

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dengan 17.504 pulau, Indonesia adalah negara kepulauan terbesar di dunia. Di antara ribuan pulau tersebut, terdapat lima pulau utama yang memiliki luas wilayah paling besar, yaitu Seluas 539.460 km², Kalimantan, Sumatra, 473.606 km², Papua, 421.981 km², Sulawesi, 189.216 km², dan Jawa, masing-masing. Secara geografis, Indonesia membentang sepanjang 3.977 mil dan terletak di antara Samudra Hindia dan Samudra Pasifik. Sekitar 1.922.750 km² adalah area daratan Indonesia, dan 3.257.483 km² adalah area perairan Mearwa & Parinussa (2020). Indonesia berada di tempat yang strategis di mana benua Asia dan Australia bergabung, serta dua samudra besar, Samudra Pasifik dan Samudra Hindia. Selat Makassar adalah salah satu perairan dengan aktifitas maritim yang paling tinggi karena fungsinya sebagai jalur perdagangan internasional yang penting Rustam (2016).

Alur laut kepulauan Indonesia (ALKI) adalah tiga jalur pelayaran utama di Indonesia. ALKI I dimulai di Laut Cina Selatan dan melewati Selat Karimata hingga Selat Sunda; ALKI II dimulai di Samudra Pasifik dan melewati Selat Sulawesi, Selat Makassar, Laut Flores, dan berakhir di Selat Lombok; dan ALKI III dimulai di Samudra Pasifik dan melewati Selat Maluku, Laut Seram, hingga mencapai Laut Banda. Dari ketiganya, ALKI I adalah yang paling banyak dilalui kapal. Selat Makassar terletak di antara pulau Sulawesi dan Kalimantan. Bagian selatannya menghubungkan laut barat Sulawesi Selatan dengan Laut Jawa di timur. Ini juga merupakan selat dengan arus yang baik di Indonesia. Mengingat bahwa aktivitas kelautan sangat rentan terhadap cuaca, penting untuk memiliki pengetahuan tentang karakteristik gelombang untuk perencanaan kegiatan kelautan, seperti untuk merencanakan pembangunan di laut, tempat wisata, penelitian di laut, dan pelayaran, seperti untuk menentukan waktu layar, kapasitas muatan, dan desain kapal untuk menyesuaikan dengan tinggi gelombang di selat

Makassar bagian selatan setiap monsun.

Perubahan lingkungan perairan di suatu wilayah akan disebabkan oleh perubahan angin selama musim barat, timur, dan periode transisi. Selama periode transisi, kondisi laut biasanya tenang. Ini disebabkan oleh pergeseran angin dari barat ke timur atau sebaliknya Nontji (1987). Seperti yang dinyatakan oleh Hutabarat & Evans (1985), pola monsun sangat berkaitan dengan pergerakan air permukaan laut selama musim tertentu. Angin monsun secara signifikan memengaruhi arah arus dan gelombang laut, yang menyebabkan pergeseran besar dalam sirkulasi dan dinamika perairan permukaan.

Secara geografis, selat Makassar bagian selatan terletak di antara pulau Sulawesi dan pulau Kalimantan. Titik koordinatnya adalah 116,80BT–118,90BT dan 3,30LS–6,30LS. (Inaku F, 2015).



Gambar 1. 1 Lokasi selat Makassar

Lalu lintas laut yang tinggi di perairan Indonesia, yang berada di lokasi strategis, membawa keuntungan dan ancaman Prasteyani & Basith (2019). Banyak kecelakaan dapat terjadi karena banyaknya kapal yang melintasi selat Makassar. Putusan Mahkamah Pelayaran selama 5 tahun, dari tahun 2011 hingga 2016, menunjukkan bahwa faktor alam menyumbang 17,2% pertumbuhan kecelakaan kapal, faktor manusia menyumbang 9,4%, dan faktor tambahan menyumbang 4,6% Rahman, et al (2017). Faktor alam yang memengaruhi pelayaran adalah cuaca perairan. Faktor-faktor seperti kecepatan arus, kecepatan angin, ketinggian gelombang, dan cuaca yang tidak menentu adalah beberapa faktor cuaca perairan yang mempengaruhi kelayakan pelayaran. Variabel yang paling berdampak pada kelayakan pelayaran adalah ketinggian gelombang. Rahmadani et al (2019).

Kapal non-konvensi adalah kapal yang tidak diatur oleh konvensi internasional yang mengatur berbagai aspek terkait pengoperasian kapal seperti keselamatan, keamanan dan lingkungan . Kapal Non-konvensi dapat mencakup berbagai jenis kapal

seperti kapal perikanan, kapal penangkap ikan, kapal tongkang, kapal feri lokal, kapal wisata lokal dan kapal lain yang tidak diatur oleh konvensi internasional maka negara dapat menetapkan peraturan dan persyaratan sendiri terkait pengoperasian kapal non-konvensi di wilayahnya Widodo (2019).

Selat Makassar adalah jalur transportasi penting di Indonesia. yang menghubungkan Samudera Pasifik dengan Samudera Hindia. Selat Makassar juga dikenal dengan tinggi gelombang laut yang cukup Ektrim Izzati & Marzaman (2023). Tinggi gelombang laut yang ekstrim ini seringkali menjadi Kendala bagi pelayaran kapal non-konvensi seperti kapal perikanan, kapal wisata, dan kapal pengangkut barang di wilayah Laut Jawa, khususnya di bagian utara Pulau Jawa, antara Surabaya, Semarang, Banjarmasin, dan Makassar, Oleh karena itu, aspek keselamatan pelayaran menjadi sangat krusial. Untuk menganalisis sistem keamanan pelayaran, diperlukan informasi mengenai kondisi angin, arus laut, pasang surut, dan gelombang. Gelombang laut yang tinggi hingga ekstrem dapat membahayakan transportasi laut, seperti menyebabkan muatan kapal tanker terjatuh akibat hantaman gelombang, serta mengganggu distribusi logistik Pramita et al (2020) Tingginya gelombang laut yang tidak dapat diprediksi dengan akurat dapat menimbulkan bahaya bagi keselamatan kapal dan awaknya serta berdampak pada kelancaran distribusi barang dan jasa.

Salah satu komponen utama industri maritim adalah pelayaran. Kapal non-konvensi dan konvensional dianggap lancar ketika ketinggian ombak berada di sekitar batas normal, yaitu 1-2 meter Pedo Baluk et al (2020). Jika ketinggian ombak lebih dari itu, kapal akan ditunda. Menurut laporan yang dirilis oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, para pelaku kegiatan pelayaran memerlukan informasi cuaca harian, seperti tinggi gelombang dan kecepatan angin di laut, untuk membantu merencanakan keberangkatan kapal. Informasi tersebut penting guna mengantisipasi kondisi cuaca buruk yang dapat membahayakan keselamatan pelayaran. Kondisi cuaca yang tidak stabil berpotensi menyebabkan kecelakaan di tengah laut. Oleh karena itu, informasi mengenai ketinggian gelombang sebelum berlayar sangat diperlukan untuk menentukan kelayakan pelayaran.

Tabel 1.1 Prediksi Tinggi Gelombat Lautdi Selat Makassar Bagian Utara

Panduan Tinggi Gelombang						
Gelombang	Tenang	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi	Ekstrem
	0.0 - 0.5 m	0.5 - 1.25 m	1.25 - 2.5 m	2.5 - 4 m	4 - 6 m	6 - 9 m

Kode	Nama Wilayah Pelayanan	Cuaca	Angin		Gelombang
			Arah	Kec.(kt)	
M.01	Perairan Kota Baru bagian barat	Hujan Petir	Timur Laut - Tenggara	2 - 12	Rendah
M.02	Perairan Kota Baru bagian timur	Hujan Petir	Timur Laut - Tenggara	2 - 12	Rendah
M.03	Perairan Balikpapan	Hujan Ringan	Utara - Timur Laut	2 - 20	Rendah
M.04	Selat Makassar bagian tengah	Hujan Lokal	Utara - Timur Laut	2 - 20	Rendah
M.05	Perairan Sulawesi Barat	Hujan Lokal	Utara - Timur Laut	2 - 15	Rendah
M.06	Perairan Samarinda - Bontang	Hujan Ringan	Utara - Timur Laut	2 - 20	Rendah
M.07	Selat Makassar bagian utara	Hujan Lokal	Utara - Timur Laut	2 - 20	Rendah
M.08	Perairan barat Sulawesi Tengah	Berawan	Utara - Timur Laut	2 - 15	Rendah
M.09	Perairan Kalimantan Utara	Berawan	Utara - Timur Laut	2 - 20	Rendah

Catatan : Gelombang Maksimum dapat mencapai dua kali tinggi gelombang yang tertera diatas..

Sumber:BMKG

Tabel 1.2 Prediksi Tinggi Gelombat Lautdi Selat Makassar Bagian Tengah

Panduan Tinggi Gelombang						
Gelombang	Tenang	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi	Ekstrem
	0.0 - 0.5 m	0.5 - 1.25 m	1.25 - 2.5 m	2.5 - 4 m	4 - 6 m	6 - 9 m

Kode	Nama Wilayah Pelayanan	Cuaca	Angin		Gelombang
			Arah	Kec.(kt)	
M.01	Perairan Kota Baru bagian barat	Hujan Petir	Timur Laut - Tenggara	2 - 12	Rendah
M.02	Perairan Kota Baru bagian timur	Hujan Petir	Timur Laut - Tenggara	2 - 12	Rendah
M.03	Perairan Balikpapan	Hujan Ringan	Utara - Timur Laut	2 - 20	Rendah
M.04	Selat Makassar bagian tengah	Hujan Lokal	Utara - Timur Laut	2 - 20	Rendah
M.05	Perairan Sulawesi Barat	Hujan Lokal	Utara - Timur Laut	2 - 15	Rendah
M.06	Perairan Samarinda - Bontang	Hujan Ringan	Utara - Timur Laut	2 - 20	Rendah
M.07	Selat Makassar bagian utara	Hujan Lokal	Utara - Timur Laut	2 - 20	Rendah
M.08	Perairan barat Sulawesi Tengah	Berawan	Utara - Timur Laut	2 - 15	Rendah
M.09	Perairan Kalimantan Utara	Berawan	Utara - Timur Laut	2 - 20	Rendah

Catatan : Gelombang Maksimum dapat mencapai dua kali tinggi gelombang yang tertera diatas..

Sumber:BMKG

Prediksi Tinggi Gelombang					
Gelombang	Rencong	Pencut	Sedang	Tinggi	Distribusi
	0.0 - 0.5 m	0.5 - 1.25 m	1.25 - 2.5 m	2.5 - 4 m	4 - 6 m
					6 - 9 m

Kode	Nama Wilayah Pelayaran	Cuaca	Angin		Gelombang
			Arah	Kec.(KT)	
L.01	Selat Makassar bagian selatan	Hujan Ringan	Barat - Utara	10 - 20	Sedang
L.02	Perairan Pare - pare	Hujan Ringan	Barat - Utara	8 - 15	Nendak
L.03	Perairan Spermonde Pangkep bagian barat	Hujan Ringan	Barat - Utara	8 - 15	Nendak
L.04	Perairan Spermonde Pangkep	Hujan Ringan	Barat - Utara	8 - 15	Nendak
L.05	Perairan Spermonde Makassar bagian barat	Hujan Ringan	Barat - Utara	8 - 15	Nendak
L.06	Perairan Spermonde Makassar	Hujan Ringan	Barat - Utara	8 - 15	Nendak
L.07	Perairan barat Selayar	Hujan Sedang	Barat - Utara	10 - 20	Sedang
L.08	Perairan Sabalana	Hujan Ringan	Barat Daya - Barat Laut	10 - 20	Sedang
L.09	Teluk Bane bagian utara	Hujan Ringan	Barat Daya - Barat Laut	10 - 20	Nendak
L.10	Teluk Bane bagian selatan	Hujan Ringan	Barat Daya - Barat Laut	10 - 20	Nendak
L.11	Perairan timur Selayar	Hujan Ringan	Barat Daya - Barat Laut	10 - 20	Sedang
L.12	Laut Flores bagian utara	Hujan Sedang	Barat Daya - Barat Laut	10 - 20	Sedang
L.13	Laut Flores bagian barat	Hujan Lebat	Barat Daya - Barat Laut	10 - 20	Sedang
L.14	Perairan Bonerate - Kaladwa bagian utara	Hujan Lebat	Barat Daya - Barat Laut	10 - 20	Sedang
L.15	Perairan Bonerate - Kaladwa bagian selatan	Hujan Lebat	Barat Daya - Barat Laut	10 - 20	Sedang
L.16	Laut Flores bagian timur	Hujan Lebat	Barat Daya - Barat Laut	15 - 25	Tinggi

Sumber: Gelombang Maksimum dapat mencapai dua kali tinggi gelombang yang tertera diatas.

Tabel 1.3 Prediksi Tinggi Gelombang Laut di Selat Makassar Bagian Selatan

Sumber:BMKG

Untuk mendukung prediksi tinggi gelombang laut harian di Selat Makassar, perlu dilakukan estimasi biaya dan manfaat dari penggunaan informasi prediksi tersebut. Perhitungan ekonomi dapat mencakup biaya investasi awal, biaya operasional, dan manfaat yang diperoleh dalam jangka pendek dan jangka panjang. Dengan demikian, perhitungan ekonomi dapat digunakan untuk mengukur tingkat keuntungan dan manfaat dari penggunaan informasi prediksi harian tinggi gelombang di Selat Makassar. Informasi tersebut dapat membantu dalam pengambilan keputusan pada sektor pelayaran, perikanan, pariwisata, serta sektor lain yang berkaitan dengan aktivitas maritim. Dengan adanya model prediksi yang akurat terhadap gelombang dan cuaca, operator kapal non-konvesi dapat menghindari pelayaran saat kondisi laut berbahaya, sehingga mampu menekan biaya kerusakan kapal, meminimalkan penundaan perjalanan, serta mengurangi biaya operasional yang ditimbulkan Alfahmi et al (2018). Beberapa manfaat ekonomi yang dapat diperoleh dari prediksi tinggi gelombang laut harian di selat Makassar antara lain:

1. Efisiensi Pelayaran dengan prediksi tinggi gelombang laut harian yang akurat, kapal-kapal dapat menghindari rute yang berbahaya dan memilih rute yang lebih aman. Hal ini dapat mengurangi risiko kecelakaan laut dan kerugian ekonomi yang ditimbulkan. Selain itu, dengan mengoptimalkan kecepatan pelayaran dan menghindari penggunaan bahan bakar yang berlebihan, kapal-kapal dapat meningkatkan efisiensi pelayaran dan mengurangi biaya oprasional Alfahmi et al (2018)
2. Peningkatan produktivitas nelayan prediksi tinggi gelombang laut harian dapat

membantu nelayan dalam menentukan waktu yang tepat untuk memancing. Dengan memilih waktu yang tepat, nelayan dapat meningkatkan hasil tangkapan dan pendapatan mereka. Hal ini dapat meningkatkan produktivitas sektor perikanan, berkontribusi terhadap perekonomian Makassar, memastikan waktu berlayar aman dari gelombang tinggi, mengurangi risiko kerusakan kapal, dan meningkatkan keandalan rantai pasok. Khoirunnisa & Karima (2019)

3. Pengembangan pariwisata prediksi tinggi gelombang laut harian dapat membantu dalam pengelolaan pariwisata di Selat Makassar. Dengan mengetahui kondisi tinggi gelombang laut, pengelola pariwisata dapat menentukan waktu yang tepat untuk melakukan aktivitas wisata laut, seperti snorkeling dan diving. Hal ini dapat meningkatkan daya Tarik wisata dan pendapatan sektor wisata.
4. Potensi investasi prediksi tinggi gelombang laut harian dapat membuka peluang investasi baru di sektor pelayaran, perikanan, pariwisata, dan sektor terkait lainnya. Dengan mengetahui kondisi tinggi gelombang laut yang lebih akurat, investor dapat melakukan perhitungan yang lebih baik dalam mengevaluasi potensi keuntungan dan resiko investasi

Dalam penelitian ini, metode *Support Vektor Regression* (SVR) akan digunakan untuk menghitung bobot awal untuk memprediksi ketinggian gelombang laut di Selat Makassar. Data yang digunakan termasuk arah angin, kecepatan angin, dan tinggi gelombang setiap jam. Metode ini menggunakan algoritme propagasi balik untuk menghasilkan output yang sesuai dengan tujuan melalui perbaikan bobot. Kasus prediksi dengan data time-series dan masalah non-linear biasanya menggunakan metode SVR. Akibatnya, metode ini lebih fleksibel untuk prediksi data *time-series* seperti data ketinggian gelombang laut.

Tinggi gelombang laut sangat berpengaruh terhadap kapal yang melintas di perairan tersebut khususnya kapal non-konvensi yang menjadi fokus utama dalam penelitian ini. Kapal non-konvensi tidak memenuhi standar keselamatan hidup di laut (SOLAS). Standar untuk kapal non-konvensi ditetapkan dalam: Undang-Undang No. 17 Tahun 2008: Fungsi keselamatan dan keamanan pelayaran di Pelabuhan dipegang oleh Syahbandar .

