

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teluk Parepare merupakan sebuah teluk semi-tertutup yang berbatasan langsung dengan Selat Makassar, menjadikannya wilayah perairan yang penting dan sensitif terhadap perubahan iklim serta dinamika laut. Kondisi perairan di Teluk Parepare sangat terkait dengan mekanisme sirkulasi di Selat Makassar, di mana sering terjadi proses mixing atau turbulensi yang disebabkan oleh gaya pasang surut dan pengaruh ENSO (*El Nino–Southern Oscillation*). Karakteristik perairan Teluk Parepare yang semi-tertutup memberikan perlindungan dari pengaruh angin dan gelombang, menciptakan lingkungan perairan dengan energi yang relatif kecil. Namun, terdapat variasi kedalaman yang signifikan, termasuk adanya submarine canyon (kontur yang menjorok ke dalam), yang dapat mempengaruhi pola sirkulasi arus laut. Variasi kedalaman ini dapat menyebabkan rotasi dan pertemuan arus pada waktu-waktu tertentu, serta perubahan kecepatan arus yang signifikan (Ningsih dan Saka, 2021).

Pemahaman mengenai sirkulasi arus di wilayah ini sangat penting karena berbagai alasan. Pertama, sirkulasi arus memengaruhi distribusi nutrisi dan sedimen, yang berdampak pada ekosistem laut dan kehidupan biota di dalamnya. Kedua, pemahaman tentang pola arus dapat membantu dalam pengelolaan pelabuhan dan aktivitas maritim lainnya, termasuk navigasi dan penanggulangan pencemaran laut. Ketiga, perubahan iklim global dapat memengaruhi pola sirkulasi arus, sehingga pemantauan dan pemodelan arus sangat penting untuk memahami dampak perubahan iklim terhadap wilayah ini.

Sebagai salah satu kawasan pesisir yang berkembang pesat di Sulawesi Selatan, Teluk Parepare menjadi pusat aktivitas perikanan, pelabuhan, serta transportasi laut. Perubahan dinamika oseanografi yang tidak terpantau dengan baik dapat memengaruhi produktivitas perairan, keberlanjutan ekosistem pesisir, hingga aktivitas manusia yang bergantung pada kawasan ini. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sirkulasi arus di perairan Parepare–Makassar dengan memanfaatkan data satelit dan pemodelan hidrodinamika. Data satelit akan memberikan informasi mengenai suhu permukaan laut, kecepatan angin, dan parameter oseanografi lainnya yang relevan untuk pemodelan arus. Pemodelan hidrodinamika (DELFT3D) digunakan untuk mensimulasikan pola arus berdasarkan data satelit dan parameter fisik perairan, sehingga penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai sirkulasi arus di perairan Parepare–Makassar, serta memberikan kontribusi bagi pengelolaan sumber daya laut dan adaptasi terhadap perubahan iklim di wilayah ini.

1.2 Landasan Teori

1.2.1 Arus Laut

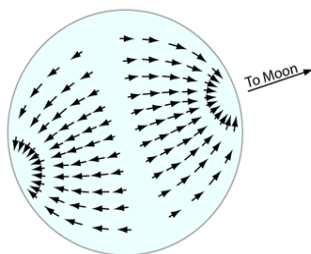
Arus laut (*sea current*) merupakan perpindahan massa air dari satu tempat ke tempat lain, yang terjadi secara terus-menerus dan dipengaruhi oleh berbagai faktor oseanografis. Menurut Julio dkk. (2023), saat kondisi muka laut mulai surut atau menuju fase surut, kecepatan arus laut cenderung meningkat dan bahkan dapat mencapai nilai maksimal. Sebaliknya, ketika permukaan laut berada pada titik pasang tertinggi, kecepatan arus laut tetap tinggi dan relatif mendekati nilai maksimum sebagaimana saat fase surut berlangsung. Perubahan dinamika ini menunjukkan betapa eratnya hubungan antara pergerakan arus laut dengan siklus pasang surut harian.

Lebih lanjut, Hadi dan Radjawane (2009) menjelaskan bahwa arus laut adalah gerakan horizontal massa air laut yang digerakkan oleh gaya-gaya seperti *stress* angin, gradien tekanan akibat perbedaan densitas horizontal, pengaruh tekanan atmosfer, gelombang laut, serta pasang surut. Berdasarkan periodenya, arus laut dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu arus pasang surut dan arus non-pasang surut. Arus pasang surut terjadi secara periodik akibat adanya pengaruh gravitasi Bulan dan Matahari terhadap muka laut. Sementara itu, arus non-pasang surut tidak bersifat periodik dan lebih dipengaruhi oleh angin, variasi densitas air laut, serta kondisi meteorologis lainnya. Pemahaman terhadap kedua jenis arus ini sangat penting dalam kajian oseanografi karena berkaitan langsung dengan proses transportasi sedimen, dinamika ekosistem laut, serta mendukung aktivitas pelayaran dan perikanan secara berkelanjutan.

1. Arus Pasang Surut

Gaya gravitasi antara bumi dan bulan menggerakkan pasang surut dan juga arus. Hal ini pertama kali diamati oleh Galileo dan berikutnya dijelaskan lebih lanjut dalam hukum Newton. Bumi dan bulan berotasi pada satu *barycenter* yang sama. Hal ini menyebabkan gaya sentrifugal di setiap titik di bumi memiliki nilai yang berbeda-beda dan arahnya berlawanan dengan gaya tarik bulan. Resultan dari kedua gaya tersebut disebut sebagai gaya pembangkit pasang surut.

