Seluruh data pemantauan divisualisasikan secara lokal melalui layar LCD TFT 2.4 inci pada kapal, kemudian ditransmisikan menggunakan modul radio LoRa SX1278 menuju *gateway* pos darat untuk ditampilkan pada dasbor pemetaan interaktif *Node-RED*.

Hasil pengujian menunjukkan modul GPS Neo-M8 berhasil mengunci lokasi stabil dalam waktu rata-rata 18 detik. Modul LoRa terbukti andal dalam mengirimkan paket data telemetri hingga jarak 1.000 meter dengan tingkat keberhasilan 70%, dan beroperasi sangat optimal di jarak 500 meter. Fusi pembacaan dari sensor MPU6050 dan rembesan air secara presisi sukses mengklasifikasikan kondisi operasional perahu menjadi *Normal*, *Warning*, *Emergency*, hingga *Capsize Flood*. Pemrosesan akhir pada dasbor *Node-RED* sukses memvisualisasikan seluruh peringatan bahaya dan pemetaan digital tanpa *error*. Kesimpulannya, *prototype* sistem ini berhasil beroperasi secara efektif sesuai dengan tujuan mitigasi keselamatan pelayaran nelayan

Kata Kunci: GPS, LoRa, ESP32, *Node-RED*, pemantauan lokasi, sinyal darurat nelayan.

ABSTRACT

This research discusses the design and development of a prototype location monitoring and emergency signal transmission system for fishermen based on GPS and LoRa. Small-scale fishing activities have a high fatality rate due to extreme weather, the absence of automatic emergency detection devices, and the loss of cellular signals (blank spots) at sea. Therefore, this research aims to develop a low-power maritime safety system featuring hazard detection redundancy and a real-time dual monitoring interface.

The system was developed using an experimental method with a node-gateway architecture approach. The ESP32 DevKit V1 microcontroller acts as the main controller that integrates coordinate points from the GPS Neo-M8 module and boat emergency parameters from the MPU6050 tilt sensor, water level sensor, and a manual SOS button. All monitoring data is visualized locally through a 2.4-inch TFT LCD screen on the boat, then transmitted using the LoRa SX1278 radio module to a land post gateway to be displayed on an interactive Node-RED mapping dashboard.

The testing results showed that the GPS Neo-M8 module successfully locked a stable location in an average time of 18 seconds. The LoRa module proved reliable in transmitting telemetry data packets up to a distance of 1,000 meters with a 70% success rate, and operated optimally at a distance of 500 meters. The fusion of readings from the MPU6050 and water level sensors successfully and precisely classified the boat's operational conditions into Normal, Warning, Emergency, and Capsize Flood. The final processing on the Node-RED dashboard successfully visualized all hazard warnings and digital mapping without errors. In conclusion, this prototype system successfully operated effectively in accordance with the maritime safety mitigation objectives for fishermen.

Keywords: *GPS, LoRa, ESP32, Node-RED, location monitoring, fishermen emergency signal.*

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	III
ABSTRAK.....	IV
ABSTRACT.....	V
DAFTAR ISI	VI
DAFTAR TABEL.....	VIII
DAFTAR GAMBAR	IX
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 RUMUSAN MASALAH	4
1.3 PERTANYAAN PENELITIAN.....	4
1.4 TUJUAN PENELITIAN	5
1.5 MANFAAT PENELITIAN	5
1.5.1 Manfaat Teoretis (Akademis).....	5
1.5.2 Manfaat Praktis (Terapan).....	6
1.6 BATASAN PENELITIAN	6
1.7 SISTEMATIKA PENULISAN.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 LANDASAN TEORI	8
2.1.1 Karakteristik Operasional dan Keselamatan Nelayan Skala Kecil	8
2.1.2 Sistem Tertanam.....	9
2.1.3 Sistem Elektronika Terintegrasi	18
2.1.3 Sistem Penentuan Posisi GPS (Global Positioning System).....	26
2.1.4 Modul Komunikasi Radio LoRa (Long Range).....	30
2.1.5 Sistem Mikrokontroler Pengendali Utama.....	34
2.1.6 Sistem Deteksi Kebocoran Air	38
2.1.7 Sistem Pengukuran Stabilitas Inersia	41
2.1.8 Sistem Interupsi Manual Tombol SOS.....	44
2.1.9 Subsistem Antarmuka Telemetry dan Aliran Data (Node-RED)	48
2.1.10 Sistem Tampilan Visual Lokal	50
2.1.11 Sistem Catu Daya.....	52
2.1.12 Sistem Indikator Visual Lampu LED	56
2.1.13 Sistem Indikator Audio Piezoelectric Buzzer	57
2.2 PENELITIAN TERDAHULU	59
2.3 KERANGKA KONSEPTUAL	63
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	64
3.1 RANCANGAN PENELITIAN	64
3.1.1 Diagram Alir Penelitian.....	64
3.1.2 Blok Diagram Sistem	67

3.2	DIAGRAM RANGKAIAN	68
3.3	PERANCANGAN HARDWARE	72
3.4	PERANCANGAN SOFTWARE	77
3.5	PARAMETER PENGUJIAN	82
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		85
4.1	HASIL PENELITIAN	85
4.1.1	Pengujian GPS Neo-M8	86
4.1.2	Pengujian Komunikasi LoRa	89
4.1.3	Pengujian Tombol SOS	91
4.1.4	Pengujian Sensor MPU6050	93
4.1.5	Pengujian Sensor Water Level	96
4.1.6	Pengujian Dashboard Node-Red	99
4.1.7	Pengujian Keseluruhan.....	99
4.2	INTERPRETASI TEMUAN PENELITIAN	101
4.3	PERBANDINGAN DENGAN PENELITIAN TERDAHULU	104
4.4	IMPLIKASI DARI TEMUAN PENELITIAN.....	105
4.4.1	Implikasi Praktis	105
4.4.2	Implikasi Teoretis.....	105
4.5	KETERBATASAN PENELITIAN.....	106
BAB V KESIMPULAN		107
5.1	KESIMPULAN.....	107
DAFTAR PUSTAKA.....		108
LAMPIRAN.....		111

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Konfigurasi Pin Rangkaian TRANSMITTER.....	71
Tabel 3. 2 Konfigurasi Pin Rangkaian RECEIVER	72
Tabel 3. 3 Tabel Ringkasan Ambang Batas (Threshold) Kondisi Sistem.....	78
Tabel 3. 4 Data yang Ditampilkan pada Dashboard Node-RED	78
Tabel 3. 5 Rencana Pengujian Sistem.....	82
Tabel 4. 1 Hasil Pembacaan Sensor GPS Neo-M8.....	86
Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Sensor GPS.....	87
Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Komunikasi LoRa	89
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Klasifikasi Status Kondisi Berdasarkan Tombol SOS92	
Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Parameter MPU6050	94
Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Klasifikasi Status Kondisi Berdasarkan MPU6050 ..	95
Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Parameter Sensor Water Level	97
Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Klasifikasi Status Kondisi Berdasarkan Sensor Water Level.....	98
Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Dashboard Node-Red	99
Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Keseluruhan.....	100
Tabel 4. 11 Hasil Pengujian Sistem	101

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skematik rangkaian Modul GPS Neo-8M.....	27
Gambar 2. 2 Skematik Rangkaian Modul Lora SX1278.....	31
Gambar 2. 3 Rangkaian Skematik Modul ESP32 (Sirkuit Inti Internal pada ESP32 DevKit V1).....	35
Gambar 2. 4 Skematik rangkaian Sensor Water Level	39
Gambar 2. 5 Skematik Rangkaian Sensor MPU 6050.....	42
Gambar 2. 6 Skematik Rangkaian Tombol SOS	46
Gambar 2. 7 Skematik Rangkaian LCD TFT 2,4 inch	51
Gambar 2. 8 Simbol Skematik dan Polaritas Pin Light Emitting Diode (LED)..	56
Gambar 2. 9 Bentuk Fisik, Struktur Internal, dan Simbol Skematik Piezoelectric Buzzer	58
Gambar 3. 1 Tahapan penelitian sistem pemantauan lokasi dan pengiriman sinyal darurat nelayan berbasis Gps dan Lora	64
Gambar 3. 2 Diagram blok sistem pemantauan lokasi dan pengiriman sinyal darurat nelayan berbasis Gps dan Lora	68
Gambar 3. 3 Skematik Rangkaian Receiver	70
Gambar 3. 4 Skematik Rangkaian Transmitter.....	70
Gambar 3. 5 Hardware Mikrokontroler ESP32 DevKit V1	74
Gambar 3. 6 Hardware Modul LoRa SX1278 Ra-02	74
Gambar 3. 7 Hardware Modul GPS Neo-M8	75
Gambar 3. 8 Hardware Sensor MPU6050	75
Gambar 3. 9 Hardware Sensor Water Level	76
Gambar 3. 10 LCD TFT SPI Serial 2.4 Inch	77
Gambar 3. 11 Flowchart dari Transmitter dan Receiver.....	81

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia memiliki potensi maritim yang sangat masif, di mana sektor perikanan tangkap menjadi penopang ekonomi utama bagi masyarakat pesisir. Berdasarkan data nasional, populasi nelayan laut di sub-sektor perikanan tangkap didominasi oleh nelayan tradisional berskala kecil (*small-scale fisheries*) (Kementerian Kelautan dan Perikanan, 2024).

Distribusi jumlah populasi nelayan di Indonesia secara makro dapat dilihat pada tabel 1.1 berikut.

Tabel 1. 1 Jumlah Populasi Nelayan di Indonesia

Kategori Nelayan	Jumlah Personel (Orang)	Persentase Karakteristik Armada
Nelayan Perairan Laut (Tangkap)	2.359.264	Pesisir Jawa, Sumatra, Sulsel, Maluku
Nelayan Perairan darat	420.736	Wilayah Sungai/Danau Besar (Kalimantan)
Total Angkatan	2.780.000	Skala kecil (<10 GT) mendominasi 85%

Berdasarkan Tabel 1.1, sektor perikanan tangkap didominasi secara absolut oleh armada nelayan skala kecil (<10 GT) yang menyumbang 85% dari total 2,78 juta angkatan kerja. Besarnya populasi armada berkapasitas kecil ini berbanding lurus dengan tingginya tingkat risiko keselamatan kerja yang mereka hadapi setiap kali melaut di perairan terbuka.

Risiko ini dibuktikan dengan tren peningkatan angka insiden kedaruratan di laut yang ditangani oleh Badan Nasional Pencarian dan Pertolongan (Basarnas) (Badan Nasional Pencarian dan Pertolongan, 2025). Data fluktuasi angka kecelakaan disajikan pada tabel 1.2 berikut.

Tabel 1. 2 Statistik Kecelakaan Kapal dan Operasi SAR Nasional (2022–2024)

Tahun	Jumlah Kecelakaan Kapal (Total)	Estimasi Keterlibatan Kapal Nelayan (31% - 40%)	Status Hasil Operasi SAR (Rata-rata Tahunan)
2022	810 kasus	251 kasus	Selamat: 72% Meninggal/Hilang: 28%
2023	850 kasus	312 kasus	Selamat: 75% Meninggal/Hilang: 25%
2024	869 kasus	347 kasus	Selamat: 70% Meninggal/Hilang: 30%

Merujuk pada Tabel 1.2, jumlah kecelakaan laut secara nasional terus melonjak setiap tahunnya, mencapai 869 kasus pada tahun 2024 dengan tingkat fatalitas (meninggal/hilang) yang meningkat hingga menyentuh angka 30%. Dari total kecelakaan tersebut, sektor kapal penangkap ikan tradisional secara konsisten menempati porsi tertinggi dengan risiko fatalitas yang paling ekstrem (Komite Nasional Keselamatan Transportasi, 2023).

Statistik kontribusi kecelakaan kapal nelayan terhadap total kecelakaan laut dipaparkan pada tabel 1.3 berikut.

Tabel 1. 3 Kontribusi Kasus dan Dampak Fatalitas Kecelakaan Nelayan

Parameter Maritim	Rata-Rata Rasio Tahunan	Dampak Riil Kedaruratan Lapangan
Persentase Kasus Nelayan	31% - 40%	Mendominasi seluruh total kecelakaan laut nasional
Rata-rata Korban Jiwa	>100 Orang / Tahun	Dinyatakan meninggal dunia atau hilang di laut
Kategori Fatalitas Utama	Kecelakaan Kapal & KMM	Karam di laut atau nelayan jatuh dari kapal (<i>man overboard</i>)

Data pada Tabel 1.3 menegaskan bahwa kecelakaan armada nelayan menyumbang 31% - 40% dari total kecelakaan laut nasional. Tingginya korban jiwa yang mencapai lebih dari 100 orang per tahun umumnya disebabkan oleh kapal karam atau nelayan jatuh ke laut (*man overboard*). Tingginya angka fatalitas ini

bermuara pada tiga aspek penyebab utama yang diuraikan pada tabel 1.4 berikut (Kurniawan & Solihin, 2022):

Tabel 1. 4 Matriks Klasifikasi Faktor Penyebab Kecelakaan Nelayan

Faktor Utama	Indikator Spesifik Kasus Nelayan	Persentase Kontribusi
Hidrometeorologi	Gelombang tinggi mendadak, angin muson barat, badai tropis, arus laut kuat.	45%
Teknis & Navigasi	Mesin mati di tengah laut, kebocoran lambung kapal tradisional, ketiadaan radio VHF/GPS.	35%
Human Error	Tidak memakai <i>life jacket</i> , kelebihan muatan ikan (<i>overloading</i>), mengabaikan peringatan cuaca BMKG.	20%

Tabel 1.4 menunjukkan bahwa faktor hidrometeorologi (cuaca ekstrem) mendominasi penyebab kecelakaan sebesar 45%. Risiko ini diperparah oleh faktor teknis (35%), di mana armada tradisional sering kali beroperasi tanpa perlengkapan navigasi dan telekomunikasi standar (seperti radio VHF/GPS), sehingga mempersulit proses pertolongan (Kurniawan & Solihin, 2022).

Menjawab permasalahan ketiadaan alat deteksi bahaya dan hilangnya sinyal seluler (*blank spot*) di wilayah laut, diperlukan sebuah sistem mitigasi yang mandiri (u-blox AG, 2021; Hashim et al., 2021). Penggunaan komunikasi nirkabel berbasis *Long Range* (LoRa) menjadi solusi ideal karena mampu mengirimkan data berukuran kecil secara jarak jauh dengan konsumsi daya yang sangat rendah, tanpa harus bergantung pada jaringan seluler komersial (Augustin et al., 2016; Raza et al., 2017).

Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan rancang bangun *prototype* pemantauan menggunakan arsitektur *node-gateway* berbasis mikrokontroler ESP32 DevKit V1 (Espressif Systems, 2023). Pada perangkat *node* (sisi perahu), deteksi darurat dibaca melalui tiga metode masukan: koordinat *Global Positioning System* (GPS) Neo-M8, input manual tombol SOS, serta otomatisasi dari sensor MPU6050 (pembaca kemiringan) dan *water level* (pendeteksi kebocoran) (TDK InvenSense, 2013; Sugiarto et al., 2023).

Seluruh status perangkat divisualisasikan secara lokal melalui LCD TFT 2.4 inci bagi nelayan, lalu ditransmisikan secara satu arah (*simplex*) menggunakan modul LoRa menuju *gateway* di darat (Pasolini et al., 2018; Ilitek, 2011). Perangkat *gateway* kemudian meneruskan paket telemetri tersebut melalui koneksi internet untuk diolah ke dalam *platform dashboard* pemantauan terpusat berbasis Node-RED, yang memvisualisasikan pemetaan titik lokasi secara interaktif guna memangkas waktu tanggap evakuasi (OpenJS Foundation, 2026; Leaflet, 2026).

1.2 Rumusan Masalah

1. Keterbatasan Infrastruktur Komunikasi Jaringan Seluler (*Blank spot*): Ketika kapal bergerak menjauh dari daratan, jaringan seluler GSM menjadi tidak stabil atau hilang sama sekali. Hal ini menyebabkan nelayan tidak dapat mengirimkan koordinat lokasi atau sinyal meminta bantuan ke darat ketika terjadi kondisi darurat.
2. Ketiadaan Deteksi Bahaya Otomatis (*False Negative Risk*): Perangkat keselamatan maritim konvensional umumnya hanya mengandalkan pelacakan lokasi tunggal atau penekanan tombol manual. Jika nelayan mengalami kecelakaan ekstrem (seperti kapal terbalik atau terlempar dari kapal) dan kehilangan kesadaran, sinyal darurat tidak akan pernah terkirim karena tidak adanya sensor otomatis yang mengenali anomali stabilitas kapal.
3. Kesulitan Interpretasi Data dan Monitoring Lokal: Data mentah dari sensor analog (berupa bit ADC atau nilai tegangan listrik) sulit dipahami secara cepat oleh petugas penyelamat di darat. Di sisi lain, ketiadaan display indikator visual di atas kapal membuat nelayan tidak dapat memastikan apakah perangkat keselamatan mereka sedang bekerja memancarkan data dengan normal atau tidak.

1.3 Pertanyaan Penelitian

1. Bagaimana karakteristik dan performa transmisi data modulasi LoRa SX1278 dalam mengirimkan paket koordinat geospasial nelayan pada area terbuka sebagai alternatif jalur komunikasi di wilayah *blank spot* seluler?
2. Bagaimana efektivitas dan akurasi integrasi masukan manual (tombol SOS) serta otomatisasi sensorik (MPU6050 dan *water level*) dalam

mengidentifikasi serta mengklasifikasikan tingkatan status kedaruratan kapal nelayan?

3. Bagaimana implementasi sistem antarmuka pemantauan ganda (*dual monitoring UI*) pada layar LCD TFT lokal (sisi *transmitter*) dan visualisasi data pada *dashboard Node-RED* (sisi *gateway*) dalam menyajikan informasi status keselamatan secara *real-time* dan *user-friendly*

1.4 Tujuan Penelitian

1. Menguji, menganalisis, dan memvalidasi keandalan jarak transmisi nirkabel *simplex* modul LoRa SX1278 dalam mengirimkan paket data koordinat lokasi nelayan berdasarkan variasi jarak serta hambatan lingkungan.
2. Mengimplementasikan dan mengevaluasi respon akurasi pembacaan thresholds dari sensor MPU6050 (*roll angle*) dan sensor *water level* (persentase volume air lambung) dalam menentukan kategori kondisi *Normal, Warning, Emergency*, hingga *Capsize Flood*.
3. Membangun dan mengintegrasikan platform antarmuka visual terpusat menggunakan *dashboard IoT Node-RED* berbasis visualisasi peta digital *maps* Leaflet di darat, sekaligus mengaktifkan indikator monitoring lokal layar LCD TFT pada kapal nelayan.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian rancang bangun *prototype* ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan yang terbagi menjadi dua aspek utama:

1.5.1 Manfaat Teoretis (Akademis)

1. Memberikan referensi ilmiah empiris mengenai pemanfaatan arsitektur *Node-gateway* berbasis teknologi LPWAN LoRa frekuensi 433 MHz untuk mitigasi keselamatan sektor maritim.
2. Menjadi studi acuan dalam pengembangan sistem instrumentasi elektronika digital yang menerapkan metode redundansi masukan ganda (kombinasi sensor otomatis dan input manual) dalam menekan risiko kegagalan deteksi bahaya (*false negative*).

1.5.2 Manfaat Praktis (Terapan)

1. Bagi Nelayan Tradisional: Menjadi landasan awal perancangan teknologi alat bantu keselamatan maritim bernilai ekonomis tinggi (*low-cost*) yang adaptif terhadap wilayah perairan tanpa sinyal GSM.
2. Bagi Tim Penyelamat (SAR): Memberikan pemodelan visual sistem pemetaan geospasial koordinat kecelakaan kapal secara instan guna memangkas durasi waktu tanggap darurat pencarian korban di laut.

1.6 Batasan Penelitian

1. Penelitian difokuskan pada perancangan, pembuatan, dan pengujian keandalan sirkuit pada skala *prototype* laboratorium; kondisi kapal nelayan disimulasikan menggunakan perangkat *node transmitter* bergerak.
2. Pengujian jarak propagasi gelombang radio modul LoRa dan penguncian awal (*initial lock time*) satelit modul GPS Neo-M8 dilakukan terbatas pada area daratan terbuka (*outdoor*) dan lingkungan berpenghalang, bukan uji operasional penuh di tengah laut lepas pantai.
3. Jalur transmisi data nirkabel antara perangkat *node transmitter* di kapal menuju perangkat *gateway receiver* di pos darat dibatasi murni menggunakan komunikasi satu arah (*simplex*).
4. Variabel deteksi anomali kedaruratan kapal pada *prototype* dibatasi pada 3 parameter masukan: penekanan digital input tombol SOS, perubahan sudut kemiringan sumbu aksis MPU6050, dan persentase rembesan volume air pada lambung tiruan menggunakan sensor *water level*.
5. Sistem pemantauan akhir di pos darat memanfaatkan koneksi WiFi lokal pada ESP32 *gateway* untuk meneruskan *parsing* data menuju aplikasi visual dasar *dashboard Node-RED* dan tidak melibatkan integrasi jaringan komunikasi satelit komersial.

1.7 Sistematika Penulisan

Bab I pendahuluan, berisi latar belakang yang menjelaskan urgensi penelitian, rumusan masalah, pertanyaan penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan penelitian, serta sistematika penulisan.

Bab II tinjauan Pustaka, membahas landasan teori yang meliputi konsep Internet of Things, GPS, LoRa, arsitektur *node-gateway*, display LCD TFT SPI,

platform monitoring *Node-RED*, tampilan maps, serta penelitian terdahulu yang relevan dengan sistem pemantauan lokasi dan sinyal darurat nelayan.

Bab III metodologi penelitian, menjelaskan metode yang digunakan dalam penelitian, meliputi rancangan penelitian, populasi dan sampel, metode pengumpulan data, metode analisis data, pertimbangan etika, serta perancangan alat dan bahan yang digunakan pada *prototype*.

Bab IV hasil dan pembahasan, berisi hasil pengujian sistem, pembahasan data pengujian, interpretasi temuan, perbandingan dengan penelitian terdahulu, serta keterbatasan penelitian.

Bab V kesimpulan dan saran, berisi kesimpulan dari hasil penelitian serta saran pengembangan untuk penelitian berikutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Karakteristik Operasional dan Keselamatan Nelayan Skala Kecil

Menurut Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2016 tentang Perlindungan dan Pemberdayaan Nelayan, Pembudi Daya Ikan, dan Petambak Garam, nelayan skala kecil (*small-scale fisheries*) didefinisikan sebagai nelayan yang melakukan penangkapan ikan untuk memenuhi kebutuhan hidup sehari-hari, baik tanpa menggunakan kapal maupun menggunakan kapal penangkap ikan berukuran paling besar 10 *Gross Tonnage* (GT). Dalam praktiknya di perairan Indonesia, kelompok armada ini didominasi oleh perahu tradisional berkapasitas di bawah 5 hingga 10 GT yang terbuat dari kayu atau serat kaca (*fiberglass*), digerakkan oleh mesin motor tempel, serta memiliki ruang kompartemen lambung dan kelistrikan yang sangat terbatas (Kurniawan & Solihin, 2022).

Keterbatasan fisik kapal nelayan skala kecil ini berimplikasi langsung terhadap tingkat kerentanan keselamatan kerja di laut:

1. Ketidadaan Catu Daya Mandiri Skala Besar: Kapal skala kecil umumnya tidak memiliki generator diesel mandiri maupun sistem distribusi daya arus bolak-balik (AC), sehingga seluruh instrumen elektronika keselamatan harus dirancang dengan profil konsumsi daya ultra-rendah (*ultra-low power*) dan mampu beroperasi stabil hanya dengan suplai baterai portabel DC (Davies, 2008).
2. Ketidadaan Perangkat Navigasi & Komunikasi Standar: Karena faktor biaya (*cost constraint*), armada nelayan kecil jarang dilengkapi dengan perangkat keselamatan berstandar *Global Maritime Distress and Safety System* (GMDSS) seperti radio VHF maritim, transponder AIS, atau EPIRB satelit komersial yang berharga mahal (Tetley & Calcutt, 2013).
3. Stabilitas Hidrodinamis yang Rentan: Bobot dan dimensi perahu yang kecil (<10 GT) menyebabkan kapal sangat mudah terombang-ambing, mengalami kemiringan ekstrem (*roll angle*), hingga kemasukan air lambung akibat hempasan gelombang tinggi (Pratama dkk., 2020; Wibowo dkk., 2021).

Oleh karena itu, rancang bangun purwarupa sistem keselamatan pada penelitian ini secara khusus ditujukan untuk mengakomodasi karakteristik perahu skala kecil tersebut, yakni dengan menghadirkan solusi teknologi nirkabel LoRa berdaya rendah, ekonomis (*low-cost*), serta terintegrasi dengan sensor kestabilan gerak dan deteksi rembesan air otonom.

2.1.2 Sistem Tertanam

2.1.2.1 Definisi Embedded System dalam Rekayasa Elektronika

Dalam paradigma rekayasa elektronika, sistem tertanam (*embedded system*) didefinisikan sebagai integrasi perangkat keras dan perangkat lunak (*firmware*) yang dikonstruksikan secara spesifik untuk memecahkan satu masalah fungsional terisolasi (Kamal, 2011). Berbeda dengan arsitektur mikroprosesor komputer personal (*general-purpose computing*), sistem tertanam bersifat terdedikasi, statis, dan beroperasi di bawah batasan lingkungan yang kaku (Mazidi et al., *The 8051 Microcontroller and Embedded Systems*, 2014; Noergaard, *Embedded Systems Architecture*, 2012). Wujud fundamentalnya berupa mikrokontroler yang bertindak sebagai *System on a Chip* (SoC) mandiri, dilengkapi antarmuka I/O fisik seperti pin GPIO, ADC, serta jalur komunikasi data UART, I²C, atau SPI untuk berinteraksi dengan dunia nyata (Ibrahim, *Microcontroller Projects in C for the 8051*, 2014; Davies, *MSP430 Microcontroller Basics*, 2008).

Pada penelitian *prototype* pemantauan keselamatan maritim ini, sistem tertanam menjadi fondasi absolut yang bertugas memitigasi bahaya kecelakaan di laut lepas (Tetley & Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 2013). Menggunakan mikrokontroler ESP32 DevKit V1 pada *node transmitter* sebagai pusat kendali otonom (Schwartz, *Internet of Things with ESP8266*, 2016), sistem ini berinteraksi langsung dengan periferal sensorik paralel. Komponen tersebut meliputi modul GPS u-blox Neo-M8 untuk mengalkulasi koordinat spasial, sensor inersia MPU6050 berbasis MEMS untuk membaca sudut kemiringan, dan sensor *water level* untuk mengonversi konduktivitas air laut menjadi tegangan analog (Wilson, *Sensor Technology Handbook*, 2005; Lay, *Principles of Space Instrument Design*, 2008; Pallas-Areny & Webster, *Sensors and Signal Conditioning*, 2012).

Mikrokontroler ESP32 berfungsi sebagai agregator untuk mengolah nilai mentah sensor ke dalam variabel desimal logis, lalu mengemas bit informasi

tersebut ke dalam satu *string* data terpadu (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015). Dalam hitungan milidetik, sistem mengeksekusi instruksi keluaran (*output*) berupa pendaran LED, bunyi peringatan *buzzer*, dan visualisasi piksel pada layar TFT LCD (Ibrahim, *Microcontroller Projects in C for the 8051*, 2014; Petruzella, *Programmable Logic Controllers*, 2016). Secara krusial, modul *transceiver* LoRa SX1278 diperintahkan memodulasikan sinyal marabahaya menuju daratan sebelum perangkat kehilangan daya atau tenggelam (Augustin & Yi, *LoRa and LoRaWAN for IoT*, 2018). Dengan demikian, implementasi sirkuit ini mewujudkan *life-safety system* yang andal dan deterministik melalui sinkronisasi tingkat rendah antara logika *software* dan perangkat keras (Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012; Mazidi et al., *The 8051 Microcontroller and Embedded Systems*, 2014). Sistem mampu menyelamatkan nyawa nelayan secara otomatis tanpa membutuhkan campur tangan teknis dari pengguna saat terjadi kondisi panik ekstrem di lapangan.

2.1.2.2 Karakteristik Embedded System

Dalam literatur rekayasa kelistrikan, sistem tertanam (*embedded system*) diidentifikasi melalui karakteristik teknis spesifik yang membedakannya secara fundamental dari komputer konvensional (*general-purpose computer*) (Kamal, *Embedded Systems: Architecture, Programming and Design*, 2011). Komputer konvensional dinilai berdasarkan fleksibilitas dan pemrosesan paralel skala masif, sedangkan sistem tertanam diukur dari seberapa efisien perangkat keras mikro tersebut menjalankan satu tugas spesifik di bawah batasan sumber daya yang ketat (Mazidi et al., *The 8051 Microcontroller and Embedded Systems*, 2014; Noergaard, *Embedded Systems Architecture*, 2012). Karakteristik *embedded system* pada *prototype* keselamatan maritim ini diklasifikasikan ke dalam empat parameter utama:

2.1.2.3 Dedikasi Fungsional Tertutup (Dedicated Functionality)

Karakteristik utama sistem tertanam adalah fungsionalitasnya yang terdedikasi untuk memecahkan satu masalah fungsional. Perangkat lunak yang menggerakkannya (*firmware*) bersifat statis dan dikunci permanen di dalam memori kilat (*flash memory*) non-volatil mikrokontroler sejak tahap perakitan (Noergaard, *Embedded Systems Architecture*, 2012). Pada *prototype* ini, sifat

dedikatif terlihat pada alur algoritma mikrokontroler ESP32 DevKit V1. Inti pemroses ganda (*dual-core*) tersebut secara eksklusif menjalankan siklus berulang tanpa henti (*infinite looping*) untuk mengeksekusi fungsi mitigasi keselamatan: membaca port SPI pada modul radio LoRa SX1278, menerima pemetaan data UART dari modul GPS Neo-M8, serta mengevaluasi sinyal analog dari sensor air (ADC) dan sinyal digital dari sensor inersia MPU6050 (Schwartz, *Internet of Things with ESP8266*, 2016; Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012). Dedikasi murni ini memastikan seluruh detak instruksi prosesor terfokus pada analisis keselamatan, sehingga meminimalisasi risiko gagal respons akibat proses latar belakang sistem operasi (Mazidi et al., *The 8051 Microcontroller and Embedded Systems*, 2014).

2.1.2.4 Batasan Kapasitas Sumber Daya Komputasi (Resource-Constrained Environment)

Sistem tertanam wajib beroperasi maksimal di bawah keterbatasan ruang memori RAM, ROM, serta kecepatan detak instruksi (*clock speed*) yang sangat kecil dibandingkan mikroprosesor PC modern (Mazidi et al., *The 8051 Microcontroller and Embedded Systems*, 2014). Keping *System on a Chip* (SoC) ESP32 pada *prototype* maritim ini hanya disokong memori volatil *Static RAM* (SRAM) sebesar 520 KB dan memori *Flash* internal berkapasitas 4 MB (Schwartz, *Internet of Things with ESP8266*, 2016). Keterbatasan ruang silikon ini memaksa penulisan kode *firmware* harus sangat efisien. Proses kalkulasi algoritma berat—seperti mengurai (*parsing*) *string* koordinat geospasial NMEA dari GPS atau pengolahan trigonometri pada sensor kemiringan MPU6050—harus ditangani dengan algoritma manipulasi *register* tingkat rendah dan manajemen *buffer* yang ketat. Pendekatan ini wajib diterapkan untuk mencegah kebocoran memori (*heap memory leak*) atau *stack overflow* yang dapat melumpuhkan sistem di tengah kondisi darurat (Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012; Noergaard, *Embedded Systems Architecture*, 2012).

2.1.2.5 Efisiensi Manajemen Konsumsi Daya Kelistrikan (Ultra-Low Power Consumption)

Sistem tertanam sering kali bertindak sebagai pos penginderaan mandiri (*remote autonomous edge node*) yang beroperasi tanpa sambungan ke jaringan

listrik utama, sehingga sangat bergantung pada suplai energi baterai yang terbatas (Davies, 2008). Karena *prototype node transmitter* ini diaplikasikan pada perahu nelayan tradisional yang tidak memiliki generator diesel sendiri, rangkaian perangkat keras didesain dengan penarikan arus listrik (*amperage draw*) sekecil mungkin (Kurniawan & Solihin, 2022). Efisiensi ini diwujudkan melalui pemilihan komponen berprofil daya rendah (*low-power profile*), seperti adopsi topologi *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) berbasis pemancar Semtech LoRa SX1278. Modul radio modulasi *chirp* ini mampu memancarkan paket telemetri hingga radius ribuan meter dengan konsumsi arus yang jauh lebih irit dibandingkan modul seluler broadband tradisional (GSM/4G LTE) (Augustin et al., 2016). Ditambah lagi, fitur manajemen daya ESP32 seperti mode *deep sleep* menjadi penentu utama durabilitas baterai saat nelayan menanti bantuan di laut lepas (Schwartz, 2016; Valvano, 2012).

2.1.2.6 Ketahanan dan Kestabilan Sistem di Lingkungan Ekstrem (Harsh Environment Reliability & Robustness)

Sistem tertanam sering kali bertindak sebagai pos penginderaan mandiri (*remote autonomous edge node*) yang beroperasi tanpa sambungan ke jaringan listrik utama, sehingga sangat bergantung pada suplai energi baterai yang terbatas (Davies, *MSP430 Microcontroller Basics*, 2008). Karena *prototype node transmitter* ini diaplikasikan pada perahu nelayan tradisional yang tidak memiliki generator diesel sendiri, rangkaian perangkat keras didesain dengan penarikan arus listrik (*amperage draw*) sekecil mungkin. Efisiensi ini diwujudkan melalui pemilihan komponen berprofil daya rendah (*low-power profile*), seperti adopsi topologi *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) berbasis pemancar Semtech LoRa SX1278. Modul radio modulasi *chirp* ini mampu memancarkan paket telemetri hingga radius ribuan meter dengan konsumsi arus yang jauh lebih irit dibandingkan modul seluler *broadband* tradisional (GSM/4G LTE) (Augustin & Yi, *LoRa and LoRaWAN for IoT*, 2018). Ditambah lagi, fitur manajemen daya ESP32 seperti mode *deep sleep* menjadi penentu utama durabilitas baterai saat nelayan menanti bantuan di laut lepas (Schwartz, *Internet of Things with ESP8266*, 2016; Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012).

2.1.2.7 Sistem *Real-time* Sederhana

Dalam hierarki rekayasa perangkat keras, konsep sistem waktu nyata (*real-time system*) tidak hanya merujuk pada seberapa cepat prosesor mengeksekusi instruksi, melainkan pada kemampuan deterministiknya. Secara elektronika, kebenaran sistem *real-time* bergantung pada keakuratan hasil keluaran (*output*) sekaligus ketepatan waktu (*timeliness*) saat sinyal tersebut dihasilkan (Laplante & Ovaska, *Real-Time Systems Design and Analysis*, 2011). Jika eksekusi sinyal terlambat melampaui batas tenggat waktu kritis (*deadline*), komputasi dianggap gagal total dan dapat memicu konsekuensi fisik yang fatal. Dalam *prototype* keselamatan nelayan, parameter deterministik ini menjadi inti operasional sirkuit. Saat terjadi kondisi darurat, seperti kapal terbalik atau penekanan sakelar SOS manual, mikrokontroler wajib merespons stimulus kelistrikan tersebut secara instan tanpa terhambat oleh antrean pemrosesan data lainnya (Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012).