- a. Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM. 118 Tahun 2018 Penyelesaian Pelanggaran Administratif di Bidang Perhubungan Laut.
- b. Keselamatan Pelayaran . Peraturan ini mengatur tentang sanksi Administratif yang dapat diberikan ke kapal-kapal nonkonvensi yang melanggar peraturan keselamatan

pelayaran.

- c. Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM. 38 Tahun 2019 tentang Pendaftaran Kapal Non Niaga. Peraturan ini mengatur persyaratan dan prosedur untuk kapal non-niaga (termasuk kapal-kapal non-konvensi di Indonesia).
- d. Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 79 tahun 2018 tentang Penyelenggaraan Pelayaran di wilayah Pelabuhan dan perairan . peraturan ini mengatur tentang persyaratan keselamatan pelayaran yang harus dipenuhi oleh semua jenis kapal yang beroperasi di wilayah Pelabuhan dan perairan , termasuk kapal – kapal non-konvensi.

Laut adalah salah satu rute transportasi penting di negara maritim seperti Indonesia karena berfungsi sebagai penghubung antar pulau dan melayani pelayaran antar pulau, serta menjadi tempat wisata populer. Setiap pelayaran dan kegiatan kelautan lainnya dapat direncanakan dengan baik dan efisien jika informasi tentang variabilitas gelombang di seluruh wilayah perairan tersedia. WMO (1998) menyatakan bahwa pengetahuan tentang cuaca dan iklim gelombang laut sangat penting untuk keselamatan dan efisiensi berbagai aktivitas manusia yang terjadi di laut, seperti transportasi, pembangunan struktur lepas pantai, dan pariwisata.

Studi tentang prediksi tinggi gelombang laut terus dilakukan menggunakan berbagai teknik prediksi, mulai dari yang paling sederhana hingga yang paling kompleks. Berbagai teknik digunakan untuk membuat sistem prediksi. Seperti penelitian sebelumnya tentang prediksi cuaca maritim, Penelitian Jabar Al Hakim tahun 2011, yang menggunakan metode logika fuzzy, menemukan tingkat akurasi 74,82% pada satu koordinat jalur perairan. Sonya melakukan penelitian tambahan pada tahun 2017 mengenai prediksi tinggi gelombang laut menggunakan metode JST Backpropagation. Penelitian serupa yang dilakukan oleh Raharja pada tahun 2018 mengenai prediksi ketinggian gelombang di pantai Gianyar menggunakan metode JST Backpropagation menemukan bahwa keakuratan prediksi ketinggian gelombang pada bulan berikutnya adalah 96,52%.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat sistem prediksi harian tinggi gelombang laut Selat Makassar yang lebih akurat dan fleksibel dengan menggunakan metode *Support Vector Regression*. Pendekatan ini menjadi pembeda dari studi-studi sebelumnya yang sebagian besar masih mengandalkan metode statistik konvensional atau model numerik deterministik. SVR dipilih karena kemampuannya menangani pola non-linear yang kompleks, khususnya dalam konteks dinamika gelombang laut tropis yang dipengaruhi oleh angin muson dan arus lintas Indonesia (*Indonesian Throughflow*). Selain

itu, penelitian ini mengintegrasikan data historis satelit dan observasi lokal sebagai basis pelatihan model, sehingga sistem yang dihasilkan mampu memberikan prediksi yang *real-time*, kontekstual, dan relevan bagi kebutuhan pelayaran kapal non-konvensi. Oleh karena itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat membantu menciptakan sistem prediksi oseanografi Indonesia yang lebih baik dan juga mendukung aktivitas ekonomi maritim Kota Makassar dengan memberikan informasi gelombang yang akurat dan mudah diakses. Metode *support vector regression* sangat efektif dalam memprediksi data dengan *noise* atau *outlier*. *Trik kernel*, di sisi lain, memungkinkan algoritma support vector regression untuk memperluas kemampuan linier model dengan memodelkan data dimensi tinggi.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan diteliti terdiri dari pertanyaan berikut berdasarkan penjelasan awal::

1. Bagaimana Sistem Prediksi Tinggi Gelombang Laut Harian Di Selat Makassar menggunakan metode Support Vektor Regression (SVR)?
2. Bagaimana efek Sistem Prediksi Tinggi Gelombang Laut Harian Di Selat Makassar untuk Pelayanan Kapal Non-Konversi Dalam Menunjang Perekonomian Kota Makassar?
3. Bagaimana Persepsi pada sistem prediksi gelombang laut dan hubungannya terhadap kinerja transportasi laut dan ekonomi Makassar: Studi pada Pelayanan Kapal Non-Konversi?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan masalah di atas, tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis Sistem Prediksi Tinggi Gelombang Laut Harian Di Selat Makassar menggunakan metode *Support Vektor Regression* (SVR).
2. Menganalisis efek Sistem Prediksi Tinggi Gelombang Laut Harian Di Selat Makassar untuk Pelayanan Kapal Non-Konversi Dalam Menunjang Perekonomian Kota Makassar
3. Menganalisis Persepsi pada sistem prediksi gelombang laut dan hubungannya

terhadap kinerja transportasi laut dan ekonomi Ekonomi Makassar: Studi pada Pelayanan Kapal Non-Konversi

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberi beberapa kontribusi seperti:

1. Bagi Masyarakat. Memberikan informasi kepada masyarakat mengenai prediksi tinggi gelombang laut di selat makassar.
2. Peneliti. Memberikan pemahaman tentang faktor-faktor yang mempengaruhi gelombang laut
3. Pemerintah. Memberikan informasi pendukung dalam desain dan operasi bangunan laut.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian yang dilakukan adalah:

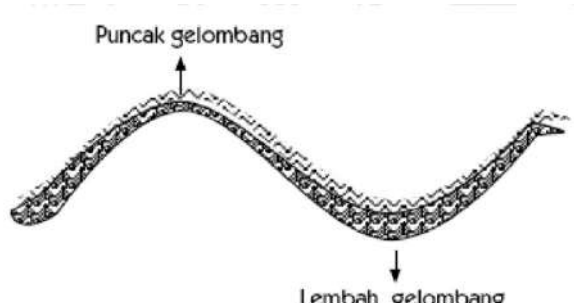
1. Penelitian ini dilaksanakan di dua lokasi utama, yaitu di kantor Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Makassar serta di Pelabuhan Paotere Makassar. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada relevansinya terhadap kajian gelombang laut dan aktivitas pelabuhan yang menjadi fokus utama penelitian
2. Penelitian Data yang digunakan dalam penelitian ini mencakup berbagai aspek penting, antara lain data tinggi gelombang yang diperoleh dari BMKG Makassar, serta informasi tentang semua barang, kapal, dan orang yang melalui Pelabuhan Paotere. Untuk meningkatkan analisis, juga dikumpulkan data tentang jenis barang yang diangkut, volume, dan kinerja pelabuhan, serta perkembangan ekonomi dan infrastruktur Kota Makassar.
3. Metode Support Vector Regression yang dikenal mampu menangani pola data *non-linear* secara lebih akurat dibandingkan metode statistik konvensional. Pendekatan ini dipilih guna menghasilkan model prediksi tinggi gelombang laut harian yang lebih responsif terhadap dinamika alam di wilayah tropis seperti Selat Makassar.

1.6 Tinjauan Pustaka Umum

1.6.1 Gelombang laut

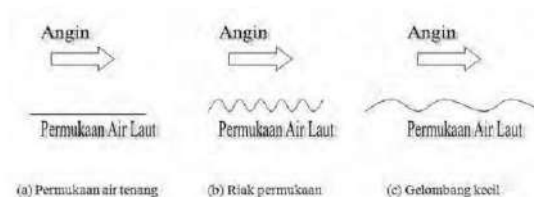
Gelombang laut sebagai energi yang sedang berubah Prinsip dasar terjadinya gelombang laut adalah bahwa gelombang terbentuk di bidang geraknya ketika dua massa benda yang berbeda kerapatannya (intensitasnya) bergesekan satu sama lain

Marino et al (2023). Namun, menurut Pinner et al (2025), gelombang laut adalah energi yang berasal dari transisi dua massa benda yang berbeda kerapatannya bergesekan satu sama lain, yang menyebabkan air laut naik turun.



Gambar 1. 2 Pergerakan Air Laut.
Sumber: Waldopo 2008

Tidak banyak orang yang benar-benar memahami atau menjelaskan proses pembentukan gelombang laut oleh gerakan angin. Gelombang laut, yang permukaannya tidak teratur atau selalu berubah dari waktu ke waktu, dapat didefinisikan sebagai gelombang *irregular*. Mereka bervariasi dari satu tempat ke tempat lain tergantung pada kecepatan angin. Riak permukaan akan dibuat oleh hembusan angin seperti itu. (lihat Gambar 1.3).



Gambar 1.3 Proses Pembentukan Gelombang Akibat Angin
Sumber: Akupintar

Gelombang terjadi karena riak air meningkat dan angin menyebar ke jarak yang cukup jauh dari permukaan laut. Di atas gelombang yang sudah ada, riak permukaan baru akan berkembang menjadi gelombang baru sendiri. Ini pasti akan terjadi secara berkala atau berulang kali. Gelombang seperti itu terjadi sebagai kombinasi perubahan panjang dan tinggi yang saling bertautan pada waktu dan tempat tertentu. Jika gelombang tidak terpengaruh oleh gelombang lain, bagian gelombang tertentu tetap memiliki karakteristik gelombang dalam kondisi ideal. Sebagai contoh, gelombang yang bergerak secara cepat akan melewati gelombang

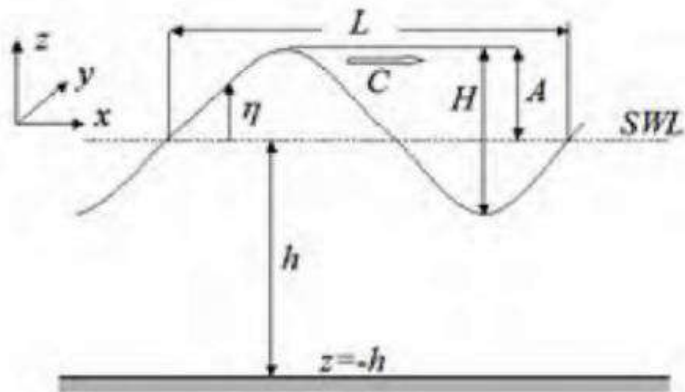
lain yang lebih pendek, atau lamban, yang menyebabkan perubahan konstan selama gerakan gelombang yang saling melampaui parameter gelombang terdiri dari banyak bagian, seperti:

- a. Puncak gelombang adalah titik tertinggi gelombang;
- b. Lembah gelombang adalah titik terendah gelombang;
- c. Panjang gelombang adalah jarak mendatar antara dua puncak gelombang atau lembah gelombang;
- d. Tinggi gelombang adalah jarak tegak antara dua puncak dan lembah gelombang;
- e. Periode gelombang adalah waktu yang dibutuhkan oleh dua puncak gelombang untuk mencapai puncaknya.

Bhat (1978), Garrison (1993), dan Gross (1993) mengemukakan bahwa ada 3 bentuk besaran yang berkaitan dengan gelombang, yakni:

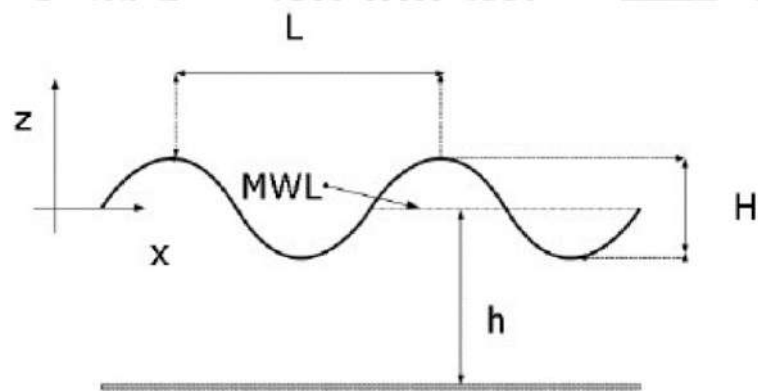
- (a) adalah jarak antara puncak gelombang dan permukaan rata-rata air.
- (b) Frekuensi gelombang
adalah jumlah gelombang yang melintasi suatu titik dalam waktu tertentu, biasanya dalam satuan detik.
- (c) Kecepatan gelombang adalah jarak yang ditempuh gelombang dalam satuan waktu tertentu. Untuk menentukan spektrum (kandungan energi gelombang), beberapa istilah dan ukuran gelombang diperlukan.

Sebagai dasar penentuan spektrum (kandungan energi gelombang), diperlukan beberapa istilah/ukuran gelombang yang ditunjukkan Gambar 1.4



Gambar 1.4 Gelombang yang berada dalam koordinat x-y dan merambat pada sumbu x yang dikembangkan oleh Djabbar.

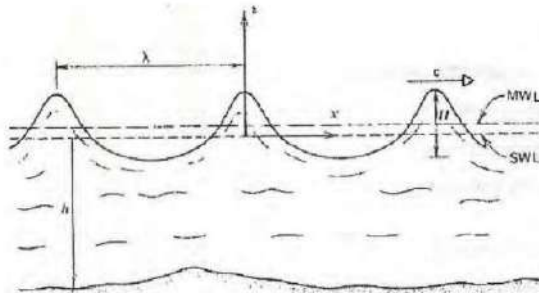
Sumber: Djabbar



Gambar 1. 5 Karakteristik Gelombang Laut Linear

Sumber: Djabbar

Gelombang laut diklasifikasikan sebagai linier dan non-linier. Salah satu ciri khas gelombang linier adalah profilnya yang berbentuk sinusoidal. Jika gelombang laut yang dalam dengan nilai H/λ yang rendah merambat dengan profil ini, profilnya akan berubah dengan puncak gelombang yang meruncing dan panjang gelombang akan mengecil setelah rambatan mencapai kedangkalan tertentu.



Gambar 1 6 Karakteristik Gelombang Laut Non Linear
Sumber: Waldopo

Permukaan air laut (SWL) dan muka air rata-rata (MWL) berbeda dalam gelombang non-linier. Jika batas SWL dan MWL berhimpit, gelombang non-linier akan berubah kembali menjadi gelombang linier. Menurut pemahaman para ahli, SWL selalu berada di bawah MWL. Dua jenis gelombang—linier dan nonlinier—bergerak pada sumbu x . Beberapa kesimpulan dari pemodelan yang dibuat di bawah ini

berikut:

MWL : *Mean Sea Water Level* (muka air tenang rata-rata)

SWL : *Surface Sea Water Level* (permukaan air laut)

λ : *Wave Length* [m]

H : *Depth below SWL* (kedalaman) [m]

T : *Wave periode* [s]

C : Kecepatan rambat gelombang (wave front velocity) [m/s]

H : Kemiringan gelombang

1.6.2 Peramalan Gelombang

Menurut Danial (2008), gelombang laut adalah aliran air laut yang bergerak naik turun karena angin di daerah pembangkitan laut dalam. Bentuk gelombang laut

biasanya sangat kompleks dan sulit untuk dijelaskan secara menyeluruh karena sifatnya yang tidak linier, tiga dimensi, dan memiliki periode dan tinggi gelombang yang berbeda. Gelombang laut disebabkan oleh angin, gaya tarik matahari dan bulan, pasang surut, dan letusan gunung berapi di laut..

Selat Makassar memiliki korelasi kuat antara kecepatan angin dan tinggi gelombang, di mana peningkatan kecepatan angin secara signifikan berkontribusi terhadap kenaikan tinggi gelombang. Angin yang bertiup secara terus-menerus dengan kecepatan tinggi akan mentransfer energi ke permukaan laut, sehingga membentuk gelombang yang lebih tinggi dan kuat. Hal ini menunjukkan bahwa pemantauan kecepatan angin dapat menjadi indikator awal yang efektif untuk memprediksi kondisi gelombang laut, terutama dalam konteks keselamatan pelayaran dan aktivitas maritim di kawasan tersebut Khoirunnisa & Karima (2019).

Menurut Baharuddin et al. (2009), Dalam teknik pantai, gelombang yang dihasilkan oleh angin dan pasang surut adalah yang paling sering dipelajari. Jumlah energi yang dapat dihasilkan oleh angin dipengaruhi oleh tiga faktor: lama angin bertiup, kecepatan angin, dan fetch, atau jarak yang ditempuh oleh angin dari arah atau lokasi pembangkitan gelombang. Gelombang yang bergerak keluar dari lokasi pembangkitan hanya menghasilkan energi. Gelombang dapat menghasilkan energi untuk membentuk pantai, membentuk arus dan transportasi sedimen sepanjang pantai, dan menghasilkan gaya yang bekerja pada struktur pantai. Menurut Triatmodjo (1999).