Gaya pembangkit pasang surut mempunyai komponen horizontal dan juga komponen vertikal. Komponen horizontal ini disebut sebagai *tractive force*. *Tractive force* ini akan menyebabkan tonjolan air pada bumi atau pun bisa kita sebut sebagai keadaan pasang. Dalam siklus pasang surut, dari surut menuju pasang, air akan bergerak secara horizontal untuk merubah volume air. Pergerakan horizontal inilah yang disebut sebagai arus pasang surut.



Gambar 1. *Tractive force* antara bumi dan bulan (Sumber : <http://www.oc.nps.edu>)

Bagian belahan bumi yang berhadapan langsung dengan Bulan akan mengalami resultan gaya yang mengarah ke Bulan. Hal ini diakibatkan oleh gaya gravitasi Bulan yang lebih dominan dibandingkan dengan gaya sentrifugal yang memiliki arah gaya menjauhi Bulan. Sedangkan di belahan bumi yang lainnya akan memiliki resultan gaya menjauhi Bulan yang diakibatkan oleh gaya sentrifugal yang lebih dominan dibandingkan dengan gaya gravitasi Bulan.

Seperti yang kita ketahui, pergerakan Bulan dan pergerakan Bumi terhadap Matahari mempunyai periodenya masing-masing. Oleh karena itu, arus pasut yang dipengaruhi oleh gaya tarik Matahari dan Bulan pun memiliki periode berdasarkan jenis pasang surut di daerahnya. Ketika daerah tersebut dipengaruhi oleh tipe pasut dengan dominan pasut harian tunggal, maka perubahan arah gerak arus pasutnya hanya sekali. Daerah yang didominasi oleh pasut harian ganda, perubahan arah arus pasut akan terjadi sebanyak dua kali dalam sehari.

2. Arus Non Pasang Surut

Arus non pasut merupakan arus yang gaya pembangkitnya bukan berasal dari peristiwa pasang surut. Oleh sebab itu, arus ini bersifat non periodik. Terdapat beberapa jenis arus non pasang surut yang diklasifikasikan berdasarkan gaya pembangkitnya, antara lain:

a. Arus geostropik

Arus geostropik adalah arus yang timbul akibat keseimbangan antara gradien tekanan dan gaya Coriolis. Arus ini diawali oleh adanya gradien tekanan, di mana massa air laut bergerak secara horizontal dari wilayah bertekanan tinggi ke wilayah bertekanan lebih rendah. Namun, aliran tersebut kemudian dipengaruhi oleh gaya Coriolis yang menyebabkan terjadinya pembelokan arah. Di belahan bumi utara (BBU), arus akan dibelokkan ke arah kanan, sedangkan di belahan bumi selatan (BBS), arus dibelokkan ke arah kiri.

Besar gaya Coriolis berbanding lurus dengan kecepatan arus yang terjadi. Semakin besar kecepatan arus akibat gradien tekanan, maka semakin besar pula gaya Coriolis yang terbentuk. Ketika besar kecepatan arus dan gaya Coriolis telah mencapai titik keseimbangan, maka terbentuklah arus

geostropik yang bergerak secara konstan dengan arah dan kecepatan yang stabil.

b. Arus yang dipengaruhi oleh angin

Pergerakan udara yang terjadi di atas permukaan laut dapat menyebabkan terbentuknya arus laut. Gaya gesek angin yang bekerja pada permukaan laut akan menyeret lapisan air di permukaan, dan lapisan tersebut akan menyeret lapisan yang berada di bawahnya, sehingga seluruh lapisan akan ikut bergerak. Pembuktian Ekman menunjukkan bahwa arus permukaan tidak sepenuhnya searah dengan arah angin yang membangkitkannya, tetapi mengalami penyimpangan sebesar 45° ke arah kanan di Belahan Bumi Utara (BBU) dan ke arah kiri di Belahan Bumi Selatan (BBS).

c. Arus densitas

Arus densitas timbul akibat adanya gradien densitas secara horizontal. Pembentukan arus densitas umumnya terjadi di daerah muara sungai, di mana terdapat gradien densitas yang disebabkan oleh perbedaan salinitas antara air laut dan air sungai. Densitas air sungai yang lebih rendah menyebabkan permukaan air sungai menjadi lebih tinggi, sehingga arus densitas terbentuk dan bergerak dari muara menuju laut lepas.

1.2.2 Pasang Surut Air Laut

Pasang surut adalah fluktuasi muka air karena adanya gaya tarik menarik benda-benda langit. Gaya-gaya pembangkit pasang surut ditimbulkan oleh gaya tarik menarik antara bumi, bulan, dan matahari. Rotasi bumi menyebabkan elevasi muka air laut di khatulistiwa lebih tinggi daripada di garis lintang yang lebih tinggi. Dengan adanya perputaran bumi maka setiap titik di bumi bekerja gaya sentrifugal (F_c), arah gaya tersebut berlawanan dengan posisi bulan. Selain itu karena adanya pengaruh gravitasi bulan, setiap titik di bumi mengalami gaya tarik (F_g) dengan arah menuju pusat massa bulan. Gaya pembangkit pasang surut adalah resultan dari kedua gaya tersebut (Triatmodjo, 1999). Hal yang sama juga dijelaskan oleh Hutabarat dan Evans (1984), bahwa pasang surut muka air laut terutama disebabkan oleh adanya gaya tarik menarik dua tenaga yang terjadi di lautan, yang berasal dari gaya sentrifugal oleh perputaran bumi pada sumbunya dan gaya gravitasi bulan. Proses kejadian pasang surut dapat dilihat secara langsung. Gerakan naik turunnya permukaan air yang secara periodik juga mempengaruhi aktifitas kehidupan manusia yang tinggal di daerah sekitar perairan (Prasetyo, 2016)