Mekanisme pemenuhan tenggat waktu seketika ini direalisasikan melalui interupsi perangkat keras (*hardware interrupt*) dan rutin pelayanan interupsi (*Interrupt Service Routine / ISR*). Pada arsitektur mikrokontroler ESP32 DevKit V1, interupsi memungkinkan periferal eksternal untuk secara asinkron menghentikan sementara siklus *looping* program utama pada Unit Aritmetika dan Logika (ALU) (Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012). Sebagai contoh, ketika tombol darurat ditekan, terjadi transisi tegangan (*falling edge*) pada pin GPIO dari HIGH ke LOW. Fluktuasi transien ini memicu *register* interupsi untuk membekukan program utama dan mengarahkan *Program Counter* (PC) langsung ke blok memori fungsi ISR darurat (Mazidi et al., *The 8051 Microcontroller and Embedded Systems*, 2014). Mekanisme tingkat rendah ini memberikan garansi *real-time*; mikrokontroler akan menunda pembacaan *string* satelit GPS yang lambat, lalu mendedikasikan detak *clock* prosesor untuk membunyikan *buzzer* dan mengirimkan kode SOS ke modul radio LoRa SX1278 dalam orde mikrodetik (Augustin & Yi, *LoRa and LoRaWAN for IoT*, 2018).

Selain interupsi fisik, kapabilitas *real-time* sederhana ini dibangun melalui algoritma pemantauan prediktif berbasis *threshold* (ambang batas). Sistem secara kontinu melakukan teknik *polling* terhadap variasi voltase analog dari sensor *water*

level melalui *Analog-to-Digital Converter* (ADC) internal, serta membaca data digital percepatan dari sensor IMU MPU6050 via *bus* serial I²C (Pallas-Areny & Webster, *Sensors and Signal Conditioning*, 2012). Jika nilai luaran melewati batas toleransi keselamatan (seperti sudut *roll* kapal melebihi 85 derajat), *state machine* pada *firmware* langsung mengubah bendera indikator menjadi status *Capsize Flood* (Noergaard, *Embedded Systems Architecture*, 2012). Transformasi logika ini menggeser mode operasional ESP32 dari fase pemantauan pasif menjadi mode transmisi aktif dengan prioritas tertinggi secara *real-time* (Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012). Nomenklatur "sederhana" pada sistem ini merujuk khusus pada optimasi dan simplifikasi muatan paket data (*payload*) yang dipancarkan. Protokol komunikasi radio LoRa memiliki *bandwidth* sempit dan batasan durasi pancaran udara (*Time on Air*) yang kaku, sehingga perangkat keras tidak dapat memindahkan data berukuran besar secara seketika (Augustin & Yi, *LoRa and LoRaWAN for IoT*, 2018).

Agar tetap memenuhi tenggat waktu *real-time*, *firmware* pada *node transmitter* diprogram untuk memampatkan ratusan data pembacaan sensor menjadi kerangka *string* ASCII biner yang pendek dan ringan sebelum disalurkan melalui jalur SPI menuju *register* FIFO modul radio SX1278 (Ibrahim, *Microcontroller Projects in C for the 8051*, 2014). Penyederhanaan paket data dan sinkronisasi tingkat komponen inilah yang memangkas latensi komunikasi dari kapal nelayan hingga sukses divisualisasikan di pos darat secara deterministik (Laplante & Ovaska, *Real-Time Systems Design and Analysis*, 2011; Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012).

2.1.2.8 Perangkat Keras (Hardware)

Dalam disiplin rekayasa sistem tertanam, perangkat keras (*hardware*) merupakan wujud manifestasi fisik dari sirkuit elektronika terpadu yang memfasilitasi interaksi antara logika algoritma mesin dengan besaran fisis di dunia nyata (Kamal, *Embedded Systems: Architecture, Programming and Design*, 2011). Perangkat keras elektronika ini tidak sekadar kumpulan komponen pasif dan aktif yang dirangkai secara acak, melainkan sebuah topologi kelistrikan tertutup (*closed-loop circuit*) yang dirancang dengan presisi untuk menjalankan fungsi akuisisi, pemrosesan, dan transmisi data di bawah batasan tegangan logika tertentu

(Noergaard, *Embedded Systems Architecture*, 2012). Pada instrumen *node transmitter* yang dipasang di perahu nelayan, arsitektur perangkat keras dibangun dengan menempatkan mikrokontroler ESP32 DevKit V1 sebagai pusat orkestrasi kelistrikan (CPU) (Schwartz, *Internet of Things with ESP8266*, 2016).

Mikrokontroler berbasis arsitektur 32-bit ini beroperasi secara ketat pada level logika tegangan searah (DC) sebesar 3,3 Volt, menjadikannya sangat sensitif terhadap rancangan sirkuit periferan yang terhubung ke pin *General Purpose Input/Output* (GPIO) miliknya (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015). Sebagai sebuah sistem yang harus berinteraksi dengan lingkungan maritim, unit pemroses pusat tersebut dikelilingi oleh jaringan periferan elektronika yang bertindak sebagai antarmuka masukan (sensor) dan keluaran (aktuator). Pada sisi masukan penginderaan, sistem mengandalkan modul penerima *Global Positioning System* (GPS) Neo-M8 yang bertugas menangkap propagasi gelombang frekuensi radio (RF) L1 dari konstelasi satelit di luar angkasa, lalu mendemodulasinya menjadi deretan sinyal kelistrikan digital yang dikirimkan ke mikrokontroler melalui protokol asinkron *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (UART) pada pin TX dan RX (Tetley & Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 2013).

Di samping itu, deteksi stabilitas fisik perahu diukur menggunakan transduser *Inertial Measurement Unit* (IMU) MPU6050. Sensor ini memanfaatkan teknologi *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS) di mana pergeseran mekanis skala mikro di dalam *chip* akibat gaya gravitasi akan mengubah nilai kapasitansi kapasitor internal, yang kemudian dikonversi menjadi data biner dan disalurkan secara sinkron melalui jalur *bus Inter-Integrated Circuit* (I²C) (Wilson, *Sensor Technology Handbook*, 2005). Sementara itu, variabel kebocoran lambung diakuisisi melalui plat elektroda tembaga pada sensor *water level*; ketika molekul air laut bertindak sebagai konduktor penghantar, sirkuit memicu perubahan resistansi yang menghasilkan variasi tegangan analog (*voltage divider*), untuk kemudian diukur secara presisi oleh fitur *Analog-to-Digital Converter* (ADC) 12-bit milik ESP32 (Pallas-Areny & Webster, *Sensors and Signal Conditioning*, 2012). Pada tahap diseminasi dan indikasi keluaran (*output*), arsitektur perangkat keras mengarahkan arus listrik (Ampere) yang dikendalikan oleh pin GPIO menuju aktuator visual dan audio. Indikasi lokal di atas kapal direpresentasikan oleh

pendaran foton pada komponen semikonduktor *Light Emitting Diode* (LED) dan resonansi mekanis dari kristal piezoelektrik *Buzzer*, yang aktif saat transistor internal ESP32 membuka gerbang arus berdasarkan instruksi darurat (Petruszella, *Programmable Logic Controllers*, 2016). Untuk antarmuka visual yang lebih kompleks, sistem memanfaatkan layar kristal cair LCD TFT 2.4 Inchi yang dikendalikan oleh *driver* ILI9341, menampilkan piksel warna berdasarkan pemetaan memori *Graphic RAM* (GRAM) (Ibrahim, *Microcontroller Projects in C for the 8051*, 2014).

Secara fundamental, mata rantai kelistrikan paling kritis dalam perangkat keras keselamatan ini adalah *transceiver* frekuensi radio modulasi LoRa SX1278 (Augustin & Yi, *LoRa and LoRaWAN for IoT*, 2018). Baik layar LCD maupun modul LoRa dihubungkan ke ESP32 melalui antarmuka *Serial Peripheral Interface* (SPI) kecepatan tinggi yang saling berbagi *bus* SPI yang sama, sehingga pengendalian pin *Chip Select* (CS) harus diatur secara bergantian agar tidak terjadi konflik data (Davies, *MSP430 Microcontroller Basics*, 2008).

2.1.2.9 Perangkat Lunak (Software / Firmware)

Sehebat apa pun arsitektur sirkuit kelistrikan dan spesifikasi sensor dirangkai, perangkat keras tersebut akan tetap menjadi benda mati yang inersial tanpa adanya injeksi perangkat lunak tingkat rendah yang disebut *firmware* (Kamal, *Embedded Systems: Architecture, Programming and Design*, 2011). Dalam ekosistem rekayasa elektronika tertanam, *firmware* adalah kumpulan instruksi logika mesin (*machine code*) yang ditulis, dikompilasi, dan "dibakar" (*flashing*) secara permanen ke dalam blok memori *non-volatile* (seperti *Flash Memory*) di dalam silikon mikrokontroler (Noergaard, *Embedded Systems Architecture*, 2012). Pada perancangan *prototype* peringatan dini ini, *firmware* dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman C/C++ melalui lingkungan pengembangan terpadu (IDE) yang secara spesifik dirancang untuk mengatur perilaku *register* perangkat keras ESP32 DevKit V1 (Schwartz, *Internet of Things with ESP8266*, 2016).

Arsitektur perangkat lunak tertanam ini tidak mengeksekusi sistem operasi (*Operating System*) berukuran masif, melainkan mengadopsi struktur algoritma kontrol prosedural yang beroperasi tanpa henti (sebuah putaran *infinite loop*) yang

sangat ketat terhadap penjadwalan dan manajemen memori (RAM) agar tidak terjadi kondisi *memory leak* atau sistem macet (*system hang*) di tengah tugas kritis penyelamatan (Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012; Mazidi et al., *The 8051 Microcontroller and Embedded Systems*, 2014). Struktur eksekusi kelistrikan *firmware* ini dibagi menjadi dua fase utama: fase inisialisasi (*setup*) dan fase operasional (*loop*). Pada saat sumber tegangan listrik pertama kali dialirkan ke papan sirkuit (VCC aktif), *firmware* langsung menjalankan rutinitas inisialisasi di mana ia memberikan instruksi konfigurasi *register* ke setiap pin GPIO; menentukan pin mana yang bertindak sebagai INPUT (membaca arus/tegangan) atau OUTPUT (mengeluarkan tegangan/arus) (Ibrahim, *Microcontroller Projects in C for the 8051*, 2014).

Pada fase krusial ini, perangkat lunak juga melakukan sinkronisasi kecepatan osilator kelistrikan (*Baud Rate*) untuk memastikan bahwa paket data serial dari GPS Neo-M8 dapat dibaca secara sinkron, serta mengonfigurasi pengaturan *register* radio internal LoRa SX1278 seperti *Spreading Factor* (SF) dan *Bandwidth* agar perangkat beroperasi pada pita frekuensi sub-GHz 433 MHz yang tepat (Tetley & Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 2013; Augustin & Yi, *LoRa and LoRaWAN for IoT*, 2018). Kegagalan *firmware* dalam menyelesaikan *handshake* kelistrikan I²C atau SPI pada fase inisialisasi ini akan membuat sistem tertanam mengunci diri (*halt*) sebagai mekanisme perlindungan gagal-aman (*fail-safe*) (Davies, *MSP430 Microcontroller Basics*, 2008).

Setelah perangkat keras berhasil dikalibrasi, *firmware* memasuki siklus pengawasan tanpa akhir. Di dalam putaran operasional ini, algoritma menjalankan metode *polling* berkecepatan tinggi; yaitu menanyakan status tegangan komparator kelistrikan dari sensor *Water Level* melalui konversi ADC, serta mem-*parsing* (memecah dan menganalisis) deretan karakter *string* data mentah NMEA 0183 yang dipancarkan oleh modul GPS menjadi matriks koordinat garis lintang dan garis bujur yang bermakna numerik logis (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015). Inti kecerdasan dari *firmware* ini terletak pada logika percabangan kondisional (algoritma *threshold*); di mana CPU terus membandingkan nilai desimal dari sudut kemiringan perahu dan persentase resistansi air dengan batas ambang kritis yang telah ditetapkan oleh *engineer* (Wilson, *Sensor Technology*

Handbook, 2005). Apabila logika matematis tersebut terpenuhi—atau apabila interupsi asinkron dari sakelar *Push Button* SOS mengubah logika pin menjadi LOW—maka *firmware* segera mengeksekusi rutinitas *handler* darurat (Laplante & Ovaska, *Real-Time Systems Design and Analysis*, 2011).

Pada tahap akhir transmisi ini, perangkat lunak tidak serta merta membuang data biner ke udara, melainkan harus merangkum, memformat, dan mengubah variabel-variabel kelistrikan desimal tersebut menjadi satu kemasan untai karakter (*payload data packet string*) yang ringkas, lalu menyuntikkannya ke dalam antrean *buffer* memori FIFO SPI untuk kemudian dimodulasikan secara paksa oleh sirkuit analog *transceiver* LoRa menuju pos pemantauan keselamatan di tepi daratan (Augustin & Yi, *LoRa and LoRaWAN for IoT*, 2018; Pallas-Areny & Webster, *Sensors and Signal Conditioning*, 2012).

2.1.3 Sistem Elektronika Terintegrasi

Teori sistem elektronika terintegrasi merupakan pilar konseptual kedua yang menjadi landasan utama rancang bangun penelitian ini. Dalam perspektif rekayasa perangkat keras (*hardware engineering*), sistem elektronika terintegrasi dipahami sebagai sebuah arsitektur rangkaian kelistrikan tertutup (*closed-loop circuit*) di mana berbagai macam komponen elektronika aktif (seperti transistor dan *Integrated Circuit*) serta komponen pasif (seperti resistor dan kapasitor) berpadu membentuk satu hierarki sistem fungsional (Kamal, *Embedded Systems: Architecture, Programming and Design*, 2011).

Sistem ini bekerja secara hirarkis dari tahap akuisisi sinyal fisik, pemrosesan logika tegangan, hingga eksekusi daya pada perangkat keluaran. Pada prototype sistem mitigasi keselamatan nelayan, fondasi elektronika terintegrasi ini diwujudkan melalui interaksi lima subsistem utama: sensor, mikrokontroler, aktuator, jalur komunikasi antar modul, dan sistem catu daya (Noergaard, *Embedded Systems Architecture*, 2012).

2.1.3.1 Sensor (Elemen Penginderaan Masukan)

Dalam ekosistem sirkuit elektronika, sensor memegang peranan esensial sebagai perangkat transduser; yaitu komponen yang bertugas mengonversi variasi besaran energi fisik atau kimia dari lingkungan nyata (seperti gravitasi, kinetik, suhu, atau konduktivitas cairan) menjadi besaran sinyal kelistrikan yang

proporsional dan terukur, baik dalam bentuk tegangan analog (*voltage*), arus (*current*), maupun pulsa digital (Wilson, *Sensor Technology Handbook*, 2005). Pada perancangan *prototype* pemantauan kapal nelayan ini, tahap akuisisi data bergantung pada tiga instrumen transduser utama yang bekerja secara simultan di bawah level logika tegangan searah (DC) sebesar 3,3 Volt hingga 5 Volt (Schwartz, *Internet of Things with ESP8266*, 2016). Pertama, sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) MPU6050 digunakan untuk memetakan stabilitas hidrodinamis perahu (Noergaard, *Embedded Systems Architecture*, 2012).

Secara arsitektur elektronika, komponen ini tidak membaca "sudut" secara gaib, melainkan memanfaatkan teknologi sirkuit *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS) terpadu. Di dalam *chip* silikon MPU6050, terdapat struktur massa seismik mikro (*proof mass*) yang ditanggguhkan oleh pegas silikon. Ketika kapal mengalami guncangan atau kemiringan (*roll/pitch*), percepatan gaya gravitasi bumi memaksa massa mekanis tersebut untuk bergeser, yang berakibat pada penyempitan atau pelebaran jarak pelat-pelat kapasitor berukuran mikro di dalamnya (Wilson, *Sensor Technology Handbook*, 2005). Perubahan jarak ini menghasilkan fluktuasi nilai kapasitansi kapasitor, yang kemudian diterjemahkan menjadi sinyal tegangan analog mikro. Tegangan ini langsung dikonversi menjadi data biner oleh unit *Analog-to-Digital Converter* (ADC) 16-bit internal milik MPU6050, sebelum dipompa keluar menuju mikrokontroler melalui *bus* kelistrikan I²C (Wilson, *Sensor Technology Handbook*, 2005; Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012). Kedua, deteksi anomali kebocoran lambung kapal diakuisisi melalui instrumen kelistrikan analog murni, yakni sensor *Water Level* (Pallas-Areny & Webster, *Sensors and Signal Conditioning*, 2012).

Sensor ini beroperasi berdasarkan prinsip dasar hukum Ohm dan konduktivitas ionik fluida. Secara fisik, sensor ini hanya tersusun atas papan *Printed Circuit Board* (PCB) dengan deretan jalur tembaga konduktor yang direntangkan secara paralel dan dibiarkan terbuka (bertindak sebagai sirkuit terbuka/resistor tak terhingga) (Pallas-Areny & Webster, *Sensors and Signal Conditioning*, 2012). Ketika air laut—yang kaya akan ion garam konduktif—menyapu area sensor, cairan tersebut menghubungkan celah antar jalur tembaga, menciptakan resistansi efektif yang menurun seiring naiknya genangan air.

Fenomena ini menciptakan sirkuit pembagi tegangan (*voltage divider*) dinamis. Tegangan keluaran analog (V_{out}) dari sensor berbanding lurus dengan tinggi air, yang kemudian ditangkap oleh pin ADC (resolusi 12-bit) pada ESP32 untuk dipetakan ke dalam angka persentase digital dengan rentang kedalaman 0 hingga 4095 tingkat resolusi voltase (Schwartz, *Internet of Things with ESP8266*, 2016; Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015). Ketiga, modul *Global Positioning System* (GPS) Neo-M8 berperan sebagai sensor gelombang elektromagnetik. Secara kelistrikan, modul ini ditenagai oleh mesin M8 *GNSS Engine* yang dilengkapi dengan arsitektur antena radio frekuensi (RF) impedansi khusus untuk meresonansikan dan menangkap tangkapan gelombang L1 (1575.42 MHz) dari satelit luar angkasa (Tetley & Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 2013).

Sinyal RF analog yang sangat lemah (hingga sensitivitas -167 dBm) tersebut diperkuat oleh sirkuit *Low Noise Amplifier* (LNA) internal, lalu didemodulasi secara elektronik menjadi untaian paket bit digital ASCII standar NMEA 0183 yang dikirim melintasi kawat tembaga pin TX secara asinkron ke mikrokontroler (Tetley & Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 2013). Melalui integrasi ketiga transduser penginderaan kelistrikan inilah, *prototype* kapal nelayan memiliki kesadaran penuh terhadap kondisi географис dan parameter kritis fisiknya (Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012).

2.1.3.2 Mikrokontroler (Unit Kendali Pemrosesan)

Apabila sensor bertindak sebagai sistem saraf tepi yang merasakan stimulus, maka mikrokontroler adalah korteks serebral atau otak sirkuit elektronika yang memegang kendali mutlak atas seluruh aliran proses logika kelistrikan (Kamal, *Embedded Systems: Architecture, Programming and Design*, 2011). Dalam perancangan rekayasa *embedded electronics* ini, sentralisasi pemrosesan dieksekusi oleh mikrokontroler ESP32 DevKit V1 yang ditenagai oleh keping silikon ESP32-WROOM-32 (Schwartz, *Internet of Things with ESP8266*, 2016). Komponen ini bukanlah sekadar *Integrated Circuit* (IC) pasif, melainkan sebuah mikrokomputer arsitektur Harvard bertenaga prosesor Xtensa *Dual-core* 32-bit LX6 yang mampu beroperasi pada kecepatan osilator *clock* hingga 240 MHz (Schwartz, *Internet of Things with ESP8266*, 2016).

Spesifikasi tingkat tinggi ini memungkinkan perangkat keras untuk menelan dan mengeksekusi jutaan instruksi per detik, yang mana sangat vital untuk memelihara tenggat waktu pada sistem peringatan dini *real-time* darurat (Laplante & Ovaska, *Real-Time Systems Design and Analysis*, 2011). Dari kacamata integrasi elektronika, batasan fisis yang paling krusial dalam pendayagunaan mikrokontroler ESP32 ini adalah pada manajemen level tegangan logika operasional (*logic level voltage*). Berbeda dengan generasi mikrokontroler klasik (seperti keluarga AVR Arduino Uno) yang mentoleransi level kelistrikan logika *Transistor-Transistor Logic* (TTL) 5 Volt, port *General Purpose Input/Output* (GPIO) pada ESP32 dirancang secara fundamental untuk beroperasi pada toleransi maksimal 3,3 Volt DC murni (Mazidi et al., *The 8051 Microcontroller and Embedded Systems*, 2014; Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015).

Apabila *engineer* menyuntikkan tegangan antarmuka sebesar 5 Volt dari modul sensor eksternal secara langsung ke dalam matriks pin GPIO ESP32 tanpa melewati sirkuit penurun tegangan (*level shifter* atau rangkaian pembagi resistor), hal tersebut berisiko merusak gerbang silikon transistor internal ESP32 secara permanen (*silicon breakdown*) (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015). Oleh karenanya, rancang bangun kelistrikan sirkuit *transmitter* (pengirim) perahu maupun *receiver* (penerima) darat di dalam skripsi ini diorientasikan secara ketat di sekitar rel tegangan stabil 3,3V; memastikan integritas sinyal digital I²C (untuk MPU6050), SPI (untuk LoRa SX1278 dan LCD TFT), serta UART (untuk GPS Neo-M8) merambat secara sinkron, bebas gangguan derau (*noise*), dan aman secara elektronik (Davies, *MSP430 Microcontroller Basics*, 2008; Noergaard, *Embedded Systems Architecture*, 2012).

Fungsi utama mikrokontroler dalam ekosistem terpadu ini mencakup proses arbitrase dan Unit Aritmetika dan Logika (ALU). ESP32 menerima *input* kelistrikan secara masif dari pin ADC 12-bit (untuk memonitor tegangan bocoran air) dan interupsi *falling-edge* (menurunnya kurva voltase dari HIGH ke LOW secara seketika) dari penekanan sakelar mekanik tombol SOS darurat di pin digitalnya (Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012). Di dalam inti silikonnya, logika algoritma *firmware* menginstruksikan *register* CPU untuk membandingkan nilai desimal ini dengan batas toleransi variabel krisis. Pada saat

kalkulasi matematis komparatif tersebut menyimpulkan terjadinya status bahaya (*Capsize Flood* atau penekanan SOS manual), mikrokontroler seketika mengalihkan rute aliran arus ke pin OUTPUT untuk merangsang aktuator alarm lokal (seperti menjatuhkan transistor penggerak *Buzzer*), sembari mengirimkan rentetan pulsa logika 1 dan 0 dengan ritme memori berkecepatan tinggi melalui pin *Master Out Slave In* (MOSI) menuju otak perangkat radio LoRa agar sinyal darurat segera ditembakkan menuju daratan (Augustin & Yi, *LoRa and LoRaWAN for IoT*, 2018; Ibrahim, *Microcontroller Projects in C for the 8051*, 2014). Integritas pemrosesan sinyal mikrokontroler inilah yang menentukan garis batas antara keselamatan dan fatalitas di laut lepas.

2.1.3.3 Aktuator dan Antarmuka Optoelektronika (Elemen Keluaran)

Dalam sirkuit elektronika terintegrasi, jika sensor dianalogikan sebagai indra perasa, maka aktuator dan *display* berfungsi sebagai instrumen motorik yang menerjemahkan kembali sinyal logika digital dari mikrokontroler menjadi energi mekanis, foton cahaya, atau bentuk energi fisis lainnya yang dapat diinterpretasikan oleh panca indra manusia (Kamal, *Embedded Systems: Architecture, Programming and Design*, 2011). Pada rancang bangun *prototype* ini, komponen keluaran bertugas menyajikan peringatan visual dan audio secara lokal di atas kapal perikanan melalui tiga periferal kelistrikan: LED, *Buzzer*, dan layar LCD TFT (Petruszella, *Programmable Logic Controllers*, 2016).

Pertama, aktuator audio direpresentasikan oleh *Buzzer* piezoelektrik (Petruszella, *Programmable Logic Controllers*, 2016). Komponen ini bekerja berdasarkan prinsip efek piezoelektrik terbalik (*converse piezoelectric effect*). Ketika pin *General Purpose Input/Output* (GPIO) dari mikrokontroler ESP32 DevKit V1 memompakan pulsa gelombang kotak (*square wave*) atau tegangan searah (DC) dengan frekuensi tertentu ke terminal positif *Buzzer*, material kristal keramik di dalamnya mengalami kontraksi dan ekspansi mekanis yang sangat cepat (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015). Getaran membran mekanis inilah yang memampatkan udara di sekitarnya dan menghasilkan perambatan gelombang suara bising sebagai alarm peringatan evakuasi lokal saat status *Capsize Flood* terjadi (Petruszella, *Programmable Logic Controllers*, 2016).

Kedua, *Light Emitting Diode* (LED) digunakan sebagai indikator peringatan visual dasar. Secara elektronika semikonduktor, LED adalah dioda yang akan memancarkan foton cahaya apabila persimpangan P-N (*P-N junction*) di dalamnya diberikan prategangan maju (*forward bias*) dari pin mikrokontroler (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015). Apabila logika instruksi darurat terpenuhi, ESP32 mengalihkan logika pin indikator menjadi HIGH (3,3 Volt), mengalirkan arus menembus resistor pembatas arus menuju anoda LED, menghasilkan kilatan peringatan yang menandakan bahwa transmisi LoRa sedang ditembakkan ke darat (Petruszella, *Programmable Logic Controllers*, 2016). Ketiga, sistem mengadopsi antarmuka optoelektronika matriks aktif melalui layar LCD TFT (*Thin-Film Transistor*) 2.4 Inchi berbasis *Integrated Circuit* (IC) driver ILI9341 (Ibrahim, *Microcontroller Projects in C for the 8051*, 2014).

Secara arsitektural, setiap piksel pada panel ini dikendalikan oleh transistor film tipis silikon yang memanipulasi medan listrik secara mikroskopis. Perubahan medan listrik tersebut memutar orientasi polarisasi molekul kristal cair (LC), yang pada akhirnya menyaring intensitas cahaya dari *backlight* LED warna putih menjadi gradasi warna RGB (Merah, Hijau, Biru) 16-bit dengan kedalaman 65.536 warna (Ibrahim, *Microcontroller Projects in C for the 8051*, 2014). Aliran data instruksi piksel ini dipasok secara konstan oleh memori *Graphic RAM* (GRAM) internal yang menerima suplai data serial dari mikrokontroler, memungkinkan nelayan melihat antarmuka titik koordinat, persentase genangan fluida, dan kalkulasi jarak secara aktual tanpa *delay* (Davies, *MSP430 Microcontroller Basics*, 2008; Ibrahim, *Microcontroller Projects in C for the 8051*, 2014)

2.1.3.4 Komunikasi Antar Modul (Antarmuka Transmisi Data)

Kehebatan arsitektur elektronika terintegrasi sangat ditentukan oleh stabilitas jalur transmisi datanya. Komunikasi antar modul adalah mekanisme kelistrikan tingkat rendah yang memungkinkan mikrokontroler dan berbagai periferal *slave* saling bertukar paket bit (0 dan 1) melalui protokol kabel yang terstandarisasi (Kamal, *Embedded Systems: Architecture, Programming and Design*, 2011). Pada PCB *prototype* ini, aliran elektronika komunikasi dibagi menjadi tiga hierarki *bus* data utama yang dikendalikan murni oleh *controller* ESP32 (Schwartz, *Internet of Things with ESP8266*, 2016). Pertama, protokol

Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART) digunakan untuk menjembatani modul satelit GPS Neo-M8 dengan ESP32 (Tetley & Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 2013).

Sesuai nomenklatur (asinkron), antarmuka ini tidak memiliki jalur kabel detak (*clock* / SCK). Sebagai gantinya, kedua sirkuit diwajibkan menyepakati laju osilator kelistrikan yang identik, yakni 9600 *bits per second* (bps) secara *default* pabrikan. Data mengalir beralih-alihan melalui dua lintasan silang, yakni TX (*Transmitter*) perangkat memompa elektron ke RX (*Receiver*) perangkat lawan, memastikan deret *string* koordinat lintang/bujur tertransfer utuh bit-demi-bit (Schwartz, *Internet of Things with ESP8266*, 2016; Tetley & Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 2013).

Kedua, protokol komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I²C) diadopsi secara spesifik oleh sensor inersia MPU6050 (Wilson, *Sensor Technology Handbook*, 2005). Arsitektur I²C adalah komunikasi serial dua kabel setengah dupleks (*half-duplex*), yang beroperasi melalui rel kelistrikan *open-drain* yang membutuhkan injeksi resistor *pull-up* (menggantung pin ke arah VCC 3,3V). Kabel *Serial Clock* (SCL) bertugas menyinkronkan detak pengiriman bit, sedangkan *Serial Data* (SDA) menjadi jalan raya pertukaran data dua arah. Karena modul MPU6050 memiliki alamat fisik *hardware* spesifik (seperti 0x68), mikrokontroler dapat secara presisi memanggil dan mengakuisisi *register* pembacaan nilai trigonometri tanpa tertukar dengan sinyal perifer lainnya (Davies, *MSP430 Microcontroller Basics*, 2008; Wilson, *Sensor Technology Handbook*, 2005).

Ketiga, antarmuka *Serial Peripheral Interface* (SPI) berkecepatan sangat tinggi diterapkan pada modul *transceiver* radio LoRa SX1278 dan layar LCD TFT ILI9341 (Ibrahim, *Microcontroller Projects in C for the 8051*, 2014; Augustin & Yi, *LoRa and LoRaWAN for IoT*, 2018). Protokol SPI beroperasi secara dupleks penuh (*full-duplex*) berkat adanya tiga jalur kabel utama: *Serial Clock* (SCK) untuk sinkronisasi ketat, *Master Out Slave In* (MOSI) untuk melempar instruksi dari otak ESP32 ke modul, dan *Master In Slave Out* (MISO) untuk arah sebaliknya. Karena sistem ini menggunakan arsitektur *shared bus*—di mana modul LoRa dan LCD TFT dipasang menempel pada jalur MOSI, MISO, dan SCK yang persis sama—ESP32 harus bermanuver mengendalikan sirkuit *multiplexing* internalnya melalui

pin kelistrikan *Chip Select* (CS) atau *Network Slave Select* (NSS). Saat ESP32 ingin memperbarui warna layar, pin CS untuk LCD akan diubah menjadi LOW sembari menahan pin NSS LoRa tetap HIGH (mode mengambang/*high-impedance*). Proses isolasi aliran data ini memastikan paket komunikasi radio dan perintah *render* grafis tidak saling menabrak dan memicu *corrupt data* di atas lintasan tembaga (Davies, *MSP430 Microcontroller Basics*, 2008; Ibrahim, *Microcontroller Projects in C for the 8051*, 2014; Augustin & Yi, *LoRa and LoRaWAN for IoT*, 2018).

2.1.3.5 Sistem Catu Daya (Pengondisian dan Regulasi Kelistrikan)

Subsistem elektronika terintegrasi tidak akan bermakna tanpa kehadiran tulang punggung vital berupa jaringan distribusi catu daya (*power supply*). Sistem catu daya bertanggung jawab memanen energi tegangan searah (DC) dari sel kimiawi baterai, kemudian meregulasi dan menstabilkan kurva kelistrikannya agar instrumen semikonduktor di dalam rangkaian tidak mengalami kerusakan akibat lonjakan maupun pemadaman parsial tegangan jatuh (*voltage drop*) (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015). Sirkuit *prototype* ini menghadapi tantangan serius berkenaan dengan manajemen arus beban (Ampere). Modul transmisi frekuensi radio LoRa SX1278 memiliki karakteristik *Current Draw* yang sangat tidak beraturan; saat modul berdiam diri (*idle* atau *listening*) ia hanya menyerap arus kecil, namun pada milidetik ketika IC Semtech memodulasikan gelombang *chirp* ke udara pada daya pemancaran puncak +20 dBm (100 mW), sirkuit radio akan tiba-tiba menyedot asupan lonjakan arus ekstrem secara sekejap hingga batas ± 120 mA (Augustin & Yi, *LoRa and LoRaWAN for IoT*, 2018).

Lonjakan tak terduga (*current spike*) inilah yang sering kali menarik turun tegangan bus utama sistem secara drastis (*sag*), yang dapat memicu fitur proteksi *Brown-Out Detector* (BOD) internal mikrokontroler ESP32 memutus program dan melakukan *hard-reset* tanpa disengaja di tengah keadaan gawat darurat (Schwartz, *Internet of Things with ESP8266*, 2016). Untuk mengisolasi masalah catu daya tersebut, perancangan sirkuit kelistrikan *hardware* mengimplementasikan modul *Voltage Regulator* bertipe *Step-Down* (seperti LM2596 atau *Low-Dropout Regulator*/LDO yang ekuivalen). Modul ini bekerja merampingkan fluktuasi *input* mentah baterai Lithium (yang umumnya bergerak dari 4,2 V penuh hingga 3,0 V

kosong) menjadi rel daya VCC 3,3 Volt atau 5 Volt yang amat konstan, riak minim (*low-ripple*), dan mulus (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015).

Stabilitas rel catu daya yang bersih dari gangguan derau frekuensi (*noise decoupling*) ini memiliki dampak langsung pada keakuratan sistem konversi *Analog-to-Digital Converter* (ADC) milik ESP32. Mengingat sensor genangan air (*Water Level*) bergantung pada referensi pembagian tegangan linier yang ketat, sedikit saja kebisingan elektromagnetik pada pasokan arus listrik dapat menyebabkan sensor secara keliru membaca persentase ambang kedaruratan, sehingga merusak fondasi keandalan mitigasi alarm *Capsize Flood* itu sendiri (Pallas-Areny & Webster, *Sensors and Signal Conditioning*, 2012; Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015). Oleh karenanya, integritas pengondisian catu daya baterai DC ini adalah prasyarat mutlak sebelum elemen *embedded system* di perahu nelayan dapat dioperasikan secara paripurna.

