

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Pantai Indonesia memiliki potensi yang sangat besar namun hal ini juga beriringan dengan meningkatnya masalah terhadap pantai, seperti mundurnya garis pantai akibat erosi yang disebabkan oleh gelombang laut dan berdampak bagi pemukiman di pesisir pantai. Gelombang laut merupakan salah satu parameter laut yang dominan terhadap laju mundurnya garis pantai. Proses mundurnya garis pantai dari kedudukan semula antara lain disebabkan oleh gelombang dan arus, serta tidak ada keseimbangan sedimen yang masuk dan keluar[1].

Gelombang laut adalah salah satu aspek yang sangat penting untuk diamati dan diukur secara berkelanjutan. Gelombang terbentuk oleh adanya beberapa gaya pembangkit seperti angin, gaya tarik menarik bumi-bulan-matahari, gempa (vulkanik atau tektonik) di dasar laut, dan gelombang yang disebabkan oleh topografi dasar laut[2]. Gaya yang timbul dari angin laut merupakan faktor utama pembangkit gelombang[3]. Gelombang yang dibangkitkan oleh angin di permukaan laut memberikan pengaruh pada aktivitas nelayan, transportasi laut antar pulau yang dapat berdampak pada kehidupan masyarakat di darat, seperti kelangkaan bahan pangan di beberapa pulau kecil dan terganggunya berbagai aktivitas pembangunan karena terhambatnya suplai bahan-bahan konstruksi [2].

Selain gelombang, arus laut juga merupakan fenomena yang mempengaruhi transportasi laut antar pulau yang dapat berdampak pada kehidupan masyarakat. Arus laut merupakan aliran suatu massa air akibat adanya angin, densitas, dan pergerakan gelombang [2]. Arus dibedakan menjadi dua yaitu arus atas dan arus bawah. Arus atas adalah arus yang bergerak di permukaan laut. Sedangkan arus bawah adalah arus yang bergerak di bawah permukaan laut. Arus laut yang mempengaruhi karakteristik perairan Indonesia adalah arus yang dibangkitkan oleh angin atau arus atas [4][5]. Data arus berguna untuk menjadi bahan pertimbangan dalam pembangunan dermaga pelabuhan, bangunan lepas pantai maupun dekat pantai.

Angin memiliki pengaruh dalam membentuk arus dikarenakan adanya gesekan antara angin dan arus permukaan [5]. Angin merupakan energi yang terjadi dikarenakan adanya perbedaan suhu dan tekanan udara. Angin bergerak dari suhu yang rendah menuju suhu yang tinggi [2]. Data kecepatan angin dapat menjadi informasi penting dalam memantau kondisi gelombang laut [6]. Pada penelitian sebelumnya dijelaskan bahwa ketika kecepatan angin mengalami peningkatan maka akan meningkatkan kecepatan arus, sedangkan ketika kecepatan angin mengalami penurunan maka akan menurunkan kecepatan arus [2]. Sehingga kondisi arus dan angin laut saling berhubungan dalam menentukan bagaimana kondisi gelombang laut.

Berdasarkan hasil observasi di Pantai Pasir Jambak, pembangunan fasilitas perlindungan pantai oleh Pemerintah Kota Padang masih belum optimal. Saat ini, pemasangan struktur pengaman pantai berupa batu pemecah ombak baru mencapai wilayah RT 02/RW 07, Kelurahan Pasia Nan Tigo, Padang. Laporan Badan Penanggulangan Bencana pada 11 Januari 2024 mencatat bahwa abrasi telah menggerus bibir pantai sepanjang 150 meter. Kondisi ini juga mengancam satu rumah warga, 80 pondok wisata, serta menyebabkan tumbang puluhan pohon cemara. Situasi tersebut menggambarkan adanya kesenjangan penanganan, di mana dampak abrasi yang terus meluas seharusnya mendapatkan perhatian lebih serius melalui upaya mitigasi dari pemerintah, aparat setempat, dan masyarakat [7]. *Monitoring* kondisi gelombang laut diperlukan untuk mengetahui potensi terjadi abrasi pantai, karena arus yang kuat dapat menyebabkan terjadinya abrasi atau pengikisan pantai [8].