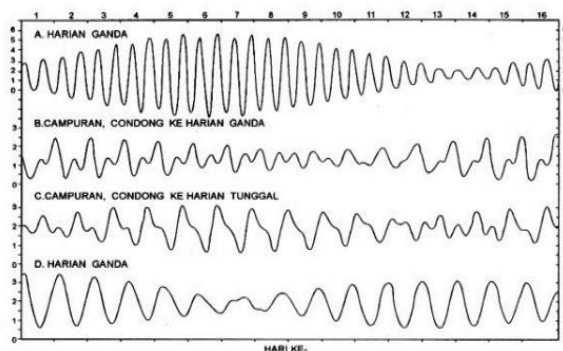
Tinggi pasang surut adalah jarak vertikal antara air tertinggi (puncak air pasang) dan air terendah (lembah air surut) yang berurutan. Periode pasang surut adalah waktu yang diperlukan dari posisi muka air pada muka air rerata ke posisi yang sama berikutnya. Periode pasang surut bisa 12 jam 25 menit atau 24 jam 50 menit, yang tergantung pada tipe pasang surut. Periode pada muka air naik disebut 5 pasang, sedang pada saat air turun

disebut surut. Fenomena pasut ini juga berpengaruh terhadap perubahan dari bentuk bumi dan atmosfer. Pengamatan pasut dilakukan untuk mendapatkan tinggi nol dari permukaan air laut yang nantinya kedalamannya suatu titik di dasar perairan atau ketinggian titik di pantai mengacu pada permukaan laut yang dianggap sebagai bidang referensi atau yang biasa disebut sebagai datum vertical (Qhomariyah, 2015).

Bentuk pasang surut di berbagai daerah tidak sama. Di suatu daerah dalam satu hari dapat terjadi satu kali atau dua kali pasang surut. Secara umum pasang surut di berbagai daerah dapat dibedakan dalam empat tipe (Gambar 2.), yaitu : Pasang Surut Harian Tunggal (*Diurnal Tide*) yaitu dalam satu hari terdapat satu kali pasang dan satu kali surut, Pasang Surut Harian Ganda (*Semi Diurnal Tide*) yaitu dalam satu hari terdapat dua kali pasang dan dua kali surut. Pasang Surut Campuran condong kehariian tunggal (*Mixed Tide Prevailing Diurnal*) yaitu dalam satu hari terdapat satu kali pasang dan satu kali surut tapi kadang-kadang terjadi dua kali pasang atau dua kali surut, Pasang surut campuran condong kehariian ganda (*Mixed Tide prevailing Semidiurnal*) yaitu dalam satu hari terdapat dua kali pasang dan dua kali surut namun tinggi dan periodenya sangat berbeda.

Menurut (Triatmodjo, 2003), dilihat dari pola gerakan muka lautnya dan indeks formzahl, pasut dapat dibagi menjadi empat jenis yaitu:

1. ($F \leq 0,25$): semi diurnal tide atau pasut harian ganda.
2. ($0,25 < F \leq 1,5$): mixed tide prevailing semi diurnal atau pasut campuran condong harian ganda.
3. ($1,5 < F \leq 3$): mixed Tide Prevailing Diurnal atau pasut campuran condong harian tunggal.
4. ($F > 3$): diurnal tide atau pasut harian tunggal.



Gambar 2. Tipe Pasang Surut (Triatmodjo, 1999)

Untuk mengetahui jenis pasut laut yaitu dengan menggunakan rumus perhitungan bilangan formzahl menurut (Kusuma, H. A., et al, 2021) :

$$F = \frac{A_{K1}}{A_{M2}} + \frac{A_{O1}}{A_{S2}} \quad (1.1)$$

Keterangan :

- A_{K_1} = amplitudo dari unsur pembangkit pasut K1
 A_{O_1} = amplitudo dari unsur pembangkit pasut O1
 A_{M_2} = amplitudo dari unsur pembangkit pasut M2
 A_{S_2} = amplitudo dari unsur pembangkit pasut S2
 F = Bilangan formzahl

1.2.3 Konstanta Pasang Surut

Pada umumnya digunakan 9 komponen utama konstanta harmonik pasang surut untuk keperluan rekayasa, yaitu: M_2 , S_2 , K_2 , N_2 , K_1 , O_1 , P_1 , M_4 dan MS_4 . Konstanta harmonik pasang surut adalah konstanta-konstanta yang dapat menyebabkan terjadinya pasang surut. Konstanta-konstanta pasang surut tersebut memiliki sifat yang harmonik terhadap waktu, sehingga dinamakan konstanta harmonik pasang surut. Secara garis besar konstanta harmonik pasang surut dapat dibagi menjadi tiga kelompok seperti di bawah ini (Rawi, 1999):

1. Konstanta harmonik pasang surut periode harian (diurnal period tide).
2. Konstanta harmonik pasang surut periode harian ganda (semidiurnal period tide).
3. Konstanta harmonik pasang surut periode panjang (long period tide).