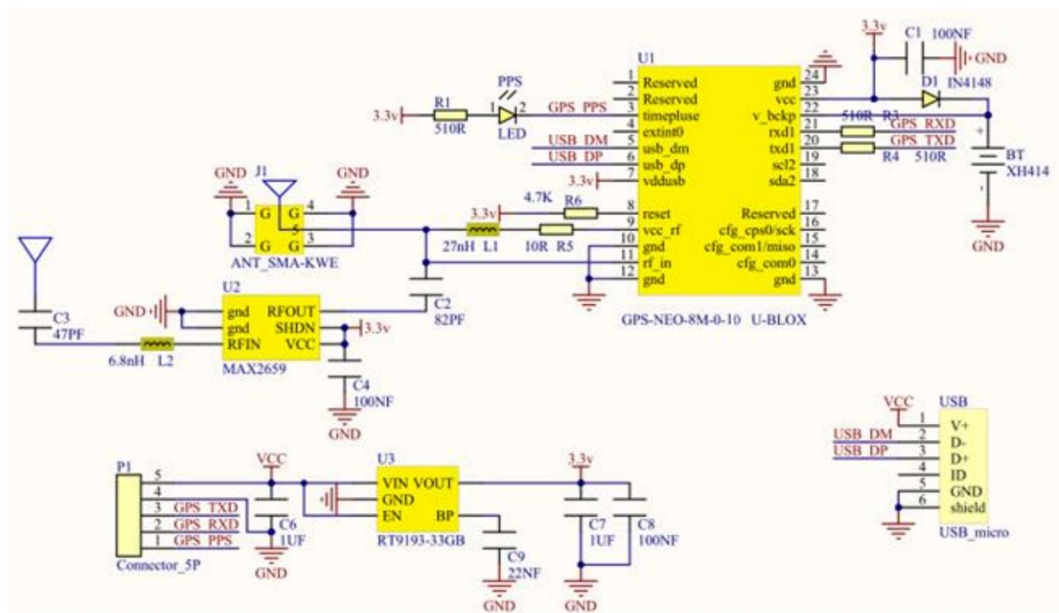
2.1.3 Sistem Penentuan Posisi GPS (*Global Positioning System*)

Dalam arsitektur *embedded electronics* pada *prototype* keselamatan maritim ini, subsistem penentuan posisi tidak bertindak sebagai elemen pemancar, melainkan secara eksklusif berfungsi sebagai transduser penerima (*receiver*) gelombang elektromagnetik. Subsistem ini bertanggung jawab untuk mengekstraksi dan mengalkulasi kedudukan spasial absolut perahu nelayan di atas permukaan bumi, untuk kemudian diumpankan sebagai matriks data kelistrikan ke dalam mikrokontroler utama (Tetley & Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 2013).

2.1.3.1 Arsitektur Komponen dan Prinsip Kerja Kelistrikan RF

Dari sudut pandang rekayasa instrumentasi radio frekuensi (RF), sistem GPS bekerja berdasarkan prinsip matematis trilaterasi ruang yang dieksekusi melalui perhitungan waktu tempuh gelombang mikro (*microwave*). Jantung kelistrikan modul Neo-M8 ditenagai oleh u-blox M8 *concurrent GNSS engine* yang dibekali arsitektur komputasi 72-kanal (*72-channel*). Modul ini mengandalkan antena keramik aktif (*Patch Antenna*) yang dirancang dengan impedansi khusus agar beresonansi tepat pada pita frekuensi UHF (spektrum L1 di 1575,42 MHz). Sinyal analog yang amat lemah dari satelit menginduksi antena, lalu masuk ke sirkuit *Low Noise Amplifier* (LNA) di dalam modul untuk diperkuat tegangannya

tanpa memperbesar derau elektronik (*noise*). Setelah diperkuat, sinyal didemodulasi oleh *Analog-to-Digital Converter* (ADC) berkecepatan tinggi menjadi biner. Cip kemudian menghitung presisi selisih mili-detik waktu tempuh gelombang (*Time of Arrival*) untuk mendapatkan jarak absolut kelistrikan (*pseudorange*) (Kaplan & Hegarty, *Understanding GPS: Principles and Applications*, 2017; Tetley & Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 2013). Tata letak jalur kelistrikan, sirkuit proteksi catu daya, dan interkoneksi pin antarmuka modul GPS Neo-M8 secara rinci ditunjukkan pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2. 1 Skematik rangkaian Modul GPS Neo-8M

2.1.3.2 Parameter Akurasi dan Sensitivitas Gelombang

Akurasi merupakan tingkat toleransi galat (*error*) elektronis antara kalkulasi titik koordinat yang diproses oleh chip silikon terhadap posisi fisik sesungguhnya di permukaan laut, yang diukur menggunakan metrik *Circular Error Probable* (CEP). Degradasi akurasi maritim sering diakibatkan oleh rasio *Signal-to-Noise* (SNR) yang melemah saat cuaca mendung tebal atau efek pantulan *multipath* gelombang radio oleh riak air laut (Tetley & Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 2013).

Untuk menekan laju galat ini, cip u-blox M8 dirancang dengan angka sensitivitas pelacakan kelistrikan yang luar biasa agresif, mampu mendeteksi atenuasi sinyal hingga batas minimum -167 dBm serta memiliki kapabilitas mengunci pita multikonstelasi secara paralel (seperti GPS L1C/A, GLONASS

L10F, dan Galileo) secara serentak. Kualitas desain isolasi kelistrikan (GND dan perisai RF) pada papan PCB sangat menentukan keandalan alat dalam mempertahankan koordinat yang presisi (Kaplan & Hegarty, *Understanding GPS: Principles and Applications*, 2017; Tetley & Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 2013).

2.1.3.3 Manajemen Daya Cadangan dan Time to First Fix (TTFF)

Agar sirkuit prosesor di dalam modul dapat memecahkan persamaan linear komputasi matriks empat dimensi (X, Y, Z, dan Waktu), subsistem antenna minimal harus berhasil mengunci fase pita frekuensi (*phase-lock loop*) dari setidaknya empat satelit berbeda. Durasi yang dibutuhkan sirkuit elektronika untuk mengunci gelombang dari kondisi dingin dikenal sebagai parameter TTFF (*Time to First Fix*) (Kaplan & Hegarty, *Understanding GPS: Principles and Applications*, 2017). Untuk mempercepat proses ini, modul Neo-M8 mempertahankan keberadaan EEPROM dan baterai kancing (*button cell*) sebagai catu daya cadangan (*backup battery*) bagi sirkuit *Real-time Clock* (RTC) dan RAM internal. Baterai ini menjamin modul dapat melakukan inisialisasi tangkapan satelit secara kilat (*Hot Start* dalam waktu ~ 1 detik) tanpa harus mengunduh ulang matriks data *ephemeris* (posisi orbit satelit) dari awal apabila rel catu daya utama diputus (Tetley & Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 2013).

2.1.3.4 Antarmuka Komunikasi UART dan Protokol NMEA

Hasil akhir dari seluruh komputasi trigonometri ruang yang rumit di dalam cip GPS tidak disalurkan dalam bentuk sinyal analog, melainkan diekstrak menjadi paket data serial digital asinkron (Noergaard, *Embedded Systems Architecture*, 2012). Transmisi data dari Neo-M8 disalurkan melalui antarmuka *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (UART) berstandar kelistrikan TTL (*Transistor-Transistor Logic*) melalui pin TX dan RX. Secara konfigurasi bawaan (*default*), osilator memompa rentetan bit digital pada kecepatan 9600 *baud rate*. Data biner ini dikemas dalam format protokol karakter ASCII kelautan berstandar NMEA 0183 (seperti kalimat \$GNRMC dan \$GNGGA). Rentetan data ini memuat variabel spasial *Latitude* (sumbu Y) dan *Longitude* (sumbu X), yang kemudian di-*parsing* oleh *firmware* ESP32 menjadi struktur tipe data *floating-point* desimal presisi tinggi guna diinjeksikan ke dalam transmisi radio LoRa (Tetley & Calcutt,

Electronic Navigation Systems, 2013; Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012).

2.1.3.5 Tegangan Kerja dan Regulasi Konsumsi Daya

Secara arsitektur silikon, chip inti u-blox M8 merupakan komponen berdaya sangat rendah yang bekerja murni pada rel tegangan 2,7V hingga 3,6V DC (Tetley & Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 2013). Akan tetapi, papan sirkuit *breakout* komersial yang digunakan pada *prototype* ini telah terintegrasi dengan komponen tambahan berupa *Low-Dropout Regulator* (LDO). Sirkuit regulator ini mengizinkan pin masukan (VCC) modul untuk diumpankan tegangan dari 3,3 Volt hingga 5 Volt DC secara aman tanpa memicu *silicon breakdown* pada struktur gerbang logika internalnya (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015). Dari segi disipasi beban, arsitektur M8 ini tergolong sangat efisien; sirkuit hanya menarik arus operasional dinamis di kisaran 21 mA hingga 35 mA pada saat fase pelacakan satelit secara kontinu (*continuous tracking*), menjadikannya kompatibel secara daya untuk disandingkan bersama ESP32 menggunakan suplai baterai (Wilson, *Sensor Technology Handbook*, 2005).

2.1.3.6 Garis Lintang dan Garis Bujur

Sistem penentuan posisi global (*Global Positioning System*) menyajikan data lokasi spasial di permukaan bumi menggunakan model Sistem Koordinat Geografis (*Geographic Coordinate System* / GCS) berbasis datum *World Geodetic System 1984* (WGS 84) (Kaplan & Hegarty, *Understanding GPS: Principles and Applications*, 2017). Sistem koordinat angular ini memetakan posisi absolut kapal nelayan ke dalam dua parameter sumbu bola bumi, yaitu garis lintang (*latitude*) dan garis bujur (*longitude*) (Tetley & Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 2013):

- Garis Lintang (*Latitude* / Φ): Merupakan garis khayal horizontal yang mengukur jarak sudut suatu titik ke arah utara (*North*) atau selatan (*South*) relatif terhadap garis ekuator (khatulistiwa) sebagai titik nol derajat (0°). Garis lintang memiliki rentang nilai mulai dari 0° di ekuator hingga $+90^\circ$ (90° LU) di Kutub Utara, dan -90° (90° LS) di Kutub Selatan. Pada modul GPS Neo-M8, koordinat di belahan bumi selatan (seperti wilayah perairan Indonesia bagian selatan khatulistiwa) dikonversi oleh firmware menjadi nilai bertanda negatif (misalnya: -6.3458°).

- Garis Bujur (*Longitude* / λ): Merupakan garis meridian vertikal yang mengukur jarak sudut ke arah timur (*East*) atau barat (*West*) relatif terhadap *Prime Meridian* (meridian nol derajat) yang melintasi Greenwich, Inggris. Rentang nilai garis bujur bergerak dari 0° hingga +180° Bujur Timur (BT) dan 0° hingga -180° Bujur Barat (BB). Karena wilayah perairan Indonesia berada di belahan bumi timur terhadap meridian Greenwich, nilai bujur yang diekstraksi modul selalu bertanda positif (misalnya: 07.1185°).

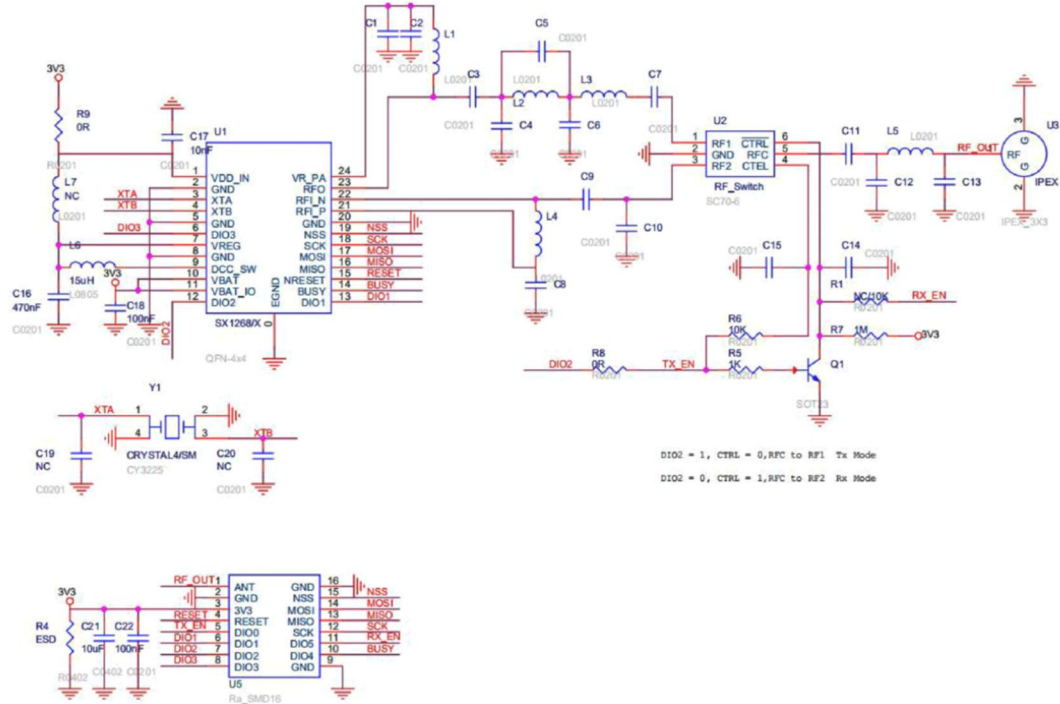
2.1.4 Modul Komunikasi Radio LoRa (*Long Range*)

Dalam arsitektur *embedded system* keselamatan maritim yang dirancang, ketergantungan terhadap jaringan seluler komersial (GSM) dihilangkan dengan mengadopsi modul komunikasi frekuensi radio (RF) mandiri. Dari kacamata rekayasa kelistrikan dan instrumentasi, modul LoRa tidak dipandang sebagai sebuah jaringan internet, melainkan sebagai periferal sirkuit *transceiver* semidupleks (*half-duplex*) analog-digital yang bertugas mengubah paket data biner dari mikrokontroler menjadi rambatan gelombang elektromagnetik ke udara (Augustin & Yi, *LoRa and LoRaWAN for IoT*, 2018). Pembahasan subsistem elektronik ini diuraikan ke dalam lima parameter perangkat keras sebagai berikut:

2.1.4.1 Arsitektur Komponen dan Spesifikasi Frekuensi Modulasi

Inti penggerak kelistrikan dari modul LoRa yang digunakan pada penelitian ini adalah *Integrated Circuit* (IC) Semtech SX1278 yang dikemas dalam bentuk modul *breakout* Ra-02 (Semtech Corporation, *SX1276/77/78/79 Datasheet*, 2020). Cip silikon ini dirancang khusus untuk beresonansi pada spektrum pita frekuensi *Industrial, Scientific, and Medical* (ISM) berlisensi bebas di bawah 1 GHz (*Sub-GHz*). Pada perancangan sirkuit ini, osilator dikonfigurasi menggunakan kristal eksternal untuk memancarkan sinyal pembawa pada panjang gelombang terpusat 433 MHz. Kekuatan penetrasi spektrum frekuensi rendah ini mengungguli sinyal mikro 2,4 GHz, sehingga lebih andal melewati rintangan partikel air laut. Secara elektronika mikro, IC SX1278 mengimplementasikan teknik modulasi kepemilikan *Chirp Spread Spectrum* (CSS), di mana sirkuit internal akan menyapu frekuensi secara linier (menciptakan *up-chirp* atau *down-chirp* analog) untuk merepresentasikan bit digital 1 dan 0. Hal ini memungkinkan sinyal memecah gangguan derau radio maritim secara tangguh melalui konfigurasi *Spreading*

Factor (SF) yang dapat diatur dari level 6 hingga 12 (Augustin & Yi, *LoRa and LoRaWAN for IoT*, 2018; Tetley & Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 2013). Struktur kelistrikan internal, sirkuit penguat daya (*Power Amplifier*), dan pemetaan pin modul transceiver ini diilustrasikan pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2. 2 Skematik Rangkaian Modul Lora SX1278

2.1.4.2 Antarmuka Komunikasi Serial Peripheral Interface (SPI)

Untuk menjembatani aliran data antara memori cip SX1278 dengan unit CPU pada ESP32, modul ini tidak menggunakan komunikasi asinkron yang lambat, melainkan mengadopsi protokol antarmuka kelistrikan *Serial Peripheral Interface* (SPI) berkecepatan tinggi yang mampu disinkronisasikan hingga detak maksimum 10 MHz (Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012). Sinkronisasi pertukaran elektron dilakukan melintasi empat kawat sirkuit utama: *Serial Clock* (SCK) sebagai penyedia detak irama, *Master Out Slave In* (MOSI) untuk menyuntikkan instruksi, *Master In Slave Out* (MISO) untuk membaca balasan *register*, dan *Network Slave Select* (NSS) yang diturunkan ke logika LOW untuk membangunkan modul dari status impedansi tingginya (*High-Z*). Di luar jalur *bus* SPI, modul ini menyediakan pin interupsi perangkat keras esensial DIO0 (*Digital Input Output 0*). Pin ini akan melonjak ke logika tegangan HIGH secara independen untuk memberi tahu CPU mikrokontroler bahwa paket data dari udara telah sukses

direkonstruksi di dalam *buffer*, atau transmisi radiasi telah selesai dilakukan (Semtech Corporation, *SX1276/77/78/79 Datasheet*, 2020; Noergaard, *Embedded Systems Architecture*, 2012).

2.1.4.3 Tegangan Kerja dan Regulasi Konsumsi Daya

Aspek paling menantang dalam integrasi modul RF pada sirkuit elektronika adalah manajemen beban daya. IC SX1278 dirancang dengan toleransi tegangan kerja (*Operating Voltage*) pada level logika 1,8 Volt hingga maksimal 3,7 Volt DC. Modul ini kompatibel untuk digabungkan secara langsung ke rel VCC 3,3 Volt milik ESP32 tanpa komponen *level converter* tambahan (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015). Karakteristik penarikan arus sirkuit ini sangat fluktuatif. Pada saat modul berada dalam mode tidur (*Deep Sleep*), ia hanya menyerap arus statis sekitar 0,2 μ A. Namun, ketika transistor pada pin PA_BOOST (*Power Amplifier*) diaktifkan untuk memancarkan sinyal emisi darurat maksimal sebesar +20 dBm (100 mW), sirkuit tiba-tiba akan menyedot arus beban ekstrem seketika (*current spike*) hingga mencapai ± 120 mA (Semtech Corporation, *SX1276/77/78/79 Datasheet*, 2020). Lonjakan transien inilah yang mewajibkan rancangan perangkat keras *prototype* dilengkapi dengan sirkuit *filter* kapasitor atau regulator baterai yang tangguh, guna mencegah kejatuhan tegangan silang (*voltage sag*) yang dapat *reset* sistem komputasi (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015; Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012).

2.1.4.4 Proses Eksekusi Pengiriman Data (Transmisi / TX)

Secara kelistrikan tingkat sirkuit, rangkaian transmisi bermula ketika memori ESP32 menembakkan pulsa data matriks melalui jalur SPI MOSI untuk mengisi *buffer register* memori statis (FIFO - *First In First Out*) berkapasitas 256 byte yang ada di dalam cip SX1278 (Semtech Corporation, *SX1276/77/78/79 Datasheet*, 2020). Setelah antrean data kelistrikan masuk, mikrokontroler mengirimkan instruksi kode heksadesimal untuk mengalihkan mode IC ke status *Transmit* (TX). Sirkuit *synthesizer* analog di dalam modul kemudian memodulasikan untaian biner tersebut menjadi sinyal RF analog, memperkuat amplitudonya, lalu meradiasikannya melalui elemen fisik antenna ke udara bebas (Augustin & Yi, *LoRa and LoRaWAN for IoT*, 2018). Begitu paket data terakhir selesai dipancarkan, sirkuit memicu interupsi DIO0 menjadi HIGH sebagai

notifikasi fisik kepada ESP32 bahwa sirkuit radio telah selesai bekerja (Noergaard, *Embedded Systems Architecture*, 2012).

2.1.4.5 Proses Penerimaan Data (Resepsi / RX)

Di sisi pos penjaga pantai daratan, modul SX1278 pada *gateway* dioperasikan dalam mode kelistrikan *Continuous Receive* (RX). Sirkuit antenna pasif secara konstan menangkap jejak rambatan medan elektromagnetik yang amat lemah dari perahu (hingga sensitivitas sirkuit menyentuh -148 dBm) (Semtech Corporation, *SX1276/77/78/79 Datasheet*, 2020). Sinyal mikroskopis analog ini disalurkan ke blok *Low Noise Amplifier* (LNA) di dalam cip untuk melipatgandakan level tegangannya. Modulator perangkat keras kemudian memecah gelombang *chirp* dan merekonstruksi kembali bit biner digitalnya ke dalam *register* FIFO (Augustin & Yi, *LoRa and LoRaWAN for IoT*, 2018; Tetley & Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 2013). Setelah integritas paket divalidasi (*Cyclic Redundancy Check* / CRC lolos), cip mengubah logika pin interupsi DIO0 menjadi HIGH, memberikan kejutan kelistrikan kepada CPU ESP32 *gateway* untuk menarik bongkahan data tersebut melintasi jalur SPI MISO dan dirakit menjadi informasi *dashboard* (Semtech Corporation, *SX1276/77/78/79 Datasheet*, 2020; Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012).

2.1.4.6 Antena Gelombang Radio (LoRa Antenna)

Dalam disiplin instrumentasi frekuensi radio (RF), antenna bukanlah sekadar konduktor pasif, melainkan sebuah transduser kelistrikan yang mengonversi arus bolak-balik (AC) berfrekuensi tinggi dari modul pemancar (TX) menjadi gelombang elektromagnetik di ruang bebas, dan sebaliknya pada modul penerima (RX) (Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2015). Pada modul LoRa SX1278, spesifikasi antenna yang dipasangkan harus disetel (*tuned*) secara presisi agar beresonansi pada rentang frekuensi kerja osilator, yakni pita 433 MHz.

- Impedansi dan *Standing Wave Ratio*:

Antena yang digunakan wajib memiliki karakteristik impedansi kelistrikan sebesar 50 Ohm untuk menyamai impedansi *output* dari sirkuit penguat daya (*Power Amplifier*) pada *chip* SX1278. Kesesuaian (*matching*) impedansi ini sangat krusial guna meminimalkan nilai *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR). Pantulan daya kelistrikan kembali ke modul akibat

ketidaksesuaian impedansi tidak hanya akan memangkas jarak jangkauan transmisi secara drastis, tetapi juga berpotensi memicu kerusakan termal pada gerbang transistor *chip* radio (Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 2015; Semtech Corporation, SX1276/77/78/79 Datasheet, 2020).

- Pola Radiasi:

Umumnya, *prototype* pemantauan kapal nelayan mengaplikasikan antenna bertipe *omni-directional* (seperti antenna *whip* atau *helical* PCB). Antena jenis ini meradiasikan energi kelistrikan secara merata ke segala arah secara horizontal (360 derajat). Hal ini menjamin bahwa fluktuasi kemiringan perahu yang dinamis di atas ombak laut tidak akan menyebabkan putusnya tautan sinyal anggaran radio (*Link Budget*) dengan stasiun *gateway* pemosisi di daratan (Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 2015; Tetley & Calcutt, Electronic Navigation Systems, 2013).

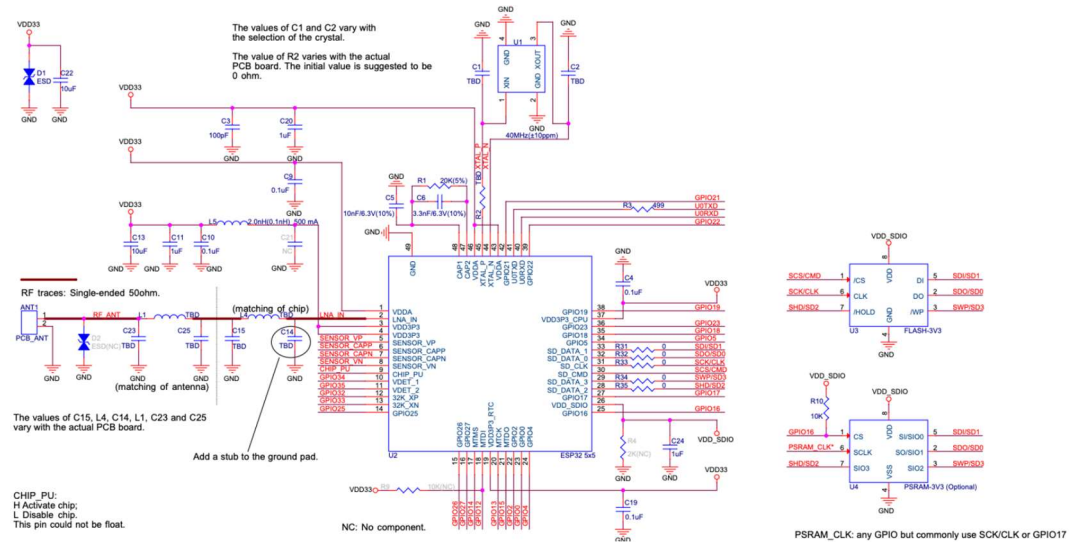
2.1.5 Sistem Mikrokontroler Pengendali Utama

Dalam arsitektur *embedded system* kelautan yang dirancang, ESP32 DevKit V1 bertindak sebagai otak komputasi (Unit Pemroses Sentral) tunggal yang memegang kendali mutlak atas seluruh akuisisi sensor dan orkestrasi sirkuit komunikasi. Sebagai pusat *Controller* utama (*Master Device*), spesifikasi perangkat keras papan pengembangan ini menjadi cetak biru (*blueprint*) pengondisian seluruh alur sinyal elektronik. Berdasarkan disiplin ilmu rekayasa mikroelektronika, fungsionalitas ESP32 ini diuraikan ke dalam beberapa parameter teknis kelistrikan berikut:

2.1.5.1 Arsitektur Mikrokontroler

Dari segi fondasi arsitektur silikon, *board* pengembangan ESP32 DevKit V1 ditenagai oleh modul inti ESP32-WROOM-32 yang dikonstruksikan di atas arsitektur Harvard termodifikasi (Espressif Systems, 2023). Arsitektur ini memisahkan jalur bus memori instruksi program dan jalur bus memori data secara fisik, memungkinkan prosesor mengambil kode dan membaca memori secara serentak dalam satu siklus *clock* kelistrikan (Horowitz & Hill, 2015). Mikrokontroler ini dipersenjatai dengan prosesor Xtensa *Dual-core* 32-bit LX6 mikroprosesor, yang mengartikan bahwa ia memiliki dua inti independen (Core 0 dan Core 1) untuk menjalankan pemrosesan paralel sejati (Noergaard, Embedded

Systems Architecture, 2012). Konfigurasi skematik modul inti beserta distribusi jalur bus input/output (GPIO) internal ESP32 ditampilkan pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2. 3 Skematik Rangkaian Modul ESP32 (Sirkuit Inti Internal pada ESP32 DevKit V1)

Arsitektur multikore ini memberikan keuntungan krusial pada sistem real-time; di mana Core 0 dapat didedikasikan murni untuk menangani interrupt kelistrikan dan mengendalikan pemancaran sinyal SPI ke modul radio LoRa, sementara Core 1 secara simultan dan tanpa hambatan menjalankan rutinitas latar belakang seperti menelan untaian data koordinat satelit dan membaca ADC (Valvano, Embedded Systems: Real-Time Interfacing, 2012). Ruang arsitektur ini didukung oleh Static Random-Access Memory (SRAM) internal sebesar 520 KB dan kapasitas Flash Memory eksternal sebesar 4 MB untuk menanamkan kode firmware secara permanen (Noergaard, Embedded Systems Architecture, 2012).

2.1.5.2 Kemampuan Pengolahan Data

Kehebatan arsitektur ESP32 tercermin pada kemampuan osilasi detak komputasinya (*clock speed*) yang dapat dipacu secara dinamis mulai dari 80 MHz hingga titik puncak 240 MHz (Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet*, 2022). Kecepatan tinggi ini disokong oleh unit komputasi *Floating-Point Unit* (FPU) internal yang memungkinkan mikrokontroler mengeksekusi kalkulasi bilangan pecahan desimal dengan presisi tinggi di level perangkat keras. Hal ini menjadi landasan mutlak bagi *prototype* nelayan, mengingat mikrokontroler diharuskan memproses algoritma trigonometri vektor kompleks untuk menerjemahkan data

raw akselerometer MPU6050 menjadi angka derajat kemiringan (*roll/pitch*) secara seketika (InvenSense, *MPU-6050 Register Map and Descriptions*, 2013). Selain itu, konversi sinyal tegangan analog dari elektroda *Water Level* dikelola oleh periferal *Analog-to-Digital Converter* (ADC) dengan resolusi tingkat tinggi 12-bit (4096 tingkat *step* tegangan), menghasilkan detail akuisisi kebocoran air yang sangat mulus dan presisi tanpa membebani kalkulasi memori CPU (Espressif Systems, *ESP32 Technical Reference Manual*, 2023).

2.1.5.3 Arsitektur Pinout dan GPIO (General Purpose Input/Output)

Papan DevKit V1 umumnya memiliki arsitektur fisik berupa deretan 30 pin atau 36 pin konektor tembaga *header*. Interaksi kelistrikan antara ESP32 dengan dunia luar diatur melalui gerbang antarmuka GPIO ini. Fitur paling superior dari arsitektur *pinout* kelistrikan ESP32 dibandingkan keluarga mikrokontroler 8-bit klasik adalah sistem matriks internal gerbang silikonnya (*GPIO Multiplexing*). Hampir setiap pin digital pada ESP32 DevKit dapat dialihkan fungsi kelistrikannya melalui kode *firmware* menjadi saluran ADC, pin PWM (*Pulse Width Modulation*), hingga jalur *bus* I²C (Espressif Systems, *ESP32 Technical Reference Manual*, 2023). Parameter kelistrikan yang paling mendasar adalah bahwa seluruh logika transistor GPIO pada ESP32 beroperasi mutlak di bawah rezim tegangan maksimum 3,3 Volt DC murni (*Non-5V Tolerant*). Paparan tegangan di atas 3,6 Volt dari periferal eksternal pada pin masukan digital akan menyebabkan kerusakan mikroskopis permanen pada struktur *gate* oksida transistor di dalam *chip* (dikenal sebagai *silicon breakdown*) (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015).

2.1.5.4 Spesifikasi Perangkat Keras dan Antarmuka UART

Protokol *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (UART) merupakan komponen keras (*hardware block*) di dalam ESP32 yang mendalangi pertukaran sinyal serial asinkron tingkat rendah. Secara fisik, di dalam inti silikon (SoC) ESP32 terdapat tiga blok sirkuit UART keras yang independen: UART0, UART1, dan UART2 (Espressif Systems, *ESP32 Technical Reference Manual*, 2023). UART0 umumnya secara terpatri telah dialokasikan oleh pabrikan untuk berkomunikasi dengan *chip* konverter antarmuka *USB-to-TTL* (seperti sirkuit CP2102) pada papan DevKit, guna keperluan *flashing firmware* dan *debugging*. Pada perancangan sistem peringatan dini ini, sistem menggunakan blok perangkat

keras UART2 secara otonom untuk memdemodulasi sinyal keluaran dari modul *receiver* satelit GPS Neo-M8. Pin transmitter (TX) dan *receiver* (RX) diarahkan secara fleksibel melalui *multiplexer* untuk mengakuisisi transmisi dengan kesepakatan *Baud Rate* statis sebesar 9600 bps, memastikan untaian kalimat geospasial ASCII standar NMEA ditransmisikan menembus sirkuit tembaga secara utuh (u-blox, *NEO-M8 Receiver Description Including Protocol Specification*, 2021).

2.1.5.5 Spesifikasi Perangkat Keras dan Antarmuka SPI

Untuk memfasilitasi kebutuhan transmisi matriks bit dengan rasio kecepatan sangat tinggi, ESP32 mengandalkan periferan kelistrikan *Serial Peripheral Interface* (SPI). SPI adalah protokol *bus* berkecepatan *broadband* yang beroperasi secara dupleks penuh (*full-duplex*) tersinkronisasi. Sirkuit ESP32 DevKit dipersenjatakan dengan beberapa blok pengontrol SPI internal, di mana perangkat yang dapat diakses oleh pengguna dikenal sebagai blok VSPI dan HSPI (Espressif Systems, *ESP32 Technical Reference Manual*, 2023). Pin *default* untuk VSPI terletak pada lintasan GPIO 18 (SCK), GPIO 19 (MISO), GPIO 23 (MOSI), dan GPIO 5 (CS). Pada arsitektur perangkat keras penelitian ini, pin VSPI milik ESP32 diposisikan sebagai unit *Master* pengontrol, sementara modul radio LoRa SX1278 diposisikan sebagai perangkat *Slave* paralel. Guna mencegah benturan logika tegangan (*data collision*) di atas rel sirkuit PCB, ESP32 dengan sigap menahan sirkuit menggunakan intervensi aktif kelistrikan melalui pin *Chip Select* (CS), untuk menyaring perangkat mana yang berhak melayani komunikasi pada pecahan milidetik tertentu (Semtech Corporation, *SX1276/77/78/79 Datasheet*, 2020).

2.1.5.6 Konsumsi Daya Kelistrikan

Manajemen daya adalah fitur penentu batas keandalan *chip* silikon ini. ESP32 dipabrikasi menggunakan proses teknologi *ultra-low-power* yang memungkinkan arsitekturnya bekerja pada tegangan operasional dasar 2,7 V hingga 3,6 V DC (Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet*, 2022). Dari sisi penarikan beban kelistrikan (arus Ampere), modul mikrokontroler ini sangat reaktif terhadap beban fitur internal yang diaktifkan. Saat melakukan komunikasi nirkabel, konsumsi sirkuit ESP32 dapat melonjak mencapai lebih dari 200 mA (Espressif

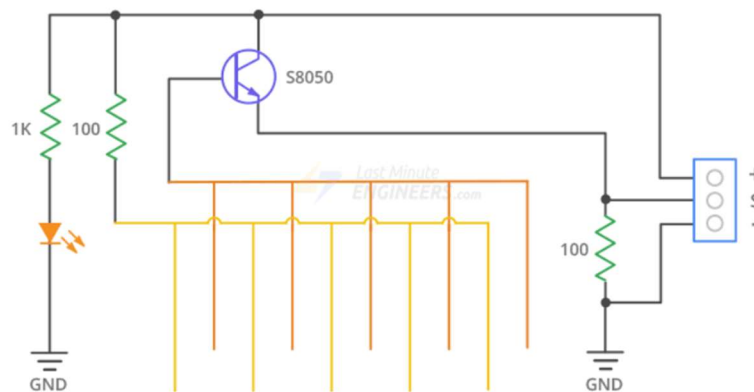
Systems, *ESP32 Series Datasheet*, 2022). Namun, mikrokontroler ini menawarkan regulasi efisiensi internal melalui arsitektur subsistem *Ultra-Low Power (ULP) Coprocessor*, yang memungkinkan komponen *hardware* untuk membekukan pasokan listrik utama dan mematikan unit CPU (mode *Deep Sleep*). Pengaturan disipasi arus ini krusial untuk menjamin sisa cadangan kapasitas voltase baterai litium perahu nelayan tidak terkuras sia-sia selama kondisi kelautan sedang normal (Raza et al., *Low Power Wide Area Networks: An Overview*, 2017).

2.1.6 Sistem Deteksi Kebocoran Air

Dalam arsitektur *embedded electronics* pada *prototype* keselamatan maritim ini, subsistem deteksi intrusi air tidak menggunakan sakelar pelampung mekanis, melainkan mengimplementasikan sensor semikonduktor berbasis konduktivitas ionik. Perangkat keras yang diimplementasikan adalah modul sensor ketinggian air analog standar berarsitektur pelat resistif. Komponen pasif ini memanipulasi parameter fisis berupa volume air laut menjadi sinyal tegangan analog murni yang dapat diukur secara presisi.

