

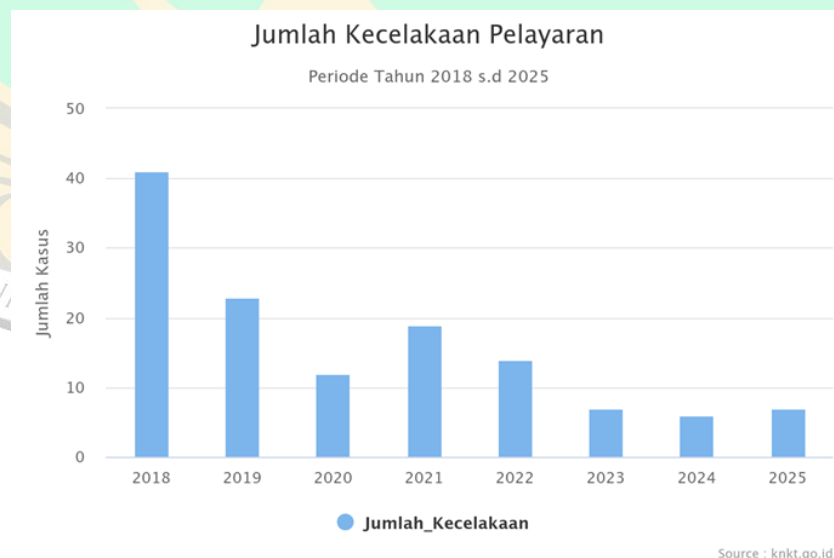
BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

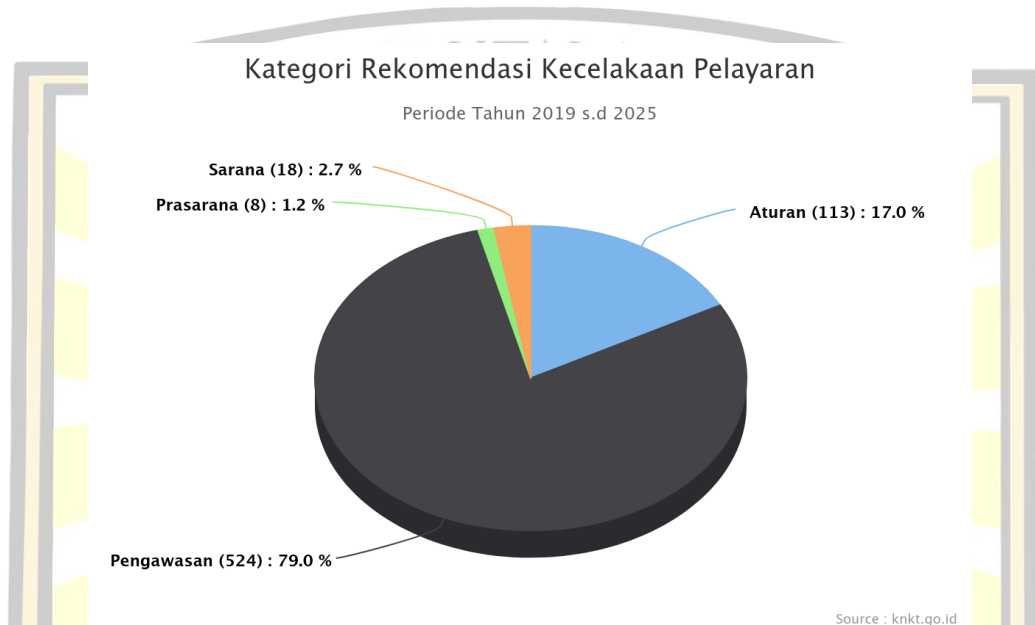
Indonesia merupakan negara kepulauan dengan garis pantai terpanjang kedua di dunia, yakni mencapai 95.181 km [1]. Kondisi ini menjadikan jutaan nelayan tradisional sangat bergantung pada laut sebagai sumber utama mata pencaharian mereka [2]. Namun aktivitas melaut di laut lepas sangat berisiko, terutama karena perubahan cuaca yang mendadak. Data menunjukkan lebih dari 964.000 rumah tangga di Indonesia menggantungkan hidupnya pada penangkapan ikan dan sekitar 24.000 nelayan meninggal setiap tahun saat melaut [2].

Kondisi ini diperburuk oleh kurangnya sistem pemantauan posisi nelayan di laut dan minimnya informasi cuaca *real-time* yang diterima nelayan. Akibatnya, keluarga nelayan seringkali tidak mengetahui keberadaan maupun kondisi anggota keluarganya di laut, sementara para nelayan sendiri kurang siap dalam menghadapi cuaca buruk. Sebagai contoh, pada pertengahan 2021 terjadi insiden 14 kapal nelayan tenggelam akibat cuaca ekstrim di Kalimantan Barat, sehingga puluhan anak buah kapal dinyatakan hilang [3].



Gambar 1. 1 Statistik Jumlah Kecelakaan Pelayaran di Indonesia [4]

Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) secara rutin mengeluarkan peringatan terkait gelombang tinggi, angin kencang, dan cuaca ekstrem di berbagai wilayah perairan Indonesia melalui Portal Cuaca Maritim. Seringnya peringatan ini menjadi bukti bahwa kondisi laut dapat berubah dengan cepat, sehingga nelayan membutuhkan sistem peringatan dini yang bisa langsung diterima di kapal.

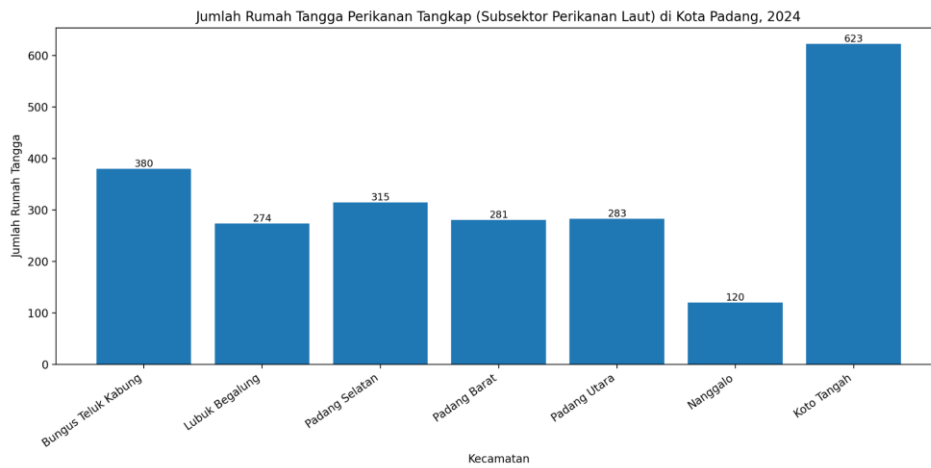


Gambar 1. 2 Kategori Rekomendasi Kecelakaan Pelayaran [4]

Berdasarkan Gambar 1.2 lemahnya pengawasan cuaca di kalangan nelayan yang dipengaruhi keterbatasan perangkat penerima informasi, rendahnya literasi cuaca, membuat perubahan kondisi cuaca yang cepat sering tidak terdeteksi. Pada saat bersamaan, tidak tersedianya mekanisme peringatan langsung kepada nelayan saat melaut, sehingga nelayan tidak memperoleh pemberitahuan *real-time* ketika muncul gelombang tinggi atau angin kencang. Akibatnya, keputusan melaut sering bertumpu pada informasi sebelum keberangkatan, dan dapat meningkatkan risiko kecelakaan.

Kondisi dinamika laut yang dinamis ini memiliki implikasi serius bagi masyarakat pesisir Kota Padang, khususnya bagi nelayan. Berdasarkan data BPS Kota Padang, terdapat 2.276 rumah tangga yang menggantungkan mata pencahariannya sebagai nelayan dengan aktivitas perikanan tangkap laut [5]. Kehidupan dan keselamatan

mereka sangat bergantung pada kondisi cuaca laut yang dapat berubah dengan cepat.



Gambar 1. 3 Statistik Jumlah Rumah Tangga dengan Mata Pencarian sebagai Nelayan [5]

Fenomena gelombang tinggi di perairan Kota Padang telah berulang kali menimbulkan dampak serius, baik berupa kerusakan ekosistem pantai maupun kerugian ekonomi bagi masyarakat. Berdasarkan laporan BMKG Maritim Teluk Bayur tahun 2025, beberapa wilayah perairan di Sumatera Barat, termasuk Padang dan sekitarnya, mengalami potensi gelombang tinggi dengan ketinggian mencapai 2,5–4,0 meter [6]. Studi sebelumnya juga menunjukkan bahwa tinggi gelombang di Pantai Padang dapat mencapai 1,58 m dengan periode gelombang puncak sekitar 5,27 detik [7].

Tabel 1. 1 Data Penduduk Kecamatan yang Di Tepi Pantai Kota Padang

Kecamatan	Laki-laki	Perempuan	Total
Padang Selatan	30.969	31.159	62.128
Padang Barat	21.377	21.972	43.349
Padang Utara	29.886	29.948	59.834
Bungus Teluk Kabung	14.795	14.222	29.017
Koto Tangah	103.661	104.079	207.740

Kecamatan	Laki-laki	Perempuan	Total
Jumlah (5 kecamatan pesisir)	200.688	201.380	402.068

Ancaman gelombang tinggi ini tidak hanya bersifat lokal, tetapi juga tercermin dalam data nasional. Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) mencatat 7 kasus kecelakaan pelayaran di Indonesia yang menewaskan 29 korban jiwa, menggarisbawahi urgensi pemahaman yang lebih baik terhadap dinamika cuaca laut untuk meningkatkan keselamatan pelayaran dan aktivitas masyarakat pesisir [4].