Admiral Sir Francis Beaufort (1808) adalah orang yang menemukan skala angin Beaufort dan pertama kali menjelaskan kondisi angin dan gelombang yang ditimbulkannya. Dengan menghitung hubungan antara kecepatan angin dan kondisi permukaan laut, khususnya kondisi tinggi gelombang yang signifikan, H.V. Sverdrup dan W.H. Munk (1947) menciptakan metode peramalan gelombang modern (Mourice, 2005). ditunjukkan dalam tabel 1.4 di bawah ini:

Tabel 1. 4 Skala beaufort

No	Kecepatan angin (knot)	Tipe angin
1	11-16	Angin Sedang
2	17-21	Angin Agak Kuat
3	22-27	Angin kuat

(Yuwono dan Kodotie,2004)

Menurut Lakitan (2002), angin adalah massa udara yang bergerak dengan arah datang dan kecepatan satu knot (1,852 km/jam). Windrose atau windflower dapat digunakan untuk mengetahui kecepatan dan arah dominan angin untuk menginterpretasikan data angin. Angin menghasilkan gelombang laut di perairan, yang kemudian merambat ke arah pantai dan pecah saat perairan turun di dekat pantai. Prediksi gelombang menunjukkan periode gelombang yang panjang dan tinggi. Gelombang dihasilkan oleh angin dari semua arah. Data yang diperlukan untuk memperkirakan termasuk::

1. Panjang fetch efektif.
2. Arah angin.
3. Data kecepatan angin yang telah dikonversi menjadi wind stress factor (UA).

Gelombang rencana dibuat dengan data angin jangka panjang. Data permukaan laut digunakan untuk angin. Metode Debyshire digunakan pada daerah pantai atau perairan dangkal, sedangkan metode SMB (*Sverdrup-Munk-Bretschneider*) digunakan pada daerah lepas pantai yang mengabaikan topografi laut. Apabila metode SMB diterapkan pada daerah perairan dangkal, maka akan didapatkan kesalahan karena efek pendangkalan, yang sangat mempengaruhi kondisi gelombang dan angin. Sugito (2010).

Angin yang berhembus di atas permukaan laut berperan penting dalam pembangkitan gelombang laut. Ketika angin mulai meniup permukaan air yang semula tenang, akan timbul gangguan berupa riak-riak kecil yang kemudian berkembang menjadi gelombang. Proses ini merupakan bentuk transfer energi dari udara ke permukaan air melalui dua mekanisme utama: dorongan langsung oleh angin dan tekanan tangensial terhadap partikel-partikel air. Kecepatan dan arah angin menjadi faktor dominan yang memengaruhi tinggi dan arah gelombang. Oleh karena itu, data angin menjadi komponen penting dalam peramalan gelombang laut, yang dapat digunakan untuk memperkirakan kondisi laut di suatu wilayah tertentu Ramli et al (2025).

Angin yang berhembus ke permukaan ini akan memindahkan energinya ke air, menurut Bambang Triatmodjo (1999). Dengan kecepatan angin, permukaan laut akan bergejolak, mengganggu permukaan air yang tenang, menyebabkan gelombang kecil. Ketika kecepatan angin meningkat, gelombang menjadi lebih besar dan akan muncul ketika angin berhembus terakhir. Kecepatan angin (U), lama angin berhembus (t_d), dan panjang fetch (F) mempengaruhi tinggi gelombang dan periode gelombang. Panjang fetch membatasi berapa lama gelombang harus berada di bawah pengaruh angin; jika panjang fetch pendek, energi yang ditransfer angin tidak cukup besar, tinggi gelombang

tidak akan terjadi.

1.6.3 Kecepatan Angin

Kecepatan angin biasanya hanya dicatat untuk harga yang sangat tinggi, kata Triatmodjo (1999). Tidak boleh menggunakan pengukuran kecepatan angin ekstrim dalam waktu singkat sebagai pengukuran kecepatan angin dalam pembangkitan gelombang; jika diperlukan, hasilnya harus diubah menjadi kecepatan rata-rata selama sepuluh, dua puluh, atau lima puluh menit. Kecepatan angin biasanya diukur pada ketinggian sepuluh meter untuk meramalkan gelombang. Jika kecepatan angin tidak dapat diukur pada ketinggian tersebut, kecepatan angin harus dikoreksi dengan menggunakan rumus berikut:

$$U_A = 0,71 \cdot U^{1,23} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dengan :

U_A = kecepatan angin terkoreksi (m/dt)

U = kecepatan angin (m/dt)

Persamaan pembangkitan gelombang biasanya digunakan di daratan untuk menghitung kecepatan angin dengan menggunakan data dari permukaan air laut. Untuk peramalan gelombang, periode dan tinggi gelombang harus dipilih dari seri pencatatan gelombang, salah satunya adalah $H_{1/3}$, yang juga disebut sebagai tinggi gelombang signifikan (H_s). Metode pengukuran tinggi gelombang juga dapat dilakukan dengan cara yang sama.

1.6.4 Gelombang Signifikan

Analisis spektrum gelombang Pierson dan Moskowitz, yang dibuat berdasarkan kondisi FDS (*Fully Developed Sea*), digunakan untuk menentukan tinggi gelombang signifikan (H_s) dan periode gelombang signifikan (T_s). Menurut Yuwono (1982), dengan mengetahui kecepatan angin rata-rata di atas permukaan laut, dapat digunakan rumus di bawah ini :

$$H_s = 0,0056 \cdot U_A^2 \dots\dots\dots(2.8)$$

$$T_s = 0,33 \cdot U_A \dots\dots\dots(2.9)$$

Dengan :

H_s = Tinggi gelombang signifikan (m)

T_s = periode gelombang signifikan (dt)

U_A = Kecepatan angin terkoreksi (m/dt)

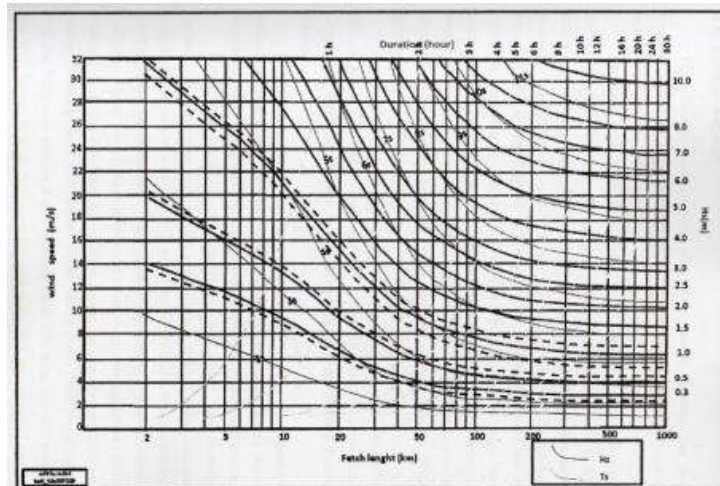
1.6.5 Fetch

Menurut Impar (2020), fetch adalah jarak seret gelombang ketika pembangkitan gelombang di laut ditinjau dari bentuk daratan yang mengelilingi laut. Sedangkan menurut Andhi Setyo et al (2021) Fetch merupakan jarak bebas di atas permukaan laut tempat angin bertiup tanpa hambatan, yang berperan penting dalam proses pembangkitan gelombang laut. Dalam kajian teknik pantai dan oseanografi, *fetch* dibatasi oleh bentuk geografis daratan yang mengelilinginya. Semakin panjang fetch, semakin besar energi angin yang dapat ditransfer ke permukaan laut untuk membentuk gelombang. Pembangkitan gelombang tidak hanya berlangsung searah dengan tiupan angin, tetapi juga menyebar ke berbagai sudut, menghasilkan spektrum gelombang yang lebih kompleks. Karena itu, fetch menjadi salah satu parameter utama dalam perhitungan dan peramalan tinggi gelombang signifikan, terutama di kawasan perairan terbatas seperti teluk dan zona pesisir. Dalam analisis pembangkit gelombang laut, fetch hanya terbatas pada daratan yang mengelilingi laut. Namun, di daerah pembentukan gelombang, gelombang tidak hanya dibangkitkan dalam arah yang sama dengan arah angin, tetapi juga dibangkitkan dalam sudut yang berbeda dari arah angin.

1.6.6 Peramalan Gelombang Dilaut Dalam

Menurut Impar (2020), daerah pembentukan gelombang dan data angin adalah sumber utama gelombang. Oleh karena itu, peramalan gelombang didasarkan pada data angin. Meskipun demikian, menurut Kurniawan dan Najib Habibie (2011). Gelombang laut adalah gerakan naik dan turun permukaan air laut yang terjadi secara periodik sebagai hasil dari gaya pembangkit seperti angin, gempa bumi, atau gaya tarik benda langit. Jenis, tinggi, dan periode gelombang yang terjadi di daerah pantai dapat dihitung dengan mengumpulkan data fetch angin. Untuk melakukan ini, kita dapat menggunakan grafik peramalan

gelombang, yang dapat dilihat pada gambar. 1.7



Gambar 1. 7 Grafik Peramalan Gelombang oleh Darbyshire-Draper.
(Sumber: CERC,1984)

1.6.7 Pemilihan Tinggi Gelombang Rencana

Saat memilih kondisi gelombang untuk rencana analisis stabilitas bangunan pantai, menurut Yuwono (1982), sangat penting untuk mempertimbangkan apakah bangunan pantai tersebut mengalami serangan gelombang pecah, tidak pecah, atau telah pecah, serta bentuk dan tujuan bangunan. Apabila karakteristik gelombang telah ditentukan, langkah selanjutnya adalah menentukan apakah tinggi gelombang di lokasi bangunan dipengaruhi dan dibatasi oleh kedalaman air. Tinggi gelombang yang direncanakan tergantung pada jenis bangunan yang akan dibangun. Tingkat gelombang rencana untuk beberapa diatur oleh standar. kebutuhan:

1. Konstruksi Kaku

Misalnya : menara bor lepas pantai, tinggi gelombang rencana yang dipakai adalah H maksimum.

2. Konstruksi Fleksibel

Misalnya : *rubble mound breakwater*, tinggi gelombang rencana yang dipakai adalah H signifikan.

3. Konstruksi Semi Kaku

Misalnya : dinding pantai (*Sea Wall*), tinggi gelombang rencana yang dipakai adalah H_{10} .

4. Proses Yang Terjadi di Pantai

Misalnya : peramalan angkutan sedimen, tinggi gelombang rencana yang dipakai adalah H signifikan atau H tahunan.

1.6.8 Kala Ulang Gelombang Rencana

Jenis konstruksi yang akan dibangun dan nilai wilayah yang akan dilindungi biasanya menentukan kala ulang gelombang rencana yang dipilih. Nilai wilayah yang akan dilindungi biasanya lebih besar daripada kala ulang gelombang rencana yang dipilih. Kala ulang gelombang rencana dapat dilihat dalam Tabel 1.5.

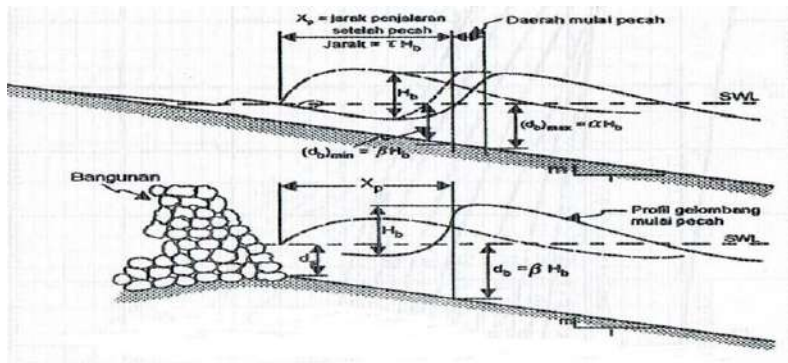
s		
No	Jenis Bangunan	Jenis Gelombang
1	Konstruksi Fleksibel (<i>Fleksible Structure</i>)	H_s
2	Konstruksi Semi Kaku (<i>Semi Rigid Structure</i>)	$H_{0,1} \cdot H_{0,01}$
3	Konstruksi Kaku (<i>Fixed Rigid Structure</i>)	$H_{0,1} \cdot H_{max}$

(Nur Yuwono, 1992)

Analisa harga—harga gelombang ekstrim tinggi—digunakan untuk menentukan kapan gelombang rencana akan ulang. Tinggi gelombang tertinggi biasanya dicatat setiap tahun.

1.6.9 Gelombang Pecah

Profil gelombang yang menjalar dari laut dalam menuju pantai adalah sinusoidal karena perubahan kedalaman laut. Semakin menuju ke perairan yang lebih dangkal, puncak gelombang menjadi lebih tajam dan lembahnya menjadi lebih datar. Selain itu, kecepatan dan panjang gelombang berkorelasi dengan tingginya. Ketika gelombang laut dalam bergerak menuju pantai, kemiringannya akan meningkat sampai mencapai kedalaman tertentu yang dikenal sebagai kedalaman gelombang pecah. (Triatmodjo, 1999).



Gambar 1. 8 Proses Gelombang Pecah
(Bambang Triatmodjo, 1999, Teknik Pantai)

Untuk menentukan tinggi dan kedalaman gelombang pecah, gelombang pecah dapat dibagi menjadi tiga kategori., menurut Triatmodj (1999):

1. *Spilling*

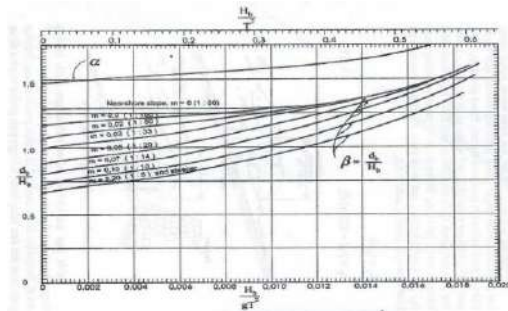
Gelombang dengan kemiringan kecil menuju pantai yang datar biasanya menyebabkan spin. Gelombang mulai pecah secara bertahap dari jarak yang cukup jauh dari pantai. Selama pecah, buih terkumpul di puncak gelombang dan meninggalkan lapisan tipis buih di jarak jauh.

2. *Plunging*

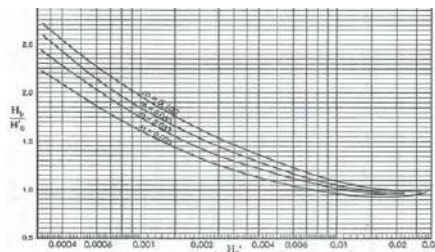
Energi gelombang dipecahkan oleh turbulensi, dan sebagian kecil dipantulkan ke pantai ke laut. Karena kemiringan dan dasar gelombang yang lebih tinggi, tidak banyak gelombang baru terjadi pada air yang lebih dangkal. Puncak gelombang akan bergerak, dan massa airnya akan terjun ke arah lebih lanjut.

3. *Surging*

Surging pantai yang memiliki kemiringan yang sangat besar sangat mirip dengan surging pantai yang terbuat dari karang. Sebagian besar energi dipantulkan kembali ke laut dalam saat tempat gelombang pecah sangat kecil. Gelombang pecah jenis surging ini memiliki mirib plunging, tetapi dasar gelombang telah pecah sebelum mencapai puncaknya.



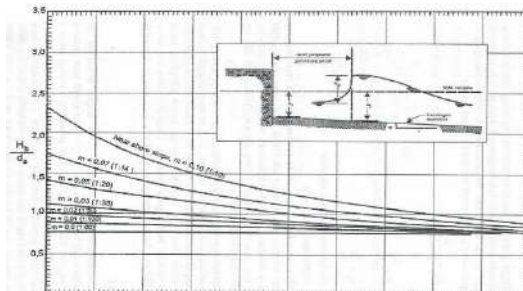
**Gambar 1. 9 Grafik Penentuan Kedalaman Gelombang Pecah
(Bambang Triatmodjo, 1999, Teknik Pantai)**



**Gambar 1. 10 Grafik Penentuan Tinggi
Gelombang Pecah
(Bambang Triatmodjo, 1999, Teknik Pantai)**

1.6.10 Gelombang Pecah Rencana

Rencana gelombang pecah H_b tinggi dipengaruhi oleh kedalaman air. di depan kaki bangunan saat gelombang terjadi pertama kali. Selama pasang surut, kedalaman tersebut berubah. Gelombang laut dalam seringkali menyebabkan gelombang pecah rencana tersebut. Untuk mengetahui seberapa banyak Setelah gelombang pecah rencana, Anda dapat membandingkan tinggi gelombang laut dalam dengan hasil analisis statistik gelombang laut dalam. Tinggi gelombang laut dalam dapat dihitung dengan menggunakan gambar 1.11.