Sifat dan karakteristik pasang surut di suatu tempat dari hasil pengamatan pasang surut dalam kurun waktu tertentu dapat diketahui dengan melakukan analisis *harmonic* pasang surut laut (Soeprapto, 1999). Tujuan dari analisis harmonik pasang surut adalah untuk menghitung amplitudo dan keterlambatan fase. Amplitudo yang dihitung merupakan hasil respons dari kondisi laut setempat terhadap pasang surut setimbang sedangkan kelambatan fase yang dihitung merupakan kelambatan fase dari gelombang tiap komponen terhadap pasang surut setimbang. Selanjutnya nilai perubahan amplitudo dan kelambatan fase tersebut dinyatakan dalam konstanta harmonik. Penjelasan mengenai komponen harmonik pasang surut tersebut dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komponen harmonik utama pasang surut (Rawi, 1999)

Tipe Pasang surut	Keterangan	Simbol	Kec. Sudut ($^{\circ}$ /jam)
Ganda	Dipengaruhi oleh Bulan Utama	M_2	28,9841
	Dipengaruhi oleh Matahari Utama	S_2	30
	Dipengaruhi oleh akibat lintasan bulan berbentuk ellips	N_2	28,4397

	Dipengaruhi oleh lintasan matahari berbentuk ellips	K_2	30,0821
Tunggal	Dipengaruhi oleh deklinasi Bulan dan deklinasi matahari	K_1	15,0411
	Dipengaruhi oleh deklinasi Bulan Utama	O_1	13,943
	Dipengaruhi oleh deklinasi Matahari Utama	P_1	14,9589
Perairan Dangkal	Kecepatan sudut dua kali kecepatan sudut M_2	M_4	59,97
	Merupakan modulasi dari M_2 dan S_2 dengan kecepatan sudut jumlah kecepatan sudut M_2 dan S_2	MS_2	59,98

1.2.4 Studi Kasus

Variasi pola arus laut dapat dianalisis secara komprehensif menggunakan pendekatan data observasi dan pemodelan numerik berbasis hidrodinamika. Berbagai studi menunjukkan bahwa data observasi dari satelit maupun hasil pengukuran langsung di lapangan, jika dipadukan dengan simulasi numerik seperti model Delft3D, dapat menggambarkan secara akurat dinamika arus musiman, arah dominan arus, serta kecepatan dan pola sirkulasi massa air di suatu perairan. Dalam penelitian Budiwicaksono et al. (2013), pola arus di Teluk Lampung dianalisis melalui pemodelan Delft3D-FLOW berbasis data pasang surut dan arus lapangan menggunakan ADCP dan tide gauge. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa pola arus didominasi oleh sirkulasi bolak-balik akibat pasang surut, dengan kecepatan yang bervariasi secara musiman. Arus tertinggi tercatat pada musim timur dengan kecepatan mencapai 0,0298 m/s, sedangkan validasi hasil model menunjukkan tingkat kesalahan relatif sekitar 34%, yang masih dalam kategori dapat diterima untuk pemodelan arus laut.

Sebaliknya, Jufri et al. (2020) melakukan studi menggunakan data citra satelit AVISO untuk mengevaluasi distribusi spasial dan temporal arus permukaan laut di Selat Makassar, Laut Flores, dan Teluk Bone. Dengan pendekatan geostropik berbasis data komponen U dan V dari AVISO, penelitian ini mengungkap bahwa arus laut secara umum mengalir dari arah selatan (Laut Flores) ke utara (Selat Makassar dan Teluk Bone), dengan kecepatan yang lebih tinggi terjadi pada musim barat dan timur, yaitu antara 0,3243–0,5059 m/s. Sedangkan pada musim peralihan, arus menjadi lebih lambat dan arah alirannya kompleks, berkisar antara 0,05347–0,2352 m/s. Kedua studi ini menggarisbawahi pentingnya pendekatan kombinasi

antara data observasi (baik satelit maupun lapangan) dan pemodelan numerik dalam memahami dinamika arus laut. Hal ini tidak hanya mendukung kajian hidrodinamika perairan, tetapi juga sangat relevan untuk berbagai kebutuhan kelautan seperti perencanaan pelayaran, manajemen sumber daya perikanan, serta mitigasi dampak lingkungan di wilayah pesisir. Pendekatan ini memperkuat pemahaman bahwa pola arus tidak hanya dibentuk oleh kecepatan arus, tetapi juga oleh interaksi antara pasang surut, angin muson, dan topografi lokal, sebagaimana tergambar pada kasus Teluk Lampung dan Selat Makassar

1.2.5 Penggunaan Data Satelit dalam Oceanografi

Perkembangan teknologi satelit telah merevolusi cara para ilmuwan memahami dan memantau dinamika laut secara global. Melalui penginderaan jauh, data satelit menyediakan informasi oseanografi yang luas, berkala, dan konsisten, meliputi parameter suhu, warna, ketinggian, serta kedalaman laut. Pendekatan ini menjadi penting terutama untuk wilayah perairan yang sulit dijangkau atau membutuhkan observasi jangka panjang, seperti kawasan tropis dan pesisir yang rentan terhadap perubahan iklim. Tidak hanya memperkuat basis ilmiah, tetapi data satelit juga telah mendorong efisiensi dalam pengambilan keputusan kebijakan kelautan, konservasi sumber daya laut, serta peringatan dini terhadap bencana oseanografi.