2.1.6.1 Arsitektur Fisik Matriks dan Prinsip Transduksi Elektrolit

Berbeda dengan sirkuit terpadu (IC) yang terenkapsulasi, arsitektur sensor *water level* dibiarkan terekspos secara fisik. Modul ini dibangun di atas substrat *Printed Circuit Board (PCB)* berbahan *fiberglass FR4*. Di atas permukaannya dicetak serangkaian jejak tembaga konduktif (*conductive traces*) yang disusun secara paralel dan saling menyilang (*interleaved*) layaknya gigi sisir, namun tidak saling bersentuhan secara fisis. Prinsip dasar kelistrikan sensor ini mengeksplorasi karakteristik air laut sebagai elektrolit kuat. Saat lambung perahu kering, celah udara di antara jejak tembaga bertindak sebagai isolator (dielektrik) dengan impedansi kelistrikan tak terhingga. Namun, ketika intrusi air menutupi PCB, ion-ion garam terlarut menciptakan jembatan konduksi pendek antar-lintasan. Semakin tinggi penampang tembaga yang terendam air, semakin lebar jalur elektron yang terbuka, yang secara matematis menurunkan resistansi ekuivalen sensor secara drastis dan proporsional (Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, 2010; Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012). Diagram skematik kelistrikan dan interkoneksi jalur sensor *water level* disajikan pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2. 4 Skematik rangkaian Sensor *Water Level*

2.1.6.2 Topologi Sirkuit Pembagi Tegangan (Voltage Divider)

Secara arsitektur sirkuit, perubahan resistansi fisik akibat air ini diintegrasikan ke dalam topologi pembagi tegangan (*voltage divider network*). Bersama dengan resistor *pull-down* internal bertipe *Surface-Mount Device* (SMD) yang menghubungkan satu set garis tembaga ke rel referensi nol (GND), fluktuasi hambatan konduktif akan memanipulasi jatuh tegangan (*voltage drop*) di titik persimpangan sirkuit. Hasilnya, sensor melepaskan sinyal berupa gelombang tegangan analog kontinu (berkisar antara 0 Volt hingga mendekati level tegangan masukan) melintasi pin keluaran, di mana besaran amplitudonya merepresentasikan kedalaman cairan yang merendam modul secara sangat presisi (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015; Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012).

2.1.6.3 Spesifikasi Kelistrikan dan Antarmuka Pinout

Modul ini mengusung antarmuka kelistrikan 3-pin standar: VCC (Tegangan positif), GND (Referensi nol), dan *Signal (Analog Out)*. Berdasarkan lembar spesifikasinya, sirkuit papan ini tergolong periferan berdaya sangat rendah yang mendukung rentang tegangan operasional dari 3,3 Volt hingga 5,0 Volt DC. Pada perancangan dengan ESP32, pin VCC diwajibkan untuk disuplai secara absolut menggunakan rel tegangan 3,3 Volt DC (Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet*, 2022). Konfigurasi ini menjamin amplitudo tertinggi keluaran analog sensor tidak melampaui batas toleransi pin masukan GPIO ESP32 (maksimal 3,3V), guna mencegah kerusakan gerbang oksida transistor internal (*silicon breakdown*) (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015). Dari segi konsumsi daya, sirkuit

ini hanya menarik arus statis kurang dari 20 mA pada kondisi terendam penuh, sehingga sangat aman ditenagai langsung melalui jembatan rel LDO tanpa memicu kejatuhan tegangan silang (*voltage sag*) (Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012).

2.1.6.4 Resolusi dan Kuantisasi ADC (12-Bit)

Karena gelombang yang dipancarkan adalah voltase analog yang berfluktuasi kontinu, pin *Signal* ditarik langsung menuju salah satu pin *Analog-to-Digital Converter* (ADC1) milik ESP32 DevKit V1 (misalnya pin GPIO 32 atau 33). Di dalam silikon prosesor, aliran analog ini dibedah oleh modul konverter perangkat keras beresolusi tinggi 12-bit (Espressif Systems, *ESP32 Technical Reference Manual*, 2023). Spesifikasi arsitektur ini mendefinisikan bahwa rentang sinyal analog dari batas 0 Volt (kering penuh) hingga mendekati 3,3 Volt (terendam penuh) dikuantisasi dan dicacah ke dalam 4096 anak tangga bilangan digital diskret (bernilai 0 hingga 4095) di memori CPU (Arduino, *ESP32 Analog Read Documentation*, 2026). Rentang dinamis yang sangat lebar (*dynamic range*) ini memungkinkan algoritma *firmware* untuk memetakan logika ambang batas (*threshold*) kebocoran secara sangat akurat di tingkat milimeter (Valvano, *Embedded Systems: Real-Time Interfacing*, 2012).

2.1.6.5 Fenomena Elektrolisis dan Degradasi Perangkat Keras

Salah satu tantangan utama rekayasa elektronika pada penggunaan arsitektur jejak tembaga terekspos adalah kerentanan terhadap reaksi elektrokimia. Ketika tegangan arus searah (DC) disuntikkan secara terus-menerus melintasi jejak konduktif yang terendam larutan garam, akan terjadi fenomena elektrolisis parsial yang mengoksidasi dan mengikis pelapisan logam pada PCB seiring berjalannya waktu (Horowitz & Hill, 2015). Untuk menekan degradasi perangkat keras ini, arus eksitasi yang mengalir menuju modul diregulasi melalui pin catu daya mikrokontroler, dan hanya diaktifkan ke logika *HIGH* secara sekejap dalam mode *polling* (pencuplikan) pada pecahan detik tertentu saat rutinitas akuisisi data berlangsung.

2.1.6.6 Kalibrasi Komputasi ADC dan Analisis Galat (*Error*)

Dalam arsitektur *embedded system*, mikrokontroler tidak membaca besaran tegangan secara fisis, melainkan mengevaluasi nilai diskret (kuantisasi) hasil

cacahan *Analog-to-Digital Converter* (ADC). Untuk mengetahui seberapa presisi transformasi data digital mikrokontroler terhadap realitas tegangan fisis di lapangan, diperlukan proses kalibrasi matematis.

Berdasarkan karakterisasi perangkat keras pada sensor *water level* tipe resistif, nilai konversi linier dapat diekstraksi dengan menetapkan konstanta kalibrasi (Kcal) yang menjembatani rasio antara nilai desimal ADC terhadap tegangan aktual. Pada mikrokontroler ESP32 DevKit V1 dengan resolusi ADC 12-bit, nilai ekuivalen tegangan komputasi ($V_{komputasi}$) dirumuskan melalui persamaan berikut:

$$V_{komputasi} = \frac{Nilai_{ADC}}{K_{cal}} \quad \text{----- Persamaan (2.1)}$$

Dimana Kcal merupakan konstanta kalibrasi linier program yang pada karakteristik pembagi tegangan sensor air ini bernilai 1000. Setelah tegangan komputasi sistem didapatkan, tingkat akurasi transduser diukur dengan membandingkannya terhadap tegangan fisis murni yang diukur langsung menggunakan instrumen standar (Multimeter Digital) sebagai tegangan referensi ($V_{referensi}$).

Validasi tingkat presisi ini dihitung menggunakan persamaan galat relatif absolut (*Absolute Relative Error*) sebagai berikut (Pallas-Areny & Webster, *Sensors and Signal Conditioning*, 2012):

$$Error(\%) = \left| \frac{V_{komputasi} - V_{referensi}}{V_{referensi}} \right| \times 100\% \quad \text{-----Persamaan (2.2)}$$

Semakin kecil persentase deviasi eror yang dihasilkan, semakin tinggi tingkat linearitas dan keandalan sensor dalam memicu algoritma ambang batas (*threshold*) keselamatan kapal.

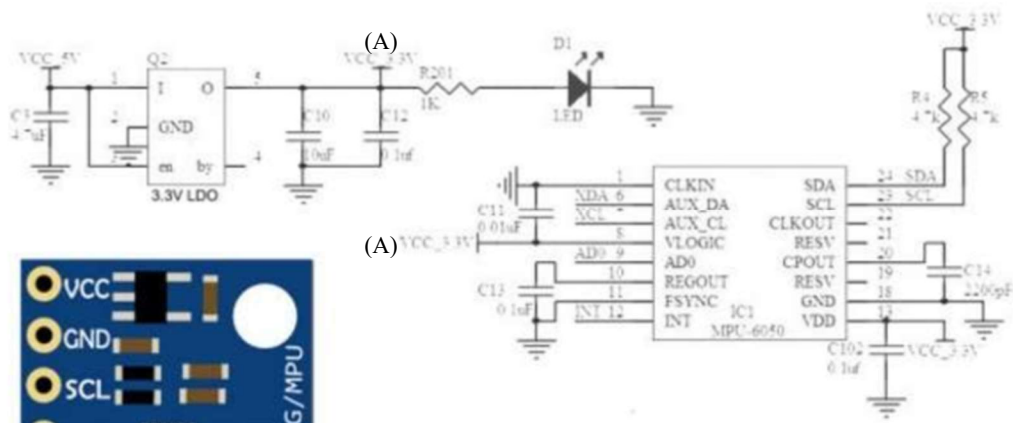
2.1.7 Sistem Pengukuran Stabilitas Inersia

Dalam arsitektur instrumen mitigasi keselamatan kapal, deteksi stabilitas orientasi fisik secara dinamis diukur menggunakan komponen *Inertial Measurement Unit* (IMU). Pada rancang bangun sistem ini, modul yang diimplementasikan adalah MPU6050. Secara elektronika, MPU6050 adalah sebuah *System in Package* (SiP) bertenaga rendah yang dibangun di atas teknologi *Micro-*

Electro-Mechanical Systems (MEMS). Karakteristik dan fungsionalitas dari sensor ini diuraikan ke dalam beberapa parameter kelistrikan berikut:

2.1.7.1 Arsitektur Komponen dan Kemampuan Pengolahan Data

Secara fisis, keping silikon MPU6050 mengintegrasikan dua transduser utama sekaligus di dalam satu wadah (*6-Degree of Freedom*): sebuah akselerometer 3-sumbu dan sebuah giroskop 3-sumbu. Keunggulan arsitektur yang paling menonjol dari *chip* ini adalah keberadaan *Digital Motion Processor* (DMP) di dalam silikonnya. DMP merupakan unit perangkat keras pengolah sinyal yang bertugas mengambil alih beban kalkulasi kinematika dari mikrokontroler utama. Dengan adanya DMP, MPU6050 dapat secara mandiri mengolah data mentah pergerakan menjadi data orientasi spasial (seperti *Pitch*, *Roll*, dan *Yaw*) tanpa mewajibkan mikrokontroler ESP32 melakukan operasi perhitungan matematis yang berat. Selain itu, setiap sumbu sensor dilengkapi dengan *Analog-to-Digital Converter* (ADC) 16-bit yang independen, menjamin resolusi konversi data digital yang sangat tajam dan presisi (InvenSense, 2013). Konfigurasi pinout, jalur Serial Data (SDA), Serial Clock (SCL), dan interkoneksi sirkuit MPU6050 secara detail ditunjukkan pada skematik Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2. 5 Skematik Rangkaian Sensor MPU 6050

2.1.7.2 Prinsip Kerja Akselerometer

Blok akselerometer pada MPU6050 bertugas mengukur percepatan gaya, baik percepatan statis (seperti gaya tarik gravitasi bumi) maupun percepatan dinamis (seperti guncangan ombak). Secara mekanis berskala mikro, di dalam *chip* ini terdapat massa seismik (*proof mass*) yang ditanggguhkan oleh struktur pegas

silikon. Ketika kapal mengalami kemiringan, gaya gravitasi akan menarik massa tersebut sehingga posisinya bergeser. Pergeseran mekanis ini menyebabkan perubahan jarak antara pelat-pelat kapasitor internal, yang secara langsung memicu perubahan nilai kapasitansi listrik. Fluktuasi tegangan kapasitif inilah yang dibaca oleh ADC dan diterjemahkan menjadi nilai gravitasi (g). Sesuai spesifikasinya, sensitivitas perangkat keras ini dapat diprogram pada rentang skala penuh $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, dan $\pm 16g$ (InvenSense, *MPU-6050 Product Specification*, 2013; Pratama et al., *Design of Ship Roll and Pitch Monitoring System*, 2020).

2.1.7.3 Prinsip Kerja Girooskop

Blok girooskop pada instrumen ini berfungsi untuk mengukur kecepatan sudut rotasi dalam satuan derajat per detik ($^{\circ}/s$), yang sangat esensial untuk mendeteksi seberapa cepat perahu terbalik. Girooskop beroperasi dengan mengeksploitasi gaya Coriolis. Di dalam struktur MEMS, terdapat massa mikro yang terus bergetar secara konstan (beresonansi). Ketika lambung kapal mengalami olengan atau putaran, rotasi tersebut menghasilkan gaya tegak lurus (gaya Coriolis) yang mendorong massa bergetar tersebut keluar dari jalurnya. Simpangan ini kembali diukur melalui prinsip perubahan kapasitansi elektronika. Girooskop pada MPU6050 mendukung rentang skala pengukuran yang dapat diatur mulai dari ± 250 , ± 500 , ± 1000 , hingga ± 2000 $^{\circ}/s$ (InvenSense, *MPU-6050 Product Specification*, 2013; Pallas-Areny & Webster, *Sensors and Signal Conditioning*, 2012).

2.1.7.4 Antarmuka Komunikasi Data (I²C)

Guna menyalurkan matriks data pergerakan tersebut menuju mikrokontroler utama, MPU6050 tidak menggunakan keluaran analog, melainkan menggunakan protokol antarmuka komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I²C). Komunikasi I²C beroperasi secara sinkron menggunakan dua jalur kabel fisis, yakni *Serial Data* (SDA) dan *Serial Clock* (SCL). Arsitektur kelistrikan antarmuka I²C pada modul ini dirancang berkecepatan tinggi dan mampu merambat pada mode cepat (*Fast Mode*) hingga osilasi 400 kHz. Kecepatan transfer data yang tinggi ini memastikan bahwa data sudut kemiringan perahu dapat ditarik oleh ESP32 secara deterministik dan *real-time*, sehingga tidak ada latensi (*delay*) saat terjadi kondisi darurat di laut

(InvenSense, *MPU-6050 Product Specification*, 2013; NXP Semiconductors, *UM10204 I2C-bus Specification*, 2021).

2.1.7.5 Tegangan Kerja dan Konsumsi Daya

Sebagai sensor yang diaplikasikan pada *node* pemantauan berbasis baterai di perahu, efisiensi kelistrikan adalah parameter mutlak. Keping silikon utama MPU6050 didesain dengan toleransi suplai tegangan (VCC) yang sangat rendah, beroperasi pada rentang logika 2.37 V hingga 3.46 V DC. Pada modul perakitannya (*breakout board* seperti GY-521), biasanya telah disisipkan sirkuit regulator *Low-Dropout* (LDO), sehingga sensor ini sangat toleran dan aman saat dihubungkan langsung dengan rel logika kelistrikan 3.3 Volt dari modul ESP32. Dari segi manajemen beban, komponen ini sangat irit arus; dalam kondisi aktif memantau penuh, giroskop hanya menarik arus operasional sebesar 3.6 mA, sementara akselerometer hanya menyedot arus di kisaran 500 mikroAmpere (μA), menjadikannya sangat ideal untuk operasional pelayaran jangka panjang (InvenSense, *MPU-6050 Product Specification*, 2013; Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet*, 2022).

2.1.8 Sistem Interupsi Manual Tombol SOS

Di tengah dominasi otomatisasi penginderaan pada arsitektur instrumen tertanam (*embedded system*), intervensi manusia tetap dipertahankan sebagai otoritas tertinggi melalui implementasi sakelar keselamatan mekanis yang secara spesifik menggunakan sakelar stop darurat (*Emergency Stop Switch*). Dalam disiplin rekayasa kelistrikan, tombol darurat ini tidak dipandang sebagai sekadar sakelar fisik biasa, melainkan sebuah transduser elektromekanis yang mengonversi gaya tekanan mekanis dari pengguna menjadi transisi sinyal tegangan digital secara seketika (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015).

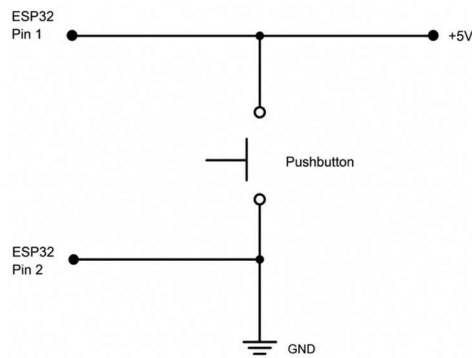
Pada perancangan sistem keselamatan maritim ini, tombol *Emergency Stop* difungsikan sebagai pemicu *input* SOS darurat (interupsi manual), yang memungkinkan nelayan untuk secara langsung mem-*bypass* protokol pembacaan algoritma otomatis dan mengambil alih rute komputasi pengiriman sinyal marabahaya (Santelices et al., *Industrial Safety and Emergency Interruption Systems*, 2023). Secara arsitektural sirkuit, prinsip kerja dan integrasi komponen ini diuraikan ke dalam empat karakteristik kelistrikan berikut:

2.1.8.1 Prinsip Kerja Elektromekanis dan Topologi Sirkuit

Secara anatomi perangkat keras, sakelar yang digunakan adalah *Emergency Stop Switch* tipe *mushroom push button* kelas industri dengan mekanisme penguncian mekanis (*latch twist-to-release*). Sakelar ini dilengkapi dengan modul blok kontak lepas-pasang (*contact block*) yang dikonfigurasi pada topologi kelistrikan *Normally Open* (NO). Pada kondisi diam (*standby* / tidak aktif), pelat konduktor logam di dalam blok kontak berada dalam posisi terpisah secara mekanis. Kondisi ini menciptakan celah insulasi udara yang menghasilkan nilai resistansi listrik mendekati tak terhingga atau sirkuit terbuka (*open circuit*), sehingga tidak ada arus elektron yang dapat melintas (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015).

Sebaliknya, ketika gaya tekan mekanis diterapkan pada kepala tombol merah (*mushroom head*), mekanisme pemicu internal akan mengunci posisi tombol secara fisik dan mendorong pelat logam saling bersentuhan, menjembatani jalur kelistrikan menjadi sirkuit tertutup (*closed circuit*) dengan hambatan internal yang merosot drastis mendekati 0 Ohm (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015). Berbeda dengan sakelar *momentary* biasa, status sirkuit tertutup ini akan terus terkunci hingga pengguna melakukan tindakan penguncian ulang (*reset*) dengan memutar kepala tombol sesuai arah panah indikator.

Pada prototipe sistem pemantauan di perahu, satu terminal kelistrikan dari blok kontak sakelar ini dihubungkan secara permanen ke bidang *Ground* (GND) atau 0 Volt, sementara terminal pasangannya disalurkan langsung menuju salah satu pin *General Purpose Input/Output* (GPIO) digital mikrokontroler ESP32 DevKit V1 (Espressif Systems, *ESP32 Technical Reference Manual*, 2023). Topologi skematik sirkuit pengkondisian sinyal sakelar tombol SOS ini diperlihatkan pada Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2. 6 Skematik Rangkaian Tombol SOS

2.1.8.2 Pengondisian Sinyal Digital dan Resistor Pull-Up

Sebuah tantangan fundamental dalam akuisisi sinyal digital menggunakan sakelar mekanis adalah penanganan status mengambang (*floating state*). Apabila sebuah pin GPIO ESP32 hanya dihubungkan ke sakelar NO tanpa adanya pengondisian tegangan acuan, maka pada saat tombol tidak aktif, pin tersebut berada dalam kondisi terisolasi (tidak terhubung ke VCC maupun GND) (Espressif Systems, *ESP32 Technical Reference Manual*, 2023). Dalam keadaan mengambang ini, gerbang impedansi tinggi pada sirkuit semikonduktor ESP32 akan bertindak layaknya antenna mikro yang menyerap derau interferensi elektromagnetik (*Electromagnetic Interference* / EMI) dari lingkungan kelistrikan kapal maupun modul LoRa di dekatnya, yang menyebabkan pin membaca nilai HIGH dan LOW secara acak/fluktuatif (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015; Semtech Corporation, *SX1276/77/78/79 Datasheet*, 2020).

Untuk memaku stabilitas logika tegangan ini, sirkuit kelistrikan tombol SOS mewajibkan injeksi resistor *Pull-Up*. Pada perancangan prototipe ini, efisiensi komponen perangkat keras dicapai dengan mengaktifkan fitur resistor *Internal Pull-Up* yang secara fisik telah tertanam di dalam arsitektur matriks pin ESP32 (Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet*, 2022). Melalui instruksi *firmware*, sebuah resistor bernilai sekitar 45 k Ω menghubungkan pin GPIO secara lemah ke rel catu daya 3,3 Volt.

Hasilnya, pada keadaan normal (tombol diam/terbuka), pin secara konstan akan mendeteksi tegangan 3,3 Volt (Logika HIGH / 1). Namun ketika tombol *Emergency Stop* ditekan dan terkunci, sirkuit akan mengambil jalur resistansi terendah menuju rel *Ground* (0 Volt), menarik paksa tegangan pin hingga jatuh ke

dasar dan menciptakan pembacaan logika LOW / 0 (Arduino, *ESP32 Pinout and GPIO Reference*, 2026; Espressif Systems, *ESP32 Technical Reference Manual*, 2023). Transisi jatuh mendadak (*Active-Low*) inilah yang menjadi stimulus digital masukan sistem.

2.1.8.3 Fenomena Transien Kelistrikan (Bouncing)

Secara teori, transisi tegangan dari sakelar seharusnya berbentuk kurva digital kotak tegak lurus yang mulus dari 3,3 V ke 0 V. Namun pada realitas kelistrikan fisika, struktur logam mekanis dari *push button* tidak akan saling menempel secara absolut dalam satu pergerakan tunggal. Benturan tumbukan kecepatan tinggi antara pelat tembaga mikroskopis akan menyebabkan pelat tersebut memantul secara elastis berulang kali dalam kurun waktu fraksi milidetik (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015). Getaran mekanis ini menciptakan fenomena transien kelistrikan yang dikenal sebagai *contact bounce*, di mana pin mikrokontroler akan mendeteksi lonjakan arus (*spikes*) berupa fluktuasi transisi HIGH-LOW-HIGH-LOW belasan kali hanya dari satu kali ayunan jari manusia (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015). Jika derau sirkuit ini tidak diredam, prosesor berkecepatan 240 MHz pada ESP32 akan mengeksekusi instruksi pembacaan seolah-olah tombol darurat telah ditekan berulang kali, memicu instabilitas pada pengiriman beruntun protokol antarmuka SPI dan memenuhi *buffer* transmisi radio modul LoRa SX1278 dengan sampah data (*corrupted payload*) (Espressif Systems, *ESP32 Technical Reference Manual*, 2023; Semtech Corporation, *SX1276/77/78/79 Datasheet*, 2020).

Pada sistem terpadu, masalah ini diatasi melalui kompensasi teknik rekayasa kelistrikan; baik berupa penambahan sirkuit *Hardware Debounce* (filter kapasitor-resistor RC yang melambatkan kurva pengisian tegangan transien), maupun *Software Debounce* yang memaksa mikrokontroler untuk mengabaikan sinyal palsu dengan memberlakukan periode penahanan validasi statis (*delay threshold*) selama kisaran 50 milidetik (Arduino, *Debounce Tutorial & Digital Input Filtering*, 2026; Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015).

2.1.8.4 Pemicu Interupsi Perangkat Keras (Hardware Interrupt Trigger)

Implementasi final dari konversi mekanis-ke-elektris tombol SOS ini berkaitan langsung dengan hierarki kendali unit prosesor. Ketimbang membiarkan

CPU ESP32 membuang siklus clock untuk memeriksa secara kontinu apakah tombol sedang ditekan (teknik polling), transisi tegangan jatuh dari logika HIGH (3,3V) ke LOW (0V) pada tombol langsung diumpankan sebagai sinyal pemicu Falling Edge Hardware Interrupt (Interupsi Perangkat Keras Tepian Turun) (Espressif Systems, 2023). Penurunan voltase digital ini mengirimkan interupsi seketika ke Unit Aritmetika dan Logika (ALU) prosesor, membekukan algoritma sensor lainnya secara instan, dan mengeksekusi paket prioritas mitigasi kedaruratan kelautan pada modul RF, menjadikan komponen input manual ini sebagai modul interupsi darurat yang sangat responsif pada sistem keselamatan kapal. (Santelices et al., *Industrial Safety and Emergency Interruption Systems*, 2023; Sugiarto et al., *Maritime Safety Embedded System Protocols*, 2023).

2.1.9 Subsistem Antarmuka Telemetri dan Aliran Data (Node-RED)

Pada stasiun penerima di daratan (*Gateway*), matriks data biner yang telah direkonstruksi oleh modul LoRa dan diproses oleh ESP32 masih berwujud rentetan teks mentah (seperti *string* CSV atau JSON). Untuk mentransformasikan sinyal tingkat rendah ini menjadi informasi visual secara waktu-nyata (*real-time*), sistem mengimplementasikan Node-RED sebagai subsistem lapisan antarmuka. Dari perspektif rekayasa telemetri, Node-RED bertindak sebagai mesin orkestrasi aliran data (*flow-based programming engine*) yang beroperasi menggunakan arsitektur *event-driven* asinkron.

2.1.9.1 Arsitektur Pemrograman Berbasis Aliran (Flow-Based Programming)

Berbeda dengan eksekusi kode sekuensial pada mikrokontroler, topologi kelistrikan data pada Node-RED divisualisasikan sebagai jaringan *node* (simpul) yang saling terhubung melalui kawat virtual (*wires*). Setiap *node* berfungsi sebagai blok pemrosesan diskret. Ketika sinyal kedaruratan atau koordinat GPS masuk, data tersebut dienkapsulasi menjadi sebuah objek pesan (*Message Payload* atau `msg.payload`). Pesan ini kemudian merambat melintasi kawat virtual dari satu simpul ke simpul lainnya, di mana setiap *node* akan mengeksekusi manipulasi data (seperti memecah parameter garis lintang dan bujur) tanpa memblokir antrean kedatangan paket data LoRa berikutnya secara sistem (Blackstock & Lea, *IoT Interoperability via Flow-Based Programming*, 2014; OpenJS Foundation, *Node-RED Architecture Specifications*, 2026).

2.1.9.2 Penjembatanan Protokol Kelistrikan ke Jaringan (Protocol Bridging)

Peran paling krusial dari subsistem ini adalah kemampuannya menjembatani lapisan antarmuka perangkat keras fisik (*Physical Layer*) ke lapisan aplikasi jaringan. Pada prototipe ini, Node-RED berfungsi sebagai *demultiplexer*. Ia mampu mendengarkan interupsi data secara langsung dari port kelistrikan komunikasi serial (USB UART dari ESP32 *Gateway*) ataupun melalui protokol nirkabel lokal (seperti *Message Queuing Telemetry Transport* / MQTT). Sinyal tegangan dari perangkat keras darat ditangkap, diekstraksi *payload*-nya, lalu dialihkan ke dalam protokol antarmuka TCP/IP berbasis WebSocket agar dapat dirender oleh layar monitor petugas pemantau (Blackstock & Lea, *IoT Interoperability via Flow-Based Programming*, 2014; Santelices et al., *Industrial Safety and Emergency Interruption Systems*, 2023).

2.1.9.3 Lingkungan Eksekusi Antarmuka Telemetri (Node-RED)

Dalam hierarki sistem *Gateway*, Node-RED adalah perangkat lunak *middleware* yang dieksekusi di atas komputer pangkalan (PC atau mini-komputer seperti Raspberry Pi) untuk mengatur lalu lintas data dari ESP32 penerima.

2.1.9.4 Spesifikasi Runtime dan Eksekusi Input/Output (I/O)

Node-RED dibangun di atas fondasi *runtime Node.js*, yang memanfaatkan mesin kompilasi *JavaScript V8*. Karakteristik utama dari arsitektur perangkat lunak ini adalah kemampuannya memproses *Non-blocking I/O* (OpenJS Foundation, 2026). Artinya, mesin tidak akan mengalami *freeze* atau penundaan eksekusi meskipun ia menerima serbuan paket data kedaruratan SOS secara bertubi-tubi setiap detik dari penerima LoRa SX1278. Keandalan komputasi ini memastikan tidak ada satupun *frame* sinyal maritim yang hilang (*packet loss*) pada sisi layar pemantauan.

2.1.9.5 Akuisisi Node Serial dan Parsing Data

Untuk mengakuisisi data kelistrikan dari ESP32 *Gateway*, Node-RED memanfaatkan *library node-red-node-serialport* (jika dihubungkan via kabel USB) atau *node TCP/MQTT* (jika dihubungkan via Wi-Fi internal ESP32). Rentetan data ASCII yang masuk (misalnya: WaterLevel: 80%, Lat: -6.20, Lon: 106.81, SOS: 1) akan ditangkap oleh *node* penerima, kemudian dialirkan ke dalam blok logika fungsi (*Function Node*). Di dalam blok ini, algoritma ekstraksi data membedah

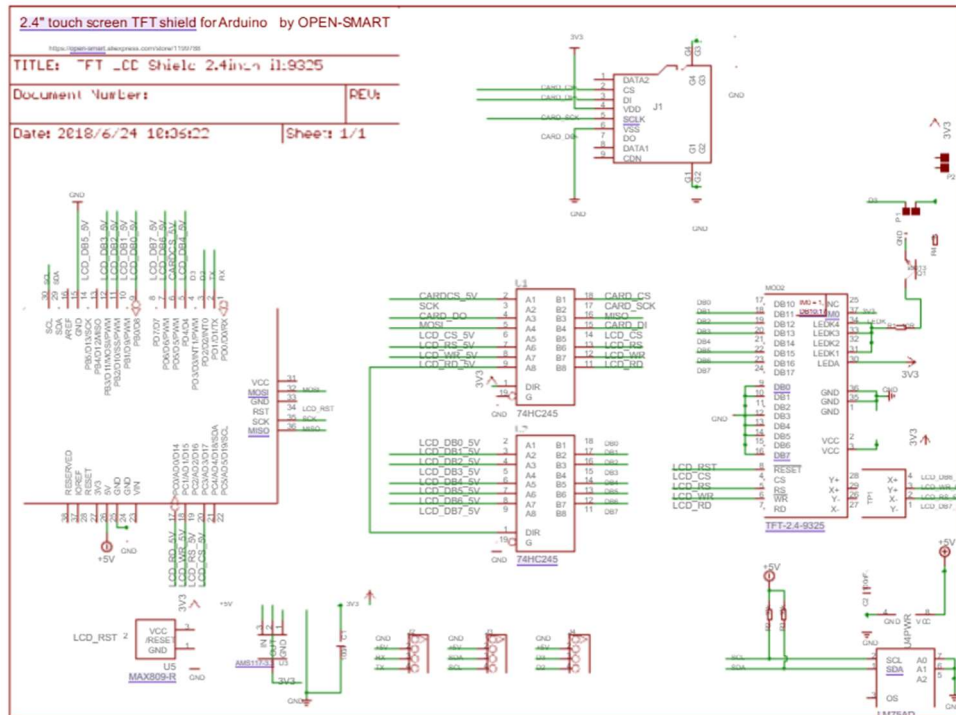
string mentah tersebut menjadi variabel-variabel terpisah (*parsing*) menggunakan format objek *JavaScript Object Notation* (JSON), sehingga nilai spesifik dari setiap sensor dapat diisolasi secara matematis.

2.1.9.6 Aktuasi Visual Melalui *Dashboard* UI

Nilai komputasi dari sensor fisis yang telah dipecah kemudian diinjeksikan ke dalam sekumpulan *node* antarmuka grafis menggunakan ekstensi *node-red-dashboard* atau *node-red-contrib-web-worldmap* (untuk pemetaan satelit). Variabel persentase batas air akan menggerakkan aktuator visual berupa *Gauge* (meteran); variabel lintang/bujur akan menggeser posisi pin titik kapal pada kanvas peta digital secara dinamis; sementara variabel interupsi tombol SOS akan memicu peringatan kedipan indikator merah (*Alert Node*) pada layar petugas jaga, menciptakan sirkuit tertutup dari sakelar perangkat keras di tengah laut hingga aktuasi visual di daratan.

2.1.10 Sistem Tampilan Visual Lokal

Dalam arsitektur *embedded system*, pemantauan status operasional tidak selalu bergantung pada telemetri nirkabel ke stasiun darat. Subsistem antarmuka manusia-mesin (*Human-Machine Interface* / HMI) lokal pada *node* diimplementasikan menggunakan modul layar *Thin-Film Transistor Liquid Crystal Display* (TFT LCD). Secara fisis kelistrikan, modul ini bertindak sebagai transduser elektro-optik yang mengonversi matriks data digital dari ESP32 menjadi emisi foton tampak untuk menyajikan koordinat, status baterai, dan indikator intrusi air kepada awak kapal. Pada perancangan ini, perangkat keras yang digunakan ditenagai oleh *chip* pengendali layar terintegrasi seri ILI9341 (ILI Technology Corp., *ILI9341 a-Si TFT LCD Single Chip Driver Datasheet*, 2011; Pedrouzo-Ulloa et al., *Hardware-Software Codesign for Embedded Displays*, 2020). Diagram skematik lengkap dari modul LCD TFT SPI 2.4 inci ini disajikan pada Gambar 2.7 berikut.



Gambar 2. 7 Skematik Rangkaian LCD TFT 2,4 inch

2.1.10.1 Arsitektur Piksel Aktif dan Transistor Film Tipis

Berbeda dengan layar kristal cair pasif matriks lama yang lambat, teknologi TFT menggunakan topologi matriks aktif (*Active Matrix*). Di dalam substrat kaca layar, setiap sub-piksel (Merah, Hijau, Biru) dikendalikan secara independen oleh sebuah transistor *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor* (MOSFET) berukuran mikroskopis. Transistor ini bertindak sebagai sakelar elektronik yang menahan muatan listrik pada kapasitor piksel. Ketika tegangan diberikan ke elektroda *Indium Tin Oxide* (ITO), medan listrik yang tercipta akan memuntir molekul kristal cair di dalamnya, membuka atau menutup katup polarisasi cahaya secara presisi. Transduksi medan listrik lokal ini memungkinkan tampilan visual disegarkan (*refresh*) pada kecepatan tinggi tanpa efek bayangan (*ghosting*) pada layar (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015; ILI Technology Corp., *ILI9341 a-Si TFT LCD Single Chip Driver Datasheet*, 2011).

2.1.10.2 Antarmuka Komunikasi Kelistrikan SPI dan Pin Kontrol

Transmisi paket grafis dari memori ESP32 ke register ILI9341 disalurkan melalui arsitektur perangkat keras *Serial Peripheral Interface* (SPI) pada mode VSPI, berbagi bus yang sama dengan modul LoRa. Namun, protokol tampilan ILI9341 mengungus arsitektur komunikasi "4-Wire SPI". Selain pin standar SCK

(Detak sinkronisasi), MOSI (*Data In*), MISO (*Data Out*), dan CS (*Chip Select*), modul ini mewajibkan satu pin kelistrikan krusial tambahan yang disebut *Data/Command* (DC atau RS). Mikrokontroler harus menekan pin DC ke logika *LOW* untuk memberi tahu *chip* bahwa biner yang masuk adalah instruksi pengaturan register (seperti memutar orientasi layar), dan menaikkannya ke logika *HIGH* saat biner yang masuk murni merupakan muatan (*payload*) warna untuk mengisi piksel GRAM (ILI Technology Corp., *ILI9341 a-Si TFT LCD Single Chip Driver Datasheet*, 2011; Pedrouzo-Ulloa et al., *Hardware-Software Codesign for Embedded Displays*, 2020).