**Gambar 1. 11 Tinggi Gelombang Pecah Rencana di Kaki Bangunan
(Bambang Triatmodjo, 1999, Teknik Pantai)**

1.6.11 Selat Makassar

Di tepi lempeng Eurasia, Selat Makassar terletak di wilayah tektonik yang kompleks. Ini terletak di Indonesia, di antara pulau Kalimantan dan Sulawesi. Bagian utara selat terdalam memiliki kedalaman lebih dari 2500m dan berhubungan langsung dengan Laut Sulawesi. Bagian selatan selat lebih dangkal, dengan kedalaman kurang dari 2000m, dan menghubungkan ke selatan ke daerah paparan (shelf) dangkal di timur Laut Jawa Kappelman et al (2024)

Perairan Selat Makassar relatif subur. Selat Makassar subur sepanjang tahun, baik di musim barat maupun timur. Selat Makassar terdiri dari wilayah-wilayah di Kalimantan Timur, Kalimantan Selatan, Sulawesi Selatan, dan Sulawesi Barat. Wilayah-wilayah ini memiliki peran strategis untuk menghubungkan provinsi-provinsi di Kalimantan dengan provinsi-provinsi di Sulawesi, terutama dalam hal pemanfaatan potensi dan sumber daya laut yang tersedia di kedua wilayah tersebut. Izzati & Mar zaman (2023) Peningkatan masa air di Selat Makassar menyebabkan penyebaran pada musim timur. Pada musim barat, runoff besar dari daratan Kalimantan dan Sulawesi disebabkan oleh curah hujan yang tinggi. Selain itu, selat ini menghubungkan Laut Jawa di bagian selatan dengan Laut Sulawesi di bagian utara. Selat Makassar adalah salah satu Alur Laut Kepulauan Indonesia (ALKI). Balikpapan, Makassar, dan Palu adalah kota pelabuhan penting di selat ini. Sebagai Alur Laut Kepulauan Indonesia (ALKI) II, Selat Makassar menjadi jalur ekonomi penting dan lintasan kapal besar

1.6.12 Pengertian Kapal Konvensi dan Non-Konvensional

Menurut Undang-Undang Republik Indonesia No. 21 tahun 1992, kapal termasuk semua jenis kendaraan air berbentuk dan jenis apapun, yang digerakkan oleh tenaga mekanik, menggunakan tenaga angin, atau ditunda; kapal juga termasuk alat apung dan struktur terapung yang tidak berpindah-pindah. Pratima et al. (2020b) menyatakan bahwa kapal adalah sarana transportasi laut yang mengangkut orang dan barang melalui jalur perairan dari satu pelabuhan ke pelabuhan lainnya. Namun demikian, melihat ketentuan umum konvensi internasional IMO, terutama SOLAS & ILLC, yang telah diadopsi oleh banyak negara, termasuk Indonesia, menunjukkan bahwa konvensi tersebut lebih berfokus pada penggunaan untuk jenis kapal yang menempuh jalur pelayaran internasional...

Seperti yang dinyatakan sebelumnya, hasil konvensi internasional hanya berlaku untuk kapal-kapal yang melakukan perjalanan internasional. Karena sulit untuk membuat peraturan dasar yang mencakup semua jenis dan ukuran kapal serta kondisi operasinya, sangat wajar jika hasil konvensi tersebut hanya membatasi persyaratan pada kapal-kapal yang sudah harus memenuhi peraturan tersebut. Kriteria yang berkaitan dengan jenis kapal tidak akan dipengaruhi oleh jenis SOLAS (Safety of Life At Sea). dibawah ini:

- Kapal perang dan kapal pasukan
- Kapal Cargo dengan tonase kurang dari 500GT
- Kapal yang tidak digerakkan dengan peralatan mekanis.
- Kapal kayu yang dibangun secara primitive (tradisional)
- Yacht yang tidak dipakai untuk perdagangan Kapal Ikan

Demikian juga Kalau menurut ILLC atau (International Load Line Convention), juga tidak akan berlaku untuk jenis kategori kapal yang terdapat dibawah ini:

- Kapal Perang
- Kapal baru dengan panjang kurang dari 24 meter
- Kapal "existing" dengan tonnage kurang dari 150GT
- Yacht yang tidak dipakai untuk perdagangan Kapal Ikan

Oleh karena itu, aturan konvensi tidak mencakup kapal-kapal yang tidak memenuhi kriteria di atas. Akibatnya, istilah "kapal non-konvensi" atau "kapal non-konvensi" adalah istilah yang umum digunakan untuk menggambarkan jenis kapal

ini. Secara logis, ini menunjukkan bahwa konvensi di atas tidak menetapkan standar khusus untuk kelayakan dan keselamatan kapal non-konvensi. Demikian juga, dengan melihat teks UU RI No 21 tahun 1992 di atas, dijelaskan bahwa pemerintah memiliki tanggung jawab yang lebih luas daripada konvensi internasional. Karena UU no 21/1992 mencakup semua kapal tanpa mempertimbangkan batasan kriteria yang disebutkan di atas. Pemerintah telah mengeluarkan Kepmenhub no. KM65/2009 mengenai Standar Kapal Non-konvensi pada bulan September 2009, yang merupakan langkah maju dalam upaya untuk meningkatkan standar keselamatan pelayaran. Ini karena beberapa negara di wilayah ini telah memiliki peraturan serupa beberapa tahun sebelumnya. Singapura adalah salah satunya, yang telah memiliki peraturan keselamatan kapal dagang pada tahun 1990. Andre Kurniawan (2020) membagi kapal menjadi empat kategori, mengklasifikasikan berbagai jenis kapal: yaitu:

1. Kapal Perang: Jenis pertama adalah kapal angkatan laut, yang seperti namanya berfungsi sebagai pendukung operasi militer di laut. Kapal induk, kapal perang, dan kapal selam biasanya merupakan kapal jenis ini.
2. Kapal Barang: Kapal barang adalah jenis kapal yang kedua yang berukuran besar dan dapat mengangkut sejumlah besar barang. Kapal-kapal ini sering dilihat di pelabuhan. Selain itu, kapal barang ini memiliki berbagai jenis, seperti kapal kontainer, kapal tanker, kapal pengangkut barang cair, kapal pengangkut mobil, dan sebagainya..
3. Kapal penumpang (Passenger Vessels): Kapal penumpang adalah jenis kapal ketiga yang dapat mengangkut banyak penumpang. Beberapa
4. Kapal pesiar, kapal laut, dan kapal fery adalah jenis kapal penumpang.

Kapal Fungsional: Ini adalah jenis terakhir dari kapal fungsional. Kapal jenis ini digunakan untuk melakukan fungsi tertentu, seperti tunda, derek, dan pengeboran.

1.7 Research GAP dan Novelty

Penelitian ini dilakukan di dua lokasi utama, yaitu Stasiun BMKG Maritim Makassar dan Pelabuhan Paotere Makassar, sebagai representasi kawasan pesisir yang memiliki aktivitas pelayaran tinggi, khususnya kapal-kapal non-konvensi. Stasiun BMKG Makassar dipilih karena merupakan pusat data meteorologi dan oseanografi yang menyediakan informasi cuaca laut harian, termasuk data kecepatan angin dan

tinggi gelombang yang dibutuhkan dalam analisis prediktif. Sementara itu, Pelabuhan Paotere dipilih sebagai lokasi implementasi lapangan karena merupakan salah satu pelabuhan tradisional tertua di Makassar yang menjadi pusat aktivitas kapal kayu, kapal nelayan, dan kapal penumpang berskala kecil. Dengan menggabungkan data observasi dari BMKG dan kondisi nyata di pelabuhan tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat sistem prediksi tinggi gelombang laut harian yang lebih akurat untuk membantu keselamatan pelayaran dan efisiensi operasi kapal non-konvensi di wilayah perairan Selat Makassar.

Penelitian mengenai sistem prediksi tinggi gelombang laut harian di Selat Makassar memiliki tingkat kebaruan (*novelty*). Aplikasi *Rupah Weather* memiliki beberapa indikator signifikan yang menunjukkan manfaat dan efektivitasnya dalam menyediakan informasi cuaca maritim. Salah satu indikator utama adalah akurasi prediksi cuaca, seperti informasi tinggi gelombang, kecepatan angin, curah hujan, dan kondisi laut yang sesuai

dengan keadaan sebenarnya. Selain itu, aplikasi ini menyediakan informasi tinggi gelombang signifikan ($H_{1/3}$) yang sangat penting bagi nelayan dan pelaku pelayaran untuk menentukan keamanan saat berlayar. Kecepatan pembaruan data secara berkala dan *real-time* juga menjadi indikator penting agar pengguna dapat memperoleh informasi cuaca terbaru dengan cepat. , terutama dalam konteks aplikasinya terhadap pelayanan kapal non-konvensi dan kontribusinya terhadap perekonomian lokal Kota Makassar. Selama ini, sistem prediksi gelombang laut masih didominasi oleh pendekatan konvensional dan deterministik yang kurang adaptif terhadap dinamika laut tropis yang kompleks, seperti pengaruh angin muson dan arus lintas Indonesia (Arlindo). Dengan mengintegrasikan pendekatan kecerdasan buatan berbasis *Support Vector Regression*, penelitian ini menawarkan model prediksi yang lebih akurat, responsif, dan adaptif terhadap perubahan cepat kondisi laut. Kebaruan lainnya terletak pada fokus penelitian yang tidak hanya berhenti pada aspek prediktif, tetapi juga mengaitkannya langsung dengan efisiensi operasional kapal non konvensional kapal-kapal kecil yang umumnya menjadi tulang punggung distribusi logistik di kawasan timur Indonesia. Dampaknya terhadap perekonomian masyarakat lokal sangat nyata: dengan prediksi gelombang yang lebih akurat, jadwal keberangkatan kapal dapat direncanakan dengan lebih baik, mengurangi risiko keterlambatan atau kecelakaan, serta menekan biaya logistik dan distribusi barang. Hal ini secara langsung meningkatkan stabilitas pasokan komoditas, memperkuat konektivitas antar pulau, dan membuka akses ekonomi yang

lebih luas bagi masyarakat pesisir dan pelaku usaha kecil di sekitar Kota Makassar.

Untuk menghindari tumpang-tindih pemahaman antara *State of the Art* (SotA) dan *Novelty*, yang keduanya berarti kebaruan, peneliti harus menjelaskan bahwa SotA berasal dari penelitian literatur tentang temuan penelitian sebelumnya dengan mempertimbangkan perkembangan ilmu pengetahuan saat ini, atau dengan kata lain, temuan terbaru yang terkait dengan penelitian saat ini. Pada akhirnya, SotA berfungsi sebagai dasar untuk penelitian inovatif, dan Novelty hanya didasarkan pada temuan baru yang terkait dengan penelitian. Sehubungan dengan SotA, penelitian ini berbeda dari penelitian sebelumnya karena berkonsentrasi pada Sistem Prediksi Gelombang Laut Harian Tinggi Di Selat Makassar dengan menggunakan metode *Support Vektor Regression*.

1.8 Penelitian Terdahulu

Penelitian terus-menerus tentang prediksi tinggi gelombang laut menggunakan berbagai metode prediksi, mulai dari yang paling sederhana hingga yang paling kompleks.

Tabel 1.5 Penelitian terdahulu

PENELITI	JUDUL PENELITIAN	VARIABEL	METODE	HASIL PENELITIAN	PERBEDAAN DAN PERSAMAAN
Ema Sastri Puspita (2016)	Perancangan Sistem Peramalan Cuaca Berbasis <i>Logika Fuzzy</i>	Cuaca, <i>Logika FUZZY</i>	Kuantitatif	Hasil penelitian menentukan bagaimana melakukan peramalan, terutama peramalan cuaca. Mereka juga menentukan bagaimana fungsi keanggotaan dan peraturan digunakan. Dalam peramalan, logika fuzzy dengan metode sugeno sangat cocok karena memiliki tingkat keakuratan lebih dari 60%. Semakin banyak variabel yang dimasukkan, semakin akurat outputnya.	Persamaan: Sistem peramalan Perbedaan : Cuaca

Zsa Zsa Rizkyana Dewi (2021)	Prediksi Tinggi Gelombang Di Pelabuhan Ketapang Menggunakan Model Fungsi Transfer	Gelombang, Pelabuhan, Model Fungsi Transfer	Kuantitatif	Nilai MAPE sebesar 22,8% menunjukkan bahwa model dapat digunakan sebagai model peramalan. Hasil peramalan tinggi gelombang menunjukkan bahwa tinggi gelombang rendah, jadi aman untuk menyebrang.	Persamaan: Gelombang, Prediksi Perbedaan : Wilayah
Roni Kurniawan (2011)	Variasi Bulanan Gelombang Laut Di Indonesia	Gelombang Laut	Kuantitatif	Menurut peneliti, karena Indonesia adalah negara kepulauan dengan sebagian besar wilayahnya terdiri dari perairan, semua aktivitas yang berkaitan dengan laut sangat penting bagi kehidupan masyarakat Indonesia. Karena gelombang tinggi adalah fenomena laut yang sangat mempengaruhi efisiensi dan keselamatan di laut, diperlukan informasi tentang variasi dan karakteristik gelombang tinggi di	Perbedaan: Gelombang Laut Bulanan Persamaan: Gelombang

perairan Indonesia. Faktor angin menyebabkan sebagian besar gelombang laut, jadi dalam penelitian ini kami menggunakan model gelombang Windwaves-05; model ini menghitung tinggi gelombang berdasarkan energi angin permukaan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pola angin musiman di daerah Indonesia terkait erat dengan perubahan gelombang di perairan Indonesia. Selama monsun Asia dan Australia (DJF dan JJA), tinggi gelombang rata-rata lebih tinggi daripada pada masa peralihan (MAM dan SON), dan puncak gelombang tertinggi terjadi pada bulan Januari dan Juli. Ini karena perbedaan panjang fetch yang

	terbentuk di wilayah perairan terbuka.				
Annisa Agustina Kurnia Putri (2022)	Analisis Tinggi Gelombang Signifikan Berdasarkan Model Wavewatch-III di Pantai Alau-Alau, Kalianda, Lampung Selatan	Gelombang, Model <i>Wavewatch-III</i>	Kuantitatif	Data Model <i>Wavewatch-III</i> divisualisasi dan dibandingkan dengan data pengukuran lapangan yang dilakukan selama 7 hari (20-26 November 2019) menggunakan software GrADS. Root Mean Square Error (RMSE) digunakan untuk mengetahui seberapa akurat model itu. Hasil penelitian pengukuran lapangan menunjukkan bahwa tinggi gelombang signifikan Pantai Alau-Alau adalah 0,082-0,405 meter, dengan tinggi gelombang signifikan model Wavewatch-III 0,027-0,118 meter, dan nilai RMSE model Wavewatch-III terhadap data lapangan adalah	Persamaan: Tinggi Gelombang Perbedaan: Metode

0,28.

Muhammad Najib Habibie (2016)	Kajian Indeks Variabilitas Tinggi Gelombang Signifikan Di Indonesia	Indeks Variabilities, Gelombang	Kuantitatif	Hasil penelitian menunjukkan pola variabilitas gelombang signifikan berdasarkan siklus musunal. Gelombang signifikan di Indonesia mencapai puncaknya pada bulan DJF dan JJA saat monsun Asia dan Australia aktif, dan koefisien variasi mencapai nilai terendah juga pada musim ini. Ini menunjukkan bahwa gelombang signifikan lebih cenderung stabil selama musim peralihan daripada selama monsun aktif. Menurut distribusi spasial, laut lepas memiliki gelombang yang lebih besar dibandingkan dengan laut tertutup. Selain itu, indeks variabilitas musiman dan bulanan dan koefisien variasi	Persamaan: Tinggi Gelombang Perbedaan: Wilayah
--	--	---------------------------------------	-------------	---	---

Nurhana Rahmadani (2019)				menunjukkan bahwa laut lepas memiliki tingkat kestabilan yang lebih tinggi. Perairan yang tidak stabil termasuk Teluk Tomini, Laut Flores, dan Selat Malaka. Laut Hindia yang paling stabil diikuti oleh Laut Cina Selatan dan Pasifik.	
	Prediksi Ketinggian Gelombang Laut Menggunakan Metode Jaringan Saraf Tiruan Backpropagation	Gelombang Laut, Metode Jaringan Saraf	Kuantitatif	Metode JST Backpropagation digunakan untuk memprediksi ketinggian gelombang laut melalui normalisasi data, inisialisasi bobot Nguyen-Widrow, pelatihan, pengujian, dan peramalan. Ketinggian gelombang laut, arah angin, dan kecepatan angin diukur setiap jam dari Januari hingga Desember 2013. Data uji dikumpulkan dari Januari hingga Juni 2014. Dalam proses	Persamaan: Tinggi Gelombang Perbedaan: Metode Jaringan Saraf Tiruan

				pelatihan, digunakan tingkat pembelajaran 0,5, empat lapisan neuron input, tiga lapisan neuron tersembunyi, satu lapisan neuron output, dan batas error MAPE pelatihan sebesar 13,2%. Kombinasi parameter ini menghasilkan rata-rata MAPE pengujian sebesar 17,53182%.	
Frans Rabung (2014)	Prediksi Gelombang Signifikan Sekitar Pantai Makassar Untuk Perencanaan Pembangunan Infrastruktur Pantai	Gelombang, Pantai, Infrastruktur pantai	Kuantitatif	Dengan rentang return dua puluh tahun, gelombang ini sangat signifikan. Untuk konstruksi pantai yang unik, seperti revetment, groin, atau pemecah gelombang dengan batuan bergradasi, periode return dan tinggi gelombang ini dapat langsung digunakan. Namun, untuk struktur laut yang dapat rusak segera, seperti caisson atau platform yang	Persamaan: Gelombang Perbedaan: Pantai Makassar

				berpenghuni, diperlukan H_{max} atau H_1 dengan rentang return 30, 50 bahkan 100 tahun. Karena distribusi tinggi gelombang mengikuti distribusi Rayleigh yang sudah diketahui, tinggi H_1 dapat sama dengan $1.68H_s$. Peramalan rentang return yang lebih panjang dapat dilakukan dengan metode yang sudah lama digunakan, seperti Gumbel dan Weibul, yang memiliki data 20 tahun.	
Purwanto (2020)	Analisis Peramalan dan Periode Ulang Gelombang di Perairan Bagian Timur Pulau Lirang, Maluku Barat Daya	Peramalan, Gelombang	Kuantitatif	Peramalan gelombang berdasarkan data angin Ogimet dan ECMWF selama sepuluh tahun (2006–2015). Untuk menghitung periode ulang gelombang, tinggi gelombang signifikan (H_s) dihitung. Studi ini menggunakan survei kuantitatif	Persamaan : Gelombang Perbedaan: Wilayah Maluku Barat Daya

dan prediktif, serta metode peramalan gelombang Darbyshire dan Sverdrup Munk Bretschneider (SMB). Selama periode ulang (Hsr) antara 2, 5, 10, 25, 50, dan 100 detik, tinggi gelombang signifikan 0,3878 m, 0,4029 m, 0,4166 m, 0,4369 m, 0,4537 m, 0,4715 m, dan 0,4715 m, data ECMWF Metode Darbyshire memiliki tinggi gelombang yang lebih sesuai, yaitu 0,251-0,79 m dengan periode gelombang 3,663–4,717 detik, dengan MRE maksimum 29,744 persen. Metode ini memiliki tingkat kepercayaan 84,7%.