Salah satu aspek krusial dari data satelit adalah pengukuran Suhu Permukaan Laut (SST). Sensor seperti Terra-MODIS dan NOAA AVHRR mampu merekam fluktuasi suhu permukaan laut secara luas. Studi di pesisir selatan Jawa (2018–2020) mencatat kenaikan suhu dari 25°C ke atas 30°C, yang mencerminkan dinamika musiman dan upwelling, berdampak pada pola migrasi ikan dan potensi perikanan (Kusumawati dkk., 2021). Pengukuran ketinggian permukaan laut (Sea Surface Height/SSH) melalui radar altimetri satelit seperti TOPEX/Poseidon dan Sentinel-6 juga memungkinkan deteksi anomali iklim (El Niño–La Niña), serta pemodelan arus laut skala besar. Bahkan, variasi kecil dalam SSH dapat digunakan untuk memahami sirkulasi mesoscale yang tidak tampak di permukaan (Dufois dkk., 2023). Warna laut yang ditangkap sensor SeaWiFS dan MODIS digunakan untuk mengestimasi konsentrasi klorofil-a, yang menjadi indikator produktivitas primer. Penelitian di Laut Jawa (2017–2021) menggunakan Aqua-MODIS dan model VGPM menemukan bahwa variasi klorofil sangat dipengaruhi oleh musim dan suhu permukaan (Haryati dkk., 2022).

Dalam hal pemetaan batimetri, pendekatan Satellite-Derived Bathymetry (SDB) memanfaatkan citra resolusi tinggi seperti WorldView-2 untuk memprediksi kedalaman laut dangkal berdasarkan rasio kanal spektral. Studi di Pulau Parang, Karimunjawa menunjukkan tingkat akurasi tinggi ($R^2 = 0,94$; $RMSE \approx 2,3$ m) (Nurhayati dkk., 2022). Namun demikian, keterbatasan seperti tutupan awan dan celah data menjadi tantangan yang kerap dihadapi. Untuk mengatasinya, para ilmuwan kini mengembangkan metode rekonstruksi data menggunakan algoritma statistik dan machine learning. Lebih dari 130 studi telah mengupas penggunaan teknik seperti kriging dan neural network untuk mengisi data oseanografi yang hilang (Prasetyo dkk., 2023).

Penggabungan data satelit dengan pengukuran in situ melalui program global seperti ARGO juga memperkaya basis data oseanografi. Di Indonesia, pendekatan ini digunakan untuk memprediksi kemunculan zooplankton sumber utama pakan ikan pelagis melalui model statistik Generalized Additive Models (Rahmatullah dkk., 2021). Dalam konteks perikanan, data Sea Surface Height Anomaly (SSHA) juga dimanfaatkan untuk mengidentifikasi zona potensial penangkapan tuna. SSHA menjadi indikator penting karena berhubungan dengan arus konvergen dan eddy yang menarik konsentrasi ikan (Nugroho dkk., 2023).

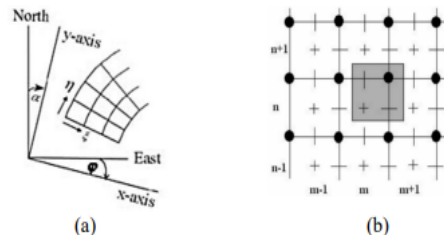
Secara keseluruhan, data satelit telah menjadi pilar utama dalam observasi laut modern. Efisiensinya dalam menjangkau wilayah luas, kemampuannya dalam mendeteksi perubahan iklim, serta potensinya untuk diintegrasikan dengan teknologi cerdas, menjadikan penginderaan jauh sebagai instrumen vital dalam pengembangan oseanografi masa depan.

1.2.6 Model Hidrodinamika Delft3D

Delft3D adalah perangkat lunak pemodelan hidrodinamika yang digunakan untuk memodelkan kondisi hidrologi dan hidrodinamika dalam sistem lingkungan air, seperti pantai, sungai, dan danau (Deltares, 2012). Delft3D juga merupakan perangkat lunak yang dikembangkan oleh delatres sebagai perangkat lunak komputer terintegrasi yang unik untuk Multi-disiplin. Metode dan perhitungan wilayah pesisir, sungai dan daerah aliran sungai dapat dilakukan dengan mensimulasikan data pasang surut, sedimen, gelombang, kualitas air, perkembangan fisik, dan faktor lingkungan yang akan mereka tiru. Para ahli dan non-ahli mengembangkan Delft3D Suite, yang terdiri dari beberapa modul yang dapat berinteraksi untuk sementara waktu. Sehubungan dengan manual Delft3D-FLOW, salah satu modul ini adalah simulasi hidrodinamika multi-dimensi (2D dan 3D), sebuah sistem yang menghitung efek aliran dan arus dari gelombang dan gaya cuaca dengan batas persegi panjang atau melengkung, yang ditumpangkan pada grid untuk mendapatkan metode koordinat perkiraan (Manual, 2022). Delft3D menggunakan sistem koordinat ortogonal horizontal yang fleksibel untuk pemasangan grid sesuai bentuk area yang dimodelkan. Persamaan gerak dan kontinuitas yang tidak stasioner diselesaikan secara numerik untuk memperoleh distribusi 2D atau 3D dari variabel hidrodinamika seperti muka air, kecepatan arus, dan tekanan air. Secara umum, pemodelan hidrodinamika dengan Delft3D memungkinkan prediksi dan analisis kondisi perairan yang kompleks, validasi dengan data pengamatan nyata, serta evaluasi dampak perubahan lingkungan atau struktur seperti breakwater terhadap pola aliran dan sedimentasi di perairan pesisir maupun Sungai.

Modul Flow pada Delft3D adalah multi-dimensi 2D dan 3D hidrodinamik yang mensimulasikan program untuk menghitung fenomena aliran yang dinamis karena pasang surut dan meteorologis pada kurva linear, sehingga membutuhkan grid. Delft3D juga memperhitungkan aliran masuk dari sungai dan sumber titik lainnya. Model digunakan sebagai input parameter fisik air dan memberikan distribusi 3D sebagai output, lalu hasil dari model Delft3D-Flow adalah dasar untuk

perhitungan proses hidrodinamika dengan menggunakan model kualitas air. Model ini didasarkan pada persamaan gerak dan kontinuitas yang tidak stasioner. Pada persamaan diselesaikan secara numerik menggunakan sistem lengkung ortogonal koordinat horizontal yang memberikan pemasangan grid yang baik dengan bentuk area yang dimodelkan (Bielecka dan Kazmierski, 2003).