Stakeholder atau para pemangku kepentingan dari permasalahan ini meliputi masyarakat yang tinggal di pesisir pantai, nelayan dan keluarga nelayan, pemerintah (BMKG, Basarnas, Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP), pihak penyelamat dan SAR. Adapun kepentingan masing-masing pihak dalam permasalahan ini adalah sebagai berikut:

1. Masyarakat: masyarakat yang tinggal dan mencari nafkah di daerah pesisir memerlukan informasi terkait keadaan gelombang laut. Ekonomi lokal bergantung pada hasil tangkapan nelayan. Jika nelayan sering mengalami kecelakaan atau hasil tangkapan menurun akibat cuaca buruk tak terduga, pendapatan masyarakat pesisir akan terganggu [8].
2. Nelayan dan keluarga nelayan: Tingginya gelombang meningkatkan risiko kecelakaan laut dan membatasi hari layar, yang berdampak langsung pada penurunan hasil tangkapan dan instabilitas ekonomi rumah tangga.

Apabila permasalahan ini ditangani dengan baik dan efektif, hal ini akan memberikan dampak yang positif dan signifikan bagi seluruh pemangku kepentingan. Berikut beberapa dampak positif yang dapat dihasilkan:

1. Masyarakat pesisir : Stabilitas ekonomi lokal lebih terjaga. Konsistensi hasil tangkapan meningkat dan angka kecelakaan menurun, sehingga pasokan ikan ke pasar tetap terjamin. Biaya sosial akibat kehilangan nyawa maupun alat tangkap berkurang, dan kepercayaan terhadap aktivitas melaut ikut meningkat.

2. Nelayan: Dapat meningkatkan keselamatan kerja nelayan melalui penyediaan informasi kondisi cuaca dan posisi kapal secara real-time, sehingga risiko kecelakaan dan hilangnya kontak saat keadaan darurat dapat diminimalkan. Selain itu, dapat memberikan rasa aman bagi keluarga nelayan karena memungkinkan pemantauan kondisi dan lokasi kapal secara langsung, serta mendukung penanganan darurat yang lebih cepat apabila terjadi insiden.
3. Keluarga Nelayan : Sangat bergantung pada kepulangan selamat nelayan untuk penghidupan. Keluarga merasakan kecemasan tinggi saat nelayan berlayar tanpa kepastian posisi atau kondisi. Informasi lokasi/keadaan nelayan sangat berarti bagi ketenangan mereka.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Berdasarkan hasil kajian sebelumnya, suhu permukaan laut (SPL) di perairan Sumatera Barat berada pada kisaran 27,9°C hingga 33,5°C dengan nilai rata-rata sekitar 30,2°C [9]. Perubahan SPL juga dipengaruhi oleh faktor musiman, sehingga rentangnya dapat berbeda pada tiap periode. Secara umum, kategori SPL berdasarkan musim dapat dirangkum sebagai berikut [10]:

1. SPL Musim Barat/Hujan (27,77 - 29,88°C)
2. SPL Musim Peralihan I (27,39 - 31,56°C)
3. SPL Musim Timur/Kemarau (30,13 - 33,89°C)
4. SPL Musim Peralihan II (24,47 - 30,37°C)

Selain suhu, kondisi perairan juga dapat ditinjau dari tinggi gelombang yang menjadi indikator penting dalam keselamatan pelayaran. Kategori tinggi gelombang laut dapat dijelaskan sebagai berikut [11]:

1. Gelombang Tenang (0.0 – 0.5 meter)
2. Gelombang Rendah (0.5 – 1.25 meter)
3. Gelombang sedang (1.25 – 2.5 meter)
4. Gelombang tinggi (2,5 – 4.0 meter)
5. Gelombang sangat tinggi (4.0 – 6.0 meter)
6. Gelombang ekstrim (6.0 – 9.0 meter).
7. Gelombang ekstrim (> 9.0 meter).

Kecepatan angin turut mempengaruhi pembentukan gelombang serta tingkat risiko aktivitas di laut. Oleh karena itu, klasifikasi angin diperlukan sebagai acuan kondisi operasional di perairan. Adapun kategori kecepatan angin di laut adalah sebagai berikut [12]:

1. Angin lemah, dengan kecepatan kurang dari 5,5 m/s, menyebabkan kondisi laut relatif tenang, dengan tinggi gelombang biasanya di bawah 1 meter. Pada kondisi ini, kegiatan perairan masih relatif aman.
2. Angin sedang, dengan kecepatan 5,5 – 8 m/s, menghasilkan gelombang sedang dengan tinggi 1 – 2 meter. Kondisi ini masih memungkinkan pelayaran atau kegiatan perairan umum, namun perlu kehati-hatian.
3. Angin kuat, dengan kecepatan lebih dari 8 m/s, menimbulkan gelombang tinggi (> 2 meter) yang berpotensi membahayakan keselamatan masyarakat. Pada kondisi ini, perjalanan laut dan kegiatan perairan sebaiknya dihindari karena risiko kecelakaan sangat tinggi.

Selain tinggi gelombang, arah gelombang juga menjadi parameter penting untuk memahami dinamika perairan serta perencanaan *rute* yang lebih aman. Arah gelombang dibagi ke dalam delapan penjuru mata angin sebagai berikut [13]:

1. N (0° atau 360°): Arah Utara
2. NE (45°): Arah Timur Laut
3. E (90°): Arah Timur
4. SE (135°): Arah Tenggara
5. S (180°): Arah Selatan
6. SW (225°): Arah Barat Daya
7. W (270°): Arah Barat
8. NW (315°): Arah Barat Laut.

Terakhir, intensitas curah hujan juga perlu diklasifikasikan karena dapat mempengaruhi jarak pandang, kondisi cuaca, serta bentuk gelombang laut.

Kategori intensitas curah hujan dapat dirangkum sebagai berikut [14]:

1. Hujan Ringan 1,0 – 5,0 mm/jam.
2. Hujan Sedang 5,0 – 10 mm/jam.
3. Hujan Lebat 10 – 20 mm/jam.
4. Hujan Sangat Lebat > 20 mm/jam.

Dari sisi solusi yang ada, beberapa pendekatan telah diterapkan, seperti prakiraan numerik (*WAVEWATCH III*) untuk memprediksi keadaan gelombang dari BMKG. Kelebihan solusi ini yaitu cakupannya luas dan punya kapasitas untuk prediksi keadaan gelombang beberapa hari kedepan. Namun, solusi ini masih memiliki keterbatasan, terutama terkait resolusi lokal, ketersediaan data real-time dan juga mahal. Solusi kedua yaitu *Ina-WAVES* sebagai model prediksi gelombang dari BMKG yang didasarkan pada model gelombang numerik global yang disesuaikan dengan keadaan perairan Indonesia. Solusi ini memiliki kelebihan yaitu cakupan luas dan terintegrasi dengan data angin global. Namun, memiliki batasan data lokal, tidak realtime memprediksi di titik sebenarnya dan juga mahal.

1.1.2 Analisis Masalah dan Konstrain

Permasalahan yang diangkat penulis mencakup beberapa aspek penting yang perlu diperhatikan, yaitu:

1. Aspek Keselamatan

Kondisi cuaca laut yang dinamis, seperti gelombang tinggi dan angin kencang, meningkatkan risiko kecelakaan dan membahayakan keselamatan nelayan. Tanpa informasi cuaca dan lokasi kapal yang akurat, operasi pencarian dan penyelamatan menjadi kurang efisien, memperbesar area pencarian, dan meningkatkan risiko korban jiwa. Kondisi ini diperparah oleh kurangnya sistem pemantauan dan peringatan dini yang dapat memberikan informasi kondisi laut secara akurat dan tepat waktu kepada nelayan dan masyarakat pesisir.

2. Aspek Ekonomi

Gelombang tinggi dan angin kencang membahayakan keselamatan dan mengganggu sektor ekonomi masyarakat pesisir. Perikanan terganggu oleh cuaca buruk, menyebabkan kerugian bagi nelayan. Kerusakan infrastruktur

pesisir, seperti dermaga dan tanggul, serta dampak pada industri pariwisata dan transportasi laut dapat membuat kerugian ekonomi.

3. Aspek Lingkungan

Gelombang laut tinggi berkontribusi terhadap percepatan abrasi pantai yang menyebabkan penyusutan garis pantai serta kerusakan ekosistem pesisir. Dampak tersebut meliputi hilangnya lahan pemukiman masyarakat pesisir, rusaknya infrastruktur pantai, serta degradasi habitat alami seperti mangrove yang berfungsi sebagai pelindung alami dari gelombang dan badai.

Ada beberapa konstrain yang muncul dari tersebut permasalahan yang telah diuraikan sebelumnya. Konstrain mencakup berbagai tantangan yang berpotensi mempengaruhi keberhasilan perancangan dan implementasi solusi.

1. Keterbatasan biaya pengembangan sistem

Sistem dirancang dengan mempertimbangkan keterbatasan anggaran pengembangan tugas akhir, sehingga pemilihan komponen, sensor, serta teknologi komunikasi fokus pada perangkat yang relatif terjangkau. Keterbatasan biaya ini membatasi pemilihan sensor yang memiliki tingkat akurasi tinggi dengan biaya yang mahal. Oleh karena itu, sistem dikembangkan dengan menekan biaya dengan menggunakan komponen yang umum digunakan dengan tetap memperhatikan keakuratan sistem. Sistem harus dirancang dengan biaya implementasi $\leq$ Rp 5.000.000.

2. Keterbatasan waktu pengembangan dan implementasi sistem

Sistem harus dirancang, diimplementasikan, dan diuji dalam rentang waktu $\pm$ 6 bulan sesuai dengan durasi pelaksanaan Tugas Akhir. Keterbatasan waktu ini mempengaruhi variasi kondisi lingkungan yang dapat diuji secara langsung di lapangan. Oleh karena itu, pengujian sistem difokuskan pada kondisi yang realistis dan sering terjadi pada aktivitas nelayan serta didukung oleh data historis untuk melengkapi keterbatasan pengujian lapangan.

3. Penggunaan satu sistem untuk 1 kapal nelayan

Konstrain ini untuk memastikan keandalan pengukuran dan relevansi data terhadap kondisi nyata yang dialami oleh masing-masing kapal. Setiap

kapal memiliki karakteristik operasional, lokasi, dan kondisi lingkungan yang berbeda, sehingga penggunaan 1 sistem per kapal memungkinkan kemampuan sistem untuk memberikan informasi aktual dari kapal tersebut.

4. Sistem bukan pengganti BMKG

Sistem tidak dimaksudkan untuk pengganti sistem peringatan dini resmi yang dikeluarkan BMKG. Sistem berperan sebagai sistem pemantauan dan peringatan dini lokal berbasis pengukuran langsung di lapangan. Tujuan sistem ini adalah untuk memberikan informasi tambahan kepada nelayan dan masyarakat pesisir.

5. Kesesuaian terhadap Standarisasi dan Regulasi

Dari aspek hukum dan regulasi, sistem yang dirancang harus mematuhi beberapa ketentuan yang berlaku. Penggunaan jaringan komunikasi nirkabel mengacu pada Peraturan Menteri Komunikasi dan Informatika Nomor 2 Tahun 2025 terkait penggunaan spektrum frekuensi radio [15]. Klasifikasi kondisi gelombang dan cuaca laut disesuaikan dengan standar yang ditetapkan oleh BMKG agar informasi yang disampaikan selaras dengan otoritas nasional [11]. Keakuratan dan konsistensi hasil pengukuran mengikuti RSNI 3 ISO 5725-1:2023 [16]. Selain itu, sistem ini berkaitan dengan keselamatan pelayaran sehingga harus memperhatikan Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2008 tentang Pelayaran, di mana sistem berperan sebagai pendukung informasi keselamatan dan bukan pengganti peringatan resmi [17]. Dari sisi mitigasi risiko bencana, sistem ini juga relevan dengan Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana [18].

1.1.3 Kebutuhan Yang Harus Dipenuhi

Berdasarkan analisis yang dilakukan terhadap rancangan sistem untuk masyarakat di tepi pantai, alat yang nantinya akan dirancang diharapkan untuk dapat memenuhi sejumlah parameter berikut:

1. Sistem yang dirancang harus mampu mendeteksi kondisi cuaca di laut dengan lima parameter utama: tinggi gelombang, arah gelombang, kecepatan angin, curah hujan, dan suhu permukaan laut.

2. Sistem yang dirancang harus mampu mengkategorikan kondisi cuaca di laut berdasarkan hasil pembacaan sistem dengan kategori aman, waspada dan bahaya.
3. Sistem yang dirancang harus mampu memberikan peringatan dini berupa waspada serta bahaya kepada keluarga nelayan dan masyarakat di tepi pantai mengenai kondisi cuaca di laut.
4. Sistem harus tahan terhadap percikan air karena akan beroperasi laut.

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan kebutuhan di atas, tujuan dari sistem ini adalah merancang dan mengembangkan sebuah sistem deteksi kondisi cuaca di laut secara *real-time* dan memberikan data kondisi cuaca yang akurat. Data ini akan diintegrasikan dengan platform visualisasi untuk disebarkan kepada masyarakat pesisir dan keluarga nelayan agar mempercepat respons dan meminimalkan keterlambatan bantuan saat terjadi keadaan darurat.

1.2 Solusi

1.2.1 Karakteristik Produk

1. Fitur Dasar

Fitur dasar yang harus dipenuhi antara lain:

1. *Sensing Capability*

Kemampuan untuk melakukan pengukuran parameter kondisi cuaca di laut secara akurat seperti ketinggian gelombang, kecepatan angin, curah hujan dan suhu. Kemampuan ini penting agar data yang dikumpulkan dapat mewakili keadaan sebenarnya.

2. *Computing Performance*

Sistem harus mampu menganalisis data dari berbagai sensor menggunakan komputasi yang kuat dengan cepat dan akurat. Hal ini memastikan hasil pengukuran bisa langsung diolah menjadi informasi yang berguna untuk melakukan klasifikasi kondisi cuaca laut.

3. *Notification Capability*

Sistem harus mampu memberikan notifikasi secara otomatis mengenai keadaan gelombang kepada masyarakat. Notifikasi ini dapat dikirim melalui aplikasi yang mudah diakses oleh Masyarakat pesisir.

4. *Real-time Database*

Data yang dikirim dari sensor perlu langsung disimpan dan diperbarui secara real-time di database. Dengan begitu, informasi yang ditampilkan selalu update.

5. *Network Capability*

Sistem dapat memiliki komunikasi yang stabil dengan berbagai kondisi jaringan. Meskipun berada di wilayah pesisir dengan keadaan jaringan terbatas, kondisi jaringan harus tetap stabil.

6. *Mobile Integrated*

Sistem yang dirancang dapat terhubung ke perangkat mobile untuk menampilkan informasi mengenai kondisi cuaca. Sehingga informasi ini dapat dengan mudah diakses oleh pengguna.

7. *Waterproof*

Sistem yang dibangun akan ditempatkan di lautan yang rawan terhadap air laut, sehingga sistem harus tahan terhadap air laut.

2. Fitur Tambahan

a. *Monitoring Capability*

Sistem dilengkapi dengan pemantauan kondisi cuaca yang ada di sekitar kapal seperti tinggi gelombang, kecepatan angin, suhu, hujan, arah dan lokasi dari kapal nelayan, sehingga masyarakat yang di pesisir dan keluarga dari nelayan bisa mengetahui kondisi cuaca yang ada pada saat nelayan berlaut agar dapat melakukan tindakan cepat apabila terjadi keadaan darurat.

b. *Weather prediction*

Sistem yang dirancang dapat memprediksi kondisi cuaca 1 hari ke depan berdasarkan data cuaca yang sudah dikumpulkan pada hari sebelumnya. Dengan adanya fitur prediksi cuaca nelayan bisa mengetahui bagaimana kondisi cuaca keesokan harinya sebelum pergi berlayar di laut.

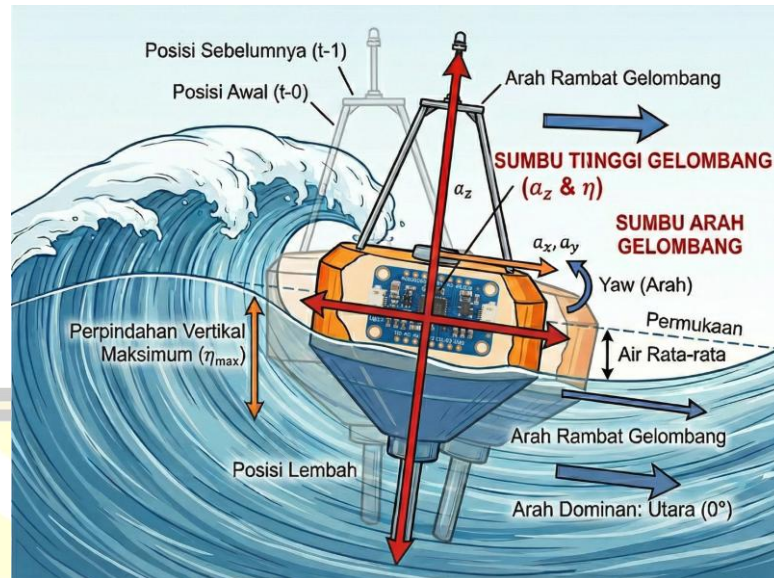
c. *Low Power Consumption*

Nelayan berlayar di laut selama 8-10 jam yang di mana sistem harus beroperasi selama nelayan pergi melaut, sehingga efisiensi energi sangat penting dan perlu di perhatikan. Perangkat sensing dan komputasi yang digunakan dipilih agar memiliki daya konsumsi rendah sehingga sistem dapat stabil dalam jangka panjang selama nelayan berlayar.

1.2.2 Usulan Solusi

1.2.2.1 Solusi 1: Sistem Monitoring Tinggi Gelombang dan Cuaca Laut dengan Wave buoy Menggunakan Metode *Random Forest* dan *Long Short-Term Memory* Terintegrasi GPS dan Jaringan LoRaWAN

Solusi ini dirancang untuk memonitoring kondisi cuaca laut secara real-time dengan memanfaatkan wave buoy yang dilengkapi dengan sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*) dan GPS. *Wave buoy* ini ditempatkan di permukaan laut dekat kapal untuk merekam gerakan vertikal dan rotasi dari permukaan laut. Pemilihan *wave buoy* untuk mengukur tinggi dan arah gelombang karena buoy mengukur secara langsung perpindahan vertikal dan horizontal gelombang. Sensor IMU mencatat perubahan posisi vertikal (*heave*), kemiringan (*pitch* dan *roll*), serta arah rotasi (*yaw*) yang menggambarkan arah gelombang, kemudian memberikan informasi yang berguna mengenai tinggi dan arah gelombang laut. Data yang terkumpul dari sensor IMU kemudian digabungkan dengan data posisi yang diperoleh dari GPS yang ada di kapal, yang memungkinkan untuk mengetahui lokasi tepat dari pengukuran gelombang. Untuk mengukur tinggi gelombang, sistem ini menggunakan prinsip analisis gerakan permukaan laut dengan mengukur perubahan posisi vertikal (*heave*), kemiringan (*pitch* dan *roll*), serta arah rotasi (*yaw*) dari sensor gerak seperti IMU (*Inertial Measurement Unit*) yang dipasang pada buoy terapung.