Mohd Hazmi Mohd Rusli (2020)	Navigational Hazards in International Maritime Chokepoints:	Navigational, Maritime	Kualitatif	Jumlah ships yang transiting the Straits of Malacca and Singapore telah meningkat	Persamaan: Pelayaran Perbedaan: wilayah
-------------------------------------	---	------------------------	------------	---	--

A Study of the Straits
of Malacca and
Singapore

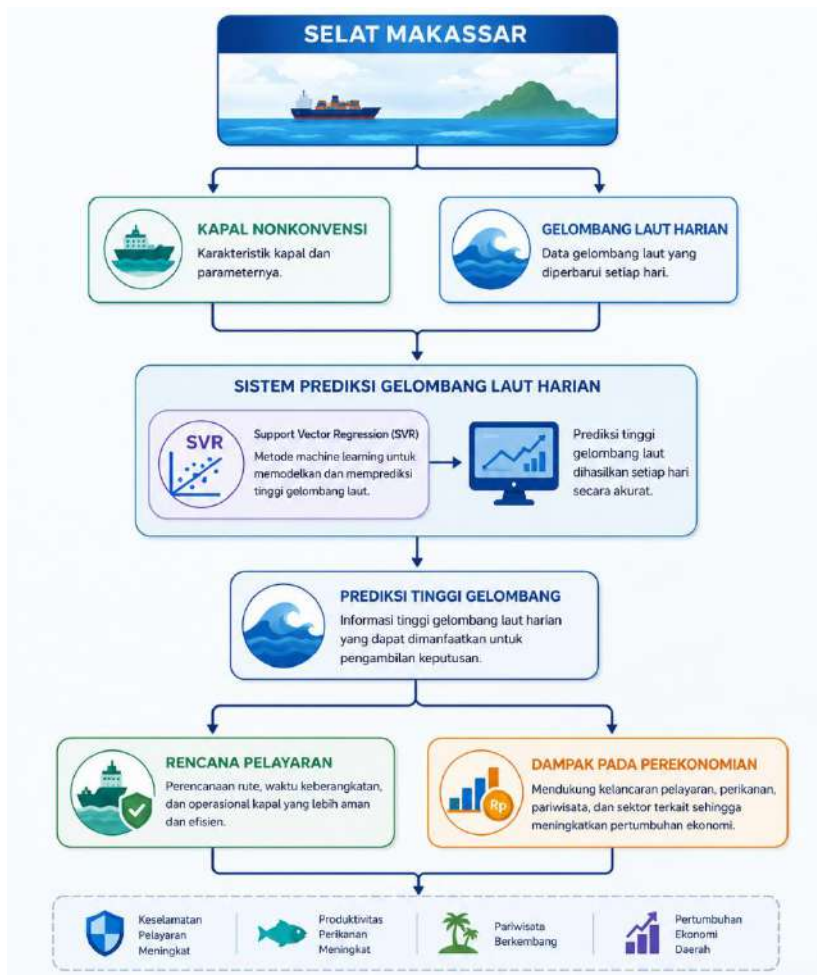
secara bertahap dan signifikan sejak tahun 2000, menjadikan these Straits two of the world's most important international maritime chokepoints. The fact that the Straits of Malacca and Singapore themselves contain a number of navigational hazards that may increase the risk of maritime accidents. Sebagai upaya untuk meningkatkan keselamatan navigasi, undang-undang internasional telah ditentukan yang dapat digunakan oleh negara pesisir Malaysia, Indonesia, dan Singapore. Because the Straits of Malacca and Singapore are a crucial shipping route for the transportation of oil, their closure would have a negative impact on

Malaysia dan
Singapore

				the global economy.	
Luciana Bertotti And Luigi Cavaleri (2014)	Nettuno: Analysis of a Wind and Wave Forecast System for the Mediterranean Sea	Wind, Wave	Kuantitatif	The results suggest that there are significant differences in the measurements from the different instruments. In addition to the overall positive results, the findings also show that there are differences in Nettuno performance for the different subbasins. The related geographical distributions of Nettuno performance are consistent with the different satellite instruments used in the comparisons. Dengan memanfaatkan sistem buoys yang luas di seluruh Italia, masalah yang dihadapi dalam memodelkan tingginya gelombang di wilayah pesisir Italia ditunjukkan.	Persamaan: Gelombang Perbedaan: Wilayah

1.9 Kerangka Konsep Penelitian

Prediksi Tinggi gelombang harian Selat Makassar adalah tujuan penelitian ini. menggunakan metode *Support Vektor Regression* , Perkiraan Tinggi Gelombang Harian di Selat Makassar berdasarkan Prediksi menggunakan metode *Support Vektor Regression* bagi pelayanan di Pelabuhan Makassar dan efek ekomoni dari Perkiraan Tinggi Gelombang Harian di Selat Makassar berdasarkan Prediksi menggunakan metode metode *Support Vektor Regression* (SVR). Permasalahan didasari atas tidak adanya model yang akurat dalam prediksi tinggi gelombang di selat Makassar dan efeknya terhadap perkembangan ekonomi dan alur lalu lintas pelayaran menjadi fokus utama dalam penelitian ini. Untuk mengatasi masalah tersebut, penulis berpendapat perlu menganalisis menemukan model yang tepat guna memprediksi tinggi gelombang harian yang ada diselat Makassar. Selanjutnya diidentifikasi efeknya baik itu bagi pelayaran maupun ekonomi kota Makassar.



Gambar 1. 12 Kerangka Konseptual

Kerangka pikir pada gambar di atas menggambarkan alur konseptual mengenai bagaimana sistem prediksi tinggi gelombang laut harian di Selat Makassar dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan perekonomian Kota Makassar melalui optimalisasi pelayanan kapal non-konvensi. Proses ini diawali dari kondisi geografis Selat Makassar, yang merupakan salah satu jalur pelayaran utama di Indonesia dan memiliki karakteristik oceanografi yang dinamis. Dalam konteks ini, terdapat dua elemen utama yang saling berkaitan, yaitu kapal non-konvensi sebagai moda transportasi laut berskala kecil-menengah yang digunakan masyarakat lokal, serta gelombang laut harian yang berfluktuasi akibat

pengaruh angin muson, arus lintas Indonesia, dan faktor iklim lainnya. elemen tersebut menjadi dasar perlunya dibangun sebuah sistem prediksi gelombang laut harian, yang bertujuan untuk memberikan informasi dini terhadap kondisi laut agar operasional kapal nonkonvensi dapat direncanakan secara lebih aman dan efisien. Dalam penelitian ini, sistem prediksi tersebut dikembangkan menggunakan metode *Support Vector Regression* , yaitu salah satu pendekatan dalam pembelajaran mesin (*machine learning*) yang terbukti efektif dalam memodelkan data non-linear serta mampu menangkap pola-pola kompleks yang terdapat pada dinamika laut.

Penerapan SVR ini diharapkan mampu meningkatkan akurasi prediksi tinggi gelombang laut harian. Hasil dari sistem prediksi ini tidak hanya berdampak pada peningkatan keselamatan pelayaran, tetapi juga memperkuat kelancaran distribusi barang, efisiensi logistik, dan keberlanjutan konektivitas antarwilayah. Secara lebih luas, keberadaan sistem prediksi gelombang laut harian yang akurat dapat memberikan dampak positif terhadap perekonomian Kota Makassar, khususnya dalam sektor perdagangan, pelayaran lokal, dan aktivitas pelabuhan. Hal ini memperlihatkan bahwa pendekatan teknologi cerdas dalam mitigasi risiko laut dapat menjadi fondasi penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi daerah berbasis kelautan dan konektivitas antarpulau.

BAB II TOPIK PENELITIAN I

SISTEM PREDIKSI TINGGI GELOMBANG LAUT HARIAN DI SELAT MAKASSAR MENGGUNAKAN METODE SUPPORT VEKTOR REGRESSION (SVR)

2.1 Abstrak

Sebagai salah satu Alur Laut Kepulauan Indonesia (ALKI) dengan aktivitas pelayaran yang tinggi, sistem prediksi tinggi gelombang laut yang akurat sangat penting untuk memastikan keselamatan navigasi dan mengurangi risiko kecelakaan laut. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membangun sistem yang dapat memprediksi tinggi gelombang laut harian di Selat Makassar dengan menggunakan algoritma *Support Vector Regression* (SVR) yang dioptimasi menggunakan algoritma *Fruit Fly Optimization* (FOA). Variabel klimatologis seperti kecepatan angin, arah angin, suhu permukaan laut, dan curah hujan diambil dari data observasi langsung di Stasiun BMKG Kota Makassar. Area penelitian terdiri dari tiga wilayah: Selat Makassar bagian utara, tengah, dan selatan. Sebelum data dimasukkan ke dalam model prediksi SVR, metode *FP-Growth* digunakan untuk melakukan seleksi fitur yang relevan. Kemudian, untuk meningkatkan akurasi prediksi, parameter model SVR dioptimasi menggunakan FOA. Dengan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0.4938, *Mean Absolute Error* (MAE) sebesar 0.3331, dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebesar 0.00208, kombinasi SVR-FOA menunjukkan performa prediksi yang sangat baik. Hasil ini menunjukkan bahwa model dapat memprediksi dengan sangat akurat tinggi gelombang laut harian. Pendekatan SVR-FOA yang diusulkan dalam penelitian ini menunjukkan performa yang lebih unggul dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan metode seperti LSTM, XGBoost, dan *Singular Spectrum Analysis* (SSA). Hal ini menunjukkan bahwa metode SVR yang dioptimasi dengan FOA sangat baik dalam memodelkan fenomena rumit seperti tinggi gelombang laut, terutama di wilayah perairan yang sangat dinamis seperti Selat Makassar. Diharapkan penelitian ini akan membantu mengembangkan sistem peringatan dini gelombang tinggi dan menjaga keselamatan pelayaran di wilayah perairan Indonesia.

Kata kunci: tinggi gelombang laut, SVR, FOA, FP-Growth, Selat Makassar, prediksi maritim

2.2 Pendahuluan

Indonesia memiliki keunggulan strategis karena merupakan negara kepulauan terbesar di dunia. Dengan lebih dari 17.000 pulau dan luas wilayah laut sekitar 3,25 juta km² bersama dengan Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE) sebesar 2,55 juta km², wilayah maritim Indonesia memainkan peran penting dalam perekonomian dan aktivitas pelayaran di seluruh dunia. Ramadhan & Chaerul (2023). Secara geografis, Indonesia berada di antara dua benua (Asia dan Australia) dan dua samudra (Pasifik dan Hindia), yang menjadikan negara ini sebagai titik temu jalur pelayaran internasional yang strategis (Indriyani et al (2022); Langgeng Gilang Pangestu (2020). Untuk mendukung kelancaran navigasi laut, pemerintah Indonesia telah menentukan tiga Alur Laut Kepulauan Indonesia (ALKI), yakni ALKI I, ALKI II, dan ALKI III. Di antara ketiganya, ALKI I yang melalui Laut Sulawesi, Selat Makassar, Laut Flores, hingga Selat Lombok merupakan jalur dengan tingkat lalu lintas maritim yang sangat tinggi (Fitriyanto et al (2022); Hutagalung (2017); Syaiful Hidayat Seskoal et al (2019). Selat Makassar secara khusus menjadi titik krusial karena intensitas aktivitas pelayaran yang tinggi baik oleh kapal niaga maupun kapal perikanan. Namun, wilayah ini juga dikenal memiliki risiko bahaya laut yang tinggi akibat kondisi oseanografis dan meteorologis yang ekstrem.

Berbagai insiden kecelakaan laut telah dilaporkan terjadi di Selat Makassar akibat gelombang tinggi, angin kencang, dan badai laut. Misalnya, pada November 2017 sebuah kapal ikan terbalik akibat dihantam gelombang tinggi; pada Juni 2018, kapal tenggelam karena ombak besar dan angin kencang; dan pada tahun 2020, enam orang anak buah kapal (ABK) terombang-ambing selama lebih dari 24 jam akibat kapal tenggelam saat badai (Ridwan Hadi Pranoto (2017); Sucipto (2020) . Hal ini menunjukkan urgensi pengembangan sistem prediksi gelombang laut yang akurat untuk menunjang keselamatan pelayaran di kawasan ini.

Prediksi tinggi gelombang laut merupakan salah satu aspek penting dalam perencanaan operasional maritim, mitigasi bencana, dan pengelolaan pesisir. Model numerik seperti *SWAN* dan *WAVEWATCH III* telah lama digunakan, namun model ini umumnya membutuhkan sumber daya komputasi besar serta cenderung kurang akurat pada kondisi yang kompleks atau keterbatasan data (Alamsyah et al (2022); Aswad, (2022). Oleh karena itu, pendekatan berbasis *machine learning* (ML) menjadi semakin diminati karena kemampuannya dalam memodelkan hubungan nonlinier dan menangani data yang mengandung noise. Salah satu metode ML yang telah menunjukkan kinerja tinggi dalam

pemodelan data lingkungan adalah *Support Vector Regression*. SVR memiliki keunggulan dalam menangani data dengan outlier serta mampu membentuk model *nonlinier* melalui penggunaan kernel trick, sehingga sangat sesuai untuk prediksi data geofisika yang kompleks Mar'ati Nur Utami et al (2021). Studi sebelumnya oleh Aprizal Arifin et al (2021) telah digunakan untuk memprediksi pasang surut air laut di Stasiun Pushidrosal Bakauheni Lampung dengan SVR. yang menghasilkan cukup baik. Selain itu, studi oleh Putri et al (2022) yang melakukan prediksi Pasang Surut Laut di Tanjung Medang, Riau menggunakan parameter angin memperoleh nilai koefisien RMSE sebesar 0.451896. Kendati hasilnya menjanjikan, studi tersebut terbatas secara geografis dan belum memanfaatkan teknik seleksi fitur berbasis pola data seperti asosiasi itemset untuk meningkatkan akurasi model prediksi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan membangun sistem prediksi tinggi gelombang laut di Selat Makassar menggunakan algoritma SVR yang dikombinasikan dengan metode asosiasi berbasis algoritma *FP-Growth*. Data yang digunakan berasal dari observasi langsung di tiga titik di Selat Makassar bagian utara, tengah, dan selatan di Stasiun BMKG Makassar. Kecepatan angin, arah angin, suhu permukaan laut, dan curah hujan adalah parameter input. Algoritma *FP-Growth* digunakan untuk mengekstraksi pola asosiasi antara variabel masukan guna menyaring fitur yang paling relevan. Selanjutnya, untuk prediksi tinggi gelombang, model SVR menggunakan fitur yang telah dipilih. Pendekatan ini diharapkan menghasilkan sistem prediksi yang lebih akurat, efisien, dan aplikatif dalam mendukung keselamatan pelayaran di jalur strategis ALKI II. Oleh karena itu, tujuan utama dari penelitian ini adalah: (1) membuat model prediksi tinggi gelombang laut untuk wilayah Selat Makassar yang didasarkan pada pembelajaran mesin, (2) menilai relevansi fitur masukan dengan menggunakan teknik asosiasi pola, dan (3) menguji kinerja model SVR terhadap data observasi lokal. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan bagi sistem peringatan dini dan perencanaan maritim nasional.

2.3 Tinjauan Teori

2.3.1 Gelombang Laut

Tinggi gelombang laut merupakan parameter krusial dalam berbagai aktivitas kelautan, termasuk pelayaran, perikanan, dan rekayasa pesisir. Prediksi yang akurat terhadap tinggi gelombang dapat meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional di laut. Tradisionalnya, prediksi ini dilakukan menggunakan model numerik seperti SWAN

dan *WAVEWATCH III*. Namun, model-model tersebut memiliki keterbatasan dalam hal kebutuhan komputasi yang tinggi dan akurasi pada kondisi laut yang kompleks Shamshirband et al (2020). Seiring perkembangan teknologi, pendekatan berbasis pembelajaran mesin (*machine learning*) telah diterapkan dalam prediksi tinggi gelombang. Metode ini mampu menangani data yang kompleks dan nonlinier, serta mengurangi kebutuhan akan sumber daya komputasi yang besar. Model seperti *Artificial Neural Networks* (ANN), *Long Short-Term Memory* (LSTM), dan *Support Vector Regression* telah menunjukkan kinerja yang menjanjikan dalam studi sebelumnya Zhang et al (2025).

2.3.2 Selat Makassar

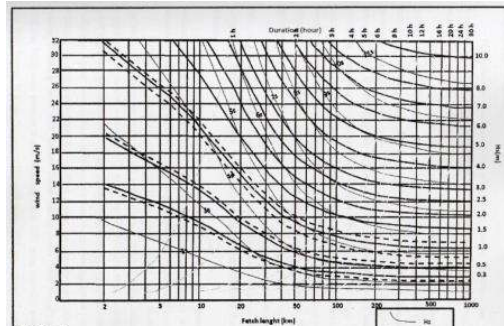
Selat Makassar merupakan jalur laut antara Pulau Kalimantan dan Sulawesi, dengan panjang sekitar 600 km dan kedalaman >2 000 m, menjadikannya kanal utama perhubungan laut di Indonesia Haiyqal et al (2023), Selat Makassar yang termasuk dalam wilayah laut semi-tertutup, fluktuasi tinggi gelombang lebih tinggi terjadi akibat pengaruh muson yang tidak langsung dan adanya daratan penghalang (seperti Sulawesi dan Kalimantan). Hal ini tercermin karena koefisien variasi yang tinggi menunjukkan tingkat kestabilan gelombang yang rendah di daerah ini. Maka, Selat Makassar termasuk wilayah yang rentan terhadap perubahan musiman, dan prediksi gelombang berbasis data musonal sangat penting untuk keselamatan pelayaran dan kegiatan kelautan. Habibie & Fitria (2019)

Siklus angin musiman atau monsun memiliki peran dominan dalam membentuk pola tinggi gelombang signifikan di perairan Indonesia. Monsun Asia (Desember–Februari) dan Monsun Australia (Juni–Agustus) menciptakan pola tiupan angin yang persisten dan luas, menghasilkan gelombang laut yang tinggi dan stabil, khususnya di wilayah laut terbuka seperti Hindia dan Pasifik. Di sisi lain, musim peralihan (Maret–Mei dan September–November) ditandai dengan angin yang tidak teratur dan berubah arah, menyebabkan tinggi gelombang cenderung rendah dan fluktuatif.

2.3.3 Prediksi Gelombang Laut

Data angin digunakan untuk peramalan gelombang. (Imbar, 2020) Sedangkan menurut Kurniawan & Najib Habibie (2011) Gelombang laut adalah gerakan naik dan turunnya permukaan air laut yang terjadi secara periodik sebagai akibat adanya gaya pembangkit berupa angin, gempa bumi, atau gaya tarik benda langit Jenis, tinggi, dan periode gelombang pantai dapat diprediksi dengan

mengumpulkan data angin *fetch*. Untuk melakukannya, grafik peramalan gelombang dapat dilihat pada gambar 2.1.



**Gambar 2. 1 Grafik Peramalan Gelombang oleh Darbyshire-Draper, 1963
(Sumber: CERC,1984)**

2.3.4 *Machine Learning* dalam Oseanografi

Perkembangan teknologi komputasi telah mendorong pemanfaatan *machine learning* (ML) dalam berbagai disiplin ilmu, termasuk oseanografi. *Machine learning* digunakan untuk memodelkan dan memprediksi berbagai fenomena laut seperti tinggi gelombang, arus laut, suhu permukaan laut, dan kualitas air. Metode ini dinilai efektif dalam mengatasi kompleksitas data oseanografi yang bersifat non-linier, memiliki banyak variabel, serta berukuran besar. Salah satu metode populer dalam ML adalah *Support Vector Regression* yang digunakan untuk melakukan prediksi data time-series seperti tinggi gelombang laut secara akurat.

Studi oseanografi menunjukkan bahwa SVR dapat memberikan prediksi yang akurat dengan tingkat error yang rendah. dibandingkan metode statistik konvensional. Misalnya, penelitian oleh Chen dan Wang (2020) menunjukkan bahwa penerapan SVR dalam prediksi tinggi gelombang di pesisir Taiwan mampu meningkatkan akurasi model hingga 15% dibanding metode regresi linier. Selain itu, studi oleh Zahoor dan Mansurova (2021) di wilayah pesisir Queensland, Australia, mencatat tingkat akurasi mencapai 95% dengan Root Mean Square Error (RMSE) sebesar 0,044 dalam memprediksi tinggi gelombang harian. Dalam konteks Indonesia, pemanfaatan machine learning di bidang oseanografi masih dalam tahap berkembang, namun potensinya sangat besar untuk diaplikasikan pada wilayah strategis seperti Selat Makassar, di mana fluktuasi gelombang tinggi sangat dipengaruhi oleh siklus muson

dan kondisi meteorologi lokal Habibie, Fitria, & Sofian, (2018).

Implementasi machine learning tidak hanya terbatas pada prediksi gelombang, tetapi juga pada klasifikasi pola arus laut, deteksi anomali suhu laut, hingga prediksi distribusi plankton. Model ML seperti *Random Forest*, *k-Nearest Neighbors* (k-NN), dan *Artificial Neural Networks* (ANN) juga mulai diterapkan dalam kajian oseanografi untuk mendukung keputusan dalam perencanaan pelayaran, mitigasi bencana, dan pemantauan lingkungan laut secara real-time. Dengan ketersediaan big data oseanografi dari satelit, buoy, dan model numerik, machine learning menjadi pendekatan masa depan yang menjanjikan dalam memahami dan mengelola ekosistem laut secara efisien dan adaptif LeCun, Bengio, & Hinton (2015).

2.3.5 Support Vector Regression

SVR adalah salah satu teknik pembelajaran mesin regresi terbaik. pada data nonlinier dan mengandung noise. Beberapa studi telah menerapkan SVR dalam prediksi tinggi gelombang dengan hasil yang memuaskan. Misalnya, penelitian oleh Zeinoddini et al (2020) menunjukkan bahwa SVR mampu memprediksi tinggi gelombang signifikan dengan akurasi yang tinggi menggunakan data angin dan gelombang . Selain itu, studi oleh Shamshirband et al. membandingkan SVR dengan model lain dan menemukan bahwa SVR memberikan hasil prediksi yang lebih akurat dalam kondisi laut yang beragam Kim & Lee (2023); Quan et al (2022). SVR sering dikombinasikan dengan teknik seleksi fitur yang efektif. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah algoritma asosiasi seperti FP-Growth, yang mampu mengidentifikasi pola hubungan antar variabel dalam dataset. Dengan mengintegrasikan FP-Growth, fitur-fitur yang paling relevan dapat dipilih sebagai input untuk model SVR, sehingga meningkatkan kinerja prediksi secara keseluruhan.

Beberapa penelitian terbaru telah mengeksplorasi kombinasi metode pembelajaran mesin untuk prediksi tinggi gelombang. Misalnya, studi oleh Wang et al. mengembangkan model *hybrid* VMD-LSTM untuk prediksi gelombang pada kondisi non-stasioner, menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu mengatasi tantangan dalam prediksi gelombang yang kompleks. Selain itu, penelitian oleh Han et al. menggunakan algoritma ConvLSTM untuk memprediksi tinggi gelombang Laut Cina Selatan, dengan hasil yang menunjukkan peningkatan akurasi dibandingkan model tradisional Ding et al., (2024); Han et al (2022).

Meskipun berbagai studi telah dilakukan dalam prediksi tinggi gelombang

menggunakan metode pembelajaran mesin, masih terdapat kesenjangan dalam penerapan model ini di wilayah perairan Indonesia, khususnya di Selat Makassar. Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada wilayah luar negeri atau menggunakan data simulasi, sehingga kurang mempertimbangkan kondisi lokal yang spesifik. Selain itu, integrasi antara SVR dan algoritma asosiasi seperti FP-Growth dalam konteks prediksi gelombang di Indonesia masih jarang dijelajahi.

Jaringan Syaraf Tiruan (JST) dan Support Vector Regression (SVR) merupakan dua metode dalam machine learning yang sama-sama digunakan untuk membangun hubungan antara data input dan output. Meskipun keduanya memiliki pendekatan yang berbeda, baik JST maupun SVR bertujuan untuk menghasilkan model prediksi yang akurat berdasarkan pola data yang dipelajari. JST bekerja dengan meniru cara kerja jaringan saraf manusia melalui neuron dan lapisan tersembunyi (hidden layer), sedangkan SVR menggunakan prinsip optimasi matematis berbasis margin maksimum untuk memperoleh fungsi regresi terbaik. Pada SVR, tujuan utama adalah mencari fungsi regresi yang mampu memprediksi nilai kontinu dengan tingkat kesalahan sekecil mungkin. Fungsi regresi pada SVR dapat dituliskan sebagai berikut:

$$f(x) = w^T \phi(x) + b$$

x merupakan data input, $\phi(x)$ adalah transformasi data ke ruang fitur berdimensi lebih tinggi, w adalah bobot, dan b adalah bias. Berbeda dengan regresi biasa, SVR menggunakan konsep ϵ -insensitive loss, yaitu kesalahan kecil yang masih berada dalam batas toleransi ϵ akan diabaikan, sedangkan kesalahan di luar batas tersebut akan dikenakan penalti. Konsep ini membuat SVR lebih stabil dan mampu menangani data yang memiliki noise. Proses optimasi pada SVR dilakukan dengan meminimalkan kompleksitas model dan error prediksi secara bersamaan. Fungsi objektif SVR dirumuskan sebagai:

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum (\xi_i + \xi_i^*)$$

Parameter C sebagai regularisasi, sedangkan ξ_i dan ξ_i^* merupakan slack variable yang digunakan untuk mengukur kesalahan prediksi. Semakin besar nilai C , maka model akan berusaha meminimalkan error dengan lebih ketat. Hubungan antara JST dan SVR dapat dilihat pada konsep transformasi nonlinier. Pada JST, transformasi dilakukan melalui hidden layer dan fungsi aktivasi, sedangkan pada SVR transformasi dilakukan

menggunakan *kernel function*. Fungsi kernel memungkinkan data dipetakan ke dimensi yang lebih tinggi sehingga pola nonlinier lebih mudah dipelajari. Salah satu bentuk kernel pada SVR adalah:

$$K(x_i, x_j) = \phi(x_i)^T \phi(x_j)$$

Kernel yang umum digunakan meliputi Linear Kernel, Polynomial Kernel, dan Radial Basis Function (RBF). Dalam hal ini, kernel pada SVR dapat dianggap mirip dengan neuron tersembunyi pada JST karena sama-sama melakukan transformasi data untuk menemukan pola yang optimal. Selain itu, model SVR juga memiliki bentuk matematis yang menyerupai JST, yaitu:

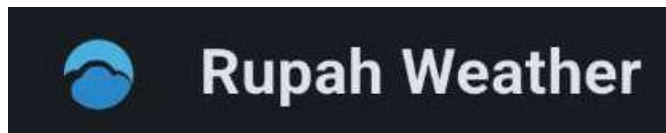
$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b$$

Pada persamaan tersebut, hanya beberapa data penting yang disebut support vectors yang digunakan dalam proses prediksi. Hal ini menjadi salah satu keunggulan SVR dibandingkan JST karena tidak semua data harus berkontribusi terhadap model. Dengan demikian, SVR cenderung lebih efisien dan lebih mampu mengontrol overfitting pada data berukuran kecil hingga menengah. Secara umum, JST lebih fleksibel dalam menangani data kompleks dan jumlah data yang sangat besar, sedangkan SVR lebih unggul dalam kestabilan matematis dan kemampuan generalisasi. Oleh karena itu, SVR sering digunakan dalam berbagai bidang engineering dan prediksi, seperti prediksi cuaca, estimasi gelombang laut, sistem kontrol, prediksi temperatur, hingga analisis data sensor IoT. Kombinasi pemahaman antara JST dan SVR menjadi penting karena keduanya merupakan metode machine learning yang mampu menyelesaikan permasalahan prediksi nonlinier dengan pendekatan yang berbeda namun memiliki tujuan yang sama, yaitu menghasilkan model prediksi yang akurat dan efisien.

2.3.6 Aplikasi *Rupah Weather*

Aplikasi *Rupah Weather* merupakan hasil pengembangan sistem pendeteksi cuaca modern yang dirancang untuk memberikan informasi cuaca secara cepat, akurat, dan mudah dipahami oleh pengguna. Dalam aplikasi ini tersedia berbagai menu utama yang mendukung kebutuhan pemantauan cuaca harian. Menu Beranda menyajikan tampilan utama berisi ringkasan kondisi cuaca saat ini. Menu BMKG menyediakan data resmi dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, sementara *OpenWeather*

menampilkan informasi tambahan dari layanan *OpenWeatherMap* sebagai sumber data internasional. Pengguna juga dapat melihat persebaran kondisi cuaca melalui Peta Cuaca, serta memantau perkembangan cuaca beberapa hari ke depan melalui menu Prakiraan 7 Hari. Untuk mengantisipasi kondisi ekstrem, tersedia menu Peringatan Cuaca, sedangkan fitur Notifikasi memungkinkan pengguna menerima pemberitahuan penting secara *real-time*. Menu Berita Cuaca memberikan update informasi dan fenomena meteorologi terbaru, dan bagian Pengaturan memungkinkan pengguna menyesuaikan preferensi aplikasi sesuai kebutuhan. Melalui kombinasi menu-menu tersebut, *Rupah Weather* menjadi platform pendeteksi cuaca yang komprehensif dan mudah digunakan.



Gambar 2. 2 Aplikasi *Rupah Weather*

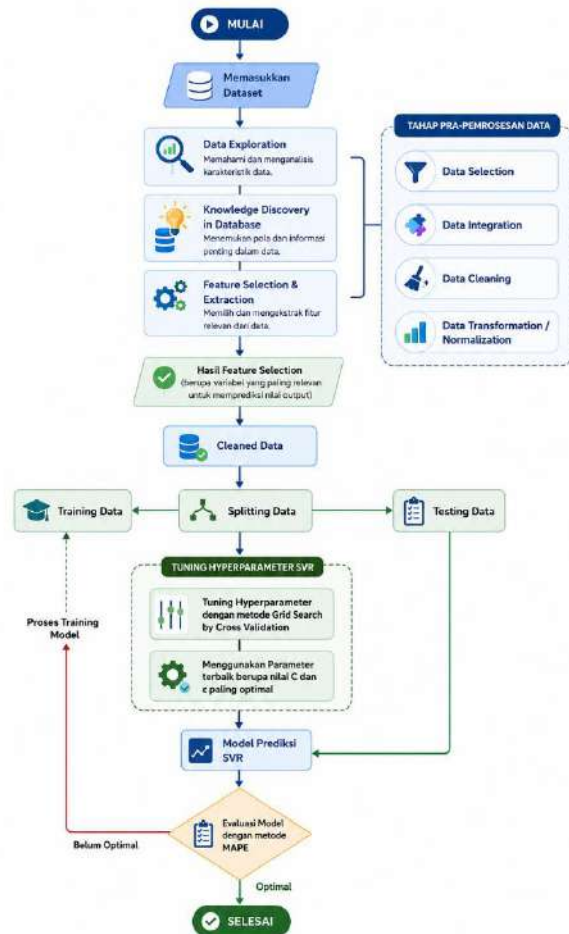


Gambar 2. 3 Layout Aplikasi

Aplikasi ini memiliki performa ringan dan responsif sehingga dapat digunakan pada smartphone dengan RAM minimal 2 GB, menjadikannya tetap lancar meskipun dijalankan pada perangkat kelas menengah. *Rupah Weather* juga kompatibel dan bekerja optimal pada versi Android terbaru, sehingga memberikan pengalaman pengguna yang lebih stabil dan modern. Aplikasi ini berfokus menampilkan prakiraan cuaca khusus wilayah sekitar Selat Makassar, mencakup informasi suhu, kelembapan, angin, serta potensi cuaca ekstrem. Data cuaca diperoleh dari sumber terpercaya seperti BMKG dan *OpenWeatherMap*, lalu disajikan dalam tampilan yang sederhana dan mudah dipahami. Dengan spesifikasi ini *Rupah Weather* sangat cocok digunakan oleh masyarakat umum, nelayan, pelaut, atau siapa saja yang membutuhkan informasi cuaca akurat di kawasan Selat Makassar.