Gambar 3. *System Coordinate Spherical (a) dan System Coordinate Cartesian (b) (Delft 3D-FLOW, 2014)*

Pemodelan numerik ini digunakan berdasarkan modul Delft3D-FLOW dan Delft3D-WAVE untuk memperkirakan dan memperhitungkan kondisi ketidakstabilan aliran (*unsteady flow*) serta fenomena transportasi yang disebabkan oleh faktor pasang surut dan fenomena transportasi gaya-gaya luar (*meteorological forcing*). Simulasi Delft3D menggunakan beberapa persamaan pembangun seperti persamaan momentum dan persamaan kontinuitas. Dalam persamaan momentum untuk pergerakan vertikal, diasumsikan bahwa percepatan vertikal diabaikan, sehingga hanya terfokuskan pada persamaan tekanan hidrostatik.

1.2.7 Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas memastikan bahwa massa air dalam sistem tetap terjaga (menjaga keseimbangan massa air) : air yang masuk ke suatu wilayah harus sama dengan air yang keluar, termasuk pengaruh perubahan tinggi muka air. Delft3D menuliskan persamaan kontinuitas kedalaman-rata sebagai dasar untuk menghitung distribusi volume air dan perubahan elevasi muka air selama simulasi.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv)}{\partial y} = 0 \quad (1.1)$$

Keterangan :

- η (eta) : Tinggi muka air laut
- u, v : Komponen kecepatan arus (arah timur-barat & utara-selatan)
- H : Kedalaman total (batimetri + muka air)
- t : Waktu

1.2.8 Persamaan Momentum

Persamaan momentum menangkap bagaimana air bergerak akibat gaya-gaya yang bekerja padanya. Gaya-gaya itu meliputi gradien muka air (yang mendorong aliran dari daerah tinggi ke rendah), gesekan dasar laut, medan angin di permukaan, serta pengaruh gaya Coriolis akibat rotasi bumi. Persamaan momentum dalam Delft3D dilekatkan pada grid horizontal dan diselesaikan secara numerik untuk menentukan kecepatan dan arah arus di setiap sel model.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + f v + v \frac{\tau_{sx}}{\rho H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho H} \quad (1.2)$$

Keterangan :

- u, v : Kecepatan arus (arah timur-barat & utara-selatan)
- g : Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)
- η (eta) : Tinggi muka air laut
- f : Parameter Coriolis (dipengaruhi lintang)
- τ_{sx} : Tegangan angin di permukaan laut
- τ_{bx} : Tegangan gesekan dasar laut
- ρ : Densitas air laut
- H : Kedalaman air

1.3 Rumusan Masalah

Rumusan Masalah dari penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pola sirkulasi arus laut di perairan Parepare - Makassar berdasarkan data satelit?
2. Bagaimana hasil pemodelan hidrodinamika menggambarkan karakteristik arus laut di perairan Parepare - Makassar?
3. Bagaimana kondisi arus laut terhadap aktivitas kelautan di wilayah tersebut?

1.4 Tujuan dan Manfaat

1.4.1 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Melakukan perbandingan data pasang surut hasil kalkulasi dengan data observasi BMKG
2. Melakukan simulasi arus laut berbasis pemodelan hidrodinamika.
3. Menganalisis pola sirkulasi arus laut di wilayah Makassar-Selayar menggunakan data satelit

1.4.2 Manfaat

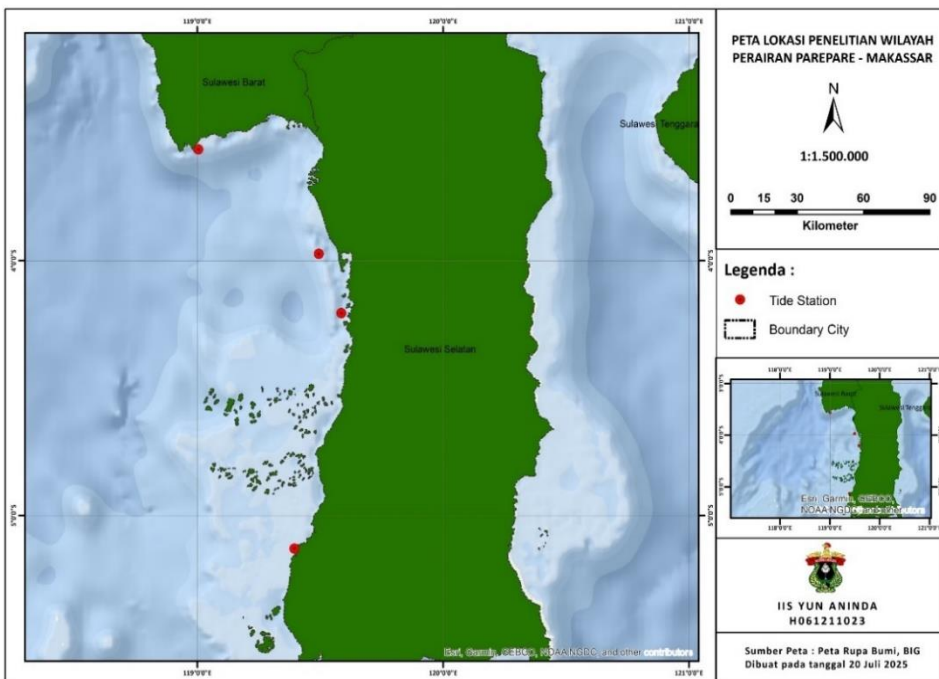
Adapun manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Memberikan informasi ilmiah mengenai dinamika arus laut di Makassar-Selayar.
2. Menyajikan interpretasi terhadap hasil analisis untuk mendukung kegiatan kelautan.
3. Menjadi referensi untuk penelitian lanjutan di bidang oseanografi.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di wilayah perairan antara Parepare hingga Makassar, Provinsi Sulawesi Selatan, Indonesia. Wilayah ini terletak pada koordinat geografis antara 119°00'E hingga 120°30'E dan 3°40'S hingga 5°00'S.