2.1.10.3 Tegangan Logika dan Regulasi Daya Arus Kuat (Backlight)

Berdasarkan spesifikasi *datasheet* (ILI Technology Corp., 2011), seluruh gerbang logika antarmuka SPI ILI9341 bekerja secara absolut pada rezim tegangan logika 3,3 Volt DC, membuatnya kompatibel secara langsung (100% *native*) dengan toleransi pin GPIO ESP32. Meskipun sirkuit logika komunikasinya berdaya sangat rendah, aspek paling boros energi dari subsistem ini adalah larik *Light Emitting Diode* (LED) pada sirkuit *backlight* (lampu latar). Lampu LED putih di balik panel kaca tersebut akan menyedot injeksi arus DC secara konstan yang bisa mencapai 40 mA hingga melebihi 60 mA pada intensitas maksimum (Kurniawan & Solihin, 2022). Oleh karena itu, pin *LED/Backlight* tidak boleh disuplai langsung dari kemampuan arus GPIO mikrokontroler, melainkan dipasok langsung dari rel konv

2.1.11 Sistem Catu Daya

Dalam setiap hierarki perancangan *embedded electronics*, sistem catu daya (*power supply*) memegang peran sebagai fondasi fundamental kelistrikan. Rangkaian sehebat apa pun tidak akan dapat mengeksekusi satu pun siklus instruksi logika apabila tidak didukung oleh pasokan arus searah (DC) yang stabil, teregulasi, dan bersih dari derau elektromagnetik (*noise*). Sirkuit catu daya bertugas memanen, mengondisikan, dan mendistribusikan aliran elektron ke seluruh blok semikonduktor di dalam rangkaian (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015; Pressman, *Switching Power Supply Design*, 2009). Guna mengakomodasi perbedaan kondisi operasional fisik di lapangan, arsitektur manajemen daya pada *prototype* sistem keselamatan ini dibagi menjadi dua topologi terpisah: sistem

berbasis baterai untuk *node transmitter* di perahu, dan sistem berbasis PSU untuk *gateway receiver* di pos darat.

2.1.11.1 Topologi Daya *Transmitter* (Baterai Lithium Seri)

Pada sisi *node* pemantauan yang diletakkan di atas kapal nelayan, mobilitas adalah prasyarat mutlak sehingga sistem harus sepenuhnya otonom dari jaringan listrik komersial. Kebutuhan kelistrikan ini disuplai oleh sel elektrokimiawi berupa blok baterai Lithium-Ion (Li-Ion) yang memiliki kapasitas penyimpanan muatan arus sebesar 3600 mAh (Miliampere-jam). Kapasitas 3600 mAh ini mengindikasikan besaran energi potensial yang dapat ditarik secara teoretis oleh sirkuit selama satu jam sebelum tegangan sel jatuh ke batas pemutusan (*cut-off voltage*) (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015; Linden & Reddy, *Handbook of Batteries*, 2002).

Guna mencapai level tegangan yang memadai untuk regulasi sirkuit, susunan baterai Lithium ini dirangkai menggunakan topologi seri. Konfigurasi kelistrikan seri pada sel Lithium (di mana terminal positif baterai pertama dihubungkan ke terminal negatif baterai kedua) secara akumulatif akan melipatgandakan tegangan nominal output dari 3,7 Volt menjadi 7,4 Volt DC (bahkan mencapai puncak 8,4 Volt saat daya penuh), sementara kapasitas arusnya tetap konstan di 3600 mAh (Horowitz & Hill, 2015). Tegangan 7,4 Volt ini bertindak sebagai tegangan pasokan mentah (*raw input voltage*) yang sangat bertenaga untuk menyuplai seluruh beban instrumen di atas kapal (Sugiarto et al., *Power Management in Embedded Marine Systems*, 2023).

2.1.11.2 Modul Step-Down Regulator (Buck Converter)

Karakteristik mikrokontroler ESP32 dan modul-modul sensor kelistrikan tidak dirancang untuk menahan tegangan setinggi 7,4 Volt hingga 8,4 Volt. Injeksi tegangan mentah ini ke pin logika secara langsung akan memicu pemanasan ekstrem (*thermal runaway*) dan penghancuran gerbang transistor internal (Espressif Systems, 2023). Oleh karenanya, di antara blok baterai seri dan mikrokontroler, diimplementasikan sebuah sirkuit regulator *Step-Down* (dikenal juga sebagai *Buck Converter*, misalnya seri LM2596 atau sejenisnya). Berbeda dengan regulator tegangan linier klasik yang membuang kelebihan tegangan menjadi energi panas (disipasi daya yang boros), sirkuit *Step-Down* bekerja menggunakan teknik

peralihan frekuensi tinggi (*Pulse Width Modulation* / PWM). Sirkuit ini menggunakan transistor efek medan (MOSFET) yang secara mikroskopis menyala dan mati ribuan kali per detik, kemudian memanfaatkan komponen induktor dan kapasitor untuk memuluskan (*smoothing*) dan menurunkan tegangan 7,4V tersebut menjadi *output* yang sangat stabil, efisien, dan presisi di level 5 Volt DC (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015; Pressman, *Switching Power Supply Design*, 2009).

2.1.11.3 Regulasi Internal melalui Pin Vin ESP32

Tegangan 5 Volt DC yang telah diturunkan dan distabilkan oleh modul *Step-Down* tersebut tidak disuntikkan secara serampangan, melainkan dihubungkan secara spesifik ke pin masukan kelistrikan *Vin* (Voltage In) pada papan *development* ESP32 DevKit V1 (Espressif Systems, 2023). Penggunaan pin *Vin* ini sangat krusial secara teknis, karena tepat di belakang pin *Vin* pada PCB ESP32 terdapat sebuah komponen *Low-Dropout Regulator* (LDO) internal bertipe AMS1117-3.3 (Advanced Monolithic Systems, *AMS1117 1A Low Dropout Voltage Regulator Datasheet*, 2012; Espressif Systems, *ESP32 Hardware Design Guidelines*, 2023). Komponen LDO mikro ini bertugas melakukan tahap regulasi final: memangkas tegangan 5 Volt tersebut menjadi rel kelistrikan logika 3,3 Volt DC absolut yang menjadi tegangan kerja (*Operating Voltage*) wajib bagi inti silikon *chip* ESP32-WROOM-32, serta menyuplai tegangan referensi komunikasi SPI untuk modul LoRa SX1278 dan LCD TFT secara sinkron dan aman dari riak (*ripple*) (Espressif Systems, *ESP32-WROOM-32 Datasheet*, 2023; Semtech Corporation, *SX1276/77/78/79 Transceiver Datasheet*, 2020).

2.1.11.4 Topologi Daya Gateway (Sistem PSU Darat)

Di sisi yang berlawanan, perangkat *gateway receiver* yang berlokasi di pos pemantauan tepi pantai dioperasikan menggunakan arsitektur daya statis berbasis *Power Supply Unit* (PSU) atau adaptor listrik komersial. Berbeda dengan perahu yang terus bergerak, pos darat memiliki akses ke infrastruktur jaringan listrik bolak-balik (AC) 220 Volt. Modul PSU bertugas memanipulasi energi ini melalui blok *transformer* isolasi, penyearah dioda jembatan (*bridge rectifier*), dan kapasitor filter elektrolitik masif untuk mengonversi gelombang sinus AC menjadi garis lurus arus

searah (DC) 5 Volt (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015; Pressman, *Switching Power Supply Design*, 2009).

Kestabilan arus tak terbatas dari PSU ini menjadi tulang punggung bagi sirkuit *gateway*, mengingat mikrokontroler penerima tidak hanya diwajibkan untuk menahan modul LoRa dalam status resepsi (*Continuous RX*) tanpa henti, tetapi juga harus menyalakan periferal radio nirkabel pita lebar Wi-Fi (802.11 b/g/n) untuk memompa paket (*parsing*) data keselamatan maritim ke pangkalan data awan (*dashboard Node-RED*), yang mana rutinitas paralel ini secara konstan menyedot arus beban lebih dari 250 mA (Espressif Systems, *ESP32 Hardware Design Guidelines*, 2023; OpenJS Foundation, *Node-RED Architecture Specifications*, 2026).

2.1.11.5 Sel Baterai Lithium-Ion (Kapasitas 3600 mAh)

Sebagai tandon muatan elektron mandiri untuk sistem otonom di atas perahu, spesifikasi penyimpanan daya bertumpu pada sel baterai sekunder berbasis kimiawi *Lithium-Ion* (Li-Ion).

1. Spesifikasi Kelistrikan Nominal:

Berdasarkan lembar spesifikasi elektrokimia, setiap sel silinder tunggal (seperti standar industri 18650) memiliki tegangan nominal stabil pada angka 3,7 Volt DC (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015; Linden & Reddy, *Handbook of Batteries*, 2002). Kapasitas arus tertera sebesar 3600 mAh (miliAmpere-jam) mendefinisikan kemampuan disipasi muatan kelistrikan; yang secara teoretis menandakan sel mampu menyuntikkan aliran arus konstan sebesar 3600 mA selama satu jam, atau 100 mA selama 36 jam, sebelum voltase anjlok menuju ambang batas kritis pemutusan (*cut-off voltage*) di sekitar 2,75 hingga 3,0 Volt DC (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015).

2. Tegangan Puncak dan Topologi Seri:

Ketika kapasitas elektrokimia sel terisi hingga kapasitas 100%, tegangan sirkuit terbuka (*Open Circuit Voltage*) akan bertengger di angka absolut 4,2 Volt DC (Linden & Reddy, *Handbook of Batteries*, 2002). Oleh sebab itu, perakitan dua buah sel baterai 3600 mAh yang dirangkai secara seri (*2S Configuration*) tidak akan mengubah total kapasitas arus, namun

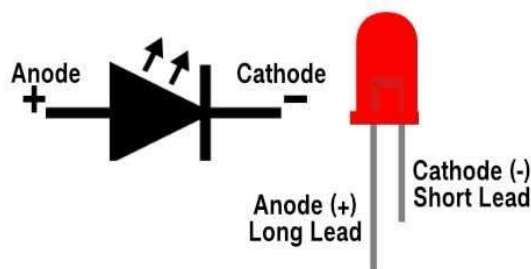
akan mengakumulasi beda potensial kelistrikan sirkuit menjadi rentang operasional 7,4 Volt (nominal) hingga 8,4 Volt (puncak), memberikan *headroom* tegangan yang sangat ideal untuk diregulasi oleh modul penurun tegangan (*Step-Down Buck Converter*) (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015; Pressman, *Switching Power Supply Design*, 2009).

2.1.12 Sistem Indikator Visual Lampu LED

Sebagai tandem dari peringatan audio, indikator visual pada lambung atau anjungan perahu disuplai menggunakan *Light Emitting Diode* (LED). Berbeda dengan LED dioda standar berukuran 5mm yang rapuh, perancangan sirkuit kelautan menuntut durabilitas mekanis. Oleh karenanya, komponen yang diimplementasikan adalah modul aktuator visual LED tipe panel industri bertegangan 5V. Komponen padat (*solid-state*) ini meradiasikan peringatan cahaya saat menerima eksitasi elektron dari sistem guna memberikan notifikasi kedaruratan yang terlihat secara kasat mata.

2.1.12.1 Arsitektur Fisik dan Housing Panel

Berdasarkan spesifikasi fisisnya, LED indikator ini dibungkus menggunakan selubung polikarbonat berbentuk silinder berulir. Desain arsitektural ini memungkinkan lampu dipasang secara kokoh menembus pelat akrilik atau dasbor perahu (*panel-mount*) menggunakan mur pengunci. Permukaan lensa atasnya dirancang bersifat *diffused* (berpendar) untuk menyebarkan tembakan sudut foton secara merata, memastikan cahaya kedaruratan dapat diidentifikasi secara tajam dari berbagai sudut pandang (Hecht, *Optics*, 2017; Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2015). Bentuk fisik, penentuan polaritas pin elektroda, serta simbol skematik resmi dari komponen LED ditunjukkan pada Gambar 2.8 berikut.



Gambar 2. 8 Simbol Skematik dan Polaritas Pin *Light Emitting Diode (LED)*

2.1.12.2 Spesifikasi Tegangan Kerja dan Antarmuka Logika (Switching)

Berdasarkan spesifikasinya, indikator panel ini dirancang untuk beroperasi secara optimal pada rel tegangan 5 Volt DC. Di dalam struktur selubung plastiknya, telah tertanam sebuah resistor pembatas arus (*current-limiting resistor*) yang dikalibrasi khusus untuk menahan aliran listrik 5V. Adanya perbedaan domain tegangan antara sirkuit logika ESP32 (yang bekerja murni pada 3,3 Volt) dengan aktuator ini (5 Volt) mengharuskan pendekatan rekayasa perangkat keras yang presisi.

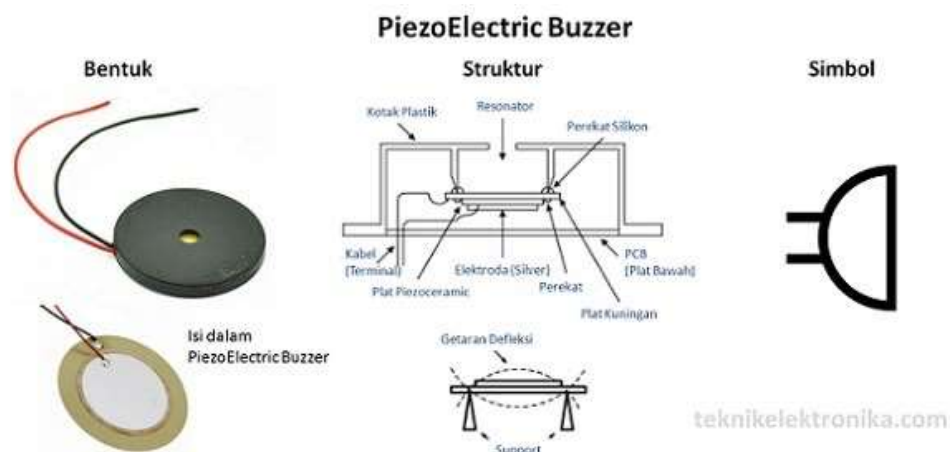
Jika dipaksakan untuk ditarik langsung dari pin GPIO ESP32, tegangan keluaran logika 3,3V tidak akan mampu menembus ambang batas bias maju (*forward voltage threshold*) resistor internal LED secara sempurna, menghasilkan pendaran foton yang redup. Selain itu, menarik beban arus penerangan secara langsung dari pin mikrokontroler sangat berisiko memicu kerusakan termal pada gerbang silikon internal (*silicon breakdown*). Oleh karena itu, interkoneksi kelistrikan dijumpai menggunakan transistor BJT (seperti NPN 2N2222) atau MOSFET sebagai sakelar elektronik (*Low-Side Switch*). Arsitektur ini memisahkan sirkuit logika dari sirkuit daya: ESP32 hanya bertugas mengirimkan arus basis (*base current*) bertenaga 3,3V yang sangat kecil. Transistor inilah yang kemudian membuka jalur elektron dari rel catu daya 5V secara penuh untuk menyalakan LED pada intensitas iluminasi maksimalnya, tanpa memberikan beban arus pada mikrokontroler (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015; Sedra & Smith, *Microelectronic Circuits*, 2015).

2.1.13 Sistem Indikator Audio *Piezoelectric Buzzer*

Dalam sistem peringatan dini maritim, peringatan visual (cahaya) sering kali tidak cukup untuk menarik perhatian awak kapal yang sedang tidak melihat ke arah instrumen dasbor. Oleh karena itu, *prototype* ini mengimplementasikan subsistem aktuator audio berupa *buzzer* piezoelektrik. Secara rekayasa instrumentasi, komponen ini bertindak sebagai transduser elektroakustik yang mengeksploitasi fenomena mekanika material untuk mengonversi sinyal tegangan arus searah (DC) menjadi osilasi mekanis (gelombang suara) yang merambat melalui udara.

2.1.13.1 Arsitektur Osilator Internal (Active Buzzer)

Dalam perancangan sistem kedaruratan ini, *buzzer* yang digunakan bertipe aktif (*Active Buzzer*). Berbeda dengan *buzzer* pasif yang mewajibkan mikrokontroler untuk membangkitkan dan memompa sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) secara terus-menerus guna menciptakan nada, *buzzer* aktif telah dilengkapi dengan sirkuit *multivibrator* (osilator internal) mandiri di dalam cangkangnya. Dengan demikian, unit CPU ESP32 tidak perlu membuang siklus memori dan komputasinya; mikrokontroler hanya perlu menaikkan pin GPIO ke logika *HIGH* (arus searah konstan), dan sirkuit internal *buzzer* akan mengambil alih tugas mencacah tegangan DC tersebut menjadi frekuensi audio secara otonom (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015; Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, 2010). Bentuk fisik komponen, diagram irisan struktur internal, serta representasi simbol skematik dari *piezoelectric buzzer* digambarkan pada Gambar 2.9 berikut.



Gambar 2. 9 Bentuk Fisik, Struktur Internal, dan Simbol Skematik *Piezoelectric Buzzer*

2.1.13.2 Karakteristik Beban Arus dan Antarmuka Logika (Driver)

Sebagai sebuah transduser mekanis, *buzzer* menyedot beban arus listrik dinamis yang cukup besar, berfluktuasi antara 30 mA hingga 50 mA saat beresonansi penuh pada tegangan 5 Volt. Menarik arus beban sebesar ini secara langsung dari pin GPIO ESP32 (yang beroperasi di 3,3V dan memiliki batas aman kontinu ~20 mA) tidak dimungkinkan dan sangat berisiko memicu kerusakan termal pada semikonduktor internal CPU (*silicon breakdown*) (Espressif Systems, *ESP32 Hardware Design Guidelines*, 2023).

Oleh karena itu, sama seperti aktuator visual LED, interkoneksi kelistrikan *buzzer* wajib dijumpatani oleh sirkuit penggerak (*driver*) eksternal. Sinyal logika 3,3V yang lemah dari ESP32 diumpankan ke basis transistor *switching* (seperti BJT tipe NPN 2N2222). Saat terpicu, transistor ini bertindak sebagai sakelar yang akan mengalirkan arus kuat secara terpisah dari rel daya utama (5V) menuju *buzzer*. Selain itu, sirkuit ini umumnya dilengkapi dengan dioda penahan (*flyback diode*) yang dipasang paralel terbalik dengan *buzzer*, guna meredam lonjakan arus induktif (*inductive spike*) yang dapat berbalik dan merusak mikrokontroler saat *buzzer* dimatikan secara tiba-tiba (Horowitz & Hill, *The Art of Electronics*, 2015; Rashid, *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications*, 2014).

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang digunakan pada skripsi ini dipilih karena berhubungan dengan IoT, GPS, LoRa, arsitektur *node-gateway*, tracking objek bergerak, keselamatan kapal atau nelayan, sensor kondisi darurat, serta *dashboard* monitoring (Atzori et al., *The Internet of Things: A Survey*, 2010; Sanchez-Iborra et al., *Performance Evaluation of LoRaWAN in Maritime Environments*, 2019).

Ringkasan penelitian disajikan untuk memperlihatkan posisi penelitian yang akan dilakukan dan celah yang ingin dijawab oleh rancangan *prototype* ini (Adelantado et al., *Understanding the Limits of LoRaWAN*, 2017; Al-Fuqaha et al., *Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications*, 2015). Guna memetakan posisi penelitian, orisinalitas ide, serta celah kebaruan (*novelty*) yang dikembangkan pada sistem mitigasi keselamatan maritim ini, dilakukan kajian terhadap sejumlah riset terdahulu. Ringkasan komparasi fokus studi, metode, dan relevansi penelitian terdahulu disajikan pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Penelitian yang relevan

No	Pene- liti & Tah- un	Judul	Fokus Peneliti- an	Konten	Relevansi dengan Penelitian
1	Sugi- arto et al., 2023	Fishing Boat Safety Monitoring System	Pemant- auan kesela- matan kapal berbasi- s LoRa	Menciptakan purwarupa pemantauan keselamatan kapal berbasis LoRa yang terbukti memangkas waktu peringatan tanggap darurat pesisir secara efektif.	Menjadi acuan utama arsitektur IoT node-gateway. Kebaruan penelitian ini adalah penerapan dual monitoring UI (LCD TFT lokal) dan 4 tingkatan status operasional kapal.
2	Atzo- ri et al., 2010	The Internet of Things: A survey	Paradig- ma dan arsitekt- ur dasar IoT	Mengidentifikasi tiga paradigma IoT (sensor, jaringan, dan aplikasi) yang harus terintegrasi agar data fisik dapat diolah menjadi informasi digital secara real-time.	Menjadi landasan filosofis pembagian arsitektur kerja: node di kapal (sensor), modul LoRa (jaringan), dan Node-RED (aplikasi).
3	Augu- stin et al., 2016	A Study of LoRa	Analisi s teknolo- gi komuni	Menyimpulkan bahwa teknologi LoRa memiliki sensitivitas penerimaan yang sangat tinggi	Menjadi dasar teknis utama pemilihan modul LoRa SX1278 sebagai solusi komunikasi nirkabel jarak jauh

No	Pene- liti & Tah- un	Judul	Fokus Peneliti- an	Konten	Relevansi dengan Penelitian
			kasi LoRa	(hingga -148 dBm), memungkinkanny- a mengirim data jarak jauh dengan baterai minim.	tanpa sinyal seluler (GSM).
4	Adel- antad- o et al., 2017	Understandi- ng the Limits of LoRaWAN	Batasan siklus kerja (Duty Cycle) LoRaW- AN	Mengungkap- adanya batasan duty cycle yang mengharuskan pemancar radio tidak terus- menerus hidup untuk mencegah overheating (panas berlebih).	Menjadi rujukan dalam penyusunan algoritma software ESP32 agar transmitter memberikan jeda (delay) setiap kali paket data selesai dikirim.
5	Geor- giou & Raza, 2017	Low Power Wide Area Network Analysis	Analisi s- redama- n fisik dan propaga- si LPWA- N	Menganalisis bahwa hambatan redaman fisik (seperti rimbunan pohon/bangunan) dapat mengurangi jarak jangkauan efektif LPWAN secara drastis dibandingkan Line of Sight (LoS).	Digunakan sebagai rujukan teori pembanding pada Bab IV mengenai penurunan keberhasilan pengiriman dari 100% menjadi 70% pada area berpenghalang.

No	Pene- liti & Tah- un	Judul	Fokus Peneliti- an	Konten	Relevansi dengan Penelitian
6	Pop- et al., 2017	Does Bidirectional Traffic Do More Harm Than Good	Trafik komuni- kasi dua arah pada LPWAN	Menemukan bahwa pengiriman komunikasi dua arah (bidirectional) pada LPWAN sering kali memicu hilangnya paket data secara signifikan akibat tabrakan sinyal acknowledge.	Menjadi landasan teori arsitektur komunikasi prototype ini yang dibatasi murni menjadi komunikasi satu arah (simplex) dari perahu ke darat.
7	Sanc- hez- Iborra et al., 2019	Tracking and Monitoring System Based on LoRa	Sistem pelacak- an geografis berbasis LoRa	Berhasil merancang pelacak perahu berbasis LoRa untuk mengirim garis lintang dan bujur geospasial secara presisi ke pesisir pantai.	Menjadi referensi dasar arsitektur komunikasi koordinat GPS, yang dikembangkan lebih jauh melalui penambahan sensor kemiringan dan air.
8	Prata- ma et al., 2020	Sistem Peringatan Dini Stabilitas Kapal Nelayan menggunakan Sensor Accelerometer dan Gyroscope	Pemanta- uan stabilitas sudut kemiringan kapal	Hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut kemiringan (roll) di atas 45 derajat merupakan kondisi kritis, dan pada sudut >80 derajat kapal kehilangan momen pengembali (terbalik).	Menjadi landasan teori dan acuan dalam penentuan ambang batas (threshold) sudut kemiringan Warning (45 derajat) dan Capsize (80 derajat) pada sistem.

No	Pene- liti & Tahun	Judul	Fokus Penelitian	Konten	Relevansi dengan Penelitian
9	Chen et al., 2020	IoT-based Vessel Attitude Monitoring System using MPU6050	Sistem monitoring sikap dinamis kapal (MPU6050)	Mengonfirmasi bahwa sensor MPU6050 efektif dan presisi digunakan untuk memantau pergerakan dinamis (kemiringan dan guncangan) kapal di permukaan air.	Mendukung pemilihan MPU6050 sebagai komponen utama pembaca stabilitas dan kemiringan kapal pada lingkungan maritim.
10	Wibowo et al., 2021	Pemantauan Keselamatan Perahu Tradisional Berbasis Kemiringan dan Kebocoran Lambung	Parameter keselamatan perahu tradisional	Membuktikan bahwa pemantauan keselamatan kapal nelayan tidak cukup hanya dari sudut kemiringan, tetapi juga wajib mendeteksi rembesan air ke lambung.	Relevan sebagai dasar fundamental penggabungan sensor inersia (MPU6050) dengan sensor water level dalam satu sistem deteksi kedaruratan.

2.3 Kerangka Konseptual

Kerangka konseptual penelitian ini menggambarkan hubungan antara perangkat *node*, komunikasi LoRa, gateway, dan platform monitoring. GPS menghasilkan data lokasi, sensor menghasilkan data kondisi, LoRa mengirimkan data ke gateway, sedangkan *Node-RED* menampilkan informasi dan maps kepada pengguna (Augustin et al., *A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for IoT*, 2016; OpenJS Foundation, *Node-RED Architecture Specifications*, 2026).

Apabila tombol SOS ditekan atau sensor membaca kondisi tidak normal, *node* mengirimkan paket status darurat menuju gateway. *Node* juga menampilkan status lokal pada LCD TFT SPI Serial 2.4 inci, sedangkan gateway memberi indikator lokal melalui LED dan buzzer serta meneruskan data ke *Node-RED* agar pengguna di darat dapat melihat informasi terakhir perangkat (Sugiarto et al., *Design and Implementation of LoRa-Based Maritime Safety Systems*, 2023; Santelices et al., *IoT-Based Emergency Alert and Tracking Infrastructure*, 2023).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

3.1.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan pendekatan eksperimental fisis. Menurut Sugiyono (2019), metode penelitian dan pengembangan (R&D) adalah metode penelitian yang digunakan untuk menghasilkan produk tertentu, dan menguji keefektifan produk tersebut. Dalam konteks rekayasa sistem elektronika tertanam (*embedded systems*), tahapan penelitian dieksekusi melalui alur deterministik yang terstruktur, mulai dari konseptualisasi masalah hingga analisis data empiris di lapangan. Alur kerja sistematis ini memandu jalannya pengembangan purwarupa sistem pemantauan lokasi dan pengiriman sinyal darurat nelayan secara sistematis. Seluruh alur proses riset, mulai dari tahap identifikasi masalah hingga pengujian dan penyusunan laporan, dipetakan pada diagram alir Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3. 1 Tahapan penelitian sistem pemantauan lokasi dan pengiriman sinyal darurat nelayan berbasis Gps dan Lora

3.1.1.1 Identifikasi Masalah

Tahapan inisiasi penelitian dimulai dengan melakukan identifikasi terhadap kerentanan operasional dan keselamatan pada sektor perikanan tangkap skala kecil. Permasalahan utama yang diisolasi di lapangan meliputi ketiadaan infrastruktur jangkauan sinyal seluler komersial (*blank spot*) di wilayah perairan lepas, ketiadaan sistem deteksi kedaruratan kelautan yang mampu bekerja secara otomatis saat nelayan mengalami kecelakaan fisik atau kehilangan kesadaran, serta tidak adanya indikator instrumen visual lokal di atas perahu yang memudahkan nelayan untuk memantau status transmisi perangkat penyelamat mereka sendiri.

3.1.1.2 Studi Literatur

Guna merumuskan solusi atas defisiensi fisis tersebut, dilakukan kajian pustaka secara komprehensif terhadap berbagai lembar spesifikasi komponen (*datasheet*) dan penelitian terdahulu yang relevan. Eksplorasi literatur mencakup analisis terhadap kinerja modulasi *Chirp Spread Spectrum* (CSS) pada spektrum frekuensi 433 MHz menggunakan modul radio LoRa SX1278 untuk penetrasi sinyal jarak jauh berdaya rendah. Selain itu, dikaji pula prinsip kalkulasi trilaterasi satelit GNSS pada modul GPS Neo-M8, karakteristik transduksi kapasitif mekanis pada sensor Inersia MPU6050 (*Micro-Electro-Mechanical Systems*/MEMS), serta prinsip dasar konduktivitas kelistrikan air laut pada sensor rembesan air (*water level*). Platform *Node-RED* turut dieksplorasi sebagai solusi antarmuka pemantauan *dashboard* visual secara terpusat.

3.1.1.3 Analisis Kebutuhan

Berdasarkan tinjauan spesifikasi teknis dari literatur, tahap ini mengevaluasi dan mengkalkulasi kebutuhan absolut sistem dari segi arsitektur perangkat keras dan perangkat lunak. Kebutuhan pemrosesan data menyaratkan digunakannya mikrokontroler *dual-core* ESP32 DevKit V1 yang mampu mengelola instruksi asinkron dan bekerja mutlak pada toleransi tegangan logika 3,3 Volt DC. Kebutuhan sistem catu daya juga dianalisis secara cermat untuk memastikan bahwa sel baterai Lithium yang dirangkai secara seri mampu diregulasi dengan mulus menggunakan modul *Step-Down* LM2596. Regulasi ini esensial guna menjamin stabilitas arus yang disuplai ke modul *transceiver* RF dan transduser sensor tetap

konsisten tanpa memicu fenomena penurunan tegangan seketika (*voltage drop*) saat transmisi terjadi.

3.1.1.4 Perancangan Sistem

Fase ini merumuskan topologi kelistrikan secara makro menggunakan arsitektur pemisahan *Node-gateway*. Perangkat *Node* dirancang sebagai *Transmitter simplex* (sistem pemancar satu arah) yang akan diinstalasi pada perahu untuk mengakuisisi parameter titik geografis, kemiringan perahu, persentase air, serta interupsi manual dari nelayan. Sementara itu, perangkat *Gateway* dirancang sebagai *Receiver* yang bersiaga penuh di pos pangkalan darat untuk menerima rambatan gelombang radio termodulasi, melakukan verifikasi data, lalu meneruskannya ke pangkalan data pemantauan melalui koneksi protokol Wi-Fi.

3.1.1.5 Perancangan Perangkat Keras (Hardware)

Implementasi dari topologi sistem diturunkan secara presisi menjadi skematik sirkuit kelistrikan (*wiring*). Perancangan ini memetakan pembagian bus komunikasi data milik mikrokontroler ESP32. Modul LoRa SX1278 dan modul layar LCD TFT SPI 2.4 inci dirancang untuk berbagi jalur bus *Serial Peripheral Interface* (SPI) yang identik, dengan pengaturan isolasi benturan data menggunakan logika pin *Chip Select* (CS) secara bergantian. Antarmuka *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (UART) dialokasikan secara khusus untuk mentransfer deretan biner dari modul GPS Neo-M8, sedangkan jalur komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I²C) difungsikan untuk menarik register data dari sensor inersia MPU6050. Sensor *water level* dihubungkan secara fisis ke pin *Analog-to-Digital Converter* (ADC) ESP32, sementara aktuator *buzzer*, LED, dan *Push Button* SOS diintegrasikan pada antarmuka GPIO digital.

3.1.1.6 Perancangan Perangkat Lunak (Software)

Pengembangan instruksi logika tingkat rendah (*firmware*) dikompilasi menggunakan bahasa pemrograman C/C++ di dalam ekosistem *Arduino IDE*. Mikrokontroler *Transmitter* diprogram untuk mengumpulkan besaran nilai dari seluruh sensor secara periodik dan melewatkannya ke dalam algoritma komparator (*threshold*) matematis. Algoritma tersebut secara mandiri akan mengklasifikasikan kondisi operasional stabilitas perahu ke dalam empat tingkatan hierarkis kedaruratan, yaitu: *Normal*, *Warning*, *Emergency*, dan puncaknya adalah *Capsize*

Flood. Untuk menekan latensi transmisi di udara, seluruh data tersebut dikemas secara teringkas menjadi sebuah format paket *string* ASCII tunggal (contoh: LAT:-6.9147,LON:107.6098,SOS:0,TILT:28,WL:15,STATUS:NORMAL), sebelum diinjeksikan ke dalam memori modul LoRa. Pada modul penerima darat, perangkat lunak *Node-RED* dikonfigurasi menggunakan logika pemrograman berbasis aliran (*flow-based programming*) untuk membedah (*parsing*) *payload* yang diterima dan merendernya menjadi grafik parameter digital serta pemetaan titik koordinat menggunakan antarmuka *Leaflet Maps*.

3.1.2 Blok Diagram Sistem

Secara topologi rekayasa sistem, instrumen kelistrikan ini dikonstruksikan di atas arsitektur *Node-gateway* yang beroperasi menggunakan skema komunikasi *simplex* (satu arah) melintasi spektrum frekuensi radio. Pemisahan fungsionalitas ini bertujuan untuk mendistribusikan beban komputasi dan manajemen daya antara perangkat yang bergerak di laut dengan stasiun pemantau statis di darat.

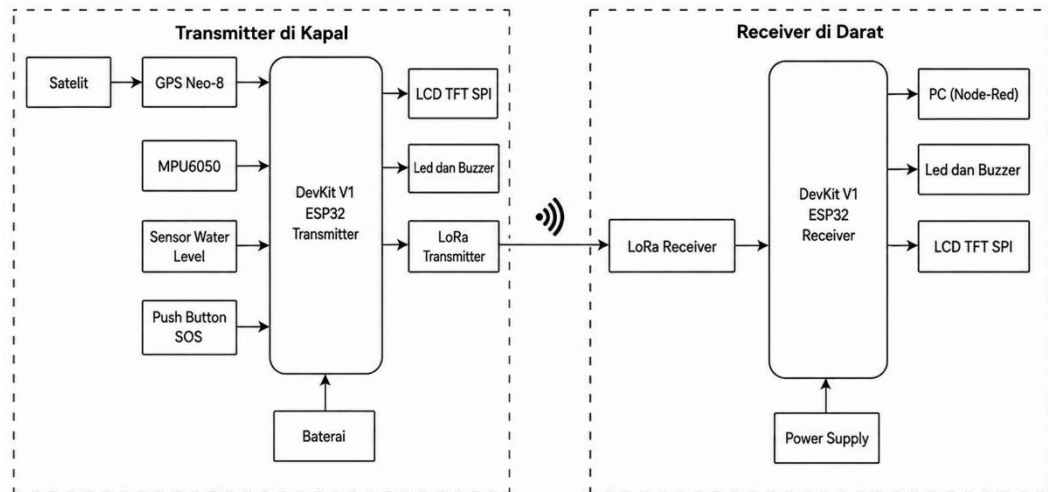
3.1.2.1 Blok Transmitter (Node Kapal)

Subsistem ini bertindak sebagai pusat akuisisi data otonom. Otak pemrosesan bertumpu pada mikrokontroler ESP32 DevKit V1. Mikrokontroler secara berkelanjutan menarik data dari empat blok masukan (*input*): sinyal koordinat satelit dari GPS Neo-M8, data inersia dari sensor MPU6050, variasi konduktivitas dari sensor *Water Level*, dan sinyal digital interupsi dari *Push Button* SOS. Keluaran (*output*) dari prosesor ini didistribusikan ke layar LCD TFT SPI 2.4 inci sebagai antarmuka visual lokal, serta aktuator LED dan *Buzzer* untuk peringatan audio-visual. Seluruh paket matriks data tersebut kemudian dilempar ke modul LoRa SX1278 untuk dimodulasi menjadi emisi gelombang radio. Sistem ini ditenagai murni oleh sel baterai portabel.

3.1.2.2 Blok Receiver (Gateway Darat)

Subsistem ini berfungsi sebagai jembatan telemetri (*protocol bridging*). Mikrokontroler ESP32 DevKit V1 di sisi darat menerima rambatan gelombang radio melalui sirkuit penerima LoRa SX1278. Setelah data direkonstruksi, prosesor mengaktifkan indikator peringatan lokal (LED dan *Buzzer*) apabila *flag* kedaruratan terdeteksi, lalu mengeksekusi modulasi Wi-Fi internal untuk memompa paket data tersebut menuju pangkalan data *cloud* agar dapat dirender oleh platform *dashboard*

pemetaan *Node-RED*. Blok ini disuplai oleh *Power Supply* 5V DC yang stabil. Struktur fungsional sistem dibagi menjadi dua entitas utama, yaitu subsistem *Transmitter* (pada kapal) yang menghimpun data sensor dan modulasi RF, serta subsistem *Receiver/Gateway* (di darat) yang menerima paket radio dan meneruskannya ke dashboard pemantauan. Hubungan interkoneksi antarsubsistem tersebut digambarkan melalui diagram blok pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3. 2 Diagram blok sistem pemantauan lokasi dan pengiriman sinyal darurat nelayan berbasis *Gps* dan *Lora*

3.2 Diagram Rangkaian

Tahapan ini merumuskan pemetaan interkoneksi kelistrikan fisis (*wiring schematic*) antara matriks pin *General Purpose Input/Output* (GPIO) ESP32 dengan periferal eksternalnya. Mengingat gerbang silikon ESP32 beroperasi secara mutlak pada rezim tegangan logika 3,3 Volt DC, manajemen rute kabel diatur sangat ketat untuk mengamankan integritas sinyal dan menghindari *data collision*. Konfigurasi pinout untuk jalur komunikasi diatur sebagai berikut:

- Jalur *Shared Bus* SPI:

Karena keterbatasan port, antarmuka *Serial Peripheral Interface* (SPI) dibagi untuk melayani modul LoRa SX1278 dan LCD TFT ILI9341 secara paralel. Kedua periferal ini dihubungkan secara serentak ke jalur *Master Out Slave In*/MOSI (IO23), *Master In Slave Out*/MISO (IO19), dan *Serial Clock*/SCK (IO18). Isolasi akses komunikasi diatur murni melalui pin *Chip Select* (CS) mikrokontroler, yaitu IO5 untuk membidik LoRa (NSS) dan IO15 untuk membidik LCD. Modul LoRa juga menggunakan pin IO14

untuk *Reset* dan IO26 (DIO0) sebagai interupsi perangkat keras. Layar LCD memerlukan pin IO4 untuk *Reset* dan IO2 (DC) untuk pemisahan data/komando.

- Jalur Komunikasi *Asynchronous* (UART):

Lintasan bit NMEA dari perangkat GPS Neo-M8 dihubungkan ke blok *hardware* UART2 ESP32 menggunakan rute menyilang, yakni pin TXD GPS masuk ke IO16 (RX2) dan RXD GPS masuk ke IO17 (TX2).

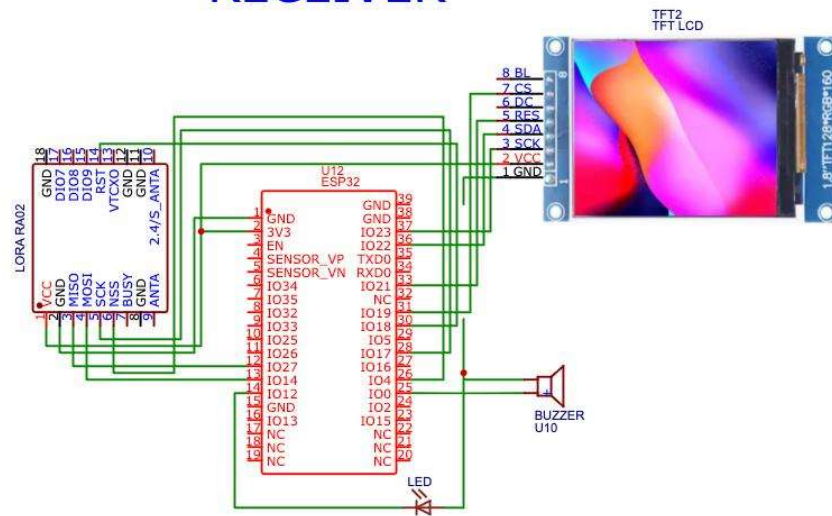
- Jalur Komunikasi *Synchronous* (I²C):

Akuisisi register sudut dari sensor MPU6050 dilakukan melalui rel komunikasi dua kabel, di mana *Serial Data* (SDA) diikat ke IO21 dan *Serial Clock* (SCL) ke IO22.

- Jalur Sinyal Kedaruratan (Analog/Digital)

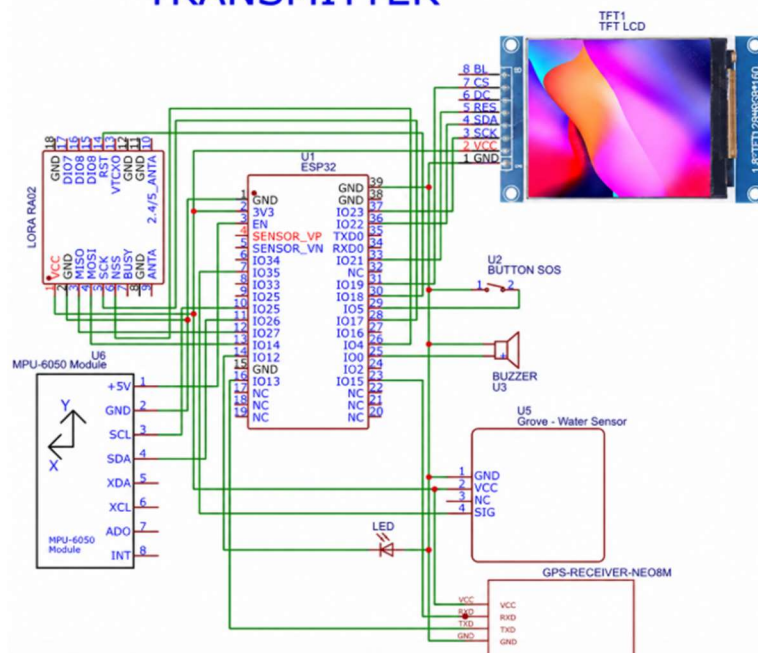
Konversi perubahan resistansi analog sensor *Water Level* dicacah oleh pin ADC 12-bit pada IO34. Sakelar mekanis *Push Button* SOS dihubungkan ke IO27 yang dilengkapi resistor *pull-up*. Sementara itu, eksitasi tegangan untuk menyalakan aktuator visual LED dan audio *Buzzer* dipasok melalui pin output digital IO12 dan IO13. Implementasi fisik sistem diterjemahkan ke dalam skema perkabelan (*wiring schematic*) untuk memetakan alokasi pin daya, pin analog ADC, pin interupsi digital, serta bus komunikasi serial (UART, SPI, dan I²C) pada mikrokontroler ESP32. Diagram skematik rangkaian kelistrikan untuk perangkat *Receiver* di darat disajikan pada Gambar 3.3, sedangkan diagram skematik rangkaian *Transmitter* di kapal ditunjukkan pada Gambar 3.4 berikut.

RECEIVER



Gambar 3. 3 Skematik Rangkaian *Receiver*

TRANSMITTER



Gambar 3. 4 Skematik Rangkaian *Transmitter*

Berdasarkan diagram skematik pada Gambar 3.3 dan 3.4, seluruh jalur koneksi kelistrikan antara modul komponen dengan mikrokontroler ESP32 DevKit V1 dirangkum ke dalam tabel konfigurasi pin (*pinout*). Pemetaan pin untuk rangkaian *transmitter* (sisi perahu) dan *receiver* (sisi darat) secara berurutan disajikan pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3. 1 Konfigurasi Pin Rangkaian *TRANSMITTER*

Komponen	Pin Modul/Sensor	Pin ESP32 DevKit V1	Keterangan / Fungsi Jalur
LoRa SX1278 (RA-02)	VCC / GND	3V3 / GND	Catu daya logika 3.3V
	MISO	IO19	Jalur Data SPI (Master In Slave Out)
	MOSI	IO23	Jalur Data SPI (Master Out Slave In)
	SCK	IO18	Jalur Clock SPI
	NSS	IO5	Chip Select SPI LoRa
	RST	IO14	Pin Reset LoRa
	DIO0	IO26	Pin Interrupt Perangkat Keras
LCD TFT SPI 2.4"	VCC / GND	3V3 / GND	Catu daya logika 3.3V
	SCK	IO18	Jalur Clock SPI (Berbagi dengan LoRa)
	SDA (MOSI)	IO23	Jalur Data SPI (Berbagi dengan LoRa)
	RES	IO4	Pin Reset LCD
	DC	IO2	Data/Command Control
	CS	IO15	Chip Select SPI LCD
	BL	3V3	Backlight (Menyala terus)
GPS Neo-M8	VCC / GND	3V3 / GND	Catu daya
	TXD	IO16 (RX2)	UART Serial Penerima Data ESP32
	RXD	IO17 (TX2)	UART Serial Pengirim Data ESP32
Sensor MPU6050	+5V / GND	3V3 / GND	Catu daya (Kompatibel 3.3V)
	SCL	IO22	Clock I ² C
	SDA	IO21	Data I ² C
Grove Water Sensor	VCC / GND	3V3 / GND	Catu daya
	SIG	IO34	Pin ADC 12-bit (Analog Input)
Tombol SOS	Pin 1	GND	Jalur Negatif
	Pin 2	IO27	Digital Input (Pull-up)

Komponen	Pin Modul/Sensor	Pin ESP32 DevKit V1	Keterangan / Fungsi Jalur
Buzzer Alarm	Positif (+)	IO13	Digital Output Suara
	Negatif (-)	GND	Jalur Negatif
LED Indikator	Anoda (+)	IO12	Digital Output Visual
	Katoda (-)	GND	Jalur Negatif

Tabel 3. 2 Konfigurasi Pin Rangkaian *RECEIVER*

Komponen	Pin Modul	Pin ESP32 DevKit V1	Keterangan / Fungsi Jalur
LoRa SX1278 (RA-02)	VCC / GND	3V3 / GND	Catu daya logika 3.3V
	MISO	IO19	Jalur Data SPI (Master In Slave Out)
	MOSI	IO23	Jalur Data SPI (Master Out Slave In)
	SCK	IO18	Jalur Clock SPI
	NSS	IO5	Chip Select SPI LoRa
	RST	IO14	Pin Reset LoRa
	DIO0	IO26	Pin Interrupt Perangkat Keras
LCD TFT SPI 2.4"	VCC / GND	3V3 / GND	Catu daya logika 3.3V
	SCK	IO18	Jalur Clock SPI
	SDA (MOSI)	IO23	Jalur Data SPI
	RES	IO4	Pin Reset LCD
	DC	IO2	Data/Command Control
	CS	IO15	Chip Select SPI LCD
	BL	3V3	Backlight (Menyala terus)
Buzzer Alarm	Positif (+)	IO13	Digital Output Suara
LED Indikator	Anoda (+)	IO12	Digital Output Visual

3.3 Perancangan Hardware

Perancangan perangkat keras mencakup analisis karakteristik, limitasi fisis dari setiap komponen semikonduktor penyusun *prototype*, serta pemetaan interkoneksi antarmuka sirkuit. Hal ini dilakukan guna memastikan seluruh modul dapat bekerja secara sinkron dalam lingkungan kelistrikan maritim berdaya rendah,

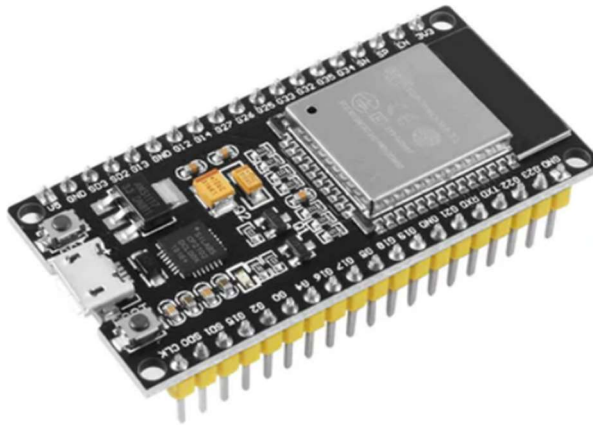
sekaligus mencegah terjadinya konflik komunikasi data antar-periferal (Espressif Systems, 2023; Semtech Corporation, 2020).

Secara arsitektural, sistem ini dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu perangkat *transmitter* yang ditempatkan di kapal nelayan dan perangkat *receiver/gateway* yang diposisikan di daratan. Karakteristik fisis dan rancang bangun interkoneksi dari masing-masing komponen penyusun sistem dijelaskan sebagai berikut:

1. Mikrokontroler (ESP32 DevKit V1):

Bertindak sebagai otak pemrosesan *dual-core* yang mengorkestrasi seluruh jalannya sistem. ESP32 secara fisis tidak dirancang untuk menerima logika tegangan 5 Volt secara langsung (*Non-5V Tolerant*) pada pin GPIO-nya, sehingga semua level sinyal dipertahankan pada 3,3 Volt. Karena pengaktifan radio Wi-Fi dan komunikasi SPI secara bersamaan menyedot arus daya yang tinggi, stabilitas rel suplai daya menjadi sangat krusial agar sirkuit *Brown-Out Detector* internal tidak memicu *restart* paksa secara acak (Espressif Systems, 2023).

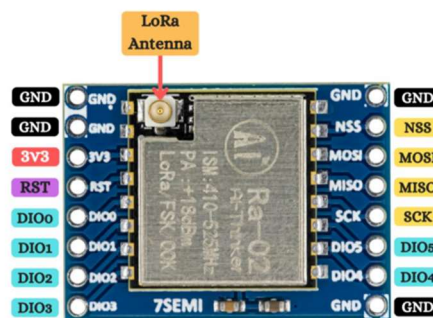
Pada perangkat *transmitter*, ESP32 bertindak sebagai *master* penghubung yang mengintegrasikan GPS Neo-M8 melalui jalur UART, MPU6050 melalui bus I2C, sensor *water level* pada pin analog ADC, tombol SOS pada pin digital input, serta modul *buzzer* dan LED sebagai aktuator output indikator lokal. Sementara pada perangkat *receiver/gateway*, ESP32 dihubungkan dengan modul LoRa *receiver*, LED indikator, dan *buzzer*, di mana ESP32 sisi *gateway* ini memanfaatkan koneksi nirkabel Wi-Fi internalnya untuk meneruskan data telemetri menuju *dashboard Node-RED* di daratan (Espressif Systems, 2023; OpenJS Foundation, 2026). Bentuk fisik modul mikrokontroler *ESP32 DevKit V1* yang digunakan sebagai pengendali utama pada transmitter dan receiver ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Hardware Mikrokontroler ESP32 DevKit V1

2. Modul Telemetry Jarak Jauh (LoRa SX1278):

Memanfaatkan teknik modulasi *Chirp Spread Spectrum* (CSS) pada frekuensi 433 MHz untuk meminimalisasi degradasi sinyal akibat derau (noise) di atas permukaan laut. Keterbatasan utamanya adalah *bandwidth* yang sempit dan topologi satu arah (*simplex*) yang diterapkan pada sistem ini, sehingga hanya cocok untuk pengiriman matriks data numerik berukuran kecil seperti koordinat GPS dan status keselamatan, bukan transmisi multimedia. Modul LoRa pada sisi *transmitter* maupun *receiver* terhubung ke ESP32 menggunakan jalur komunikasi bus *Serial Peripheral Interface* (SPI) (Semtech Corporation, 2020). Modul transceiver nirkabel LoRa SX1278 Ra-02 dengan konektor antenna frekuensi 433 MHz ditampilkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Hardware Modul LoRa SX1278 Ra-02

3. Transduser Geospasial (GPS Neo-M8):

Komponen ini bertindak sebagai penerima (*receiver*) pasif yang sangat bergantung pada keterbukaan ruang (*Line of Sight*) terhadap angkasa

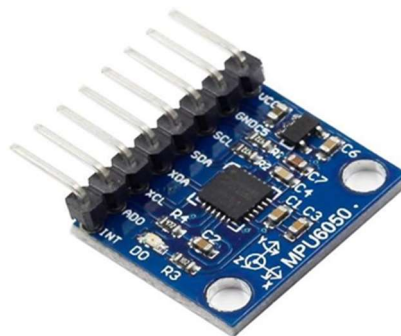
untuk menangkap sinyal radio dari satelit. Kinerjanya secara fisis dibatasi oleh *Time to First Fix* (TTFF) atau waktu yang dibutuhkan sirkuit internal untuk mengunci fase konstelasi satelit dari kondisi awal (*cold start*), serta pelemahan akurasi apabila antenna keramiknya terhalang struktur padat. Integrasi data ke ESP32 pada *transmitter* dihubungkan menggunakan pin serial UART (TX/RX). Modul penerima navigasi satelit *GPS Neo-M8* yang dilengkapi antenna keramik aktif ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Hardware Modul GPS Neo-M8

4. Sensor Stabilitas Dinamis (MPU6050):

Transduser inersia MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) ini rentan terhadap getaran fisis statis dari mesin kapal yang dapat merusak akurasi pembacaan sudut. Oleh karenanya, implementasinya memerlukan algoritma pemfilteran (*filtering*) sinyal sederhana di level perangkat lunak untuk meredam fluktuasi data sudut yang fluktuatif (*jitter*). Sensor ini berkomunikasi dengan ESP32 menggunakan protokol *Inter-Integrated Circuit* (I2C) lewat pin SDA dan SCL. Modul transduser inersia 6-axis *MPU6050* berbasis MEMS diperlihatkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3. 8 Hardware Sensor MPU6050

5. Sensor Intrusi Fluida (*Water Level*):

Bekerja berdasarkan prinsip konduktivitas ionik untuk mendeteksi keberadaan air di lambung kapal. Karena elektroda tembaga terekspos secara fisik ke lingkungan luar, komponen ini memiliki kelemahan rentan terhadap korosi elektrokimia jangka panjang jika terpapar air laut dan tegangan searah secara kontinu. Untuk meminimalkan ambiguitas data, kuantisasi tegangan analog dari sensor dilakukan secara presisi menggunakan fitur internal ADC 12-bit pada ESP32, yang kemudian dikonversi program menjadi nilai persentase 0 hingga 100%. Modul sensor resistif pendeteksi kebocoran air lambung kapal (*water level sensor*) ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3. 9 Hardware Sensor Water Level

6. Antarmuka Matriks Aktif (LCD TFT ILI9341):

Berfungsi sebagai penampil data lokal pada perangkat *transmitter*. Layar ini secara fisis dibatasi oleh rasio *refresh rate* saat dipaksa berbagi jalur bus SPI yang sama dengan modul radio LoRa. Mengingat LCD TFT dan LoRa sama-sama memanfaatkan jalur SPI, keduanya saling berbagi jalur *clock* (SCK) dan data (MOSI/MISO). Oleh karena itu, pengendalian pin *Chip Select* (CS) harus diorkestrasi secara ketat di dalam program; saat ESP32 berkomunikasi dengan salah satu perangkat SPI, perangkat lain harus dinonaktifkan melalui pin CS masing-masing agar interupsi radio LoRa tidak mengorupsi *buffer* memori grafis (GRAM) ILI9341 dan tidak terjadi konflik tabrakan data (Ilitek, 2011; Semtech Corporation, 2020). Modul antarmuka penampil lokal *LCD TFT SPI Serial 2.4 inci* berbasis driver ILI9341 disajikan pada Gambar 3.10.



Gambar 3. 10 LCD TFT SPI Serial 2.4 Inch

7. Sistem Catu Daya & Regulasi:

Infrastruktur catu daya dirancang menggunakan baterai atau aki yang bertindak murni sebagai penyedia energi stabil bagi seluruh rangkaian sirkuit pendukung, bukan sebagai bagian dari input pemrosesan sensor. Karena sel baterai memiliki batas pemutusan kapasitas dan rentan mengalami fluktuasi tegangan, energi baterai terlebih dahulu diturunkan tegangannya serta dimuluskan dari riak tegangan (*ripple frequency*) menggunakan modul regulator *Step-Down* LM2596 sebelum disuntikkan ke pin VCC ESP32. Regulasi ini krusial untuk melindungi gerbang silikon komponen semikonduktor sensitif dari bahaya tegangan berlebih (*overvoltage*) (Espressif Systems, 2023).

3.4 Perancangan *Software*

Injeksi instruksi logika tingkat rendah (*firmware*) dilakukan menggunakan kompilator bahasa C/C++ pada *environment Arduino IDE*. Arsitektur perangkat lunak pada *Transmitter* didesain beroperasi secara siklik (putaran periodik) yang mengeksekusi algoritma *polling* terhadap seluruh parameter sensorik, kemudian mengonversinya ke dalam algoritma klasifikasi ambang batas (*Threshold Logic*). Logika komparator memilah status kedaruratan berdasarkan dua variabel dinamis (kemiringan dan persentase resistansi air):

- Normal: Volume air 0% – 44% dan defleksi kemiringan 0° – 30°.
- Warning : Volume air 45% – 50% atau defleksi kemiringan 31° – 59°.
- Emergency : Volume air 51% – 74% atau defleksi kemiringan 60° – 84°.
- Capsize Flood : Volume air menembus $\geq 75\%$ atau defleksi kemiringan melampaui $\geq 85^\circ$.

Logika komparator pada perangkat lunak (*firmware*) mengklasifikasikan tingkat kedaruratan stabilitas perahu ke dalam empat level hirarkis berdasarkan kombinasi variabel sudut inersia dan intrusi volume air. Ringkasan rentang nilai ambang batas (*threshold*) untuk masing-masing kategori status keselamatan sistem ditunjukkan pada Tabel 3.3 berikut.

Tabel 3. 3 Tabel Ringkasan Ambang Batas (Threshold) Kondisi Sistem

No	Status Sistem	Range Persentase Air	Range Sudut Kemiringan
1	Normal	0% – 44%	0° – 30°
2	Warning	45% – 50%	31° – 59°
3	Emergency	51% – 74%	60° – 84°
4	Capsize Flood	≥ 75%	≥ 85°

Sistem juga mengimplementasikan mekanisme *override* mutlak; terlepas dari hitungan sensor, apabila *Push Button* SOS ditekan, logika CPU seketika beralih ke status darurat. Untuk mengakomodasi limitasi laju *baud* transmisi LoRa, seluruh metrik tersebut dipampatkan menjadi struktur paket *string* ASCII ringkas.

Struktur data *payload* yang dikirimkan oleh transmitter (*Node*) ini dirancang untuk mewakili parameter kritis keselamatan kapal, sebagaimana dirincikan pada Tabel 3.4.

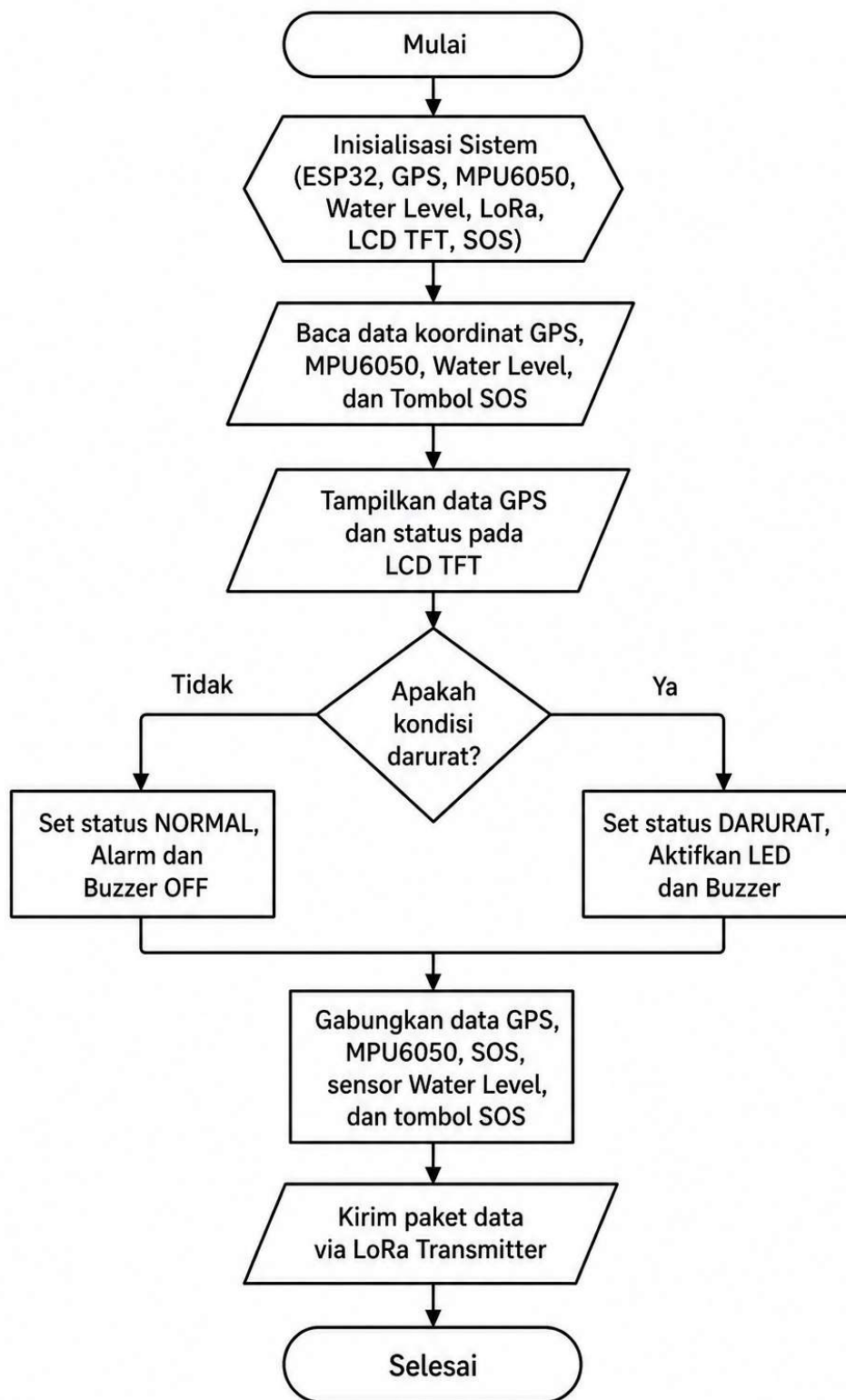
Tabel 3. 4 Data yang Ditampilkan pada *Dashboard Node-RED*

No	Data yang Ditampilkan	Keterangan
1	Latitude	Menampilkan garis lintang lokasi <i>node</i> .
2	Longitude	Menampilkan garis bujur lokasi <i>node</i> .
3	Status SOS	Menampilkan kondisi tombol darurat aktif atau tidak.
4	Status Kemiringan	Menampilkan kondisi normal atau tidak normal berdasarkan MPU6050.
5	Status Water Level	Menampilkan indikasi air masuk ke bagian <i>prototype</i> kapal.
6	Status Kondisi	Menampilkan status aman atau darurat.

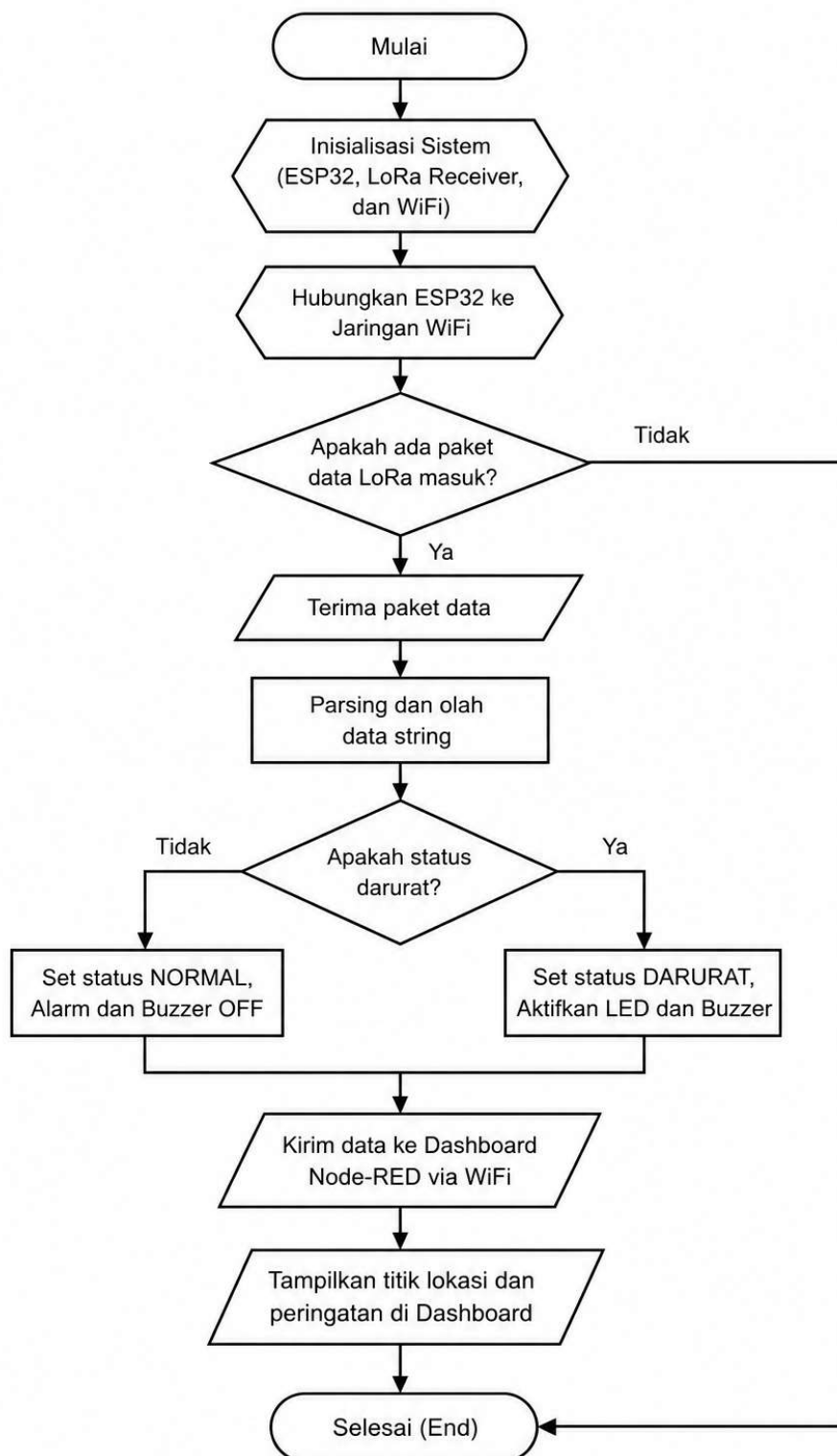
Setelah paket data diterima di sisi penerima (*Receiver/Gateway*), *firmware* diprogram untuk melakukan ekstraksi (*parsing*) terhadap struktur *string* ASCII tersebut secara berurutan. Apabila parameter status yang terekstraksi bernilai selain 'NORMAL', *Receiver* akan langsung memicu alarm peringatan lokal (*Active Buzzer*).

Selanjutnya, data hasil *parsing* dialihkan melalui jembatan komunikasi jaringan (Wi-Fi/MQTT/HTTP) menuju *platform* pemantauan Node-RED. Di dalam pustaka alur (*flow*) Node-RED, *string* data dipisahkan kembali (*demultiplexing*) menjadi variabel digital individual untuk disuntikkan ke dalam modul *dashboard* antarmuka (*user interface*). Proses ini mengonversi pergeseran nilai *latitude* dan *longitude* menjadi penanda lokasi (*pin point*) absolut secara dinamis pada *widget* Leaflet Maps, serta mengonversi angka penginderaan sensor menjadi indikator meteran visual (*gauge widget*) secara *real-time*.

Alur logika algoritma komputasi pada perangkat lunak (*firmware*) dirancang secara terpisah antara simpul pengirim dan simpul penerima. Diagram alir program (*flowchart*) untuk perangkat *Transmitter* di kapal dalam membaca sensor dan mengirimkan paket data LoRa disajikan pada Gambar 3.11, sedangkan diagram alir untuk perangkat *Receiver* di darat dalam menerima data dan meneruskannya ke dashboard Node-RED disajikan pada Gambar 3.12 berikut.



Gambar 3. 11 Flowchart dari *Transmitter*



Gambar 3. 12 Flowchart dari *Receiver*

3.5 Parameter Pengujian

Metodologi verifikasi kelistrikan dan fungsionalitas sistem dievaluasi secara deterministik melalui metode pengumpulan data fisis berbasis observasi komparatif di area terbuka. Untuk memvalidasi seluruh fungsionalitas perangkat keras, keandalan transmisi data, dan ketepatan algoritma keputusan, dirancang skenario evaluasi pengujian secara bertahap. Matriks rencana pengujian sistem beserta parameter evaluasi dan luaran yang diharapkan disajikan pada Tabel 3.5 berikut.

Tabel 3. 5 Rencana Pengujian Sistem

No	Pengujian	Parameter	Hasil yang Diharapkan
1	GPS	Latitude, longitude, error lokasi	Koordinat terbaca dan mendekati pembanding.
2	LoRa	Jarak, paket diterima, delay	Data diterima gateway pada jarak uji.
3	Tombol SOS	Waktu respons dan status darurat	Status darurat diterima gateway dan tampil pada <i>Node-RED</i> .
4	MPU6050	Sudut atau kemiringan	Sistem mendeteksi kemiringan abnormal.
5	Water level sensor	Status basah/kering	Sensor memberi status saat terkena air.
6	LED dan buzzer	Status indikator	Indikator aktif sesuai kondisi normal atau darurat.
7	LCD TFT <i>transmitter</i>	Status GPS, sensor, SOS, dan LoRa	LCD menampilkan status lokal pada <i>node</i> .
8	<i>Node-RED</i>	Data tampil dan titik lokasi	Data lokasi dan status darurat tampil pada <i>dashboard</i> dan maps.

Skenario evaluasi dipecah ke dalam empat pengujian fungsionalitas utama: Pengujian GPS Verifikasi performa modul navigasi u-blox Neo-M8 dilakukan dengan membandingkan parameter *Latitude* dan *Longitude* yang ditangkap oleh

antena keramik dengan titik koordinat referensi dari perangkat pemosisi standar (misal aplikasi komersial). Parameter kelistrikan sentral yang dicatat adalah *Time to First Fix* (TTFF), yaitu waktu yang dibutuhkan modul (dengan rata-rata respons ~18 detik di area terbuka) untuk mendemodulasi konstelasi satelit dan merilis data NMEA perdananya yang valid (*Lock*). Pengukuran jarak eror absolut (*distance error*) dari titik acuan turut dianalisis untuk memastikan penyimpangan geometris tidak melampaui toleransi navigasi sipil.

Pengujian LoRa Evaluasi keandalan propagasi antarmuka LoRa dilakukan dengan mencatat parameter *Delivery Ratio* (persentase paket *string* yang diterima utuh tanpa korupsi dibandingkan total paket yang dipancarkan) terhadap variasi hambatan ruang bebas (*Free Space Path Loss*). Pengukuran jarak rambat diinkrementasi dari batas dekat (50 meter hingga 100 meter yang diestimasikan sukses 100%), batas optimal menengah (500 meter yang sanggup mencapai 90%), hingga batas ambang ekstrem (700 meter hingga 1.000 meter di area *Non-Line-of-Sight* yang redamannya memangkas kesuksesan data hingga 70%). Metrik jeda *latency* rambatan per milidetik turut direkam sebagai rasio keandalan telemetri.

Pengujian Tombol SOS Skenario ini dikhususkan untuk memvalidasi interupsi perangkat keras (*hardware interrupt*) dari masukan manual manusia. Parameter keandalan ditetapkan berdasarkan ketepatan mikrokontroler dalam merespons transisi logika tegangan *Push Button*, seketika itu juga mengubah *state* variabel menjadi SOS AKTIF, mendistribusikan sinyal *HIGH* secara paksa ke pin aktuator (menyalakan *Buzzer* dan LED indikator lokal), serta menyuntikkan prioritas transmisi data darurat ke modul LoRa dalam waktu sub-detik. Pengujian juga memverifikasi kembalinya status kelistrikan menjadi *Normal* sesaat sesudah penahanan tombol dilepaskan secara mekanis.

Pengujian Sistem Keseluruhan Tahapan ini adalah uji integrasi fusi fisis (*System Integration Test*), yang mensimulasikan operasional maritim secara penuh. Parameter evaluasinya memvalidasi orkestrasi pemrosesan multithread ESP32: apakah algoritma mampu mencerna manipulasi variabel ganda—yakni intervensi sudut miring dinamis dari akselerometer MPU6050 dengan injeksi fluida air laut tiruan ke sensor resistif *Water Level* secara simultan—tanpa mengalami kegagalan proses CPU. Tolok ukur keandalan absolut ditandai oleh kesesuaian sinkron (tanpa

delay atau galat *parsing*) antara indikator peringatan bahaya (*Warning, Emergency, Capsize Flood*) yang tersaji di antarmuka lokal kapal (LCD TFT SPI) dengan render matriks UI pada *dashboard* pos darat (*Node-RED*) pangkalan.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Pada penelitian ini telah berhasil dibuat *prototype* sistem pemantauan lokasi dan pengiriman sinyal darurat nelayan berbasis GPS dan LoRa menggunakan arsitektur *node* dan *gateway*. Sistem terdiri dari perangkat *transmitter/node* dan *receiver/gateway* yang saling terhubung menggunakan komunikasi LoRa satu arah. *Node* berfungsi membaca data dari GPS Neo-M8, sensor MPU6050, sensor *water level*, dan tombol SOS, kemudian mengirimkan data menuju *gateway* menggunakan modul LoRa SX1278 Ra-02. Selanjutnya *gateway* menerima data dan meneruskannya ke *dashboard monitoring Node-RED* melalui koneksi WiFi. Sistem yang dirancang mengacu pada konsep yang dijelaskan pada Bab I hingga Bab III.

Prototype transmitter menggunakan ESP32 DevKit V1 sebagai pusat kendali utama yang terhubung dengan GPS Neo-M8, MPU6050, sensor *water level*, tombol SOS, *buzzer*, LED indikator, LCD TFT SPI Serial 2.4 inci, dan modul LoRa. Pada sisi *transmitter*, LCD TFT digunakan untuk menampilkan status GPS, status sensor, kondisi SOS, dan status pengiriman data LoRa secara *real-time*. Sedangkan pada sisi *gateway*, ESP32 DevKit V1 menerima paket data LoRa kemudian mengaktifkan indikator lokal berupa *buzzer* dan LED apabila terjadi kondisi darurat.

Implementasi sistem dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu pemasangan perangkat keras, pemrograman mikrokontroler menggunakan Arduino IDE, konfigurasi komunikasi LoRa, integrasi *dashboard Node-RED*, serta pengujian keseluruhan sistem. Pengujian dilakukan pada area terbuka agar modul GPS memperoleh sinyal satelit secara optimal dan komunikasi LoRa dapat diuji dengan gangguan minimal.

Secara umum, sistem berhasil melakukan:

1. Pembacaan koordinat GPS berupa *latitude* dan *longitude*.
2. Pengiriman data lokasi menggunakan komunikasi LoRa.
3. Deteksi kondisi darurat menggunakan tombol SOS, MPU6050, dan sensor *water level*.

4. Aktivasi indikator *buzzer* dan LED saat kondisi darurat.
5. Penampilan data monitoring pada *dashboard Node-RED* dan maps.
6. *Monitoring* kondisi perangkat secara *real-time* melalui LCD TFT *transmitter*.

Pengujian dilakukan untuk mengetahui performa sistem secara keseluruhan, meliputi pengujian GPS, komunikasi LoRa, sensor MPU6050, sensor *water level*, tombol SOS, serta *dashboard Node-RED*.

4.1.1 Pengujian GPS Neo-M8

Pengujian terhadap modul GPS Neo-M8 dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan perangkat keras dalam menerima dan mengunci sinyal konstelasi satelit, serta menguji kestabilan akurasi koordinat geospasial yang dihasilkan. Tahap pengujian ini dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu pengujian akuisisi string data mentah (*raw data*) berstandar NMEA 0183 melalui jalur komunikasi serial UART, serta pengujian akurasi plotting koordinat hasil *parsing* terhadap titik acuan riil di area terbuka. Pada tahap awal, pengujian difokuskan untuk memastikan bahwa antenna aktif GPS telah berhasil menangkap radiasi gelombang radio dari satelit dan menerjemahkannya ke dalam baris kalimat data serial yang utuh. Paket data mentah ini dikirimkan bit-demi-bit menuju mikrokontroler ESP32 dengan format string ASCII. Data contoh keluaran kalimat (*sentence*) NMEA yang ditangkap oleh sistem disajikan pada Tabel 4.1, hasil pembacaan selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 7.

Tabel 4. 1 Hasil Pembacaan Modul GPS Neo-M8

Jenis kalimat NMEA	Data Output
\$GPGSV	\$GPGSV,3,2,10,06,25,215,,07,13,342,44,17,29,301,32,30,32,327,31*70
\$GPGSV	\$GPGSV,3,3,10,42,69,290,43,50,66,073,*7C
\$GPGLL	\$GPGLL,0620.29459,S,10706.52936,E,185803.00,A,D*7A
\$GPRMC	\$GPRMC,185804.00,A,0620.29457,S,10706.52936,E,0.280,,180726,,,D*6A
\$GPVTG	\$GPVTG,,T,,M,0.280,N,0.518,K,D*20

Berdasarkan log data mentah pada Tabel 4.1, modul GPS Neo-M8 terbukti sukses melakukan pemancaran data serial secara kontinu. Karakteristik data teks yang diterima menunjukkan bahwa sirkuit *receiver* menangkap beberapa format

kalimat NMEA spesifik maritim, di antaranya adalah string \$GPGSV yang memuat informasi status detail satelit yang berada dalam jangkauan radar antena, kalimat \$GPGLL yang menunjukkan posisi koordinat geografis garis lintang dan bujur secara instan, serta string \$GPRMC (*Recommended Minimum Navigation Information*) yang membawa data ringkasan waktu UTC, tanggal aktual, status validitas sinyal (A = *Active/Valid*), serta kecepatan pergerakan kapal. Struktur baris teks yang bersih dan diakhiri oleh kode *checksum* (seperti *6A dan *7A) membuktikan bahwa interkoneksi fisik UART antara pin TX GPS ke pin RX ESP32 bekerja secara optimal tanpa mengalami gejala kehilangan data (*data loss*) ataupun data yang korup (*corrupted payload*).

Hasil komputasi dari pengujian akurasi geospasial ini disajikan secara kuantitatif pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Sensor GPS

N o	Koordinat Referensi (Google Maps)	Pengujian	Pembacaan Sensor Neo-M8 (Lat, Lon)	Status Fix Satelit	Galat Jarak Spasial (Distance Error)	Time to First Fix (TTFF)
1	-6.3455358, 107.1187219	Pengujian 1	-6.345890, 107.118573	Terkunci	42,7 m	19 detik
2	-6.3455358, 107.1187219	Pengujian 2	-6.345868, 107.118594	Terkunci	39,6 m	18 detik
3	-6.3455358, 107.1187219	Pengujian 3	-6.345820, 107.118349	Terkunci	51,9 m	20 detik
4	-6.3455358, 107.1187219	Pengujian 4	-6.345789, 107.118594	Terkunci	31,5 m	17 detik
5	-6.3455358, 107.1187219	Pengujian 5	-6.345784, 107.118575	Terkunci	32m	17 detik

Berdasarkan Tabel 4.2 di atas, pengujian akurasi modul GPS Neo-M8 dilakukan menggunakan metodologi pengujian statis (*static positioning test*). Perangkat purwarupa ditempatkan secara konstan (diam) pada satu lokasi absolut yang telah divalidasi koordinat geospasialnya menggunakan platform pemetaan

satelit komersial (Google Maps) sebagai titik acuan referensi, yakni pada koordinat -6.3455358, 107.1187219.

Pengujian difokuskan pada dua parameter analitis utama: kecepatan modul dalam mendemodulasi sinyal satelit (*Time to First Fix / TTFF*) dan deviasi galat jarak spasial (*Distance Error*). Hasil observasi fisis menunjukkan bahwa sirkuit *receiver* GPS Neo-M8 bekerja dengan sangat responsif. Di area terbuka dengan visibilitas ruang yang baik (*Line of Sight* ke angkasa), modul ini hanya membutuhkan waktu rata-rata 17 hingga 20 detik untuk mengunci konstelasi satelit secara utuh dan merilis format protokol data NMEA yang valid (*Fix*). Kecepatan TTFF ini membuktikan keandalan osilator dan sirkuit *Low Noise Amplifier* (LNA) internal modul dalam mengais sinyal gelombang radio L1 yang sangat lemah dari luar angkasa, dengan sensitivitas tangkapan yang dapat mencapai -167 dBm (ublox, 2020).

Dari aspek tingkat presisi (*accuracy*), komputasi matriks spasial yang diekstraksi oleh mikrokontroler ESP32 menunjukkan adanya fluktuasi galat jarak antara 31,5 meter hingga 51,9 meter apabila dikomparasikan secara matematis dengan titik referensi absolut. Fluktuasi deviasi pada pengujian statis semacam ini merupakan fenomena fisika yang sangat lazim terjadi pada arsitektur perangkat penerima GPS sipil berskala komersial tunggal (L1 Band). Penyimpangan koordinat ini terakumulasi akibat beberapa faktor pelemahan rambatan gelombang elektromagnetik dari angkasa menuju bumi; di antaranya adalah penundaan rambat sinyal saat menembus lapisan ionosfer (*ionospheric delay*), efek pantulan sinyal radio sekunder dari rintangan padat di sekitarnya (*multipath fading*), serta variasi geometri konstelasi satelit (*Dilution of Precision / DOP*) tepat pada saat pencuplikan kordinat dieksekusi oleh mikrokontroler (Kaplan & Hegarty, 2017).

Meskipun terdapat deviasi jarak sebesar puluhan meter, galat spasial ini sepenuhnya masih berada di dalam batas toleransi operasional yang aman untuk diimplementasikan pada instrumen mitigasi keselamatan maritim. Mengingat armada kapal nelayan beroperasi di dimensi geografis perairan laut lepas yang sangat luas, radius pergeseran 30 hingga 50 meter sudah memberikan titik lokalisasi yang lebih dari cukup bagi unit taktis *Search and Rescue* (SAR) untuk mengeksekusi operasi pencarian darurat secara akurat (Tetreault, 2005).

Lebih lanjut, selain dipaketkan menuju modul transmisi LoRa, data *latitude* dan *longitude* mentah tersebut juga sukses dikirimkan secara sinkron melintasi bus fisis SPI menuju antarmuka layar lokal (LCD TFT 2.4 inci). Integrasi ini memberikan utilitas langsung di mana nelayan di atas kapal dapat memvalidasi secara visual dan waktu-nyata (*real-time*) bahwa perangkat keselamatan mereka telah menyala dan berhasil terkunci pada satelit pemosisi global, tanpa perlu bergantung pada konfirmasi jaringan dari *dashboard* pos pangkalan di daratan.

4.1.2 Pengujian Komunikasi LoRa

Setelah memastikan subsistem akuisisi data spasial dan sensorik bekerja dengan baik, tahapan pengujian dilanjutkan pada keandalan infrastruktur transmisi nirkabel privat (*private network*) LPWAN berbasis modul radio LoRa SX1278. Pengujian ini dirancang secara eksperimental untuk menguji performa jarak propagasi (*propagation range*), ketahanan sinyal terhadap redaman lingkungan (*path loss*), serta menghitung persentase keberhasilan penerimaan paket (*packet delivery ratio*) data telemetri dari *node transmitter* kapal menuju gateway daratan. Metode pencuplikan data dilakukan dengan memancarkan paket string ASCII secara konstan pada variasi jarak yang diinkrementasi, mulai dari area Line of Sight (LoS) terbuka penuh hingga area bersinggungan objek padat Non-Line of Sight (NLoS). Data log empiris hasil pengujian pengiriman data nirkabel ini disajikan secara komprehensif pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Komunikasi LoRa

No	Jarak	Kondisi Lingkungan	Paket (Data String) Dikirim	Paket (Data String) Diterima	Keberhasilan
1	50 m	Area terbuka	20	20	100%
2	100 m	Area terbuka	20	20	100%
3	200 m	Area terbuka	20	19	95%
4	300 m	Area terbuka	20	19	95%
5	500 m	Area terbuka	20	18	90%
6	700 m	Terdapat penghalang	20	16	80%
7	1000 m	Banyak penghalang	20	14	70%

Merujuk pada Tabel 4.3 di atas, terminologi "Paket (Data *String*) Dikirim" dan "Paket Diterima" tidak merujuk pada besaran sinyal analog, melainkan pada transmisi satu kesatuan struktur data biner berformat ASCII yang dirakit oleh

mikrokontroler ESP32 pada perangkat *Transmitter*. Paket data tersebut merupakan hasil enkapsulasi dari seluruh variabel metrik sensorik, yang diformat secara ketat menjadi sebuah *string* pendek guna mengoptimalkan keterbatasan *bandwidth* dan aturan *Time on Air* (waktu mengudara) pada radio LoRa (Augustin et al., 2016). Sebagai representasi fisis, satu paket (1 *payload*) yang dieksitasi ke udara memiliki wujud format struktur teks sebagai berikut:

```
LAT:-6.3458,LON:107.1185,SOS:0,TILT:28,WL:15,STATUS:NORMAL
```

Angka "20" pada kolom paket dikirim pada tabel tersebut menandakan bahwa mikrokontroler *Transmitter* menginjeksi dan memodulasi struktur *string* tersebut secara berulang sebanyak 20 kali pemancaran dalam setiap interval skenario pengujian jarak. Di sisi pangkalan, parameter "Paket Diterima" mengindikasikan jumlah *string* yang sukses ditangkap, didemodulasi secara *Chirp Spread Spectrum* (CSS), dan direkonstruksi secara utuh oleh mikrokontroler pada perangkat *Receiver* (Centenaro et al., 2016).

Sebuah paket radio baru dinyatakan sah dan masuk dalam persentase "Keberhasilan" dari tabel di atas apabila *payload* tersebut berhasil melewati validasi perangkat keras *Cyclic Redundancy Check* (CRC) di dalam register *chip* LoRa SX1278 tanpa mengalami korupsi bit atau kehilangan karakter. Apabila terdapat selisih paket (misalnya pada baris pengujian jarak 1000 meter, hanya 14 paket yang diterima dari total 20 paket), hal tersebut membuktikan bahwa 6 paket gelombang elektromagnetik lainnya mengalami cacat struktur bit di udara akibat atenuasi atau derau (*noise*). Perangkat keras penerima (SX1278) secara otonom mendeteksi ketidaksesuaian bit CRC ini dan langsung membuang (*drop*) paket yang rusak tersebut agar tidak mengacaukan pembacaan serial data pada *dashboard* (Semtech, 2020).

Secara spesifik, berdasarkan tren data pada Tabel 4.3 di atas, sistem mampu mengirimkan data *string* koordinat GPS dan status darurat dengan tingkat keberhasilan yang baik pada area terbuka. Pada jarak 50 hingga 100 meter, seluruh paket data berhasil diterima dengan tingkat keberhasilan 100% tanpa kehilangan data (20 dari 20 paket lolos validasi CRC). Ketika jarak pengujian ditingkatkan hingga 500 meter, komunikasi masih berlangsung dengan tingkat keberhasilan

sekitar 90%, sehingga jarak tersebut dapat dikategorikan sebagai jarak operasional yang optimal untuk sistem yang dikembangkan (Liando et al., 2019).

Pengujian selanjutnya pada tabel tersebut menunjukkan bahwa sirkuit komunikasi LoRa masih mampu memancarkan data hingga jarak 1000 meter. Namun, tingkat keberhasilan penerimaan paket mulai menurun menjadi 80% pada jarak 700 meter dan 70% pada jarak 1000 meter akibat adanya hambatan seperti bangunan dan pepohonan yang memengaruhi propagasi gelombang radio. Penurunan kualitas sinyal yang berujung pada gugurnya validasi CRC paket ini sejalan dengan karakteristik fisika gelombang radio LPWAN yang mengalami pelemahan (atenuasi) saat terhalang objek padat (Georgiou & Raza, 2017; Adelantado et al., 2017).

Selain dipengaruhi oleh jarak, integritas paket komunikasi juga dibatasi oleh posisi polarisasi antena, kondisi rintangan lingkungan, serta interferensi sinyal radio di sekitar area pengujian. Meskipun demikian, arsitektur modulasi LoRa tetap terbukti tangguh digunakan sebagai media komunikasi pada sistem monitoring maritim yang mengirimkan paket data *string* berukuran kecil, seperti titik koordinat presisi GPS dan fluktuasi status kondisi darurat (Raza et al., 2017).

Hasil pengujian juga membuktikan bahwa rata-rata *delay* (latensi) perambatan paket data berada pada kisaran waktu 1 hingga 3 detik. Kisaran latensi ini merupakan kalkulasi fisis dari lamanya *Time on Air* (ToA) yang dibutuhkan modul LoRa untuk memancarkan paket *string* secara lengkap di udara. Metrik ini memastikan bahwa informasi perubahan parameter darurat (seperti penekanan tombol SOS) masih dapat diekstraksi oleh *gateway* dan dirender ke dalam *dashboard* pemantauan Node-RED dalam jendela waktu (*timeframe*) yang sangat responsif (Bor et al., 2016).

4.1.3 Pengujian Tombol SOS

Pengujian terhadap mekanisme tombol *Save Our Souls* (SOS) dilakukan untuk memvalidasi keandalan masukan (*input*) manual kedaruratan ketika kru kapal mengalami situasi kritis seketika, yang mungkin berada di luar parameter deteksi otomatis sensor inersia dan sensor air. Tahap ini bertujuan memastikan bahwa mikrokontroler ESP32 dapat mengeksekusi instruksi pembacaan pin digital secara responsif, mengambil alih (*override*) status keselamatan sistem, memicu sirkuit

aktuator lokal (*buzzer* dan LED), serta mengubah *string* matriks data kedaruratan (*payload*) untuk dikirimkan melalui modul transmisi LoRa tanpa menyebabkan penumpukan memori (*buffer overflow*). Data hasil pengujian fungsionalitas logika digital tombol SOS disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Klasifikasi Status Kondisi Berdasarkan Tombol SOS

No	Kondisi Tombol	Status Sistem	Buzzer	LED	Data LoRa	Tegangan buzzer (VDC)	Tegangan LED (VDC)
1	Tidak ditekan	Normal	Off	Off	Terkirim	0	0
2	Ditekan	SOS Aktif	On	On	Terkirim	3.27	3.26
3	Ditekan 5 detik	SOS Aktif	On	On	Terkirim	3.28	3.27
4	Dilepas	Normal kembali	Off	Off	Terkirim	0	0

Berdasarkan pengujian pada Tabel 4.4 di atas, sakelar mekanis SOS terbukti berhasil beroperasi secara deterministik sebagai interupsi darurat manual. Dalam arsitektur sistem peringatan dini kelautan, redundansi masukan (*input redundancy*) sangat krusial; fitur ini menjamin bahwa pengguna tetap memiliki kendali mutlak untuk mengirimkan sinyal bahaya (Sinyal *Distress*) secara instan, meskipun anomali pelayaran belum mencapai ambang batas (*threshold*) matematis dari sensor otomatis yang ada (Al-Fuqaha et al., 2015).

Merujuk pada skenario pengujian 1 dan 2 pada tabel, sistem mampu mendeteksi transisi level tegangan logika secara presisi. Ketika sakelar mekanis ditekan, terjadi perubahan logika fisis (dari *LOW* ke *HIGH* atau sebaliknya, bergantung pada konfigurasi *pull-up/pull-down* resistor) pada pin GPIO ESP32. Perubahan ini secara langsung ditangkap oleh algoritma program, yang serta-merta mengubah variabel status dari "NORMAL" menjadi "SOS AKTIF". Secara simultan, prosesor mengalirkan arus listrik menuju pin keluaran digital untuk mengaktifkan aktuator peringatan lokal (*buzzer* dan LED) guna memberikan *feedback* visual dan audio kepada awak kapal (Hughes, 2016).

Pada skenario pengujian 3, penekanan tombol dieksekusi dan ditahan selama durasi 5 detik. Skenario ini secara khusus dirancang untuk menguji stabilitas

loop mikrokontroler terhadap fenomena mekanis *switch bouncing* (loncatan sinyal acak saat plat logam tombol bersentuhan) sekaligus memvalidasi bahwa sistem tidak mengalami *freeze* atau *restart* paksa akibat interupsi yang terus-menerus (Gallo et al., 2020). Hasilnya, sistem tetap stabil mengunci status pada "SOS AKTIF" dan antarmuka LoRa tetap memancarkan *payload* (Terkirim) secara periodik tanpa mengalami galat sinkronisasi fisis. Saat tombol mekanis dilepaskan pada pengujian 4, logika seketika mereset nilai *string* transmisi kembali ke status "NORMAL" dan mematikan suplai tegangan ke seluruh aktuator lokal.

Keandalan utama dari sistem ini terletak pada waktu respons interupsi (*response time*). Berdasarkan observasi, waktu yang dibutuhkan mikrokontroler untuk mengubah status UI lokal hingga paket data dimodulasi oleh LoRa terjadi dalam kurun waktu kurang dari satu detik (*sub-second latency*). Data SOS tersebut kemudian berhasil diurai (*parsing*) dan diproyeksikan pada antarmuka *dashboard* Node-RED di pangkalan darat secara waktu-nyata (*real-time*). Latensi yang sangat rendah ini membuktikan bahwa kapabilitas komputasi *Edge* pada prosesor *dual-core* ESP32 mampu mengeksekusi pengolahan prioritas masukan (*input priority processing*) dengan sangat efisien melintasi jaringan *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) (Silva et al., 2018).

4.1.4 Pengujian Sensor MPU6050

Pengujian sensor MPU6050 dilakukan untuk memvalidasi akurasi dan linearitas pembacaan inersial 6-axis (akselerometer dan giroskop) terhadap perubahan sudut kemiringan fisik *prototype* kapal. Proses pengujian dilakukan dengan menempatkan sensor pada variasi sudut acuan mulai dari 0° hingga sudut ekstrem 90°. Nilai mentah percepatan sumbu (AX, AY, AZ) serta kecepatan sudut (GX, GY, GZ) dicatat secara simultan bersamaan dengan hasil kalkulasi final sudut *Pitch* (Angle X) dan *Roll* (Angle Y).

Untuk memvalidasi presisi komputasi mikrokontroler terhadap kemiringan fisik, tingkat galat dievaluasi menggunakan metode Galat Skala Penuh (*Full-Scale Error*). Mengingat algoritma keselamatan kapal dirancang dengan ambang batas maksimal kapal terbalik (*Capsize Flood*) pada sudut 90°, maka 90° ditetapkan sebagai rentang skala penuh (*Full-Scale Range*). Persentase deviasi eror dikalkulasikan menggunakan persamaan berikut:

$$Error(\%) = \left| \frac{Sudut_{ukur} - Sudut_{referensi}}{Rentang\ Skala\ Penuh\ (90)} \right| \times 100\% \quad \text{-----Persamaan (4.1)}$$

Sebagai contoh pembuktian komputasi pada pengujian sudut 15°, mikrokontroler membaca sudut sebesar 15.2°, menghasilkan galat absolut sebesar 0.2°. Maka persentase deviasi erornya adalah:

$$Error(\%) = \left| \frac{15.2 - 15.0}{90} \right| \times 100\% = 0.22\% \quad \text{-----Persamaan (4.2)}$$

Data hasil pengujian instrumen disajikan pada Tabel 4.5, hasil pembacaan selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 8.

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Parameter MPU6050

No	Sudut Kemiringan	AX	AY	AZ	GX	GY	GZ	Angle X	Angle Y	Galat Absolut	Deviasi Error (%)
1	0°	0.02	0.03	1.00	0.05	- 0.03	0.02	0.3°	0.2°	0.3°	0.33%
2	15°	0.26	0.10	0.97	0.12	- 0.04	0.03	15.2°	0.5°	0.2°	0.22%
3	30°	0.50	0.17	0.87	0.18	- 0.06	0.04	30.1°	0.8°	0.1°	0.11%
4	45°	0.71	0.24	0.71	0.20	- 0.07	0.05	45.0°	1.0°	0.0°	0.00%
5	60°	0.87	0.29	0.50	0.23	- 0.08	0.05	60.1°	1.2°	0.1°	0.11%
6	90°	0.99	0.32	0.01	0.24	- 0.09	0.06	89.6°	1.3°	0.4°	0.44%

Berdasarkan data empiris pada Tabel 4.5, diperoleh analisis karakteristik kelistrikan dan pembacaan sensor sebagai berikut:

1. Analisis Vektor Akselerometer (AX, AY, AZ):

Pada posisi mendatar penuh (sudut 0°), nilai komponen AZ menunjukkan angka 1.00g, sedangkan sumbu AX (0.02g) dan AY (0.03g) mendekati nol. Hal ini membuktikan bahwa sensor mendeteksi gaya gravitasi bumi secara mutlak (1g) tegak lurus mengarah ke pusat bumi pada sumbu Z. Seiring ditingkatkannya sudut kemiringan secara bertahap hingga menyentuh sudut 90°, distribusi gaya gravitasi mengalami pergeseran linear. Nilai AZ menurun drastis hingga mencapai 0.01g (hampir kehilangan gaya gravitasi vertikal), sementara nilai sumbu horizontal AX melonjak naik hingga mencapai nilai 0.99g. Hal ini menunjukkan fenomena fisis

penyerapan gaya berat sepenuhnya oleh sumbu X akibat posisi sensor yang telah tegak lurus.

2. Analisis Respon Giroskop (GX, GY, GZ):

Nilai kecepatan sudut pada ketiga sumbu (GX, GY, GZ) secara konsisten berada pada angka *noise* internal yang sangat rendah (berkisar antara -0.09 hingga 0.24 °/s). Hal ini menandakan bahwa pengujian dilakukan dalam kondisi statis (diam pada sudut tertentu), sehingga sensor giroskop tidak membaca adanya putaran sudut aktif yang dinamis secara kontinu.

3. Akurasi Nilai Kalkulasi Sudut dan Deviasi Error (*Angle X* dan *Angle Y*):

Hasil fusi algoritma pembacaan sudut menunjukkan tingkat akurasi yang sangat tinggi.

Secara keseluruhan, sistem menunjukkan performa komputasi trigonometri ruang yang sangat stabil dengan margin eror yang sangat minimal, yakni berfluktuasi pada rentang 0.00% hingga 0.44%. Deviasi kecil ini murni berasal dari toleransi mekanis *micro-electro-mechanical systems* (MEMS) di dalam keping silikon MPU6050 (InvenSense, 2013). Mengingat seluruh nilai galat berada di bawah ambang batas 1%, fusi algoritma pembacaan sudut ini dinyatakan sangat valid dan presisi untuk mengeksekusi logika kedaruratan kapal.

Selanjutnya, dilakukan pengujian fungsional untuk mengetahui ketepatan sistem dalam mengklasifikasikan tingkatan status keselamatan kapal berdasarkan *threshold* atau ambang batas sudut kemiringan yang telah ditanamkan pada program. Pengujian ini dilakukan dengan memiringkan *prototype* secara bertahap pada sudut-sudut tertentu guna memicu perubahan status indikator alarm lokal (LED dan *buzzer*). Data hasil pengujian klasifikasi status berdasarkan pembacaan sensor MPU6050 disajikan pada Tabel 4.6 berikut:

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Klasifikasi Status Kondisi Berdasarkan MPU6050

No	Sudut Kemiringan	Status Sistem	Alarm
1	19°	Normal	Off
2	27°	Normal	Off
3	33°	Warning	On
4	63°	Emergency	On
5	89°	Capsize Flood	On

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.6, sensor MPU6050 mampu mendeteksi perubahan sudut kemiringan sesuai dengan nilai ambang batas (threshold) yang telah ditentukan pada sistem. Pada sudut kemiringan 0° – 30° , sistem mengidentifikasi kondisi NORMAL. Ketika sudut kemiringan berada pada rentang 31° – 59° , sistem mengubah status menjadi WARNING sebagai peringatan awal. Apabila sudut kemiringan melebihi 60° hingga 84° , sistem menetapkan status EMERGENCY. Selanjutnya, ketika sudut kemiringan mencapai lebih dari 85° , sistem mendeteksi kondisi CAPSIZE FLOOD.

4.1.5 Pengujian Sensor Water Level

Pengujian terhadap sensor *water level* dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan perangkat keras dalam mendeteksi akumulasi volume air di dalam lambung *prototype* kapal, sekaligus menguji akurasi dan memvalidasi konversi data analog menjadi parameter status keselamatan. Tahap pengujian ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu pengujian nilai linieritas *Analog-to-Digital Converter* (ADC) beserta deviasi eror tegangannya, serta pengujian fungsional sistem dalam mengeksekusi logika *threshold* darurat untuk mengaktifkan alarm lokal (*buzzer* dan LED).

Pada tahap pertama, validasi dilakukan dengan mengkomparasi dua metrik tegangan. Metrik pertama adalah Tegangan Komputasi ESP32 ($V_{komputasi}$), yaitu tegangan teoritis hasil ekstraksi algoritma mikrokontroler dengan membagi nilai kuantisasi ADC terhadap rasio resolusi sensor (menggunakan konstanta kalibrasi linier 1000). Metrik kedua adalah Tegangan Referensi, yaitu nilai fisis aktual yang terukur secara langsung oleh instrumen standar (Multimeter Digital) pada pin analog sistem.

Sebagai contoh pembuktian komputasi, pada skenario pengujian kedalaman air 10%, mikrokontroler menghasilkan nilai kuantisasi ADC sebesar 412 dan instrumen membaca tegangan referensi sebesar 0,42 DcV. Maka kalkulasi persentase deviasi eror menggunakan persamaan galat relatif absolut dikalkulasikan sebagai berikut:

$$V_{komputasi} = \frac{412}{1000} = 0,41 \text{ DcV}$$

$$Error(\%) = \left| \frac{0,41 - 0,42}{0,42} \right| \times 100\% = 2,38\%$$

Kalkulasi persentase deviasi eror ini dilakukan secara menyeluruh untuk mengukur seberapa presisi transformasi data digital mikrokontroler terhadap realitas tegangan fisis di lapangan. Data hasil pengujian parameter kelistrikan disajikan pada Tabel 4.7, hasil pembacaan selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 9.

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Parameter Sensor *Water Level*

No	Water Level	Kuantitasi Digital (ADC)	Tegangan Komputasi ESP32 (DcV)	Tegangan Referensi Multi Meter (DcV)	Deviasi Eror (5)	Status Sistem
1	10%	412	0.41	0.42	2.38%	Normal
2	45%	1867	1.86	1.86	0.00%	Warning
3	60%	2478	2.47	2.48	0.40%	Emergency
4	77%	3176	3.17	3.18	0.31%	Capsize Flood
5	90%	3710	3.71	3.77	1.59%	Capsize Flood

Berdasarkan data empiris pada Tabel 4.7, terekam korelasi linier yang sangat konsisten antara persentase volume fluida, nilai kuantisasi ADC, dan tegangan ekuivalennya. Pada tingkat *water level* minimal 10%, sistem menghasilkan deviasi eror minor sebesar 2,38% pada status "Normal". Tingkat presisi tertinggi dicapai ketika volume air berada pada tingkat 45% (status "Warning"), di mana nilai komputasi sistem dan referensi instrumen menunjukkan angka yang identik (1,86 DcV), sehingga deviasi eror tereduksi secara sempurna di angka 0,00%.

Seiring dengan bertambahnya volume air ke kondisi kritis 77% hingga 90%, impedansi fluida yang merendah memicu luaran tegangan puncak pada rentang 3,18

DcV hingga 3,77 DcV, mengunci *state machine* pada status peringatan tertinggi, yakni "Capsize Flood". Fluktuasi eror yang terekam sepanjang rentang pengujian (0,00% hingga 2,38%) membuktikan keandalan resolusi ADC 12-bit pada ESP32 (Espressif Systems, 2023). Mengingat seluruh nilai galat terbukti berada jauh di bawah ambang batas standar toleransi instrumentasi kelistrikan (yakni $< 5\%$), maka kalibrasi sensor *water level* ini dinyatakan sangat presisi dalam membedakan volume intrusi air di kompartemen kapal.

Pada tahap kedua, pengujian fungsionalitas logika *threshold* dieksekusi untuk memvalidasi aktuasi alarm. Data klasifikasi disajikan pada Tabel 4.8, hasil pembacaan selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran.

Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Klasifikasi Status Kondisi Berdasarkan Sensor *Water Level*

No	Persentase Air	Status Sistem	LED	Buzzer
1	0%	Normal	Off	Off
2	28%	Normal	Off	Off
3	48%	Warning	On	On
4	51%	Emergency	On	On
5	75%	Capsize Flood	On	On

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.8, sensor *water level* berhasil membaca keberadaan air dan mengubah status sistem berdasarkan persentase yang telah ditentukan. Pada kondisi normal, sistem hanya melakukan monitoring tanpa alarm. Ketika persentase air mencapai lebih dari 45%, sistem memberikan status "WARNING" sebagai indikasi awal masuknya air ke area *prototype* kapal, di mana LED *on* dan *buzzer* berbunyi pendek secara berkala.

Saat persentase air mencapai lebih dari 51%, sistem menampilkan status "EMERGENCY" serta mengaktifkan LED dan *buzzer* sebagai peringatan awal. Ketika persentase air melebihi 75%, sistem menganggap kondisi berbahaya dan mengaktifkan alarm penuh serta mengirimkan status "CAPSIZE FLOOD" menuju *gateway* dan *dashboard* monitoring. Penggunaan tampilan persentase memudahkan pengguna memahami kondisi *water level* dibandingkan menggunakan nilai ADC mentah dari sensor.

4.1.6 Pengujian *Dashboard Node-Red*

Pengujian *dashboard* dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh data yang diterima oleh perangkat *gateway* di darat dapat diteruskan dan ditampilkan pada *platform* Node-RED secara *real-time*. Pengujian ini bertujuan untuk melihat apakah informasi penting dari kapal—seperti titik lokasi (*Latitude* dan *Longitude*), perhitungan jarak, status tombol SOS, kemiringan perahu (MPU6050), dan deteksi genangan air (*water level*)—berhasil divisualisasikan dengan tepat di layar pemantauan. Hasil pengujian fungsionalitas parameter pada *dashboard* Node-RED ini dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Hasil Pengujian *Dashboard Node-Red*

No	Parameter	Status
1	Latitude tampil	Berhasil
2	Longitude tampil	Berhasil
3	Jarak Lokasi tampil	Berhasil
4	Status SOS tampil	Berhasil
5	Status MPU6050 tampil	Berhasil
6	Status water level tampil	Berhasil

Pada Tabel 4.9 hasil pengujian menunjukkan bahwa *dashboard Node-RED* sukses menampilkan seluruh parameter telemetri yang dikirimkan oleh *gateway* secara *real-time* dengan status keberhasilan 100%. Analisis dari tabel tersebut membuktikan bahwa data koordinat GPS berupa *latitude* dan *longitude*, serta informasi jarak lokasi dapat divisualisasikan pada maps dengan akurat sehingga posisi perangkat dapat diketahui secara langsung.

Selain itu, pengujian pada parameter status SOS, kemiringan MPU6050, dan *water level* juga teranalisis berhasil ter-*parsing* dan ditampilkan pada *dashboard* monitoring tanpa adanya *error* data. Ketika terjadi kondisi darurat, tampilan *dashboard* secara responsif berubah sesuai status *emergency* yang diterima.

4.1.7 Pengujian Keseluruhan

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan untuk menguji performa *prototype* dalam merespon berbagai skenario kondisi kapal secara *real-time*. Evaluasi ini

mengintegrasikan masukan manual tombol SOS dengan data sensorik dari sensor *water level* dan MPU6050 untuk mengeksekusi status keselamatan, indikator visual-auditori (LED & *Buzzer*), serta tampilan antarmuka. Data lengkap hasil pengujian sistem penerima tersebut dirangkum pada Tabel 4.10

Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Pada Perangkat Penerima

No	Pengujian	Tombol SOS	Persentase Air	Sudut Kemiringan	Status Sistem	LED & Buzzer	Tampilan LCD dan <i>Dashboard Node-RED</i>
1	Pengujian 1	Off	28%	1°	Normal	Off	Tampil Normal
2	Pengujian 2	Off	47%	20°	Warning	On	Tampil Warning
3	Pengujian 3	Off	51%	67°	Emergency	On	Tampil Emergency
4	Pengujian 4	Off	75%	96°	Capsize Flood	On	Tampil Capsize Flood
5	Pengujian 5	On	0	2°	Capsize Flood	On	Tampil Capsize Flood

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.10, *prototype* yang dirancang berhasil membaca seluruh parameter masukan dan mengubah status sistem berdasarkan ketentuan yang telah ditentukan. Pada pengujian pertama dengan kondisi normal, sistem hanya melakukan monitoring tanpa alarm. Ketika persentase air mencapai 47% dengan kemiringan 20 derajat, sistem memberikan status “Warning” sebagai indikasi awal siaga dengan mengaktifkan LED dan *buzzer*.

Saat persentase air mencapai 51% dengan kemiringan 67 derajat, sistem menampilkan status “Emergency” serta mengaktifkan LED dan *buzzer* sebagai peringatan awal. Ketika persentase air melebihi 75% dengan kemiringan mencapai 96 derajat, sistem menganggap kondisi berbahaya dan langsung mengaktifkan alarm penuh dengan status “Capsize Flood”.

Selanjutnya pada pengujian kelima, saat tombol SOS ditekan secara manual (On) meskipun persentase air dalam kondisi 0% dan kemiringan stabil di 2 derajat, sistem secara responsif langsung mengaktifkan alarm dan mengubah status menjadi “Capsize Flood”. Penggunaan tampilan terintegrasi ini memudahkan pengguna memahami seluruh kondisi keselamatan *prototype* secara *real-time* baik melalui layar LCD lokal maupun *dashboard Node-RED*.

4.2 Interpretasi Temuan Penelitian

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan untuk mengetahui apakah *prototype* yang dirancang telah memenuhi pertanyaan penelitian dan tujuan penelitian yang telah ditetapkan pada Bab I. Pengujian dilakukan dengan mengintegrasikan seluruh bagian sistem mulai dari *transmitter/node*, komunikasi LoRa, *receiver/gateway*, indikator lokal, LCD TFT, hingga *dashboard Node-RED*.

Parameter pengujian meliputi kemampuan sistem dalam memperoleh koordinat GPS, pengiriman data menggunakan LoRa, deteksi kondisi darurat, tampilan *monitoring*, serta respon indikator lokal pada *transmitter* maupun *gateway*. Hasil pengujian keseluruhan sistem menunjukkan bahwa seluruh fungsi utama *prototype* dapat berjalan dengan baik sesuai rancangan penelitian.

Tabel 4. 11 Hasil Pengujian Sistem

No	Parameter Pengujian	Hasil Pengujian	Kriteria Keberhasilan	Status
1	Pembacaan latitude dan longitude GPS Neo-M8	GPS berhasil memperoleh koordinat secara <i>real-time</i> pada area terbuka dengan waktu lock rata-rata 18 detik	Berhasil menampilkan titik koordinat	Berhasil
2	Pengiriman data lokasi menggunakan LoRa	Data lokasi berhasil dikirim dari <i>transmitter</i> menuju gateway hingga jarak ± 500 meter dengan tingkat keberhasilan 90–100%	Berhasil mengirimkan paket dari lora transmitter ke lora reciever	Berhasil
3	Pengiriman status darurat melalui LoRa	Status Normal, Warning, Emergency dan Capsize Flood berhasil diterima gateway dan <i>dashboard</i>	Berhasil mengirim dan menerima status Normal, Warning, Emergency dan Capsize Flood	Berhasil
4	Tombol SOS	Tombol berhasil mengaktifkan status emergency dan alarm lokal	Berhasil memicu status <i>Emergency</i> dan mengaktifkan alarm lokal saat tombol ditekan	Berhasil

No	Parameter Pengujian	Hasil Pengujian	Kriteria Keberhasilan	Status
5	Sensor MPU6050	Sensor berhasil mendeteksi sudut kemiringan normal, warning, emergency, dan capsized	Berhasil mendeteksi perubahan sudut kemiringan sesuai kategori <i>Normal</i> , <i>Warning</i> , <i>Emergency</i> , dan <i>Capsized</i>	Berhasil
6	Sensor water level	Sensor berhasil mendeteksi kondisi <i>Normal</i> , <i>Warning</i> , dan <i>Capsized Flood</i>	Berhasil mendeteksi level ketinggian air pada kondisi <i>Normal</i> , <i>Warning</i> , dan <i>Capsized Flood</i>	Berhasil
7	LCD TFT transmitter	LCD TFT berhasil menampilkan status GPS, sensor, dan pengiriman LoRa secara <i>real-time</i>	Berhasil menampilkan data koordinat GPS, pembacaan sensor, dan status pengiriman LoRa pada antarmuka lokal	Berhasil
8	LED indikator dan buzzer	LED dan buzzer berhasil memberikan indikator sesuai kondisi sistem	Berhasil memberikan peringatan visual (LED) dan suara (<i>Buzzer</i>) sesuai tingkatan kondisi keselamatan sistem	Berhasil
9	Dashboard Node-RED	Data GPS dan status sensor berhasil tampil pada <i>dashboard</i> monitoring	Berhasil menerima serta menampilkan pemetaan GPS dan <i>real-time monitoring</i> status sensor pada antarmuka <i>dashboard</i>	Berhasil

No	Parameter Pengujian	Hasil Pengujian	Kriteria Keberhasilan	Status
10	Respon sistem darurat	Sistem mampu mengirimkan dan menampilkan kondisi darurat	Berhasil mengeksekusi seluruh alur penanganan kondisi darurat secara sinkron dari <i>transmitter</i> hingga tampilan <i>dashboard</i>	Berhasil

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.11, *prototype* yang dirancang mampu menjawab seluruh pertanyaan penelitian yang telah ditetapkan pada Bab I. Sistem berhasil memperoleh koordinat GPS menggunakan modul Neo-M8 dan mengirimkan data lokasi menuju *gateway* menggunakan komunikasi LoRa.

Pengujian menunjukkan bahwa LoRa mampu mengirimkan paket data lokasi dan status darurat dengan tingkat keberhasilan tinggi pada area terbuka. Data yang dikirim berupa koordinat GPS, status SOS, status kemiringan MPU6050, dan kondisi *water level*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa komunikasi LoRa sesuai digunakan untuk pengiriman data kecil pada sistem monitoring keselamatan.

Pada sisi deteksi kondisi darurat, tombol SOS berhasil bekerja sebagai input manual untuk mengaktifkan *emergency*. Selain itu, sensor MPU6050 berhasil mendeteksi perubahan sudut kemiringan kapal, sedangkan sensor *water level* berhasil mendeteksi adanya air yang masuk ke area *prototype* kapal hingga status *Capsize Flood*. Integrasi beberapa sensor membuat sistem memiliki kemampuan deteksi darurat yang lebih baik dibandingkan hanya menggunakan satu sensor saja. LCD TFT *transmitter* juga berhasil menampilkan informasi sistem secara *real-time*, sehingga pengguna dapat mengetahui kondisi perangkat secara langsung tanpa harus membuka *dashboard* monitoring. Hal ini membantu proses monitoring lokal pada sisi *node/transmitter*.

Sementara itu pada sisi monitoring terpusat, *dashboard* Node-RED juga teruji berhasil menampilkan seluruh data GPS dan status sensor secara akurat. Pengujian terhadap respon sistem darurat menunjukkan performa yang sangat

optimal, di mana sistem mampu mentransmisikan serta memvisualisasikan kondisi darurat dari perangkat *node* hingga tampil di *dashboard* darat.

4.3 Perbandingan dengan penelitian terdahulu

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian sistem, prototipe yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan beberapa kebaruan (*novelty*) serta peningkatan performa yang signifikan apabila disandingkan dengan penelitian terdahulu oleh Sugiarto dkk. (2023). Pada penelitian terdahulu, fungsionalitas pemantauan keselamatan perahu berbasis *Internet of Things* (IoT) umumnya hanya berfokus pada pengiriman parameter sensor secara sekuensial menuju pusat data di daratan. Hal tersebut memunculkan keterbatasan di mana kru kapal tidak dapat memantau status fungsional perangkat keselamatan maupun parameter kedaruratan mereka secara mandiri dari atas perahu.

Guna mengatasi celah fungsional tersebut, sistem ini mengintegrasikan arsitektur antarmuka pemantauan ganda (*dual monitoring UI*). Seluruh visualisasi koordinat geospasial GPS Neo-M8, persentase intrusi air, dan status stabilitas sudut kemiringan diolah secara real-time untuk ditampilkan secara lokal pada layar LCD TFT 2.4 inci berbasis driver ILI9341 di atas kapal, bersamaan dengan penerusan telemetri menuju *dashboard* Node-RED di pos darat menggunakan modulasi nirkabel LoRa SX1278 (ILI Technology Corp., 2011; OpenJS Foundation, 2026; Semtech Corporation, 2020).

Selain pada aspek antarmuka, kebaruan mendasar dari penelitian ini terletak pada penerapan algoritma kontrol keputusan multisensor yang mengadopsi logika 4 tingkatan *threshold* kondisi sistem (*Normal*, *Warning*, *Emergency*, dan *Capsize Flood*). Pendekatan multi-ambang batas ini jauh lebih prediktif dalam memetakan eskalasi risiko kecelakaan laut jika dibandingkan dengan model klasifikasi biner sederhana pada sistem konvensional. Integrasi lapis perlindungan dari otomatisasi sensorik (MPU6050 dan *water level*) yang diperkuat oleh interupsi perangkat keras (*hardware interrupt*) dari tombol SOS manual juga berhasil meminimalkan risiko kegagalan deteksi (*false negative*). Dengan demikian, prototipe ini terbukti menawarkan pemodelan instrumentasi keselamatan maritim bernilai ekonomis (*low-cost*) yang jauh lebih aplikatif, informatif, dan adaptif untuk mitigasi bahaya di wilayah *blank spot* seluler (Pratama dkk., 2020; Wibowo dkk., 2021).

4.4 Implikasi Dari Temuan Penelitian

Hasil rancang bangun dan pengujian *prototype* ini memberikan kontribusi yang dapat dijabarkan ke dalam dua sudut pandang implikasi utama, yakni implikasi praktis di lapangan dan implikasi teoretis dalam bidang elektronika:

4.4.1 Implikasi Praktis

Meninjau kembali data statistik kecelakaan maritim nasional pada Bab I, sektor kapal penangkap ikan tradisional berskala kecil masih mendominasi total kecelakaan laut di Indonesia. Tingginya angka fatalitas ini sebagian besar dipicu oleh faktor hidrometeorologi (cuaca buruk) yang memperparah kerentanan armada nelayan berkapasitas di bawah 10 GT (Kementerian Kelautan dan Perikanan, 2024; Kurniawan & Solihin, 2022)

Oleh karena itu, kehadiran *prototype* alat ini menawarkan solusi perangkat mitigasi bernilai ekonomis (*low-cost*) bagi masyarakat pesisir. Penggunaan teknologi LoRa memungkinkan nelayan tetap dapat mengirimkan koordinat lokasi darurat meskipun mereka berlayar di luar batas jangkauan sinyal seluler komersial (*blank spot*). Selain itu, penerapan sistem pemantauan ganda—yakni pemantauan lokal di atas kapal melalui layar LCD TFT dan pemantauan jarak jauh melalui *dashboard Node-RED*—memberikan kemudahan bagi tim Search and Rescue (SAR) untuk memetakan titik koordinat kecelakaan secara presisi dalam hitungan detik. Hal ini diharapkan dapat memangkas waktu respons evakuasi secara signifikan.

4.4.2 Implikasi Teoretis

Secara teoretis kelistrikan dan sistem kontrol, penelitian ini membuktikan secara empiris bahwa penggabungan metode masukan kedaruratan ganda (input manual dan otomatis) menciptakan sistem manajemen bahaya yang jauh lebih tangguh. Kehadiran tombol SOS memberikan kontrol penuh bagi nelayan untuk meminta bantuan seketika. Di sisi lain, kehadiran otomatisasi dari sensor MPU6050 dan *water level* berfungsi sebagai pelapis sistem keamanan (redundansi) yang akan mengambil alih peran pengiriman sinyal darurat apabila nelayan terlempar ke laut atau kehilangan kesadaran sebelum sempat menekan tombol SOS. Arsitektur ini terbukti efektif dalam menekan risiko kegagalan deteksi bahaya dibandingkan sistem yang hanya bergantung pada satu jenis perangkat masukan.

4.5 Keterbatasan Penelitian

Meskipun integrasi sistem fungsional alat ini telah berjalan dengan sukses sesuai rencana penelitian dan mampu menjawab pertanyaan rumusan masalah di Bab I, penulis mengakui adanya beberapa keterbatasan yang memerlukan perhatian dalam pengembangan lanjutan: Batasan Pengujian Lingkungan Aktual: Seluruh pengujian sistem saat ini baru dilaksanakan pada ruang lingkup pemodelan skala laboratorium serta uji jangkauan gelombang radio di area terbuka daratan saja. Alat belum diuji secara langsung di bawah kondisi operasional perairan laut yang sesungguhnya. Pada realitas maritim, perangkat akan menghadapi berbagai tantangan ekstrem yang dinamis, seperti guncangan ombak air, tingkat kelembapan udara tinggi, korosi ekosistem air asin terhadap ketahanan komponen elektronika, serta efek redaman permukaan air laut (sea-surface multipath attenuation) terhadap jangkauan propagasi frekuensi antena LoRa.

Saran Perbaikan untuk Penelitian di Masa Depan:

1. Melakukan pengujian lapangan secara langsung (field testing) dengan menginstalasi perangkat pada kapal nelayan tradisional yang beroperasi di kawasan laut lepas pantai guna menganalisis batas jangkauan jaring transmisi data LoRa di atas permukaan air asin yang sebenarnya.
2. Meningkatkan standarisasi perlindungan fisik perangkat keras (hardware enclosure) dengan menerapkan casing pelindung yang memenuhi kualifikasi standar industri kedap air (minimal IP67) guna mengisolasi komponen mikrokontroler dari korosi air laut jangka panjang.
3. Mengembangkan sistem komunikasi LoRa menjadi arsitektur dua arah (two-way communication) agar pusat kendali darat dapat mengirimkan sinyal umpan balik berupa instruksi penyelamatan darurat atau status evakuasi langsung ke layar LCD TFT kapal nelayan.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

1. Kinerja Pengiriman Data Menggunakan LoRa Sistem komunikasi satu arah (*simplex*) berbasis LoRa terbukti andal sebagai solusi alternatif jaringan di area *blank spot* kelautan. Transmisi paket data telemetri (koordinat GPS, status SOS, sudut kemiringan, dan volume air) mencatat tingkat keberhasilan 100% pada jarak 50–100 m, beroperasi optimal pada 500 m dengan keberhasilan 90%, serta mampu menjangkau 1.000 m dengan keberhasilan 70% pada area berpenghalang.
2. Akurasi Sensor dan Tombol Darurat Manual: Integrasi masukan manual dan multi-sensor otomatis sukses memetakan tingkatan kedaruratan kapal tanpa kegagalan deteksi. Tombol SOS manual merespons instan dengan latensi di bawah 1 detik. Sensor inersia MPU6050 presisi mengklasifikasikan stabilitas kapal dari kondisi Normal hingga *Capsize Flood* pada kemiringan di atas 85° sedangkan sensor *water level* akurat mengonversi konduktivitas analog menjadi persentase intrusi air hingga status *Capsize Flood* pada volume di atas 75%. Seluruh kondisi bahaya berhasil memicu aktuator alarm lokal (LED dan *buzzer*) secara presisi.
3. Keberhasilan Implementasi Sistem Pemantauan Ganda dan Visualisasi Data: Sistem berhasil mengintegrasikan pemantauan visual di dua sisi secara *real-time*. Layar LCD TFT 2.4 inci pada kapal sukses menyajikan data telemetri bagi nelayan, sementara perangkat *gateway* di darat berhasil 100% meneruskan data melalui jaringan Wi-Fi untuk dirender secara interaktif pada peta dan indikator dasbor Node-RED guna mempercepat respons evakuasi.

DAFTAR PUSTAKA

1. Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., & Watteyne, T. (2017). Understanding the Limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 34–40.
2. Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A Survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805.
3. Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. (2016). A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), 1466.
4. Badan Nasional Pencarian dan Pertolongan. (2025). *Surat Edaran Nomor SE 7 Tahun 2025 tentang Tindak Lanjut Hasil Workshop Implementasi dan Rencana Aksi Bersama Keselamatan Pelayaran*. JDIH Basarnas.
5. Chen, Y., Wang, H., & Li, Z. (2020). IoT-based Vessel Attitude Monitoring System using MPU6050. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4), 215.
6. Espressif Systems. (2023). *ESP32 Hardware Design Guidelines* (v3.1). Shanghai Espressif Systems Co., Ltd.
7. Espressif Systems. (2023). *ESP32-WROOM-32 Datasheet* (v3.3). Shanghai Espressif Systems Co., Ltd.
8. Fraden, J. (2010). *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications* (4th ed.). Springer.
9. Georgiou, O., & Raza, U. (2017). Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?. *IEEE Wireless Communications Letters*, 4(5), 626–629.
10. Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The Art of Electronics* (3rd ed.). Cambridge University Press.
11. ILI Technology Corp. (2011). *ILI9341 a-Si TFT LCD Single Chip Driver Specification* (v1.02). ILI Technology Corp.
12. InvenSense. (2013). *MPU-6050 Six-Axis (Gyro + Accelerometer) MEMS MotionTracking Devices Datasheet*. TDK InvenSense.
13. Kamal, R. (2011). *Embedded Systems: Architecture, Programming and Design* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.

14. Kementerian Kelautan dan Perikanan. (2024). *Portal Satu Data Perikanan Tangkap: Jumlah Nelayan Menurut Provinsi*. KKP RI.
15. Komite Nasional Keselamatan Transportasi. (2023). *Laporan Investigasi Kecelakaan Pelayaran Kapal Penangkap Ikan di Indonesia*. KNKT Kementerian Perhubungan RI.
16. Kurniawan, A., & Solihin, I. (2022). Analisis risiko keselamatan kerja nelayan tradisional pada kapal perikanan di bawah 10 GT. *Jurnal Keselamatan Bahari dan Teknologi Kelautan*, 8(2), 114–123.
17. Leaflet. (2026). *Leaflet JavaScript Library for Interactive Maps*. Leaflet Documentation.
18. Noergaard, T. (2012). *Embedded Systems Architecture: A Comprehensive Guide for Engineers and Programmers* (2nd ed.). Elsevier / Newnes.
19. OpenJS Foundation. (2026). *Node-RED Official Documentation & Architecture Specifications*. Node-RED Documentation.
20. Pallas-Areny, R., & Webster, J. G. (2012). *Sensors and Signal Conditioning* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
21. Pop, A. I., Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Does Bidirectional Traffic Do More Harm Than Good in LoRaWAN Based Networks?. *IEEE Communications Letters*, 21(4), 761–764.
22. Pratama, A., Susilo, B., & Hidayat, R. (2020). Sistem Peringatan Dini Stabilitas Kapal Nelayan menggunakan Sensor Accelerometer dan Gyroscope. *Jurnal Teknik Elektro dan Kelautan*, 6(2), 112–120.
23. Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 855–873.
24. Sanchez-Iborra, R., Sanchez-Gomez, J., Ballesta-Viña, J., Cano, M. D., & Skarmeta, A. F. (2019). Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions. *Sensors*, 18(3), 772.
25. Santelices, A. R., et al. (2023). Tracking Device System Using LoRaWAN for Maritime Safety. *Journal of Marine Science and Technology*, 31(2), 101–112.

26. Semtech Corporation. (2020). *SX1276/77/78/79 Datasheet: 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver* (v7.0). Semtech.
27. Sugiarto, D., et al. (2023). Fishing Boat Safety Monitoring System Based on Internet of Things. *International Journal of Marine Engineering*, 15(2), 134–142.
28. u-blox AG. (2021). *NEO-M8 Series: u-blox M8 Concurrent GNSS Modules Datasheet* (v25.0). u-blox AG.

LAMPIRAN

Lampiran 1

Datasheet LoRa SX1278 Ra-02

Parameter Teknis	Nilai / Spesifikasi Resmi
Faktor bentuk / ukuran	SMD-16 (17mm x 16mm x 3.2mm)
Rentang frekuensi kerja	410 MHz – 525 MHz (Default sistem: 433 MHz)
Antarmuka data (interface)	SPI (Serial Peripheral Interface)
Tegangan suplai listrik	2.7 V – 3.6 V (Nilai tipikal rekomendasi: 3.3 V)
Konsumsi arus transmisi (TX)	≤ 120 mA pada daya pancar maksimal +20dBm
Konsumsi arus penerimaan (RX)	≤ 12.15 mA
Arus mode tidur (deep sleep)	0.2 uA – 1.5 uA
Daya pancar maksimum	+20 dBm (Setara dengan daya output 100 mW)
Sensitivitas Penerimaan Sinyal	Mencapai batas minimum -148 dBm
Tipe Modulasi Sinyal	LoRa / FSK / GFSK / MSK / GMSK / OOK
Laju Data Transmisi (Bit Rate)	0.018 kbps hingga 37.5 kbps (Dalam mode LoRa)

Lampiran 2

Datasheet GPS Neo-M8

Parameter Jalur	Nilai / Spesifikasi Resmi
Arsitektur Engine Inti	72-channel u-blox M8 engine (Mendukung GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo)
Tingkat Akurasi Posisi Horisontal	2.0 meter CEP (Circular Error Probable) dengan sinyal optimal
Sensitivitas Pelacakan (Tracking)	-167 dBm
Sensitivitas Penguncian Awal (Cold Start)	-148 dBm
Waktu Penguncian Pertama (TTFF)	Cold Start: 26 detik Hot Start: 1 detik (Kondisi udara terbuka)
Protokol Keluaran Data	NMEA 0183 Versi 4.0, UBX (Biner), RTCM 2.3
Antarmuka Komunikasi Utama	UART Serial (Baud Rate standar: 9600 bps), SPI, I2C / DDC
Tegangan Operasional Chip	2.7 V – 3.6 V (Papan pengembangan GY-NEO8M sudah dilengkapi regulator 5V)
Batas Kecepatan Maksimum	500 meter per detik (m/s)

Lampiran 3

Datasheet MPU6050

Parameter Sensor	Nilai / Spesifikasi Resmi
Konfigurasi Derajat Kebebasan (DoF)	6-Axis Motion Tracking (3-Axis Accelerometer + 3-Axis Gyroscope)
Resolusi Pengubah Analog ke Digital	ADC internal berukuran 16-bit untuk masing-masing sumbu pembacaan
Skala Penuh Pengukuran Gyro	Dapat diprogram: ± 250 , ± 500 , ± 1000 , hingga ± 2000 °/detik (°/s)
Skala Penuh Pengukuran Akselerasi	Dapat diprogram: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, dan $\pm 16g$
Protokol Komunikasi Data	I2C (Inter-Integrated Circuit) dengan kecepatan transfer s.d 400 kHz
Tegangan Suplai Input (VCC)	2.37 V – 3.46 V (Modul GY-521 mendukung input hingga 5 V)
Konsumsi Arus Operasional	Gyroscope aktif: 3.6 mA Accelerometer aktif: 500 uA
Sensor Suhu Internal	Tersedia dengan jangkauan akurasi suhu - 40°C hingga +85°C

Lampiran 4

Datasheet Water Level Sensor

Parameter Elektrikal	Nilai / Spesifikasi Resmi
Tegangan Suplai Listrik (VCC)	3 V – 5 V DC
Arus Konsumsi Operasional	Kurang dari 20 mA (Sangat hemat daya untuk sistem baterai)
Tipe Jenis Sinyal Keluaran	Sinyal Tegangan Analog (Berbanding lurus dengan tinggi permukaan air)
Dimensi Area Deteksi Sensor	40 mm x 16 mm (Panjang konduktor aktif pembaca air)
Suhu Lingkungan Operasional	10°C – 30°C
Kelembapan Batas Operasi	10% – 90% (Kondisi non-kondensasi)

Lampiran 5

Datasheet Esp32

Arsitektur Hardware	Nilai / Spesifikasi Resmi
Chipset Utama Mikrokontroler	ESP32-WROOM-32 (Xtensa <i>Dual-core</i> 32-bit LX6 Microprocessor)
Kecepatan Detak CPU (Clock Speed)	Dapat dikonfigurasi dari 80 MHz, 160 MHz, hingga 240 MHz
Kapasitas Memori Flash Internal	4 Megabyte (MB) / 32 Megabit untuk penyimpanan kode firmware
Kapasitas RAM Internal (SRAM)	520 Kilobyte (KB) SRAM
Konektivitas Nirkabel Terintegrasi	WiFi 802.11 b/g/n (2.4 GHz) & Bluetooth v4.2 BR/EDR dan BLE (Bluetooth Low Energy)
Tegangan Operasional Kerja I/O	3.3 V DC (Pin GPIO tidak toleran terhadap tegangan 5 V / Non-5V tolerant)
Tegangan Input Catu Daya (Vin/USB)	5 V DC via Port Micro USB atau 5 V – 9 V DC via Pin VIN
Jumlah Pin General Purpose I/O	Hingga 30 s.d 36 pin fungsional pada papan pengembangan ESP32
Fitur Analog-to-Digital Converter	12-bit ADC resolusi tinggi (Tersedia hingga 18 saluran input pembacaan)
Fitur Digital-to-Analog Converter	8-bit DAC bawaan hardware (Tersedia sebanyak 2 channels)
Protokol Antarmuka Hardware	3x Hardware UART, 3x SPI, 2x I2C, PWM, I2S, dan Capacitive Touch Sensors

Lampiran 6

Datasheet *Buzzer*

Parameter	Nilai
Tegangan Kerja	3 – 15 VDC
Konsumsi Arus	60 mA
Frekuensi	2048 Hz
Tekanan Suara pada Jarak 10 cm	80 dB pada 12V DC
Resistansi DC Kumparan	60 Ω (Ohm)
Suhu Operasional	-40°C hingga +80°C

Lampiran 7

Hasil Pengujian Parameter GPS Neo-M8

Pembacaan Sensor GPS Neo-M8
Output Serial Monitor X Message (Enter to send message to 'DOIT ESP32 DEVKIT V1' on '/dev/cu.usbserial-0001') New Li <pre> \$GPGSV,3,2,10,06,25,215,,01,13,342,44,11,29,301,32,30,32,321,31*10 \$GPGSV,3,3,10,42,69,290,43,50,66,073,*7C \$GPGLL,0620.29459,S,10706.52936,E,185803.00,A,D*7A \$GPRMC,185804.00,A,0620.29457,S,10706.52936,E,0.280,,180726,,,D*6A \$GPVTG,T,M,0.280,N,0.518,K,D*20 \$GPGGA,185804.00,0620.29457,S,10706.52936,E,2,05,1.64,65.5,M,2.3,M,,0000*41 \$GPGSA,A,3,07,17,30,01,03,,,,,,3.13,1.64,2.66*02 \$GPGSV,3,1,10,01,43,036,29,02,16,030,17,03,32,119,33,04,26,165,18*72 \$GPGSV,3,2,10,06,25,215,,07,73,342,44,17,29,301,31,30,32,327,31*73 \$GPGSV,3,3,10,42,69,290,43,50,66,073,*7C \$GPGLL,0620.29457,S,10706.52936,E,185804.00,A,D*73 \$GPRMC,185805.00,A,0620.29455,S,10706.52938,E,0.028,,180726,,,D*67 \$GPVTG,T,M,0.028,N,0.052,K,D*2B \$GPGGA,185805.00,0620.29455,S,10706.52938,E,2,05,1.64,65.6,M,2.3,M,,0000*4F \$GPGSA,A,3,07,17,30,01,03,,,,,, </pre>

Lampiran 8

Hasil Pengujian Parameter Sensor MPU6050

No	Sudut Kemiringan	Hasil
1	0°	AX: 0.02 AY: 0.03 AZ: 1.00 GX: 0.05 GY: -0.03 GZ: 0.02 Angle X (Pitch) : 0.3 ° Angle Y (Roll) : 0.2 ° -----
2	15°	AX: 0.26 AY: 0.10 AZ: 0.97 GX: 0.12 GY: -0.04 GZ: 0.03 Angle X (Pitch) : 15.2 ° Angle Y (Roll) : 0.5 ° -----
3	30°	AX: 0.50 AY: 0.17 AZ: 0.87 GX: 0.18 GY: -0.06 GZ: 0.04 Angle X (Pitch) : 30.1 ° Angle Y (Roll) : 0.8 ° -----
4	45°	AX: 0.71 AY: 0.24 AZ: 0.71 GX: 0.20 GY: -0.07 GZ: 0.05 Angle X (Pitch) : 45.0 ° Angle Y (Roll) : 1.0 ° -----
5	60°	AX: 0.87 AY: 0.29 AZ: 0.50 GX: 0.23 GY: -0.08 GZ: 0.05 Angle X (Pitch) : 60.1 ° Angle Y (Roll) : 1.2 ° -----
6	90°	AX: 0.99 AY: 0.32 AZ: 0.01 GX: 0.24 GY: -0.09 GZ: 0.06 Angle X (Pitch) : 89.6 ° Angle Y (Roll) : 1.3 ° -----

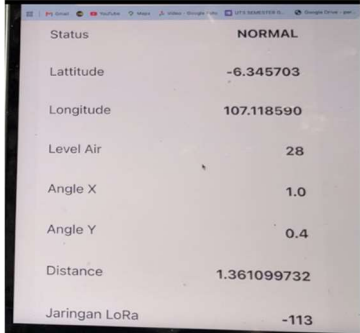
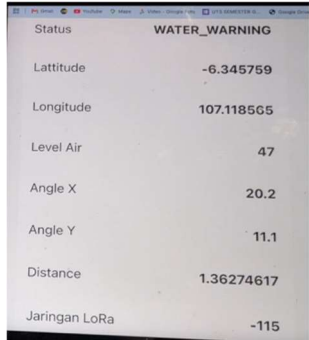
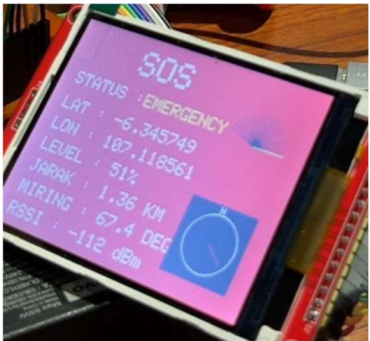
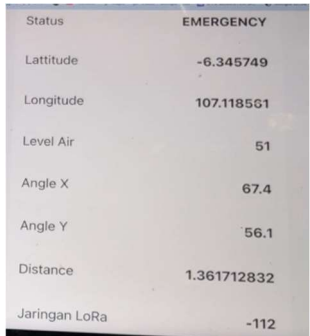
Lampiran 9

Hasil Pengujian Parameter Sensor Water Level

No	Tampilan Data	Tampilan Multi meter
1	ADC : 412 Water Level: 10% Status : NORMAL -----	
2	ADC : 1867 Water Level: 45% Status : WARNING -----	
3	ADC : 2478 Water Level: 60% Status : EMERGENCY -----	
4	ADC : 3176 Water Level: 77% Status : CAPSIZE / FLOOD -----	
5	ADC : 3710 Water Level: 90% Status : CAPSIZE / FLOOD -----	

Lampiran 10

Hasil Pengujian Keseluruhan

Kondisi	Tampilan LCD	Tampilan <i>Node-RED</i>
Normal		
Warning		
Emergency		

Kondisi	Tampilan LCD	Tampilan <i>Node-RED</i>
Capsize Flood	 The LCD display shows the following information: - STATUS : CAPSIZE_FLOOD - LAT : -6.345729 - LON : 107.118567 - LEVEL : 75% - JARAK : 1.35 KM - MTIRING : 96.1 DEG - RSSI : -110 dBm	 The Node-RED interface displays the following data: - Status: CAPSIZE_FLOOD - Latitude: -6.345729 - Longitude: 107.118567 - Level Air: 75 - Angle X: 94.5 - Angle Y: 96.1 - Distance: 1.360866906 - Jaringan LoRa: -110