2.4 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif.. Adapun tempat yang penulis tinjau adalah stasiun BMKG Makassar guna memperoleh data mengenai tinggi gelombang yang ada di Selat Makassar. data primer didapat dari hasil observasi atau pengamatan secara langsung di Stasiun BMKG Kota Makassar guna mengambil data gelombang laut di Selat Makassar. Sedangkan data sekunder berupa studi kepustakaan yang digunakan sebagai data pendukung. Berikut diagram alur analisis data pada penelitian ini.



Gambar 2. 4 Alur Proses Analisis Data

Dalam penelitian ini, proses analisis data dimulai dengan memasukkan data observasi gelombang laut dari BMKG Makassar. Pada langkah berikutnya, eksplorasi data dilakukan untuk mengidentifikasi pola, nilai ekstrim, dan kemungkinan anomali. Data diproses setelah eksplorasi melalui tahapan *Knowledge Discovery in Database* (KDD), yang terdiri dari empat proses utama: data *selection* (pemilihan data yang relevan), data *integration* (penggabungan data dari berbagai sumber jika diperlukan), data *cleaning* (pembersihan data dari suara dan nilai yang hilang), dan data *transformation* atau *normalization* (transformasi skala data agar seragam).

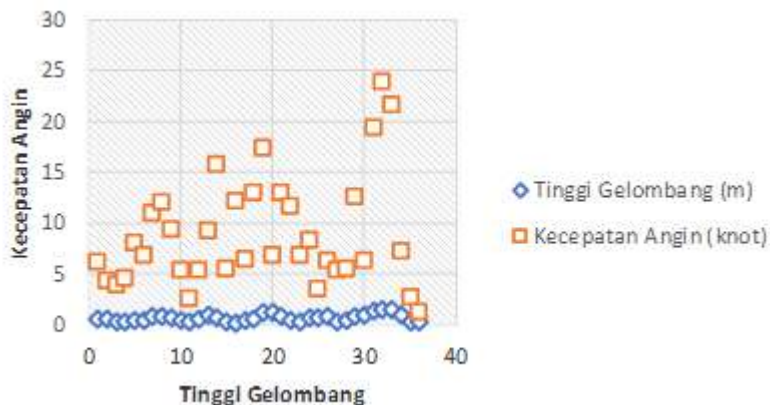
Tahap berikutnya adalah *feature selection dan extraction*, di mana variabel-variabel paling relevan dipilih berdasarkan korelasi terhadap target output, yaitu tinggi gelombang laut. Variabel terpilih ini kemudian membentuk data bersih (*cleaned data*) yang siap

digunakan dalam proses modeling. Data bersih ini kemudian dibagi ke dalam dua subset yaitu data training dan data testing pada tahap splitting data. Pada proses pelatihan model, dilakukan *tuning hyperparameter* menggunakan metode *Grid Search* yang divalidasi dengan teknik *cross-validation*. Proses ini bertujuan untuk mencari kombinasi parameter model SVR terbaik, khususnya nilai parameter C, epsilon (ϵ), dan kernel agar menghasilkan performa prediksi yang optimal. Parameter terbaik yang diperoleh kemudian digunakan untuk membangun model prediksi SVR.

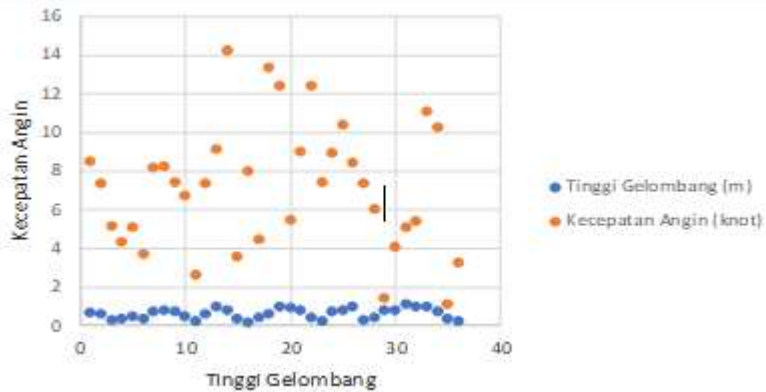
Setelah model terbentuk, dilakukan evaluasi kinerja model menggunakan metode *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Jika hasil evaluasi belum mencapai performa yang optimal, maka proses pelatihan model akan diulang kembali dengan menyesuaikan parameter atau strategi. Jika model telah menunjukkan hasil evaluasi yang optimal, maka proses analisis data dinyatakan selesai.

2.5 Hasil dan Pembahasan

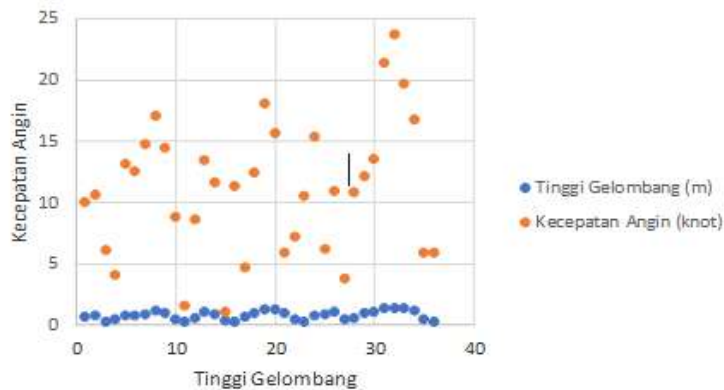
Selat Makassar terletak 100–200 km di antara Pulau Kalimantan dan Pulau Sulawesi, dengan kedalaman air laut lebih dari 2000 m. Bagian utara, tengah, dan selatan digunakan untuk penelitian. Data yang dikumpulkan dari Pusat Meteorologi Maritim Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 5 Data Tinggi Gelombang dan Kecepatan Angin Periode 2021-2023 di Wilayah Selat Makassar Bagian Utara



Gambar 2. 6 Data Tinggi Gelombang dan Kecepatan Angin Periode 2021-2023 di Wilayah Selat Makassar Bagian Tengah



Gambar 2. 7 Data Tinggi Gelombang dan Kecepatan Angin Periode 2021-2023 di Wilayah Selat Makassar Bagian Selatan.

2.6 Pemodelan *Support Vector Regression*

Untuk peramalan menggunakan model SVR, tiga parameter akan digunakan: C (konstan), γ (*epsilon*), dan parameter yang diperoleh dari pencarian parameter optimal dengan FOA. Sebelum memulai pencarian model dengan parameter FOA, percobaan akan dilakukan dengan menggunakan parameter acak dan parameter FOA terbaik dari penelitian sebelumnya, data pelatihan akan diuji, dan perbandingan akan dilakukan untuk ketiga parameter ini. Untuk mendapatkan model, juga akan dilakukan percobaan dengan parameter FOA terbaik dari penelitian sebelumnya.

Tabel 2. 1 Perencanaan peramalan

Keterangan Peramalan	Keterkaitan Variabel Bebas
Data <i>training</i>	Variabel <i>open</i>
	Variabel <i>high</i>
	Variabel <i>low</i>
	Variabel <i>volume</i>
	Variabel <i>open</i> , <i>high</i> , <i>low</i> , <i>volume</i> dan <i>exchange rate</i>
Data <i>testing</i>	Variabel <i>open</i>
	Variabel <i>high</i>
	Variabel <i>low</i>
	Variabel <i>volume</i>
	Variabel <i>open</i> , <i>high</i> , <i>low</i> , <i>volume</i> dan <i>exchange rate</i>

Tabel 2.1 Ini akan digunakan untuk menganalisis hasil ramalan berdasarkan data yang diramalkan dan variabel yang digunakan. Semua peramalan dari data pelatihan, uji coba, dan data lainnya akan dianalisis dengan ini.

2.7 Impementasi Model *Support Vector Regression*

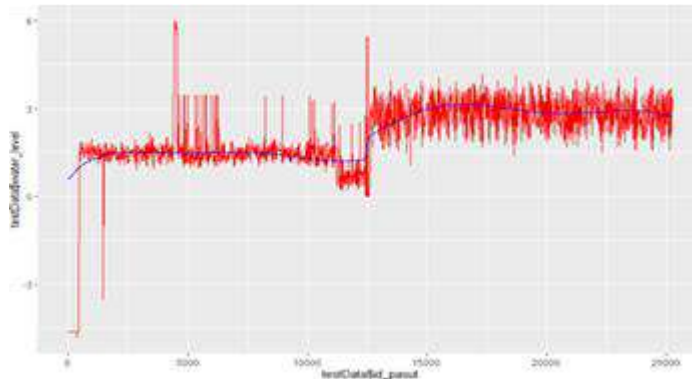
Untuk meramalkan SVR, eksperimen parameter acak dan parameter FOA dari studi sebelumnya digunakan. Hasil peramalan akan dibandingkan dengan peramalan yang menggunakan masukan parameter SVR paling ideal yang ditemukan pada pencarian parameter FOA, yaitu C adalah 9139.009142607989 dan ϵ adalah 1.0219421.

Tabel 2. 2 Akurasi Hasil Peramalan

Data	MAPE	MSE
<i>Training</i>	0.13353995230124457	41260.9841172731
<i>Testing</i>	0.002084004115826324	1.0442746056588716
Data lain	0.06560070082254996	1.0442347212676222

Algoritme SVR digunakan untuk membuat model dengan *kernel* RBF yang ditemukan di library RBF e1071. Kernel RBF dipilih karena memiliki nilai prediksi yang lebih

akurat daripada kernel lain (Bermolen & Rossi, 2008). Mula-mula, model diuji pada data uji uang dengan melakukan pelatihan pada data latihan dengan nilai gamma 0.125, pengaturan SVR standar. Setelah pelatihan selesai, nilai gelombang laut dihitung dan dibandingkan dengan nilai prediksi awal dan aktual dari data dependen. Koefisien korelasi adalah 0,6927282, dan nilai RMSE yang dihasilkan adalah 1,009267. Grafik yang dibuat pada librar dibandingkan dengan nilai-nilai ini. pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Grafik perbandingan nilai aktual dan nilai prediksi Gelombang air laut pada di selat Makssar dengan paramter default

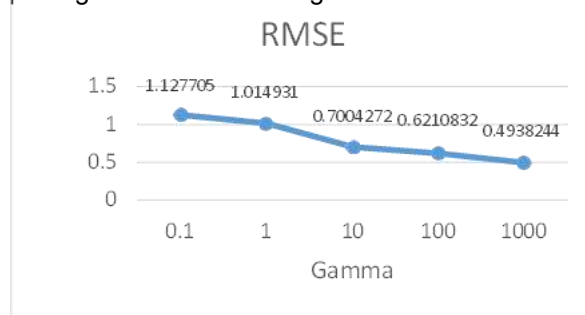
Gambar 2.8 menunjukkan bahwa nilai prediksi dan nilai aktual sangat berbeda. Hasil ini menunjukkan bahwa model tampaknya tidak dapat memprediksi secara akurat nilai gelombang laut. Selain itu, setelah pembentukan model prediksi selesai, parameter disesuaikan dengan menggunakan kernel RBF dengan nilai default pada parameter gamma. Tidak semua nilai dalam data prediksi dapat mengikuti pola nilai aktual. Ini dilakukan untuk mengetahui apakah akurasi model prediksi dapat ditingkatkan. Nilai gamma diatur dari 0,1 hingga 1000. Selanjutnya, setiap model dengan setiap parameter diuji dan dinilai untuk nilai RMSE dan korelasinya. Hasilnya ditunjukkan. pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Evaluasi model

Percobaan ke-	Gamma	Kernel RBF	
		RMSE	Correlation
1	0.1	1.127705	0.5918968
2	1	1.014931	0.6911665
3	10	0.7004272	0.85679
4	100	0.6210832	0.8868804
5	1000	0.4938244	0.9202879

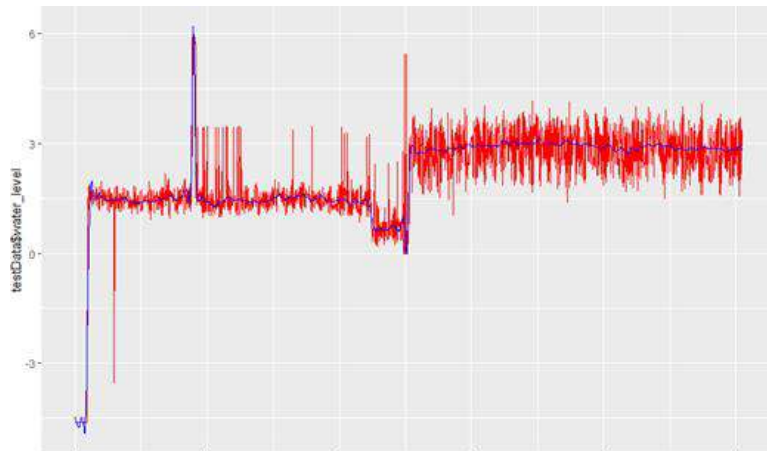
Hasil evaluasi dan penyesuaian parameter model gelombang laut dapat

menghasilkan grafik ukuran terbaik untuk model, seperti yang ditunjukkan oleh nilai RMSE dan *koefisien korelasi*. Kesimpulannya, kemampuan model untuk menghasilkan prediksi yang lebih baik terkait dengan nilai Gamma yang lebih tinggi. akurat, dengan RMSE yang lebih rendah dan *Correlation* yang lebih tinggi. Namun, perlu diperhatikan bahwa nilai *Gamma* yang terlalu besar bisa menyebabkan overfitting, jadi perlu dipertimbangkan apakah peningkatan Gamma lebih lanjut masih memberikan hasil yang optimal atau justru menurunkan kemampuan generalisasi model. grafik evaluasi nilai RMSE dapat terlihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Grafik Nilai RMSE Hasil Evaluasi Model Prediksi Gelombang Air Laut Pada di Selat Makassar Dengan Paramter Default

Parameter gamma 1000 adalah model terbaik untuk memprediksi gelombang laut pada stasiun pushidrosal, menurut beberapa percobaan. Nilai RMSE yang paling cocok adalah 0,4938244, dan nilai korelasi yang paling cocok adalah 0,9202879. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa model prediksi yang dibuat sudah cukup baik untuk memprediksi gelombang laut. Ini ditunjukkan pada grafik pada gambar 5, yang dibuat oleh library ggplot2 pada bahasa pemrograman R untuk membandingkan nilai aktual dan nilai prediksi ketinggian gelombang laut pada stasiun pushidrosal dengan menggunakan nilai gamma 1000. Dalam grafik ini, nilai prediksi tampaknya hampir dapat mengikuti pola dari nilai aktual, yang berarti.



Gambar 2. 10 Grafik Perbandingan Nilai Aktual dan Nilai Prediksi Gelombang Air Laut Pada Di Selat Makassar Dengan Nilai Gamma 100

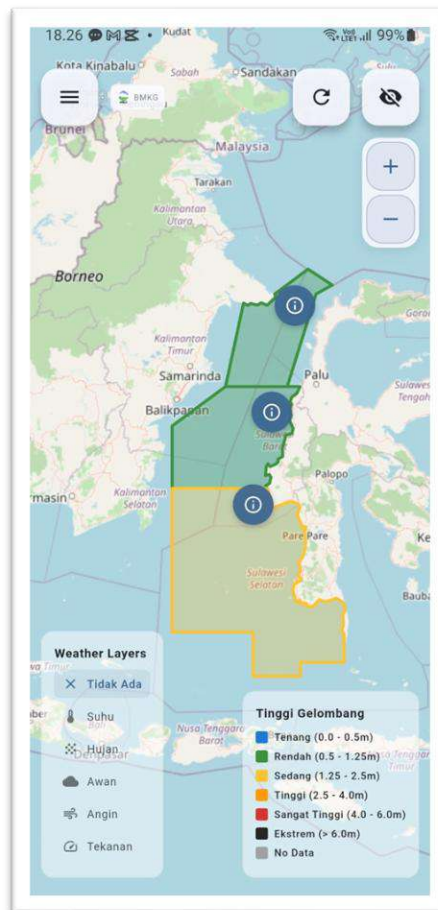
Oleh karena itu, model prediksi yang dibuat dapat digunakan untuk meramalkan atau memprediksi ketinggian gelombang laut di Selat Makassar di waktu yang akan datang. Penelitian ini menggabungkan metode *Support Vector Regression* dengan algoritma optimasi parameter *Fruit Fly Optimization* (FOA). Kombinasi ini belum banyak diterapkan dalam konteks prediksi gelombang laut di wilayah Indonesia, khususnya di Selat Makassar. Selain itu, pembagian wilayah analisis menjadi tiga bagian (utara, tengah, dan selatan) memberikan pemahaman spasial yang lebih terperinci terhadap dinamika tinggi gelombang di kawasan tersebut. Pendekatan ini memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan akurasi prediksi dan pemahaman terhadap karakteristik gelombang laut di wilayah studi.

Riset sebelumnya telah menerapkan metode pembelajaran mesin untuk prediksi tinggi gelombang laut. Misalnya, Khatimah et al. (2024) menggunakan model *Long Short-Term Memory* (LSTM) untuk memprediksi tinggi gelombang signifikan di perairan Kepulauan Seribu. Model tersebut menunjukkan performa yang baik dengan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0.1535 m dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebesar 37.11% . Namun, dibandingkan dengan hasil penelitian ini, model SVR yang dioptimasi dengan FOA menunjukkan akurasi yang lebih tinggi dengan nilai RMSE sebesar 0.4938 dan MAPE sebesar 0.00208 (Khatimah et al., 2024). Studi lain oleh Riswanda et al. (2024) menerapkan kombinasi LSTM dan *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost) untuk prediksi tinggi gelombang di Kabupaten Tuban. Hasilnya menunjukkan bahwa LSTM lebih unggul dalam memprediksi tinggi gelombang 30 hari ke depan dengan nilai RMSE berkisar antara 0.044 hingga 0.051 dan MAPE antara 7.773% hingga 10.64% . Meskipun hasil ini

menunjukkan performa yang baik, model SVR dengan FOA dalam penelitian ini masih menunjukkan akurasi yang lebih tinggi (Dhiya'ulhaq et al., 2024a). Selain itu, Utami dan Agustina (2023) menggunakan metode *Singular Spectrum Analysis* (SSA) untuk memprediksi tinggi gelombang laut di Pelabuhan Tanjung Priok. Model SSA menghasilkan nilai MAPE sebesar 10.01%, yang menunjukkan tingkat akurasi yang memadai dalam prediksi tinggi gelombang laut. Namun, dibandingkan dengan model SVR-FOA dalam penelitian ini, tingkat akurasi SSA masih lebih rendah Utami & Agustina (2023).

2.8 Penerapan *Rupah Weather*

Penerapan model SVR-FOA dalam aplikasi *Rupah Weather* memberikan dampak nyata terhadap peningkatan akurasi informasi gelombang laut yang ditampilkan kepada pengguna. Dengan kemampuan model dalam memprediksi tinggi gelombang secara lebih presisi, aplikasi ini membantu pengguna memahami kondisi laut terkini di Selat Makassar secara lebih jelas dan terverifikasi. Informasi prediktif ini turut mendukung berbagai sektor, mulai dari nelayan tradisional yang membutuhkan data gelombang harian, hingga kapal logistik dan transportasi laut yang membutuhkan perkiraan kondisi perairan untuk keselamatan perjalanan. Berikut merupakan Layout Aplikasi *Rupah Weather* Gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Layout Keterangan Fitur Aplikasi

Selain itu, hasil penggunaan model SVR-FOA dalam aplikasi ini menunjukkan bahwa prediksi yang dihasilkan cenderung lebih stabil dan minim fluktuasi kesalahan dibandingkan model pembelajaran mesin lain yang digunakan dalam penelitian sebelumnya. Akurasi tinggi yang ditunjukkan model ini memungkinkan aplikasi *Rupah Weather* menampilkan prakiraan gelombang hingga beberapa hari ke depan dengan tingkat kepercayaan yang lebih kuat. Hal ini menjadikannya alat bantu yang lebih handal dalam perencanaan aktivitas maritim, seperti penentuan jadwal berlayar, kegiatan perikanan, hingga pemantauan potensi gelombang ekstrem yang dapat membahayakan keselamatan pengguna.

Selain itu, penggunaan model ini menegaskan posisi *Rupah Weather* sebagai aplikasi cuaca dan kelautan yang berfungsi sebagai sistem serta penyedia informasi.

prediksi berbasis data ilmiah yang dapat diandalkan. Dengan memanfaatkan teknologi SVR yang dioptimasi FOA, aplikasi ini berhasil mengintegrasikan hasil penelitian terbaru ke dalam perangkat mobile yang mudah digunakan oleh masyarakat umum. Dengan demikian, *Rupah Weather* mampu memberikan kontribusi nyata dalam mendukung keselamatan dan efisiensi aktivitas di wilayah Selat Makassar melalui prediksi gelombang laut yang lebih akurat, cepat, dan adaptif terhadap perubahan kondisi cuaca. Berdasarkan perbandingan tersebut, dapat disimpulkan bahwa pendekatan SVR yang dioptimasi dengan FOA dalam penelitian ini memberikan hasil prediksi yang lebih akurat dibandingkan dengan metode lain yang telah diterapkan dalam studi sebelumnya. Hal ini menunjukkan potensi besar dari kombinasi metode ini dalam meningkatkan akurasi prediksi tinggi gelombang laut, khususnya di wilayah perairan Indonesia.

2.9 Kesimpulan

Penelitian ini berhasil membuat sistem prediksi tinggi gelombang laut harian di Selat Makassar dengan menggunakan metode Support Vector Regression (SVR) yang dioptimasi oleh algoritma *Fruit Fly Optimization* (FOA). Model ini didasarkan pada data observasi dari tiga titik strategis utara, tengah, dan selatan Selat Makassar. Juga diperhitungkan variabel klimatologi seperti kecepatan angin, arah angin, suhu permukaan laut, dan curah hujan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model SVR-FOA mampu memberikan prediksi yang sangat akurat dengan nilai RMSE, MAE, dan MAPE yang rendah pada ketiga titik pengamatan. Keunggulan model ini adalah kemampuan untuk menangani data dengan noise dan kemampuan untuk mengoptimalkan parameternya menggunakan FOA yang terbukti lebih efisien dibandingkan metode-metode lain yang telah digunakan dalam studi sebelumnya. Selain memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan sistem prediksi maritim di Indonesia, penelitian ini juga memiliki nilai kebaruan dari sisi integrasi metode dan fokus wilayah studi yang jarang dieksplorasi secara komprehensif.

Sebagai bentuk implementasi praktis dari hasil penelitian ini, model prediksi SVR-FOA diintegrasikan ke dalam aplikasi *Rupah Weather* sebagai modul utama dalam memperkirakan tingkat gelombang laut Selat Makassar. Aplikasi ini memanfaatkan keluaran model untuk menampilkan informasi gelombang harian yang akurat, sehingga dapat digunakan oleh nelayan, pelaut, operator kapal, maupun masyarakat pesisir untuk memantau kondisi perairan. Dengan penyajian data yang mudah diakses melalui perangkat Android, *Rupah Weather* mampu menerjemahkan hasil penelitian ke dalam layanan

informasi yang bermanfaat secara langsung bagi pengguna. Integrasi ini juga menjadikan aplikasi tersebut sebagai alat pendukung keputusan yang efektif dalam mitigasi risiko kecelakaan laut dan perencanaan rute pelayaran, sekaligus memperkuat kedudukan penelitian ini dalam mendorong pemanfaatan teknologi prediktif di sektor kelautan Indonesia.

2.10 Daftar Pustaka

- Alamsyah, B., Nuraini, C., -, K., & Suwarno, B. (2022). Strategi Manajemen Mitigasi Bencana Pesisir Pantai Timur Sumatera Utara. *Publis Penerbit Unpri Press*, 2(2), 1–81. <https://Jurnal.Unprimdn.Ac.Id/Index.Php/Isbn/Article/View/3212>
- Aprizal Arifin, W., Ariawan, I., Armelita Rosalia, A., Setyo Sasongko, A., Renaldi Apriansyah, M., Studi Sistem Informasi Kelautan, P., Studi Pendidikan Kelautan Dan Perikanan, P., & Jurnal, A. (2021). Model Prediksi Pasang Surut Air Laut Pada Stasiun Pushidrosal Bakauheni Lampung Menggunakan Support Vector Regression. *Jurnal Kemaritiman: Indonesian Journal Of Maritime*, 2(2), 139–148. <https://doi.org/10.17509/Ijom.V2i2.35149>
- Aswad, I. A. H. (2022). *Analysis Of Wave Energy Potential In The Western Oceans Of Lampung Province*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Dhiya'ulhaq, R. A., Safira, A., Fahmiyah, I., & Ghani, M. (2024). Ocean Wave Prediction Using Long Short-Term Memory (Lstm) And Extreme Gradient Boosting (Xgboost) In Tuban Regency For Fisherman Safety. *Methodsx*, 13, 103031. <https://doi.org/10.1016/J.Mex.2024.103031>
- Ding, T., Wu, D., Shen, L., Liu, Q., Zhang, X., & Li, Y. (2024). Prediction Of Significant Wave Height Using A Vmd-Lstm-Rolling Model In The South Sea Of China. *Frontiers In Marine Science*, 11, 1382248. <https://doi.org/10.3389/Fmars.2024.1382248/Bibtex>
- Fitriyanto, A., Darmawan, W. B., & Djuyandi, Y. (2022). Kerjasama Pengamanan Alur Laut Kepulauan Indonesia li: (Studi Kasus Sinergi Bakamla, Tni Dan Polairud). *Paradigma Polistaat: Jurnal Ilmu Sosial Dan Ilmu Politik*, 5(1), 1–15. <https://doi.org/10.23969/Paradigmapolistaat.V5i1.5500>
- Han, L., Ji, Q., Jia, X., Liu, Y., Han, G., & Lin, X. (2022). Significant Wave Height Prediction In The South China Sea Based On The ConvLstm Algorithm. *Journal Of Marine Science And Engineering* 2022, Vol. 10, Page 1683, 10(11), 1683. <https://doi.org/10.3390/Jmse10111683>
- Hutagalung, S. M. (2017). Penetapan Alur Laut Kepulauan Indonesia (Alki): Manfaatnya Dan Ancaman Bagi Keamanan Pelayaran Di Wilayah Perairan Indonesia. *Jurnal Asia Pacific Studies*, 1(1), 75–91. <https://doi.org/10.33541/Japs.V1i1.502>
- Indriyani, Y., Laksmono, R., Syhataria, M. I., & Uksan, A. (2022). Strategi Pertahanan Negara Dalam Melindungi Sumber Energi Di Wilayah Perbatasan: Studi Kasus Blok Ambalat & Kepulauan Natuna. *Cakrawala*, 16(1), 29–42. <https://doi.org/10.32781/Cakrawala.V16i1.424>
- Imbar, S. E. J. (2020). Analisis Deformasi Gelombang Pada Pantai Minahasa Barat. *Jurnal*

- Sipil Statik*, 8(1), 65–70. [Http://Robcroslinggeoblog.Blogspot.Com/](http://Robcroslinggeoblog.Blogspot.Com/)
- Khatimah, H., Jaya, I., & Atmadipoera, A. S. (2024). Significant Wave Height Forecasting Using Long-Short Term Memory (Lstm) In Seribu Island Waters. *Ijccs (Indonesian Journal Of Computing And Cybernetics Systems)*, 18(2), 1–5. <https://doi.org/10.22146/ijccs.95044>
- Kim, T., & Lee, W.-D. (2023). Prediction Of Wave Conditions Using A Machine Learning Framework On The East Coast Of Korea On Jstor. *Journal Of Coastal Research*, 39(1), 143–153. <https://www.jstor.org/stable/48712018>
- Kurniawan, R., & Najib Habibie, M. (2011). *Variasi Bulanan Gelombang Laut Di Indonesia Monthly Ocean Waves Variation Over Indonesia*.
- Langgeng Gilang Pangestu, . (2020). *Strategi Indonesia Mewujudkan Asean Outlook On Indo-Pacific (Aoip) Untuk Menciptakan Stabilitas Di Kawasan Indo-Pasifik*. <http://repository.upnvj.ac.id>
- Mar'ati Nur Utami, T., Rini Novitasari, D. C., Setiawan, F., Ulinnuha, N., Farida, Y., Indah, G., & Sari, P. (2021). Tide Prediction In Prigi Beach Using Support Vector Regression (Svr) Method. *Scientific Journal Of Informatics*, 8(2), 194–201. <https://doi.org/10.15294/sji.v8i2.28906>
- Putri, D. F. R., Arianti, I., Nugroho, J. W., & Silviya. (2022). Analysis Of Using Support Vector Regression (Svr) Algorithm To Predict The Occurrence Of Sea Tides In Tanjung Medang, Riau By Saas Storage In Cloud Computing. *Jurnal Mandiri It*, 11(1), 34–40. <https://doi.org/10.35335/Mandiri.V11i1.154>
- Quan, Q., Hao, Z., Xifeng, H., & Jingchun, L. (2022). Research On Water Temperature Prediction Based On Improved Support Vector Regression. *Neural Computing And Applications*, 34(11), 8501–8510. <https://doi.org/10.1007/S00521-020-04836-4>
- Ramadhan, F. V., & Chaerul, A. (2023). Peluang Dan Tantangan Indonesia Menuju Poros Maritim Dunia: Perspektif Politik Internasional. *Tuturan: Jurnal Ilmu Komunikasi, Sosial Dan Humaniora*, 1(3), 262–272. <https://doi.org/10.47861/Tuturan.V1i3.460>
- Ridwan Hadi Pranoto. (2017). *Kecelakaan Kapal Sepanjang Tahun 2017*. <https://www.emaritim.com/2017/12/Kecelakaan-Kapal-Sepanjang-Tahun-2017.html>
- Shamshirband, S., Mosavi, A., Rabczuk, T., Nabipour, N., & Chau, K. Wing. (2020). Prediction Of Significant Wave Height; Comparison Between Nested Grid Numerical Model, And Machine Learning Models Of Artificial Neural Networks, Extreme Learning And Support Vector Machines. *Engineering Applications Of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 805–817. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1773932>
- Sucipto. (2020). *Kapal Tenggelam, Enam Abk Terombang-Ambing 26 Jam Di Selat Makassar* - [Kompas.Id](https://www.kompas.id/Baca/Nusantara/2020/10/19/Kapal-Tenggelam-Enam-Abk-Terombang-Ambing-26-Jam-Di-Selat-Makassar). <https://www.kompas.id/Baca/Nusantara/2020/10/19/Kapal-Tenggelam-Enam-Abk-Terombang-Ambing-26-Jam-Di-Selat-Makassar>
- Syaiful Hidayat Seskoal, A., Angkatan Laut, T., Iwa Soemantri Seskoal, A., & Poernomo Seskoal, H. (2019). Implementasi Strategi Pengendalian Alur Laut Kepulauan Indonesia (Alki) li Dalam Mendukung Ketahanan Nasional. *Jurnal Ketahanan*

- Nasional*, 25(3), 313–330. <https://doi.org/10.22146/jkn.49528>.
- Shamshirband, S., Mosavi, A., Rabczuk, T., Nabipour, N., & Chau, K.-W. (2020). *Prediction of significant wave height; comparison between nested grid numerical model, and machine learning models of artificial neural networks, extreme learning and support vector machines*. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 805–817.
- Tempo.Co. (2018). *Kapal Tenggelam Di Danau Toba Diduga Akibat Angin Kencang | Tempo.Co.* <https://www.tempo.co/ekonomi/kapal-tenggelam-di-danau-toba-diduga-akibat-angin-kencang-907488>
- Utami, W. D., & Agustina, A. C. (2023). Implementation Of Singular Spectrum Analysis In The Forecasting Of Seawater Wave Height. *Desimal: Jurnal Matematika*, 6(3), 285–294. <https://doi.org/10.24042/djm.v6i3.18382>
- Zhang, J., Shi, W., Porlan-Ferrando, L., David Nuñez-Gonzalez, J., Ulazia Manterola, A., Martinez-Iturricastillo, N., & Ringwood, J. V. (2025). Maximum Individual Wave Height Prediction Using Different Machine Learning Techniques With Data Collected From A Buoy Located In Bilbao (Bay Of Biscay). *Journal Of Marine Science And Engineering* 2025, Vol. 13, Page 625, 13(4), 625. <https://doi.org/10.3390/jmse13040625>
- Chen, Y.-L., & Wang, C.-H. (2020). *Wave Height Prediction Using Support Vector Machine And Reanalysis Meteorological Data In Taiwan Coastal Waters*. *Ocean Engineering*, 217, 107993. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107993>
- Habibie, M. N., Fitria, W., & Sofian, I. (2018). Kajian Indeks Variabilitas Tinggi Gelombang Signifikan Di Indonesia. *Jurnal Segara*, 14(3), 159–168. <https://doi.org/10.15578/segara.v14i3.6650>
- Lecun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep Learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/Nature14539>
- Zahoor, M., & Mansurova, N. (2021). Significant Wave Height Forecasting Using Support Vector Regression Model. *International Journal Of Advanced Computer Science And Applications*, 12(2), 280–286. <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2021.0120236>.