Gambar 4. Peta Lokasi Penelitian Wilayah Perairan Parepare – Makassar

Lokasi penelitian secara khusus mencakup beberapa titik observasi yang ditandai dengan stasiun pasang surut (tide station). Titik-titik tersebut berada di sepanjang garis pantai Parepare hingga Makassar, dengan rincian sebagai berikut:

1. Titik pertama berada di bagian utara, dekat wilayah pesisir Sulawesi Barat.
2. Titik kedua dan ketiga terletak di bagian tengah sepanjang pesisir barat Sulawesi Selatan.
3. Titik keempat berada di bagian selatan dekat wilayah pesisir Kota Makassar.

2.2 Pengumpulan Data

Data Data yang diolah berupa data sekunder seperti data batimetri dan data pasang surut yang diperoleh dari berbagai institusi resmi dan platform resmi seperti *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO), Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Maritim Untia Makassar Sulawesi Selatan, dan Delftdashboard.

1. Data Batimetri

Data batimetri yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*) 2023. Pemilihan GEBCO didasarkan pada pertimbangan cakupan wilayah yang luas, resolusi yang cukup baik, serta ketersediaannya yang terbuka (*open access*). Data GEBCO telah dikompilasi dari berbagai sumber, baik hasil survei kapal (*ship soundings*) maupun altimetri satelit, sehingga dapat memberikan representasi batimetri dasar laut yang akurat untuk kebutuhan pemodelan numerik skala regional. Sementara itu, data batimetri dari Badan Informasi Geospasial (BIG) umumnya memiliki tingkat ketelitian lebih tinggi karena bersumber dari survei langsung di lapangan, namun aksesnya relatif terbatas dan tidak selalu tersedia untuk cakupan wilayah yang luas. Mengingat penelitian ini menggunakan domain pemodelan yang mencakup wilayah Parepare hingga Makassar, maka GEBCO dipilih sebagai sumber data yang lebih sesuai karena praktis, konsisten, dan mudah diintegrasikan ke dalam perangkat pemodelan Delft3D. Dengan demikian, penggunaan data GEBCO bukan berarti mengabaikan data BIG, melainkan karena pertimbangan ketersediaan, cakupan wilayah, serta kesesuaian dengan kebutuhan pemodelan hidrodinamika pada skala regional penelitian ini.

<https://download.gebco.net/>

2. Data Shapefile

Shapefile dapat digunakan untuk mendefinisikan batas wilayah model pada *Software* Delft3D dengan mengubah *Shapefile* menjadi *Land Boundary* atau format (.ldb) menggunakan *software* *Global Mapper*.

3. Data Pasang Surut

Data pasang surut digunakan karena pasang surut merupakan salah satu penggerak utama dinamika arus laut, khususnya di wilayah pesisir dan teluk. Data ini sangat penting sebagai kondisi batas (*boundary condition*) dalam pemodelan numerik Delft3D agar hasil simulasi pola arus sesuai dengan kenyataan di lapangan. Penelitian ini menggunakan data pasang surut dari BMKG Maritim Untia Makassar yang diperoleh melalui pengamatan langsung di stasiun pasut, serta data dari DelftDashboard yang menyediakan data harmonik pasut global berbasis satelit dan model numerik. Kombinasi kedua sumber ini memungkinkan pemodelan lebih akurat, baik dari sisi pengamatan lokal maupun cakupan global.

2.3 Prosedur Pengolahan Data

Prosedur pengolahan data merupakan serangkaian langkah sistematis yang dilakukan untuk mengambil, menyimpan, mengolah, dan menghasilkan informasi yang relevan dan akurat dari data mentah. Dalam penelitian ini, prosedur pengolahan data dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut :

2.3.1 Input Data

Dalam penelitian ini, input utama berupa data batimetri dan data pasang surut diperoleh dari sumber resmi dan divalidasi untuk memastikan kesesuaiannya dengan pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak Delft3D. Data batimetri

dari GEBCO mencakup wilayah Parepare hingga Makassar, disajikan dalam format .xyz dan dikonversi ke .dep menggunakan Python dan Grid Editor Delft3D. Validasi dilakukan melalui visualisasi kontur untuk menghindari anomali kedalaman. Data pasang surut berasal dari BMKG Maritim Untia Makassar dan Delftdashboard yang terhubung dengan model pasut global seperti TPXO atau FES, kemudian dikonversi ke format .bct sebagai input batas model. Proses pengolahan dibantu oleh Microsoft Excel dan Python sebelum digunakan dalam simulasi dengan Delft3D-FLOW.