Gambar 1. 4 Ilustrasi pengukuran tinggi dan arah gelombang

Menurut teori dinamika fluida laut, tinggi gelombang dapat direpresentasikan dari amplitudo osilasi vertikal buoy yang mengapung mengikuti gerakan gelombang permukaan. Besarnya gerakan vertikal $\eta(t)$ dapat diturunkan dari percepatan $a_z(\tau)$ yang diukur sensor IMU menggunakan rumus integral dua kali:

$$\eta(t) = \iint_0^t a_z(\tau) d\tau^2 \dots\dots\dots (1.1)$$

Keterangan:

$\eta(t)$ = Elevasi yang merupakan fluktuasi ketinggian gelombang permukaan laut

$a_z(\tau)$ = Nilai percepatan pada sumbu Z

Sistem ini juga menggunakan sensor cuaca juga digunakan untuk memantau parameter penting lainnya, seperti kecepatan angin, suhu udara, dan curah hujan. Kecepatan angin di laut dapat mempengaruhi tinggi gelombang, sehingga penting untuk terus memantau perubahan kecepatan angin. Sensor suhu digunakan untuk mengukur suhu udara sekitar yang dapat memberikan gambaran terkait dengan kondisi atmosfer dan dampaknya terhadap kecepatan angin. Sementara itu, sensor curah hujan digunakan untuk mendeteksi intensitas hujan yang dapat mempengaruhi tinggi gelombang.

Sensor Kecepatan angin digunakan untuk mendeteksi kecepatan angin di laut, karena semakin meningkat kecepatan angin akan membuat tinggi gelombang meningkat. Kecepatan angin dapat dihitung dengan persamaan 1.2

$$v = k \times f \dots\dots\dots (1.2)$$

Keterangan :

v = kecepatan angin (m/s)

f = frekuensi putaran (putaran per detik)

k = konstanta kalibrasi alat (tergantung desain alat)

Sensor suhu pada sistem ini memiliki peran krusial karena perubahan suhu permukaan laut (SPL) dan suhu udara berkorelasi langsung dengan stabilitas atmosfer yang dapat memicu peningkatan kecepatan angin. Sensor yang digunakan berjenis *transducer* termal (seperti termistor atau sensor *band-gap*) yang mengubah besaran panas menjadi sinyal listrik.

Prinsip kerjanya didasarkan pada perubahan resistansi atau tegangan keluaran material semikonduktor akibat perubahan energi termal di sekitarnya. Mikrokontroler akan membaca sinyal analog berupa tegangan (V_{out}) yang dihasilkan sensor, kemudian mengkonversinya menjadi satuan derajat *Celcius* ($^{\circ}\text{C}$) menggunakan persamaan linear berdasarkan karakteristik sensitivitas sensor.

Rumus konversi tegangan menjadi suhu adalah sebagai berikut:

$$T = (V_{out} \times S) \pm C \dots\dots\dots (1.3)$$

Keterangan:

T = Suhu terukur dalam derajat *Celcius* ($^{\circ}\text{C}$)

V_{out} = Tegangan keluaran yang dibaca dari sensor (*Volt*)

S = *Scale Factor* atau sensitivitas sensor

C = Konstanta kalibrasi atau nilai *offset* untuk penyesuaian akurasi

Intensitas curah hujan merupakan parameter hidrometeorologi yang memiliki korelasi kompleks dengan keselamatan pelayaran. Hujan dengan intensitas tinggi tidak hanya membatasi jarak pandang (*visibility*) nelayan, tetapi juga sering kali menyertai sistem badai yang membawa angin kencang dan gelombang tinggi. Meskipun secara fisik tetesan hujan dapat memberikan efek redaman (*damping*) pada riak gelombang kecil, kehadiran hujan lebat tetap dikategorikan sebagai kondisi waspada atau bahaya dalam navigasi laut.

Sistem pengukuran curah hujan dirancang untuk menghitung volume air yang jatuh per satuan waktu (intensitas). Prinsip kerja yang diterapkan adalah metode penakaran volumetrik otomatis. Alat penakar akan menampung air hujan yang masuk melalui corong pengumpul. Setiap kali air mencapai volume ambang batas tertentu (resolusi alat), mekanisme internal akan memicu pengiriman sinyal pulsa digital (*interrupt signal*) ke mikrokontroler. Sistem tidak mengukur ketinggian air secara statis, melainkan menghitung frekuensi kejadian "penuh"-nya penakar tersebut dalam durasi waktu tertentu.

Data yang diolah adalah jumlah pulsa yang masuk, yang merepresentasikan akumulasi volume hujan. Untuk mendapatkan nilai intensitas curah hujan dalam satuan milimeter per jam (mm/jam), sistem menggunakan rumus integrasi waktu sebagai berikut:

$$I = \frac{\sum N \times r}{t} \dots\dots\dots (1.4)$$

Keterangan:

I = Intensitas curah hujan terhitung (mm/jam).

$\sum N$ = Akumulasi jumlah sinyal pulsa atau cacahan yang terdeteksi oleh mikrokontroler selama periode pengukuran.

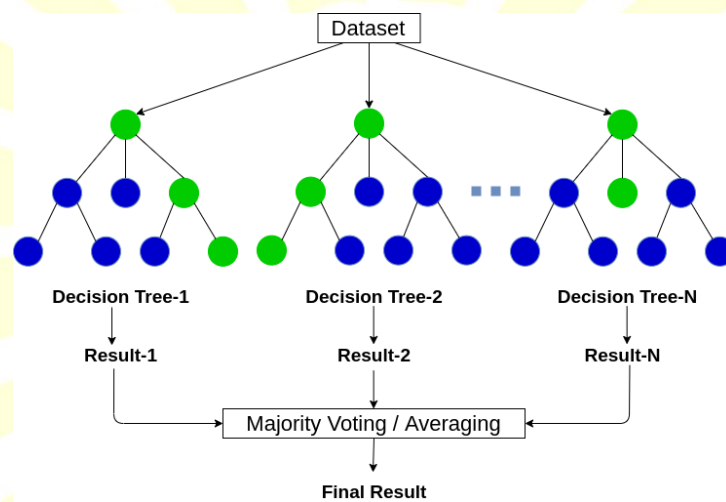
r = Resolusi alat ukur, yaitu ekuivalensi kedalaman hujan untuk setiap satu sinyal pulsa (biasanya dalam satuan mm, contoh: 0.2 mm/pulsa).

t = Durasi waktu pengambilan sampel data (dalam satuan jam).

Data yang terkumpul dari sensor IMU berupa data tinggi gelombang dan kecepatan angin kemudian dianalisis dengan menggunakan metode Random Forest untuk mengklasifikasikan kondisi cuaca laut ke dalam kategori Aman, Waspada, atau Bahaya. Metode Random Forest dipilih sebagai teknik klasifikasi utama dalam sistem. Random Forest adalah metode ensemble learning yang membangun banyak pohon keputusan (decision trees) dan menggabungkan hasil klasifikasinya melalui voting mayoritas. Cara kerja *Random Forest* yaitu dengan membangun sejumlah pohon keputusan (*decision tree*) dari *subset* data secara acak, kemudian hasil klasifikasi dari tiap pohon digabungkan untuk menghasilkan keputusan akhir

(*voting*). Metode ini efektif untuk menangani data sensor yang bervariasi dan memiliki *noise*.

Kelebihan utama dari Random Forest adalah kemampuannya menangani data yang berisik dan akurasi yang tinggi dalam memprediksi kondisi cuaca laut berdasarkan data sensor yang bervariasi. Random Forest juga dapat menangani berbagai fitur input sekaligus, dan mampu menangkap hubungan non-linear antar fitur, seperti mengklasifikasikan kondisi "bahaya" meskipun angin sedang tetapi gelombang sangat tinggi.



Gambar 1. 5 Algoritma Random Forest

Dengan memanfaatkan data historis cuaca laut yang dijadikan dataset, Random Forest dilatih untuk mengenali pola-pola yang mewakili kondisi laut yang aman, waspada, atau berbahaya. Dalam konteks klasifikasi, kondisi laut dikategorikan sebagai berikut:

1. Aman: kecepatan angin $< 5,5$ m/s dan tinggi gelombang $< 0,75$ meter
2. Waspada: kecepatan angin $5,5-8$ m/s dan tinggi gelombang $0,75-1,25$ meter
3. Bahaya: kecepatan angin > 8 m/s dan gelombang $> 1,25$ meter

Dengan aturan klasifikasi ini, sistem dapat memberikan prediksi kondisi laut yang akurat dan berguna, sehingga membantu nelayan dan pihak berwenang mengambil keputusan yang tepat sebelum dan selama pelayaran.

Hasil klasifikasi kondisi cuaca akan diinformasikan kepada kapal nelayan melalui indikator visual, sehingga ketika kondisi cuaca masuk dalam kategori bahaya,

nelayan dapat segera mengambil tindakan untuk kembali ke pelabuhan dengan aman.

Komponen sistem ini terbagi menjadi dua bagian utama:

1. Di *wave buoy*, terdapat sensor IMU yang mengukur tinggi gelombang melalui perubahan posisi vertikal, kemiringan, dan arah rotasi buoy yang mengapung.
2. Di kapal, terdapat sensor kecepatan angin, suhu udara, curah hujan, dan GPS yang mengukur kondisi cuaca dan lokasi kapal secara terus-menerus.

Kemudian, hasil klasifikasi kondisi cuaca oleh sistem, data GPS, arah gelombang, suhu, dan curah hujan akan dikirimkan secara real-time melalui jaringan LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) yang memiliki jangkauan luas dan konsumsi daya rendah, sehingga ideal untuk pemantauan berkelanjutan. Data yang dikirim menggunakan jaringan LoRaWAN kemudian ditampilkan pada dashboard dan dapat memberikan peringatan dini melalui aplikasi mobile.

Selain memonitoring kondisi *real-time* menggunakan *Random Forest*, sistem ini dikembangkan untuk memiliki kemampuan memprediksi kondisi cuaca laut untuk 24 jam ke depan. Untuk tujuan *forecasting* ini, digunakan algoritma yaitu *Long Short-Term Memory* (LSTM). LSTM dipilih karena keunggulannya dalam mempelajari pola jangka panjang dari data deret waktu (*time-series*) dan kemampuannya mengatasi masalah *vanishing gradient* yang sering terjadi pada algoritma RNN biasa, sehingga sangat cocok untuk menganalisis tren fluktuasi cuaca laut yang dinamis.

Dalam membangun model prediksi yang akurat, sistem ini menggunakan empat parameter fisika utama sebagai variabel input yang memiliki korelasi kuat terhadap dinamika laut. Parameter pertama adalah tinggi gelombang, yang datanya digunakan untuk memetakan tren energi gelombang apakah sedang dalam fase peningkatan atau penurunan signifikan. Parameter kedua adalah kecepatan angin, yang menjadi variabel prediktor paling krusial karena angin merupakan gaya utama pembentuk gelombang laut; peningkatan kecepatan angin hari ini adalah indikator kuat tingginya gelombang di esok hari. Parameter ketiga adalah intensitas curah hujan, yang berfungsi mendeteksi keberadaan sistem badai lokal yang dapat

mempengaruhi jarak pandang dan stabilitas pelayaran. Parameter terakhir adalah suhu permukaan laut, di mana data historis suhu digunakan untuk mendeteksi anomali pemanasan laut yang sering kali menjadi pemicu instabilitas atmosfer dan cuaca ekstrem. Integrasi keempat parameter ini memungkinkan model LSTM memahami interaksi kompleks antara atmosfer dan laut untuk menghasilkan prediksi status keamanan yang presisi.

Dengan sistem ini, masyarakat dan pihak berwenang dapat memantau kondisi gelombang secara *real-time*, sehingga risiko yang ditimbulkan oleh gelombang laut dapat diminimalkan.

1.2.2.2 Solusi 2: Sistem Monitoring Tinggi Gelombang dan Cuaca Laut Menggunakan Sensor IMU dengan Metode Decision Tree Terintegrasi GPS dan Jaringan LoRaWAN

Solusi ini dirancang untuk memantau kondisi cuaca laut secara *real-time* dengan mendeteksi berbagai parameter penting, seperti tinggi gelombang, kecepatan angin, suhu udara, dan curah hujan di sekitar kapal nelayan. Sistem ini dipasang langsung pada kapal nelayan, sehingga memungkinkan pemantauan kondisi cuaca secara langsung di lingkungan sekitar kapal. Untuk mendeteksi tinggi gelombang, digunakan sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*) yang dipadukan dengan teknologi komunikasi LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*), serta algoritma *Decision Tree* untuk mengklasifikasikan kondisi cuaca di sekitar kapal.

Decision Tree adalah algoritma pembelajaran terawasi non-parametrik yang digunakan untuk klasifikasi dan regresi. Algoritma ini memiliki struktur hierarkis yang terdiri dari *root node*, cabang, *internal node*, dan *leaf node*, di mana *leaf node* berfungsi sebagai keputusan akhir dalam klasifikasi kondisi cuaca.

Sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) adalah perangkat elektronik yang mengukur percepatan linier dan kecepatan sudut pada tiga sumbu ruang (X, Y, Z) menggunakan kombinasi akselerometer, giroskop, dan magnetometer. Sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*) pada sistem deteksi tinggi gelombang bekerja dengan menggabungkan tiga sensor utama: akselerometer, giroskop, dan magnetometer. Akselerometer mengukur percepatan *linear* pada tiga sumbu (x, y, z), yang

digunakan untuk mendeteksi pergerakan kapal akibat gelombang laut, terutama pergerakan vertikal (*heave*) yang berkaitan dengan tinggi gelombang. Girooskop, yang mengukur kecepatan sudut atau rotasi kapal, membantu mendeteksi kemiringan kapal (*roll* dan *pitch*) yang disebabkan oleh gelombang, memberikan data penting tentang kestabilan kapal. Sementara itu, magnetometer mendeteksi orientasi kapal relatif terhadap kutub utara magnet Bumi, memberikan informasi tambahan untuk mengoreksi orientasi kapal di laut. Dengan menggabungkan data dari ketiga sensor ini, sistem IMU dapat melacak posisi, orientasi, dan pergerakan kapal secara akurat, serta memberikan estimasi tinggi gelombang. Hal ini dapat memberikan peringatan dini ketika kondisi laut memburuk, meningkatkan keselamatan nelayan selama pelayaran.

Besarnya gerakan vertikal $\eta(t)$ dapat diturunkan dari percepatan $a_z(t)$ yang diukur sensor IMU menggunakan rumus integral dua kali:

$$\eta(t) = \iint_0^t a_z(\tau) d\tau^2 \dots\dots\dots (1.1)$$

Keterangan:

$\eta(t)$ = Elevasi yang merupakan fluktuasi ketinggian gelombang permukaan laut

$a_z(\tau)$ = Nilai percepatan pada sumbu Z

Secara fisik, sistem ini terdiri dari sensor cuaca yang digunakan untuk memantau kecepatan angin, suhu udara, dan curah hujan. Kecepatan angin di laut dapat mempengaruhi tinggi gelombang, sehingga penting untuk terus memantau perubahan kecepatan angin. Sensor suhu digunakan untuk mengukur suhu udara sekitar yang dapat memberikan gambaran terkait dengan kondisi atmosfer dan dampaknya terhadap kecepatan angin. Sementara itu, sensor curah hujan digunakan untuk mendeteksi intensitas hujan yang dapat mempengaruhi tinggi gelombang.

Sensor Kecepatan angin digunakan untuk mendeteksi kecepatan angin di laut, karena semakin meningkat kecepatan angin akan membuat tinggi gelombang meningkat. Berikut rumus untuk mengukur kecepatan angin:

$$v = k \times f \dots\dots\dots (1.2)$$

Keterangan :

v = kecepatan angin (m/s)

f = frekuensi putaran (putaran per detik)

k = konstanta kalibrasi alat (tergantung desain alat)

Untuk mendapatkan nilai suhu, mikrokontroler akan membaca sinyal analog berupa tegangan (V_{out}) yang dihasilkan sensor, kemudian mengkonversinya menjadi satuan derajat *Celcius* ($^{\circ}\text{C}$) menggunakan persamaan *linear* berdasarkan karakteristik sensitivitas sensor.

Rumus konversi tegangan menjadi suhu adalah sebagai berikut:

$$T = (V_{out} \times S) \pm C \dots\dots\dots (1.3)$$

Keterangan:

T = Suhu terukur dalam derajat *Celcius* ($^{\circ}\text{C}$)

V_{out} = Tegangan keluaran yang dibaca dari sensor (Volt)

S = *Scale Factor* atau sensitivitas sensor

C = Konstanta kalibrasi atau nilai *offset* untuk penyesuaian akurasi

Untuk mendapatkan nilai intensitas curah hujan dalam satuan milimeter per jam (mm/jam), sistem menggunakan rumus integrasi waktu sebagai berikut:

$$I = \frac{\sum N \times r}{t} \dots\dots\dots (1.4)$$

Keterangan:

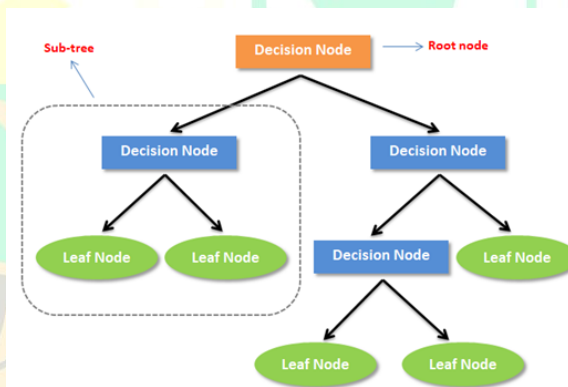
I = Intensitas curah hujan terhitung (mm/jam).

ΣN = Akumulasi jumlah sinyal pulsa atau cacahan yang terdeteksi oleh mikrokontroler selama periode pengukuran.

r = Resolusi alat ukur, yaitu ekuivalensi kedalaman hujan untuk setiap satu sinyal pulsa (biasanya dalam satuan mm, contoh: 0.2 mm/pulsa).

t = Durasi waktu pengambilan sampel data (dalam satuan jam).

Data yang terkumpul dari sensor IMU berupa data tinggi gelombang dan kecepatan angin kemudian dianalisis dengan menggunakan algoritma *Decision Tree*, yang akan mengklasifikasikan status kapal berdasarkan tinggi gelombang dan kecepatan angin yang terdeteksi. *Decision Tree* adalah algoritma *machine learning* yang menggunakan struktur pohon keputusan hierarkis untuk memetakan kondisi *input* seperti tinggi gelombang, kecepatan angin, dan kemiringan kapal hingga mencapai keputusan *output*. Algoritma ini dipilih karena sifatnya yang mudah di pahami dan diinterpretasikan, serta logika keputusan yang dihasilkan menyerupai cara manusia membuat keputusan berbasis aturan *if-then* dalam kehidupan sehari-hari [19].



Gambar 1. 6 Algoritma Decision Tree

Dengan memanfaatkan data historis cuaca laut, model Decision Tree dilatih untuk mengenali pola-pola yang mewakili kondisi laut yang aman, waspada, atau berbahaya. Dalam konteks klasifikasi, kondisi laut dikategorikan sebagai berikut:

1. Aman: kecepatan angin $< 5,5$ m/s dan tinggi gelombang $< 0,75$ meter
2. Waspada: kecepatan angin $5,5-8$ m/s dan tinggi gelombang $0,75-1,25$ meter
3. Bahaya: kecepatan angin > 8 m/s dan gelombang $> 1,25$ meter

Dengan aturan klasifikasi ini, sistem dapat memberikan prediksi kondisi laut yang akurat dan berguna, sehingga membantu nelayan dan pihak berwenang mengambil keputusan yang tepat sebelum dan selama pelayaran.

Setelah diproses, data hasil klasifikasi dan data curah hujan, suhu udara, arah gelombang dan GPS koordinat kapal dikirimkan melalui komunikasi jaringan LoRaWAN ditampilkan pada dashboard dan dapat memberikan peringatan dini melalui aplikasi mobile.

Selain memonitoring kondisi *real-time* menggunakan *Random Forest*, sistem ini dikembangkan untuk memiliki kemampuan memprediksi kondisi cuaca laut untuk 24 jam ke depan. Untuk tujuan *forecasting* ini, digunakan algoritma yaitu *Long Short-Term Memory* (LSTM). LSTM dipilih karena keunggulannya dalam mempelajari pola jangka panjang dari data deret waktu (*time-series*) dan kemampuannya mengatasi masalah *vanishing gradient* yang sering terjadi pada algoritma RNN biasa, sehingga sangat cocok untuk menganalisis tren fluktuasi cuaca laut yang dinamis.

Dalam membangun model prediksi yang akurat, sistem ini menggunakan empat parameter fisika utama sebagai variabel input yang memiliki korelasi kuat terhadap dinamika laut. Parameter pertama adalah tinggi gelombang, yang datanya digunakan untuk memetakan tren energi gelombang apakah sedang dalam fase peningkatan atau penurunan signifikan. Parameter kedua adalah kecepatan angin, yang menjadi variabel prediktor paling krusial karena angin merupakan gaya utama pembentuk gelombang laut; peningkatan kecepatan angin hari ini adalah indikator kuat tingginya gelombang di esok hari. Parameter ketiga adalah intensitas curah hujan, yang berfungsi mendeteksi keberadaan sistem badai lokal yang dapat mempengaruhi jarak pandang dan stabilitas pelayaran. Parameter terakhir adalah suhu permukaan laut, di mana data historis suhu digunakan untuk mendeteksi anomali pemanasan laut yang sering kali menjadi pemicu instabilitas atmosfer dan cuaca ekstrem. Integrasi keempat parameter ini memungkinkan model LSTM memahami interaksi kompleks antara atmosfer dan laut untuk menghasilkan prediksi status keamanan yang presisi.

Dengan sistem ini, masyarakat dan pihak berwenang dapat memantau kondisi gelombang secara real-time, sehingga risiko yang ditimbulkan oleh gelombang laut dapat diminimalkan.

Selain memberikan peringatan kepada masyarakat pesisir, sistem juga memberikan peringatan kepada nelayan yang berada di kapal melalui indikator visual, sehingga ketika kondisi cuaca masuk dalam kategori bahaya, nelayan dapat segera mengambil tindakan untuk kembali ke pelabuhan dengan aman.

1.2.2.3 Solusi 3: Sistem Monitoring Kondisi Cuaca dan Tinggi Gelombang Laut Berbasis Pengukuran Jarak Permukaan dengan Fuzzy Logic menggunakan Integrasi Jaringan LoRaWAN

Solusi ini menggunakan sensor jarak yang dipasang di tiang statis untuk mengukur jarak permukaan sensor ke permukaan air. Selain itu pada tiang ini dipasang juga sensor kecepatan angin, suhu, dan hujan yang akan mendeteksi keadaan angin, suhu, dan hujan. Sistem dipasang di pinggir laut seperti dermaga yang langsung berbatasan dengan permukaan laut. Selisih jarak digunakan untuk menentukan tinggi gelombang secara real-time. Data yang diperoleh kemudian diklasifikasikan menggunakan algoritma *Fuzzy Logic*, kemudian dikirimkan melalui jaringan LoRaWAN ke *server* pusat untuk diolah.

Solusi ketiga ini berfokus pada pengukuran jarak antara sensor dan permukaan air secara langsung menggunakan sensor jarak seperti ultrasonik. Prinsip dasarnya mengacu pada waktu tempuh gelombang (*time of flight*), di mana sinyal akustik atau optik dipancarkan ke permukaan air dan dipantulkan kembali ke sensor. Waktu tempuh sinyal t dikonversi ke jarak d menggunakan:

$$d = \frac{v \times t}{2} \dots\dots\dots (1.5)$$

Keterangan:

d = Jarak

v = Kecepatan rambat gelombang (kecepatan suara di udara untuk ultrasonik)

t = Waktu tempuh sinyal

Dengan memantau perubahan jarak $d(t)$ terhadap waktu, sistem dapat menghitung tinggi gelombang H sebagai:

$$H = d_{max} - d_{min} \dots\dots\dots (1.6)$$

Persamaan 1.10 Tinggi gelombang

Keterangan:

H = Tinggi gelombang

d_{max} = Jarak maksimal

d_{min} = Jarak minimum

Selain mengukur tinggi gelombang, sistem juga mengukur kecepatan angin di laut menggunakan sensor kecepatan angin, karena semakin meningkat kecepatan angin akan membuat tinggi gelombang meningkat. Berikut rumus untuk mengukur kecepatan angin:

$$v = k \times f \dots\dots\dots (1.2)$$

Keterangan :

v = kecepatan angin (m/s)

f = frekuensi putaran (putaran per detik)

k = konstanta kalibrasi alat (tergantung desain alat)

Untuk mendapatkan nilai suhu, mikrokontroler akan membaca sinyal analog berupa tegangan (V_{out}) yang dihasilkan sensor, kemudian mengkonversinya menjadi satuan derajat *Celcius* ($^{\circ}C$) menggunakan persamaan *linear* berdasarkan karakteristik sensitivitas sensor.

Rumus konversi tegangan menjadi suhu adalah sebagai berikut:

$$T = (V_{out} \times S) \pm C \dots\dots\dots (1.3)$$

Keterangan:

T = Suhu terukur dalam derajat *Celcius* ($^{\circ}C$)

V_{out} = Tegangan keluaran yang dibaca dari sensor (Volt)

S = *Scale Factor* atau sensitivitas sensor

C = Konstanta kalibrasi atau nilai *offset* untuk penyesuaian akurasi

Untuk mendapatkan nilai intensitas curah hujan dalam satuan milimeter per jam (mm/jam), sistem menggunakan rumus integrasi waktu sebagai berikut:

$$I = \frac{\sum N \times r}{t} \dots\dots\dots (1.4)$$

Keterangan:

I = Intensitas curah hujan terhitung (mm/jam).

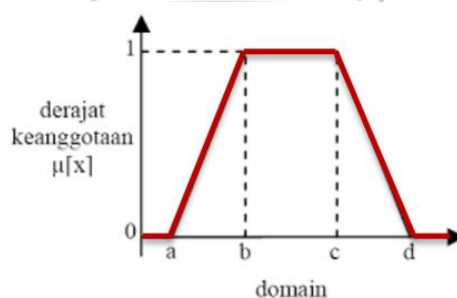
$\sum N$ = Akumulasi jumlah sinyal pulsa atau cacahan yang terdeteksi oleh mikrokontroler selama periode pengukuran.

r = Resolusi alat ukur, yaitu ekuivalensi kedalaman hujan untuk setiap satu sinyal pulsa (biasanya dalam satuan mm, contoh: 0.2 mm/pulsa).

t = Durasi waktu pengambilan sampel data (dalam satuan jam).

Data yang diperoleh seperti tinggi gelombang dari sensor ultrasonik, kecepatan angin, suhu, dan curah hujan kemudian di analisis menggunakan algoritma *Fuzzy*. Data pengukuran kemudian dikirim ke server pusat menggunakan jaringan internet.

Fuzzy Logic merupakan metode kecerdasan buatan yang meniru cara manusia mengambil keputusan berdasarkan informasi tidak pasti atau linguistik. Berbeda dengan logika biner (ya/tidak) yang kaku, fuzzy logic memperkenalkan derajat keanggotaan (membership degree) dalam rentang 0 hingga 1 untuk merepresentasikan kebenaran parsial. Dengan demikian, suatu nilai input tidak lagi hanya dianggap "benar" atau "salah", melainkan dapat memiliki tingkat kebenaran tertentu sesuai dengan levelnya. Inti dari teori *fuzzy* terletak pada penggunaan himpunan fuzzy dan fungsi keanggotaan.[20]



Gambar 1. 7 Kurva trapesium [20]

Berikut rumus fungsi keanggotaan kurva trapesium :

Fungsi keanggotaan :

$$\mu x = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x < d \\ 0, & x \geq d \end{cases}$$

Persamaan 1.1 Fungsi keanggotaan kurva trapesium [20]

Keterangan :

a = nilai *domain* terkecil mempunyai derajat keanggotaan nol

b = nilai *domain* terkecil mempunyai derajat keanggotaan satu

c = nilai *domain* terbesar mempunyai derajat keanggotaan satu

d = nilai *domain* terbesar mempunyai derajat keanggotaan nol

x = nilai *input* yang akan diubah kedalam bilangan *fuzzy*

Contoh aturan fuzzy dalam sistem :

1. IF tinggi gelombang *Rendah* OR kecepatan angin *Rendah* THEN Status = *Aman*. atau
2. IF tinggi gelombang *Sedang* OR kecepatan angin *Sedang* THEN Status = *Waspada*.
3. IF tinggi gelombang *Tinggi* OR kecepatan angin *Tinggi* THEN Status = *Bahaya*.

Hasil klasifikasi ditampilkan di *dashboard* pada aplikasi *mobile*, sehingga masyarakat pesisir dapat memantau kondisi gelombang secara real-time dan mengambil tindakan mitigasi jika gelombang tinggi terdeteksi. Sistem ini mendukung pengambilan keputusan cepat untuk keselamatan masyarakat dan perlindungan infrastruktur di pesisir pantai.

1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Dari tiga usulan solusi yang telah diajukan sebelumnya, perlu dilakukan analisis untuk menentukan solusi yang paling tepat dan efektif dalam mengatasi masalah disebabkan oleh perubahan kondisi cuaca yang tak terduga. Analisis ini akan

menggunakan metode *House of Quality* dengan mempertimbangkan fitur dasar dan fitur tambahan dari sistem untuk masing-masing solusi yang diusulkan.

Konstrain	Rank of Importance	Percent of Rank Importance	Functional Requirements										
			↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↓	
			Sensing Capability	Computing Performance	Notification Capability	Real-time Database	Network Capability	Mobile Integrated	Waterproof	Monitoring Capability	Weather prediction	Low Power Consumption	
Biaya ≤ 5.000.000	5	20.00%	△	△	△	△	△	△	△				
Lama Pengerjaan < 6 bulan	5	20.00%	○	○	○	△		○					
Satu sistem untuk 1 kapal	5	20.00%	⊙	⊙	⊙			⊙		⊙	⊙	○	
Sistem bukan pengganti BMKG	5	20.00%			○			△		⊙	⊙		
Kesesuaian terhadap Standarisasi dan Regulasi	5	20.00%	⊙	⊙	⊙		⊙	⊙		⊙	⊙		
Importance Rating			70	70	85	10	45	75	5	75	75	15	525
Percent of Importance			13.3%	13.3%	16.2%	1.9%	8.6%	14.3%	1.0%	14.3%	14.3%	2.9%	100.0%
Solusi 1			⊙	⊙	⊙	⊙	○	⊙	○	⊙	⊙	△	3.92
Solusi 2			○	⊙	⊙	⊙	○	⊙	○	⊙	△	○	3.37
Solusi 3			△	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	○	⊙	△	⊙	3.56

Gambar 1. 8 *House of Quality*

Tabel 1. 2 Keterangan Simbol House of Quality

Simbol	Nilai	Hubungan
Kosong	0	Tidak ada
△	1	Lemah
○	3	Sedang
⊙	5	Kuat

Gambar 1.8 menunjukkan hasil analisis menggunakan metode *House of Quality*, yang menggambarkan hubungan antara fitur dasar dan fitur tambahan untuk setiap solusi yang telah diusulkan. Penjelasan mengenai simbol yang digunakan dalam metode ini dapat dilihat pada tabel 1.2 di atas.

Fitur biaya yang terjangkau memiliki hubungan yang lemah dengan sensing *capability*, karena sensor yang mendukung akurasi tinggi harganya mahal. Biaya yang terjangkau memiliki hubungan lemah dengan computing performance, karena mikrokontroler yang memiliki performa komputasi tinggi harganya mahal. Biaya terjangkau memiliki hubungan lemah dengan notification *capability* dikarenakan notifikasi memerlukan *gateway* yang stabil dan *server cloud* yang berbayar. Biaya terjangkau memiliki hubungan yang lemah dengan *Real-time Database*, karena untuk memiliki *database* yang *real-time* butuh biaya yang cukup mahal. Biaya terjangkau memiliki hubungan yang lemah dengan *Network Capability*, karena *Network* yang performa yang bagus memiliki harga yang mahal. Biaya terjangkau memiliki hubungan yang lemah dengan *Mobile Integrated*, karena membutuhkan biaya yang mahal agar bisa terintegrasi dengan aplikasi mobile. Biaya terjangkau memiliki hubungan yang lemah dengan *Waterproof*, di mana untuk memperoleh sistem yang tahan air, biasanya diperlukan casing dengan harga yang cukup mahal.

Fitur lama pengerjaan < 6 bulan memiliki hubungan sedang dengan *Sensing Capability* memiliki hubungan sedang, karena untuk mendapatkan sensor yang memiliki akurasi tinggi membutuhkan waktu yang cukup lama. Fitur lama pengerjaan < 6 bulan memiliki hubungan sedang dengan computing *performance* karena komputasi kompleks membutuhkan waktu yang cukup lama. Lama pengerjaan < 6 bulan dengan notification *capability* memiliki hubungan sedang dengan notifikasi otomatis karena memakan waktu lama untuk integrasi untuk perangkat lunak. Lama pengerjaan < 6 bulan memiliki hubungan yang lemah dengan *Real-time Database*, karena untuk mengimplementasikan database real-time tidak memerlukan waktu yang tidak terlalu lama. Lama pengerjaan < 6 bulan memiliki hubungan yang sedang dengan *mobile integrated* karna membangun koneksi antara sensor dan mobile butuh waktu yang cukup lama untuk hasil yang baik.

Satu sistem untuk 1 kapal memiliki hubungan yang kuat dengan *Sensing Capability*, karena satu sistem terdapat hanya pada satu kapal agar sistem dapat membaca kondisi cuaca yang ada di kapal tetap akurat. Satu sistem untuk 1 kapal memiliki hubungan yang kuat dengan computing *performance*, karena komputasi yang tinggi

pada sistem di tempatkan di 1 kapal. Satu sistem untuk 1 kapal memiliki hubungan yang kuat dengan *Notification capability*, karena sistem memberikan notifikasi mengenai kondisi cuaca yang ada di 1 kapal tempat sistem di letakkan. Satu sistem untuk 1 kapal memiliki hubungan yang kuat dengan *Mobile Integrated*, karena sistem yang berada di kapal akan terintegrasi dengan aplikasi *mobile* untuk melakukan monitoring kondisi cuaca. Satu sistem untuk 1 kapal memiliki hubungan yang kuat dengan *Monitoring Capability*, karena sistem akan memonitoring kondisi cuaca yang ada di sekitar kapal nelayan. Satu sistem untuk 1 kapal memiliki hubungan yang kuat dengan *Weather Prediction*, karena sistem akan memprediksi kondisi cuaca 1 hari kedepan agar nelayan bisa mengetahui bagaimana kondisi cuaca yang ada di laut. Satu sistem untuk 1 kapal memiliki hubungan yang lemah dengan *Low Power Consumption*, karena sistem yang digunakan untuk monitoring kondisi cuaca bisa bertahan selama nelayan pergi berlayar di laut yaitu sekitar 8-10 jam.

Sistem bukan pengganti BMKG memiliki hubungan yang lemah dengan *Notification Capability*, karena sistem hanya sebagai pendukung/pelengkap dari peringatan dini BMKG bukan sepenuhnya pengganti sistem peringatan resmi. Hubungan lemah dengan *Mobile Integrated* karena aplikasi *mobile* hanya kanal informasi untuk menampilkan data kepada nelayan. Aplikasi *mobile* tidak mengubah status sistem sebagai pengganti informasi resmi dari BMKG. Hubungan kuat sistem bukan pengganti BMKG dengan *Monitoring Capability* yaitu sistem melakukan monitoring pada titik spesifik yang tidak terjangkau oleh radar makro BMKG. Hubungan kuat dengan *Weather Prediction* karena sistem ini menggunakan algoritma *machine learning* untuk memprediksi kondisi laut berdasarkan input sensor lokal secara *real-time*.

Kesesuaian terhadap Standarisasi dan Regulasi memiliki hubungan kuat dengan *sensing capability* karena terdapat RSNI 3 ISO 5725, standar ini mengatur regulasi, ketelitian, dan ketepatan metode pengukuran. Dengan mengikuti standar ini secara langsung memvalidasi *sensing capability* dari sensor yang digunakan. Computing Performance memiliki hubungan yang kuat dengan Regulasi klasifikasi tinggi gelombang BMKG, karena hasil komputasi dari sistem harus sesuai dengan

klasifikasi tinggi gelombang BMKG yang merupakan sistem memonitoring kondisi cuaca laut yang resmi di Indonesia. Peraturan Menteri Kominfo dan *network capability* memiliki hubungan kuat karena peraturan ini mengatur secara eksplisit *frekuensi* yang digunakan untuk jaringan. Regulasi klasifikasi BMKG dan *computing performance* karena kategori gelombang sudah diatur dari regulasi ini. Jadi, notifikasi harus memberikan informasi tinggi gelombang yang didasarkan pada regulasi ini. Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2008 tentang Pelayaran dengan *Notification Capability* memiliki hubungan yang kuat, karena notifikasi dari sistem yang dibuat berperan sebagai pendukung informasi keselamatan bukan pengganti dari peringatan resmi.

Berdasarkan analisis HoQ yang telah dilakukan didapatkan poin akhir dari setiap usulan Solusi sebagai berikut:

Solusi 1: Sistem Monitoring Tinggi Gelombang dan Cuaca Laut dengan Wave buoy Menggunakan Metode *Random Forest* dan *Long Short-Term Memory* Terintegrasi GPS dan Jaringan LoRaWAN

$$(13.3\% \times 5) + (13.3\% \times 5) + (16.2\% \times 5) + (1.9\% \times 5) + (8.6\% \times 3) + (14.3\% \times 5) + (1.0\% \times 3) + (14.3\% \times 5) + (14.3\% \times 5) + (2.9\% \times 1) = 4.70$$

Solusi 2: Sistem Monitoring Tinggi Gelombang dan Cuaca Laut Menggunakan Sensor IMU dengan Metode *Decision Tree* Terintegrasi GPS dan Jaringan LoRaWAN

$$(13.3\% \times 3) + (13.3\% \times 5) + (16.2\% \times 5) + (1.9\% \times 5) + (8.6\% \times 3) + (14.3\% \times 5) + (1.0\% \times 3) + (14.3\% \times 5) + (14.3\% \times 1) + (2.9\% \times 3) = 3.91$$

Solusi 3: Sistem Monitoring Tinggi Gelombang dan Cuaca Laut Berbasis Pengukuran Jarak Permukaan dengan Metode Machine Learning menggunakan Integrasi Jaringan LoRaWAN

$$(13.3\% \times 1) + (13.3\% \times 5) + (16.2\% \times 5) + (1.9\% \times 5) + (8.6\% \times 5) + (14.3\% \times 5) + (1.0\% \times 3) + (14.3\% \times 5) + (14.3\% \times 1) + (2.9\% \times 5) = 3.88$$

Hubungan solusi 1 dengan fitur dasar, yaitu *Sensing Capability* dinilai kuat karena penggunaan sensor IMU yang ditempatkan langsung di permukaan. Penempatan ini memungkinkan sensor IMU mengukur karakteristik gelombang secara fisik dan real-time, sehingga pengukuran tinggi gelombang menjadi lebih akurat. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan sensor angin, curah hujan, dan suhu untuk mendukung pemantauan kondisi lingkungan secara langsung dan menyeluruh. Hubungan kuat pada *Computing Performance* dikarenakan beban komputasi dibagi rata, perangkat pemrosesan memproses data yang relevan bukan semua data mentah yang besar. Hubungan kuat pada *Notification Capability* karena notifikasi berbasis kondisi nyata sehingga informasi lebih relevan. Informasi tidak hanya bersifat informatif tapi juga bersifat preventif (tindakan pencegahan). Hubungan kuat dengan *Realtime Database* karena data dikirim secara langsung dari buoy dan kapal serta adanya sinkronisasi waktu dan lokasi dari GPS. Hubungan kuat dengan *Mobile Integrated* karena output dirancang khusus untuk ditampilkan pada aplikasi *mobile* sehingga informasi mudah dipahami dan akses cepat. Hubungan kuat dengan *Waterproof* karena sistem dirancang dengan pertimbangan lingkungan sejak awal yaitu untuk penempatan di lingkungan laut yang dinamis. Hubungan kuat pada *Monitoring Capability* dikarenakan solusi pertama ini dapat melakukan monitoring kondisi cuaca. Hubungan kuat pada *Weather Prediction* dikarenakan sistem dapat memprediksi kondisi cuaca 1 hari ke depan sehingga nelayan bisa mengetahui kondisi cuaca sebelum pergi berlayar ke laut. Namun solusi ini lemah di *Network Capability* karena *buoy* di laut bergerak bebas memiliki resiko loss sinyal yang secara langsung mempengaruhi keandalan realtime database. Hubungan lemah pada *Low Power Consumption* dikarenakan pada solusi pertama ini terdapat banyak komponen yang digunakan sehingga sumber daya yang digunakan banyak selama nelayan pergi berlayar di laut.

Hubungan Solusi 2 dengan *sensing capability*, *network capability* dan *Water Resistance* memiliki hubungan yang sedang. Karena *sensing capability* sistem pada solusi ini hanya terdapat di kapal, sehingga hasil deteksi tinggi gelombang pada solusi ini kurang akurat. *Network Capability* dipengaruhi oleh posisi kapal yang berada di tengah laut, yang dapat mempengaruhi kualitas jaringan komunikasi dengan sistem *receiver*, berpotensi menyebabkan kehilangan sinyal yang

berdampak langsung pada keandalan *realtime database*. Dalam hal *Waterproof*, meskipun kapal berada di lingkungan laut, ketahanan terhadap air tidak menjadi masalah utama karena kapal dirancang untuk tahan terhadap kondisi tersebut. Di sisi lain, Solusi 2 memiliki hubungan yang kuat dengan *Computing Performance*, *Notification Capability*, *Real-time Database*, dan *Mobile Integrated*. Karena pada *Computing Performance* solusi 2 dapat mengklasifikasikan kondisi cuaca laut dengan kategori yang akurat berdasarkan data didapatkan oleh sistem. Untuk *Notification Capability*, solusi ini dapat memberikan notifikasi kepada masyarakat di pesisir pantai mengenai kondisi cuaca laut, sehingga mereka dapat mengambil tindakan yang diperlukan. Sedangkan pada *Real-time Database*, solusi ini dapat mengirimkan data secara langsung dari kapal dengan sinkronisasi waktu dan lokasi yang akurat melalui GPS. Untuk *Mobile Integrated*, *output* dirancang akan ditampilkan pada aplikasi *mobile*, memudahkan masyarakat untuk mengakses informasi secara cepat dan mudah. Hubungan kuat pada *Monitoring Capability* dikarenakan solusi kedua ini dapat melakukan monitoring kondisi cuaca. Hubungan lemah pada *Weather Prediction* dikarenakan sistem pada solusi kedua ini hanya melakukan prediksi dengan melihat secara langsung *history* cuaca yang pada aplikasi *mobile* pada sistem. Hubungan sedang pada *Low Power Consumption* dikarenakan pada solusi kedua tidak terlalu banyak komponen yang digunakan sehingga sumber daya yang digunakan tidak terlalu banyak selama nelayan pergi berlayar di laut.

Hubungan solusi 3 dengan *Sensing Capability* memiliki hubungan yang lemah karena kerentanan sensor ultrasonik terhadap faktor atmosfer seperti suhu dan kelembaban yang menjadikan pembacaan kurang stabil. Nilai sedang pada *Water Resistance* karena sensor ultrasonik ditempatkan menjorok ke permukaan laut sehingga rentan terkena ombak besar. Hubungan kuat dengan *Computing Performance* karena seluruh data sensor dikumpulkan di satu titik tetap yang tidak memerlukan sinkronisasi antar node. *Notification Capability* memiliki hubungan kuat karena masyarakat mendapatkan informasi secara cepat dari sistem. Hubungan kuat dengan *Realtime Database* karena data dikirim secara langsung dari sistem. *Mobile integrated* memiliki hubungan yang kuat dengan solusi 3 ini karena penyajian informasi ditampilkan di *mobile* sehingga lebih praktis dan mudah di

akses. Solusi ini memiliki hubungan yang kuat dengan *Network Capability* karena sistem berada di area terjangkau jaringan sehingga sinyal lebih kuat. Hubungan kuat pada *Monitoring Capability* dikarenakan solusi ketiga ini dapat melakukan monitoring kondisi cuaca. Hubungan lemah pada *Weather Prediction* dikarenakan sistem pada solusi ketiga ini hanya melakukan prediksi dengan melihat secara langsung *history* cuaca yang pada aplikasi *mobile* pada sistem. Hubungan kuat pada *Low Power Consumption* dikarenakan komponen yang digunakan pada sistem ketiga ini lebih sedikit dibandingkan dengan solusi lainnya sehingga sistem lebih hemat daya dalam beroperasi.

1.2.4 Solusi yang Dipilih

Dari hasil analisis HoQ yang telah dilakukan dengan menganalisis hubungan semua fitur dasar dengan Konstrain serta hubungan keduanya dengan usulan solusi, didapatkan hasil bahwa Solusi 1 unggul dengan nilai HoQ 4,63. Hal ini menunjukkan Solusi 1 sesuai dengan permasalahan yang diangkat dan memenuhi kriteria dari kebutuhan sistem. Solusi 1 dipilih karena kemampuan dalam mengintegrasikan fitur utama seperti *sensing capability*, *computing performance*, *notification capability*, *realtime database*, *network capability*, *mobile integrated*, *waterproof*, *Monitoring Capability*, *Weather Prediction* dan *Low Power Consumption*. Dengan memanfaatkan sensor IMU, sensor kecepatan angin, sensor suhu, sensor hujan dan GPS, metode komputasi Random Forest dan jaringan LoRa, sistem ini mampu memonitoring tinggi gelombang dan cuaca laut yang kemudian mengklasifikasikan gelombang tersebut sesuai dengan kategori yang telah ditentukan. Serta dapat memberikan notifikasi visual kepada nelayan mengenai kondisi cuaca dan tinggi gelombang secara realtime, serta nelayan dapat memberikan sinyal tanda bahaya. Sistem ini juga mampu melakukan pengolahan data secara efisien, memberikan informasi gelombang secara realtime dan terhubung ke aplikasi *mobile* yang mudah diakses.