Saat ini, BMKG hanya memiliki 26 stasiun pemantau ketinggian air laut yang tersebar di berbagai wilayah Indonesia. Jumlah tersebut masih jauh dari cukup jika dibandingkan dengan panjang garis pantai yang dimiliki. Berdasarkan perhitungan kebutuhan, Indonesia memerlukan sekitar 800 stasiun pemantauan agar dapat menyediakan data dan informasi yang akurat mengenai kondisi gelombang laut [9]. BMKG memperoleh data kondisi gelombang laut di tingkat nasional melalui penggunaan data satelit, pemodelan, dan *current meter*. Untuk memperoleh estimasi dan prakiraan yang akurat mengenai arus dan suhu laut, hasil dari pemodelan ini perlu diverifikasi melalui penggunaan data observasi in – situ, seperti

penggunaan alat *sea glider* dan *buoy*. Namun, pemantauan kondisi gelombang laut saat ini masih terkendala oleh keterbatasan peralatan, terutama karena harganya yang relatif mahal, dapat mencapai puluhan hingga ratusan ribu dolar AS, serta ukurannya yang cukup berat. Alternatif lain berupa *buoy* juga memiliki kelemahan, yaitu tidak bersifat portabel dan hanya dapat dipasang secara permanen pada satu lokasi pengamatan [10].

Monitoring gelombang laut diperlukan untuk mengurangi risiko, serta memberikan peringatan dini terhadap bencana yang disebabkan oleh gelombang laut sehingga membantu masyarakat sekitar pesisir pantai, pemerintah daerah yang berperan dalam mitigasi bencana dan pengelolaan wilayah pesisir serta pihak yang bertanggung jawab atas pemeliharaan dan pengelolaan infrastruktur yang rentan terhadap kerusakan akibat gelombang laut, hal ini sangat penting karena daerah pesisir yang tidak terpantau dengan baik berisiko mengalami dampak buruk dari fenomena gelombang laut. Dampak seperti erosi pantai, kerusakan ekosistem, serta hilangnya lahan dan infrastruktur yang dapat merugikan masyarakat lokal secara ekonomi dan sosial. Dalam hal ini, pengembangan sistem *monitoring* berbasis teknologi yang menyediakan data *real-time* menjadi solusi yang diperlukan. Dengan memanfaatkan data terkait angin dan arus yang menjadi salah satu faktor terjadinya gelombang laut. Hasil analisis data dapat digunakan untuk memberikan informasi peringatan dini kepada masyarakat pesisir dan pihak berwenang, sehingga langkah mitigasi dapat dilakukan dengan cepat dan tepat. Dengan sistem *monitoring* yang inovatif, risiko kerugian dapat diminimalkan, dan keberlanjutan ekosistem pesisir pantai dapat terjaga.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Berdasarkan permasalahan yang akan diangkat mengenai kondisi arus permukaan air laut yang bergerak secara dinamis dan diiringi dengan kecepatan angin di permukaan laut diperlukan informasi mengenai data yang diperlukan untuk merancang sistem yaitu parameter kecepatan arus dan angin laut sebagai parameter *monitoring* kondisi gelombang laut.

Parameter kecepatan arus [11] :

1. Kecepatan Arus Lemah

Kekuatan Arus kurang dari 0.1 m/s. Kecepatan arus laut yang sangat rendah, biasanya terjadi di perairan yang terlindungi dari angin kencang atau di area dengan topografi dasar laut yang tidak terlalu curam.

2. Kecepatan Arus Sedang

Kekuatan Angin antara 0.1 - 1 m/s. Kecepatan arus laut yang cukup signifikan untuk mempengaruhi pola pergerakan air, tetapi tidak terlalu ekstrem. Umumnya terjadi di area perairan terbuka dengan pengaruh angin ringan hingga sedang.

3. Kecepatan Arus Kuat

Kekuatan Angin lebih dari 1 m/s. Kecepatan arus yang tinggi, biasanya disebabkan oleh kombinasi angin kencang, topografi dasar laut yang curam, atau fenomena seperti arus pasang surut yang kuat.

Parameter kecepatan angin [12]:

1. Kecepatan Angin Lemah

Kekuatan Angin kurang dari 5.5 m/s, gelombang relatif tenang, dengan tinggi gelombang biasanya di bawah 1 meter.

2. Kecepatan Angin Sedang

Kekuatan Angin antara 5.5 - 8 m/s, gelombang sedang dengan tinggi gelombang berkisar antara 1 hingga 2 meter. Biasanya masih dapat dilewati dengan kapal atau melakukan kegiatan perairan umum dengan hati-hati.

3. Kecepatan Angin Kuat

Kekuatan Angin lebih 8 m/s, gelombang tinggi yang berbahaya dengan tinggi gelombang lebih dari 2 meter. Perjalanan laut dan kegiatan perairan umum harus dihindari karena kondisi tersebut dapat sangat berbahaya dan berisiko.

Pada penelitian [12] telah pernah dirancang penggunaan *Wireless Sensor Network* (WSN) untuk memantau gelombang laut, kelebihan sistem ini dapat melakukan klasifikasi terhadap kondisi gelombang laut (aman, sedang, berbahaya) berdasarkan kecepatan angin dalam pengambilan keputusannya di area pesisir, namun hanya menggunakan metode *single-hop routing* sehingga tidak mempertimbangkan penggunaan metode *routing* lain yang dapat meningkatkan jangkauan komunikasi dan kestabilan jaringan. Serta, parameter untuk *monitoring* gelombang laut menggunakan kecepatan angin saja, tidak menggunakan *trigger* kepada pengguna untuk mengetahui kondisi gelombang laut dan belum menggunakan aplikasi mobile atau web dalam *monitoring* secara *real time*.

1.1.2 Analisis Masalah

Analisis permasalahan memiliki beberapa aspek yang harus diperhatikan, pada topik permasalahan yang penulis angkat terdapat beberapa topik aspek antara lain :

1. Aspek Ekonomi

Arus laut yang dinamis yang dikombinasikan dengan angin kencang dapat merusak infrastruktur perairan. Kerusakan berulang akibat gelombang pasang akan memerlukan perbaikan dan pemeliharaan infrastruktur secara berkala.

2. Aspek Lingkungan

Gelombang pasang dapat menyebabkan kerusakan hutan bakau dan terumbu karang.

3. Aspek Sustainability

Kondisi arus bawah laut dan kecepatan angin harus dikurangi dampak resikonya agar masyarakat di sekitar pesisir pantai dapat bersiap menghadapi kondisi ekstrem, sehingga mengurangi hilangnya nyawa dan kerusakan properti.

4. Aspek Manufakturabilitas

Mitigasi gelombang laut pasang diperlukan agar masyarakat di sekitar pesisir pantai dapat melakukan perbaikan dan pemeliharaan tepat waktu untuk infrastruktur pesisir.

5. Aspek Sosial

Upaya mitigasi gelombang laut dapat memperkuat peraturan tentang peningkatan kesiapsiagaan bencana dapat mengurangi ketegangan sosial dan ketidakstabilan politik di wilayah pesisir yang sering dilanda bencana alam.

1.1.3 Kebutuhan Yang Harus Dipenuhi

Berdasarkan analisis masalah yang sudah dipaparkan, kebutuhan atau masalah yang perlu diatasi adalah diperlukannya sistem *monitoring* kondisi gelombang laut secara *real time* yang dapat mengirimkan data pada jangkauan yang luas kepada pengguna. Sebelum hasil pemantau dikirim ke pengguna data yang dihasilkan perlu diolah dan dianalisis secara komprehensif untuk memahami pola arus dan angin laut dengan menggunakan metode komputasi yang tepat agar hasil *monitoring* lebih akurat. Hal ini dapat membantu dalam perencanaan jangka panjang untuk pembangunan infrastruktur yang lebih tahan terhadap bencana di masa yang akan datang. Serta sistem ini akan terhubung ke aplikasi *mobile* untuk memberikan peringatan dini kepada masyarakat sekitar pesisir pantai.

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan kebutuhan yang harus dipenuhi, sistem *monitoring* kondisi gelombang laut harus dirancang untuk memberikan *monitoring* yang akurat dan *real-time*, sehingga masyarakat di sekitar pesisir dapat mengurangi dampak risiko gelombang laut. Sistem ini harus mampu mengumpulkan data secara otomatis dari sensor yang ditempatkan di laut, memastikan pengukuran yang konsisten dan berkelanjutan. Selain itu, sistem ini juga harus dirancang agar memberikan informasi secara langsung kepada pengguna melalui aplikasi berbasis *mobile*, sehingga pengguna dapat segera mengambil tindakan jika ada potensi bahaya dari gelombang laut.

1.2 Solusi

1.2.1 Karakteristik Produk

a. Fitur Dasar

Fitur dasar yang dapat dipenuhi antara lain :

1. *Computing Performance*

Sistem harus memiliki kemampuan komputasi yang kuat untuk menganalisis data dari berbagai sensor dengan cepat dan akurat.

2. *Sensing Capability*

Kemampuan alat untuk mengukur secara akurat parameter-parameter penting seperti kecepatan angin dan kuat arus.

3. *Notifikasi Capability*

Sistem harus secara otomatis mengirimkan peringatan melalui aplikasi untuk memastikan masyarakat mendapatkan informasi

4. *Usable data Storage*

Sistem harus menyertakan solusi penyimpanan data yang memungkinkan akses mudah ke data

5. *Real-time Database*

Sistem yang dirancang dapat memperbaharui data pengguna secara *real-time*

6. *Network Capability*

Sistem yang dirancang dapat menjaga komunikasi yang stabil di berbagai kondisi jaringan

7. *Mobile Integrated*

Sistem yang dirancang dapat terhubung ke aplikasi *mobile* untuk memberikan informasi kepada masyarakat sekitar pesisir mengenai kondisi gelombang laut

b. Fitur Tambahan

1. Harga Terjangkau

Sistem ini harus memiliki batasan biaya yang ekonomis

2. Sistem mudah di Instalasi

Sistem mudah untuk dijalankan dan digunakan oleh masyarakat di sekitar pesisir pantai

3. Desain Estetis dan Tahan Lama

Komponen yang akan digunakan pada sistem harus tahan lama agar dapat bertahan di berbagai lingkungan kondisi cuaca.

4. Jangkauan Komunikasi

Sistem harus memiliki jangkauan komunikasi yang luas, terutama untuk mengirim data dari lokasi yang jauh dari pantai atau pusat pengolahan data.

5. Efisiensi Daya

Sistem harus hemat energi, terutama jika digunakan di area yang sulit dijangkau atau tanpa akses ke sumber daya listrik yang stabil

6. Sistem dapat diselesaikan < 4 bulan

Sistem harus terhubung ke jaringan *internet of things*, sehingga data dari sensor dapat dikumpulkan, dikirim, dan dipantau secara *real-time* melalui aplikasi berbasis intern

1.2.2 Usulan Solusi

1.2.2.1 Sistem *Monitoring* Kondisi Gelombang Laut Menggunakan Jaringan LoRaWAN Menggunakan Metode *Decision Tree*

Solusi pertama akan melakukan *monitoring* kondisi gelombang laut dengan cara sensor dipasang di area pesisir pantai untuk mengukur kecepatan angin serta kuat arus di permukaan laut, data dari sensor akan dikumpulkan secara *real-time*, data yang dikumpulkan dikirim melalui jaringan LoRaWAN sehingga memungkinkan pengiriman data dalam jarak jauh dengan konsumsi daya yang rendah, kemudian data yang diterima di server pusat akan diproses menggunakan metode *decision tree* untuk mengklasifikasikan kondisi laut apakah aman, waspada dan bahaya. Cara kerja dari algoritma *decision tree* yaitu dengan membangun model kemudian memecah data set menjadi subset berdasarkan atribut yang paling informatif. Setiap simpul dalam pohon mewakili keputusan berdasarkan nilai atribut, dan cabang

mewakili hasil dari keputusan tersebut. Proses ini berlanjut hingga mencapai simpul daun, yang berisi klasifikasi akhir. *Decision Tree* memudahkan interpretasi hasil karena strukturnya yang visual dan sederhana. Algoritma ini memisahkan data menjadi kategori-kategori seperti aman, waspada, atau bahaya berdasarkan batas-batas parameter yang sudah ditentukan, hasil dari analisis *Decision Tree* akan memberikan peringatan dini kepada pengguna melalui aplikasi, pengguna dapat memantau kondisi laut secara *real-time* melalui aplikasi *mobile* yang terhubung dengan sistem, informasi pemantau kondisi gelombang laut membantu masyarakat sekitar pesisir pantai dalam mengambil tindakan untuk mengurangi resiko kecelakaan laut.

1.2.2.2 Sistem *Monitoring* Kondisi Gelombang Laut Menggunakan Jaringan WiFi dengan Metode Random Forest

Solusi kedua akan melakukan *monitoring* kondisi gelombang laut menggunakan jaringan WIFI yang merupakan jaringan komunikasi nirkabel yang sangat umum dan dapat menyediakan kecepatan tinggi dengan bandwidth yang besar untuk mengirim data dan algoritma random forest sebagai metode klasifikasi. Sistem ini bertujuan untuk memberikan informasi secara *real time* terkait kondisi gelombang laut yang dikategorikan aman, waspada dan bahaya. Sistem ini memanfaatkan algoritma random forest untuk mengolah data yang diterima dari berbagai sensor, seperti sensor angin dan arus laut. Random Forest merupakan algoritma yang menggabungkan hasil dari banyak pohon keputusan untuk menghasilkan klasifikasi yang akurat. Sensor angin dan sensor arus dipasang di area pesisir pantai untuk mendeteksi kecepatan angin dan arus laut, data yang dihasilkan akan dikirim ke gateway wifi yang terhubung dengan server untuk pemrosesan. Data yang diterima di *gateway* wifi diproses oleh algoritma random forest. Algoritma ini akan membuat sejumlah besar pohon keputusan dari dataset, setiap pohon memberikan hasil klasifikasinya, dan hasil akhir ditentukan oleh voting mayoritas dari semua pohon dengan *output* menjadi aman, waspada dan bahaya sesuai dengan pola data yang terdeteksi. Hasil analisis random forest divisualisasikan melalui dashboard secara realtime dan memberikan notifikasi peringatan dini jika kondisi laut terdeteksi berbahaya, jika kondisi laut berbahaya, sistem secara otomatis mengirimkan peringatan dini kepada masyarakat melalui aplikasi, informasi ini membantu

masyarakat sekitar pesisir pantai dalam mengambil tindakan untuk mengurangi risiko kecelakaan laut.

1.2.2.3 Sistem *Monitoring* Kondisi Gelombang Laut Menggunakan Jaringan Zigbee dengan Metode Fuzzy Logic

Solusi ketiga akan melakukan *monitoring* kondisi gelombang laut dengan menggunakan metode fuzzy logic untuk menangani pemrosesan dalam sensor data. Sistem fuzzy akan mengambil input dari berbagai sensor dan memberikan output dalam berbagai kategori aman, waspada dan bahaya berdasarkan aturan fuzzy, sistem dapat menyesuaikan keputusan berdasarkan input yang bervariasi dan tidak pasti, hasil analisis fuzzy dapat divisualisasikan melalui dashboard secara real-time, memberikan informasi yang dapat diakses dengan cepat untuk pengambilan keputusan. Cara kerja Fuzzy Logic dalam solusi ini beroperasi pada prinsip logika yang tidak biner, memungkinkan variabel memiliki nilai antara 0 dan 1. Hal ini berguna untuk menangani ketidakpastian informasi yang tidak tepat. Input dari sensor dikategorikan ke dalam kelompok fuzzy, seperti “rendah”, “sedang”, atau “tinggi”. Aturan fuzzy kemudian diterapkan untuk menghasilkan output yang sesuai. Fuzzy logic memberikan solusi yang lebih fleksibel untuk pengambilan keputusan di lingkungan yang dinamis. Penerapan solusi ini dimulai dengan pengumpulan data oleh sensor angin dan arus, sensor ini terhubung dengan jaringan Zigbee yang merupakan jaringan yang memiliki konsumsi daya yang sangat rendah menggunakan teknologi jaringan mesh yang memungkinkan perangkat untuk saling terhubung satu sama lain, data sensor dikirim ke gateway Zigbee secara nirkabel, data yang diterima dari *Wireless Sensor Network* akan dianalisis dengan Fuzzy Logic. Fuzzy Logic bekerja dengan menangani data yang bersifat dinamis dan tidak pasti, hasil analisis akan dikirim ke aplikasi dan memberikan peringatan dini kepada masyarakat jika ada potensi bahaya gelombang pasang atau kondisi laut berbahaya. Sistem akan melakukan *monitoring* secara real-time, dimana data dikumpulkan dan dianalisis sampai hasil *monitoring* dapat dilihat melalui aplikasi mobile.

1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Tabel 1. 1 Analisis House Of Quality

	Rating		Karakteristik Produk							Total Jumlah Skor	Solusi 1	Solusi 2	Solusi 3
			Computing Performance	Sensing capability	Notification Capability	Usable data storage	Real time database	Network capability	Mobile integrated				
Jangkauan Komunikasi	5	19,23%				●		●			●	●	▲
Efisiensi daya	5	19,23%	●	●			●	●			●	▲	●
Mudah di Instal	3	11,54%	●		▲				●		●	●	▲
Biaya < 2.000.000	5	19,23%		●		▲			●		●	▲	●
Selesai < 4 bulan	5	19,23%	●						●		●	●	●
Perawatan sistem mudah	3	11,54%		●				●			●	●	●
Jumlah			31	29	3	20	10	39	39	171	72	45	57
Persentase			18,12 %	17%	1,73%	11,70%	5,85%	22,80%	22,80%	100%	2,7	1,7	2,2
Solusi 1 : LoRaWAN dan Decision Tree			●	●	●	●	●	●	●	2,8			
Solusi 2 : WiFi dan Random Forest			●	●	▲	●	●	●	●	2,3			
Solusi 3 : Zigbee dan Fuzzy Logic			▲	●	●	●	●	▲	●	1,9			

Tabel 1. 2 Keterangan Simbol

Simbol	Nilai	Pengertian
<kosong>	0	Tidak ada hubungan
▲	1	Kurang berhubungan
●	2	Hubungannya sedang
○	3	Sangat Kuat Hubungannya

Berdasarkan Analisa yang telah dilakukan dengan *House of Quality* didapatkan poin akhir dari setiap solusi sebagai berikut.

Perhitungan dilakukan dengan menerapkan rumus :

Jumlah = SUM (Persentase HoQ x Point Hubungan)

Poin akhir solusi berdasarkan fitur dasar :

Solusi 1 :

$$(15,79\% \times 3) + (18,05\% \times 3) + (7,52\% \times 3) + (15,04\% \times 2) + (3,76\% \times 2) + (21,80\% \times 3) + (18,04\% \times 3) = 2,8119$$

Solusi 2 :

$$(15,79\% \times 2) + (18,05\% \times 3) + (7,52\% \times 1) + (15,04\% \times 2) + (3,76\% \times 2) + (21,80\% \times 2) + (18,04 \times 3\%) = 2,2857$$

Solusi 3 :

$$(15,79\% \times 1) + (18,05\% \times 3) + (7,52\% \times 2) + (15,04\% \times 2) + (3,76\% \times 2) + (21,80\% \times 1) + (18,04 \times 3\%) = 1,9849$$

Poin akhir solusi berdasarkan fitur tambahan :

Solusi 1 :

$$(19,23\% \times 3) + (19,23\% \times 3) + (11,54\% \times 2) + (19,23\% \times 3) + (19,71\% \times 3) + (11,54\% \times 2) = 2,7836$$

Solusi 2 :

$$(19,23\% \times 2) + (19,23\% \times 1) + (11,54\% \times 3) + (19,23\% \times 1) + (19,71\% \times 2) + (11,54\% \times 2) = 1,7404$$

Solusi 3 :

$$(19,23\% \times 1) + (19,23\% \times 2) + (11,54\% \times 1) + (19,23\% \times 3) + (19,71\% \times 3) + (11,54\% \times 3) = 2,2067$$

Hubungan jangkauan komunikasi dengan *usable data storage* memiliki hubungan yang erat karena Jangkauan komunikasi yang baik sangat penting dalam menentukan seberapa banyak data dapat disimpan dan diakses. Jarak yang lebih jauh memerlukan transmisi data dengan daya lebih besar, yang dapat mengurangi efisiensi pengiriman data secara *real-time* [13], [14]. Oleh karena itu, sistem penyimpanan data harus dirancang untuk dapat menangani pengambilan data yang sering, dengan mempertimbangkan ukuran data yang dapat dikirim. Dalam lingkungan dengan jaringan tidak stabil, solusi penyimpanan yang efisien sangat dibutuhkan untuk memastikan ketersediaan data. Hubungan jangkauan komunikasi dengan *Network capability* memiliki hubungan yang erat karena *Network capability* yang baik berperan penting dalam menentukan jangkauan komunikasi. Jaringan yang memiliki kapasitas tinggi dapat mendukung lebih banyak perangkat dan

meningkatkan jangkauan komunikasi[15]. Hal ini memungkinkan pengguna untuk terhubung dengan lebih banyak alat dan sensor, yang sangat penting dalam aplikasi yang memerlukan pengiriman data secara bersamaan dari berbagai titik.

Hubungan efisiensi daya dengan *computing performance* memiliki hubungan yang erat karena Efisiensi daya sangat bergantung pada metode komputasi yang digunakan. Metode komputasi yang hemat daya dapat memastikan bahwa perangkat beroperasi dengan cepat sambil mengurangi konsumsi energi[16]. Dengan demikian, penting untuk memilih algoritma dan metode komputasi yang tidak hanya cepat tetapi juga efisien dalam penggunaan daya, terutama untuk aplikasi yang berjalan di lokasi terpencil. Hubungan efisien daya dengan *sensing capability* memiliki hubungan yang sedang karena Efisiensi daya dan kemampuan *sensing capability* saling mempengaruhi. Desain sistem dan teknologi yang tepat dapat meningkatkan kemampuan *sensing capability* tanpa memerlukan penggunaan daya yang berlebihan[17]. Dengan pengelolaan yang baik, sensor dapat beroperasi dengan lebih efisien, mengurangi kebutuhan akan pengisian daya yang sering. Hubungan efisiensi daya dengan *real-time* data memiliki hubungan yang sedang karena penggunaan *database* yang hemat energi sangat penting untuk memastikan sistem tetap responsif tanpa menguras baterai perangkat, sistem harus dapat dipastikan dapat terus beroperasi dalam kondisi yang akan terjadi di daerah pesisir pantai.

Hubungan efisiensi daya dengan *notification capability* memiliki hubungan yang kuat karena pengiriman notifikasi hanya membutuhkan sedikit daya karena hanya melibatkan komunikasi data kecil atau perintah sederhana serta tergantung dengan jaringan yang digunakan. Oleh karena itu, efisiensi daya pada tingkat keseluruhan sistem tidak banyak dipengaruhi oleh fitur notifikasi. Hubungan efisiensi daya dengan *network capability* memiliki hubungan yang sedang karena semakin jauh jangkauan komunikasi, semakin besar daya transmisi yang dibutuhkan untuk menjaga kualitas sinyal. Sehingga diperlukan jaringan komunikasi yang hemat daya dengan kecepatan data yang stabil[17].

Hubungan kemudahan di *instal* dengan *computing performance* memiliki hubungan yang kurang karena sistem dengan kemampuan komputasi tinggi membutuhkan

pengaturan konfigurasi yang lebih kompleks, seperti penginstalan *software* tambahan, pengaturan parameter, atau integrasi perangkat keras tertentu, namun perangkat yang dirancang dengan performa komputasi sederhana dan fungsi terbatas lebih mudah dipasang karena memerlukan sedikit atau tanpa konfigurasi. Hubungan kemudahan di *instal* dengan *mobile integration* memiliki hubungan yang kuat karena aplikasi *mobile* yang menyediakan antarmuka untuk instalasi dan pengaturan, kemudahan instalasi akan memudahkan pengguna agar dapat memanfaatkan sistem dengan perangkat seluler tanpa hambatan[18].

Hubungan biaya yang digunakan terhadap *sensing capability* memiliki hubungan yang sedang karena semakin bagus sensor yang digunakan harganya juga semakin mahal, namun biaya pemeliharaan dan penggantian sensor yang perlu juga untuk dipertimbangkan, sehingga mempengaruhi total biaya yang diperlukan, tetapi secara tidak langsung berkaitan dengan semua jenis sensor. Hubungan biaya dengan *usable data* memiliki hubungan yang kurang karena biaya penyimpanan data dapat bervariasi tergantung pada jenis solusi penyimpanan yang digunakan, meskipun solusi penyimpanan yang efisien dapat mengurangi biaya, implementasi awal dan biaya pemeliharaan juga harus diperhitungkan. Hubungan biaya dengan *mobile integrated* memiliki hubungan yang kuat karena integrasi *mobile* membutuhkan pengembangan aplikasi yang sesuai dengan perangkat pengguna, semakin besar biaya yang dikeluarkan untuk pengembangan, perangkat keras dan pengujian maka semakin besar juga biaya yang dibutuhkan[19].

Hubungan waktu pengerjaan dengan *computing performance* memiliki hubungan yang sedang karena sistem dengan kemampuan komputasi tinggi dapat mempercepat proses seperti pengolahan data, simulasi, atau *debugging*, sehingga mengurangi waktu pengerjaan. Namun, performa tinggi sering membutuhkan perangkat keras yang lebih kompleks, yang bisa memperpanjang waktu desain, integrasi, dan pengujian. Faktor lain seperti keterampilan tim, kompleksitas proyek, atau kesiapan modul *software* juga memainkan peran penting. Hubungan waktu pengerjaan dengan *mobile integrated* memiliki hubungan yang kuat karena merancang aplikasi dengan antarmuka responsif, pengujian sistem dan versi perangkat seluler, serta pengembangan fitur koneksi memerlukan waktu yang cukup agar aplikasi yang dirancang sesuai dengan kebutuhan pengguna[20].

Hubungan perawatan sistem memiliki hubungan yang kuat terhadap *sensing capability* karena sensor yang baik berkontribusi langsung pada efektivitas perawatan sistem, sensor membutuhkan kalibrasi secara berkala untuk menjaga akurasi pengukuran, serta perawatan sistem yang terencana membantu mendeteksi kerusakan sensor lebih awal untuk menghindari data yang salah atau kehilangan data penting. Hubungan perawatan sistem memiliki hubungan yang kuat dengan *network capability* karena komunikasi jaringan membutuhkan perawatan untuk memastikan antena, konektor dan modul pengiriman tetap dalam kondisi yang baik, pembaruan *firmware* untuk meningkatkan stabilitas koneksi yang dapat mempengaruhi performa jaringan komunikasi[21].

1.2.4 Solusi yang dipilih

Solusi pertama, yaitu sistem *monitoring* kondisi gelombang laut berbasis LoRaWAN dan *Decision Tree*, menunjukkan hasil terbaik dalam analisis menggunakan *House of Quality*. LoRaWAN memiliki keunggulan utama dalam jangkauan komunikasi yang sangat luas, dapat menjangkau hingga beberapa kilometer tanpa membutuhkan infrastruktur yang kompleks, yang sangat berguna untuk *monitoring* wilayah pesisir yang sulit dijangkau. Selain itu, LoRaWAN dirancang dengan efisiensi daya yang tinggi, memungkinkan perangkat bertahan lama dengan sumber daya terbatas, seperti baterai, yang sangat penting di daerah terpencil. Menggunakan *Decision Tree* sebagai metode komputasi memungkinkan sistem untuk memproses data dengan cepat dan efisien dalam mengklasifikasikan kondisi laut berdasarkan informasi sensor, seperti arus dan angin laut. Keputusan yang dihasilkan bisa langsung digunakan untuk memberi peringatan dini kepada otoritas atau masyarakat melalui notifikasi *real-time*, yang sangat berperan dalam mitigasi bencana. Meskipun demikian, tantangan dapat muncul dalam hal infrastruktur lokal yang membatasi kinerja LoRaWAN di beberapa wilayah tertentu. Secara keseluruhan, solusi pertama menawarkan kombinasi terbaik dalam hal jangkauan, efisiensi daya, dan pengolahan data *real-time*.

Solusi kedua yaitu menggunakan *WiFi* dan *Random Forest*, dapat menjadi pilihan yang baik jika area *monitoring* memiliki infrastruktur *WiFi* yang stabil dan konektivitas internet yang baik. *WiFi* memiliki kecepatan transfer data yang tinggi dan kemudahan implementasi di area dengan jaringan *WiFi* yang sudah ada.

Sementara itu, *Random Forest* sebagai metode komputasi memungkinkan analisis data dalam jumlah besar dengan akurasi tinggi namun akan memakan waktu yang lebih lama dibanding *decision tree* ketika klasifikasi, cocok untuk memproses informasi terkait kondisi laut dengan kompleksitas yang lebih tinggi. Namun, solusi ini memiliki beberapa kekurangan, terutama terkait dengan jangkauan yang terbatas sekitar 100-200 meter tanpa penghalang dan keterbatasan konektivitas internet, yang bisa menjadi masalah besar di daerah terpencil atau yang memiliki koneksi internet yang tidak stabil. Selain itu, biaya infrastruktur *WiFi* dan komputasi besar dapat menjadi kendala tambahan. Secara keseluruhan, meskipun solusi ini memiliki kekuatan dalam analisis data, biaya dan jangkauan terbatas menjadi pertimbangan yang penting.

Solusi ketiga, yang menggunakan *Zigbee* dan *Fuzzy Logic*, cocok untuk aplikasi skala kecil dengan keterbatasan sumber daya dan lebih fokus pada efisiensi daya. *Zigbee* dikenal dengan konsumsi daya yang rendah, namun memiliki jangkauan terbatas sekitar 10-100 meter, membuatnya lebih cocok untuk penggunaan di area dengan cakupan yang terbatas. *Fuzzy Logic* digunakan untuk menangani data yang tidak pasti atau tidak jelas, seperti kondisi arus dan angin yang dapat bervariasi. Metode ini yang lebih sederhana dan efisien, cocok untuk kondisi lingkungan yang dinamis, namun kurang fleksibel jika diperlukan untuk analisis data dalam skala besar. Meskipun biaya implementasi relatif lebih rendah, solusi ini mungkin tidak dapat menangani data besar atau memiliki jangkauan yang lebih luas seperti LoRaWAN. Oleh karena itu, solusi ini lebih sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan solusi hemat biaya dan energi dalam skala kecil.

Dengan demikian, solusi pertama yaitu LoRaWAN dan *Decision Tree* menjadi pilihan terbaik bagi *monitoring* kondisi gelombang laut di wilayah pesisir yang terpencil dan membutuhkan sistem jangkauan luas dan efisiensi daya. Solusi kedua yaitu *WiFi* dan *Random Forest* lebih tepat digunakan di area dengan infrastruktur *WiFi* yang sudah tersedia dan membutuhkan analisis data besar dengan akurasi tinggi, meskipun dengan beberapa keterbatasan terkait jangkauan dan biaya. Solusi ketiga yaitu *Zigbee* dan *Fuzzy Logic* lebih cocok untuk aplikasi dengan skala kecil dan biaya rendah, namun kurang dapat menangani data besar.