2.3.2 Data Batimetri

Data batimetri diproses menggunakan perangkat lunak GIS (*Geographic Information System*) seperti QGIS untuk membuat model elevasi digital (DEM) dasar laut. Proses ini mencakup interpolasi titik kedalaman menjadi permukaan kontinu, pembersihan data dari nilai ekstrim, serta pemotongan wilayah sesuai domain pemodelan. Hasil DEM ini selanjutnya dikonversi ke dalam format grid (.dep) dan digunakan sebagai representasi kontur dasar laut dalam pemodelan hidrodinamika dengan Delft3D-FLOW. Data batimetri diproses dengan perangkat lunak GIS (*Geographic Information System*) untuk mendapatkan model elevasi digital (DEM) dasar laut yang menjadi dasar untuk pemodelan hidrodinamika dalam Delft3D.

2.3.3 Data Pasang Surut

Data tinggi muka air laut dari BMKG dan Delftdashboard diproses untuk mengidentifikasi komponen pasang surut dominan, termasuk amplitudo dan fase masing-masing komponen utama seperti M2, S2, K1, dan O1. Analisis ini dilakukan menggunakan metode harmonik atau analisis spektral. Hasilnya digunakan sebagai input *boundary condition* dalam model, dalam format .bct, untuk mensimulasikan variasi muka air secara temporal dalam domain Delft3D.

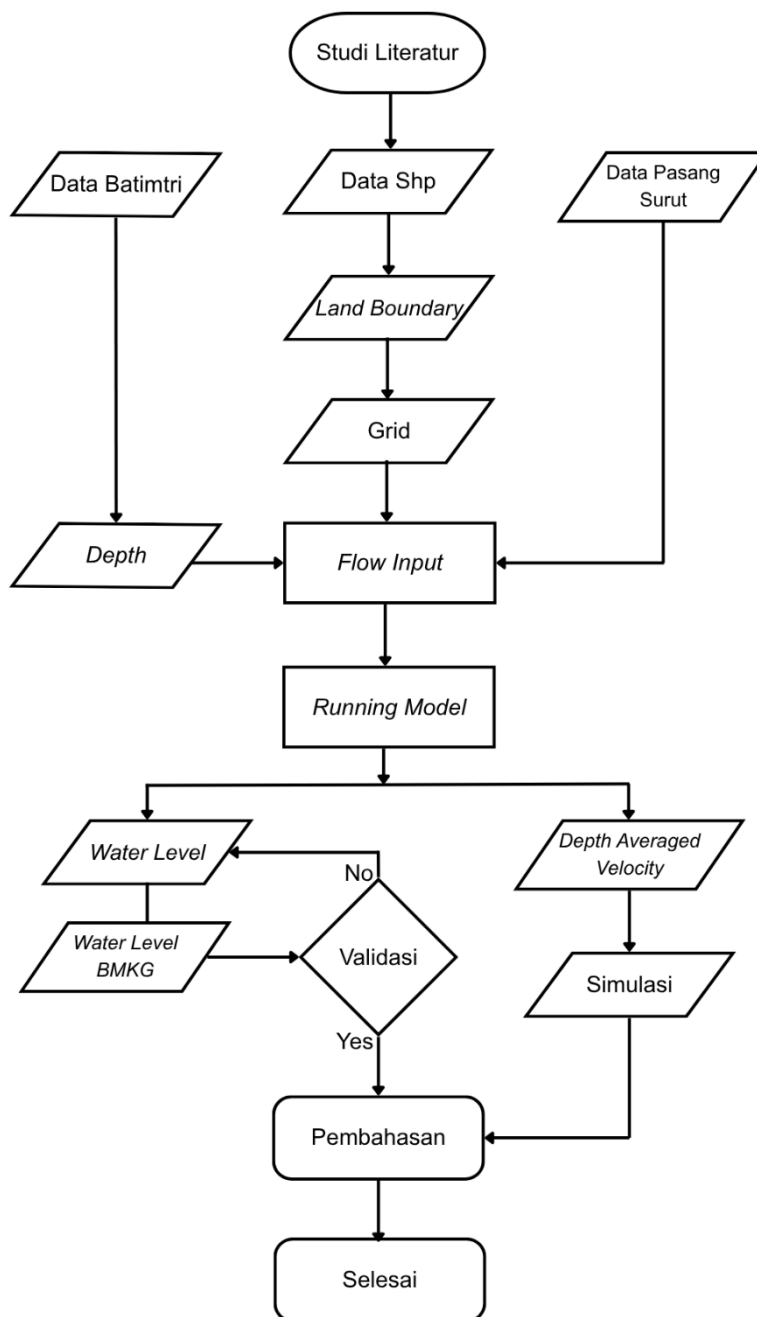
2.3.4 Pemodelan Hidrodinamika

Menggunakan perangkat lunak Delft3D untuk memodelkan pola sirkulasi arus berdasarkan data input batimetri dan pasang surut yang telah diproses, serta mengintegrasikan hasil model dengan analisis data satelit untuk mendapatkan gambaran yang komprehensif mengenai sirkulasi arus di wilayah perairan Parepare–Makassar.

2.3.5 Penanganan Nilai NaN

NaN (*Not a Number*) adalah nilai kosong atau tidak terdefinisi yang sering muncul dalam data numerik, termasuk hasil simulasi hidrodinamika seperti Delft3D. Nilai ini bukan nol dan bukan error, tapi menandakan bahwa tidak ada nilai sah untuk titik/grid tertentu. Nilai hilang (NaN) dalam data pemodelan hidrodinamika perlu ditangani agar tidak mengganggu hasil simulasi. Dengan menggunakan Excel, nilai hilang dapat dideteksi melalui fitur *Filter*, lalu diatasi dengan menghapus baris/kolom kosong. Langkah ini penting untuk memastikan data input bersih dan simulasi Delft3D berjalan optimal.

2.4 Bagan Alir



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian