

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara maritim yang terbentang dari Sabang di ujung utara Pulau Sumatera hingga Merauke di ujung selatan Pulau Papua. Di sekitar 66,667% dari wilayahnya adalah laut, dengan garis pantai sepanjang sekitar 80 ribu kilometer, terletak pada posisi 7°20' LU - 14° LS dan 92° BT - 141° BT. Provinsi Papua terletak di koordinat 130-140 BT dan 9,0 - 10,45 LS, menjadi bagian wilayah paling timur Indonesia yang berbatasan secara langsung dengan Papua New Guinea. Provinsi Papua memiliki pantai yang membentang sepanjang 1. 170 mil laut dan luas perairan teritorialnya mencapai 45. 510 km².

Kabupaten Merauke terletak antara 137° – 141° BT dan 6° – 9° LS. Dari segi geografis, Kabupaten Merauke berbatasan dengan Kabupaten Mappi dan Kabupaten Boven Digoel di utara, Laut Arafura di selatan dan barat, serta Negara Papua Nugini di timur. Kabupaten Merauke berada di ujung timur bagian selatan Indonesia, berbatasan langsung dengan Papua Nugini dan Australia. Secara administratif, luas wilayahnya mencapai 45.071 km² dengan garis pantai sepanjang 350 km yang berada di tepi Laut Arafura.

Sungai Maro di Kabupaten Merauke mengalir dengan tenang dari arah timur laut menuju barat daya sebelum membuahkan diri ke dalam Laut Arafura. Sungainya membentang sepanjang 207 km dan memiliki lebar yang beragam, berkisar antara 48 hingga 900 m. Sebagian besar aliran sungai ini memiliki arus yang kuat, sementara di bagian bawahnya airnya menjadi asin karena terpengaruh oleh air laut. Salinitas yang terjadi selama musim kemarau bisa mencapai jarak hingga 70 km dari tepi pantai menuju ke hulu sungai. Fluktuasi pasang surut di perairan Merauke dapat mencapai ketinggian antara 5 hingga 6 meter.

Lokasi di sekitar muara sungai memiliki nilai ekonomi yang penting karena menjadi titik vital yang menghubungkan laut dengan sungai yang mengalir dari darat ke laut ataupun sebaliknya. Pada saat air bergerak bolak-balik, banyak air kembali ke laut, yang membuat aliran air semakin dalam dan arus semakin kencang, bisa mengikis lantai muara dan memelihara kedalaman air. Kondisi ini memungkinkan estuari bisa dimanfaatkan sebagai jalur pelayaran.

Muara merupakan area di pinggir pantai di mana sungai-sungai bertemu dan mengalir bebas ke laut. Muara menjadikan wilayah peralihan antara ekosistem sungai dan lautan, dipengaruhi oleh naik-turun air, gelombang, serta aliran dan pengendapan material dari sungai. Oleh karena itu, muara dipengaruhi oleh kualitas air laut dan air tawar, sehingga gabungan pengaruh keduanya membentuk ciri khas yang unik di muara itu.

Di muara sungai, air sungai dan air laut saling bercampur sebagai hasil dari pasang surut dan gelombang yang terjadi (Nelson et al. dalam Purba, 2006). Maka, pasokan air di muara sungai bergantung pada peristiwa pasang surut. Arus pasang

merayap, menggerakkan partikel sedimen di daerah muara sungai, sehingga berimbas pada konsentrasi material padat yang terlarut di wilayah tersebut.

Dalam pandangan Wright (1985), delta dipandang sebagai wilayah di pesisir yang telah mengalami penimbunan material sedimen di bagian bawah air dan di atas permukaan air. Bahan yang membentuk delta adalah hasil pengendapan sungai dan pula pengendapan laut kedua yang terbentuk akibat gelombang, arus, atau pasang surut (CERC, 2007). Berdasarkan penjelasan itu, dapat disarikan bahwa delta terbentuk di daerah tempat muara sungai berada dan sangat dipengaruhi oleh volume endapan sedimen serta peristiwa hidrodinamika yang terjadi di kawasan tersebut (Riandi, Apriansyah, dan Risiko 2022). Faktor lain yang memengaruhi proses terbentuknya dan penampilan delta meliputi ukuran butiran sedimen, kedalaman serta morfologi cekungan pengendapan, serta tingkat hujan yang berpengaruh pada fluktuasi debit air dan sedimen yang diangkutnya (Nichols, 2009).

Kami melakukan penelitian yang menarik tentang pengaruh pasang surut terhadap pembentukan delta di muara Sungai Maro, karena delta tersebut memiliki ciri-ciri yang unik. Metode yang kami gunakan adalah pemodelan simulasi matematik.

Dari latar belakang tersebut, maka judul penelitian yang kami teliti adalah **“Pemodelan Simulasi Matematik Pengaruh Pasang Surut Terhadap Terbentuknya Delta di Muara Sungai Maro Kabupaten Merauke”**

1.1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, permasalahan yang ingin diselesaikan dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimanakah pasang surut mempengaruhi terbentuknya delta di muara Sungai Maro?
2. Bagaimana model hidrodinamika muara Sungai Maro tanpa adanya delta?
3. Bagaimana model hidrodinamika muara Sungai Maro dengan adanya delta?

1.1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh pasang surut terhadap terbentuknya delta di muara Sungai Maro.
2. Menganalisis model hidrodinamika muara Sungai Maro tanpa adanya delta.
3. Menganalisis model hidrodinamika muara Sungai Maro dengan adanya delta.

1.1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diinginkan dapat memberikan pemahaman tentang pengaruh pasang surut terhadap terbentuknya delta di muara Sungai Maro, serta bagaimana model hidrodinamika muara Sungai akan bekerja baik tanpa keberadaan delta maupun saat delta hadir. Harapannya penelitian ini bisa berguna untuk

mempertimbangkan tindakan yang akan diambil dalam pengaturan wilayah perairan di area di sekitar muara Sungai Maro.

1.1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penulisan ini adalah sebagai berikut:

1. Daerah pengumpulan data dan penelitian terletak di sekitar perairan seputar delta Sungai Maro di Kabupaten Merauke, Provinsi Papua.
2. Pemodelan Simulasi dari pola arus yang dilakukan menggunakan perangkat lunak MIKE Zero (Modul hidrodinamika) dengan mempertimbangkan syarat batas.

1.2. Teori

1.2.1 Delta dan Klasifikasi Delta

Endapan delta sungai atau kuala terbentuk di muara sungai ketika air sungainya bersentuhan dengan perairan lain yang memiliki arus ringan atau tenang. Air yang bergerak lambat tidak dapat mengangkut sedimen, sehingga menyebabkan sedimen terendap di muara. Biasanya, Delta terbentuk di lautan terbuka, tepi pantai, atau danau. Ukuran serta bentuk delta dipengaruhi oleh proses yang terjadi di air yang mengalir dan menerima endapan. Tak hanya itu, dimensi, wujud, dan letak perairan tempat mengendapnya sedimen pun memiliki dampak pada perkembangan delta.

Peranan sungai delta sangat penting dalam perkembangan manusia, karena seringkali delta menjadi tempat utama untuk bercocok tanam dan pemukiman. Delta turut menjaga wilayah pantai dan memengaruhi pasokan air minum. Dari perspektif ekologi, delta memegang peranan yang penting sebagai tempat tinggal bagi berbagai spesies.

Berdasarkan penelitian oleh Coleman (1968) serta hasil penelitian dari Scott dan Fischer (1969), delta dijelaskan sebagai sebuah dataran yang terbentuk akibat dari proses pengendapan yang disebabkan oleh aktivitas sungai dan muara. Dampak dari aktivitas ini mengakibatkan sedimentasi dan menyebabkan pergeseran tidak teratur pada garis pantai. The year 2020. Berkenaan dengan terciptanya delta, terdapat beberapa syarat yang harus dipenuhi:

1. Terdapat sungai yang mengalir menuju laut atau danau
2. Lautnya dangkal
3. Arus dan gelombang laut sangat lemah
4. Tidak ada aktivitas tektonik yang menyebabkan penurunan dasar laut atau danau di lokasi muara sungai
5. Arus pasang surut air laut tidak kuat
6. Material batuan yang diendapkan dilaut atau danau dalam jumlah besar secara berkala.

1.2.2 Macam-Macam Delta

Saat delta terbentuk, juga tumbuh morfologi delta yang khas dan mudah dikenali di setiap sistem. Menurut Walker dan James (1992), biasanya delta terdiri dari tiga bagian: delta plain, delta front, dan prodelta.

1) Delta Plain

Delta plain merupakan bagian delta yang mengarah ke daratan. Delta plain itu adalah area yang terbentuk di atas daratan dan terdiri dari saluran air yang pernah digunakan. Bagian ini adalah daratan bagian dari delta, terdiri dari endapan sungai yang lebih mendominasi daripada endapan laut. Menyusun area rawa-rawa yang didominasi oleh bahan sedimen yang halus, seperti serpih organik dan batu bara.

Biasanya, Delta plain terdapat di saluran distribusi, menghadirkan beragam lingkungan mulai dari daratan hingga area berair payau, seperti rawa, paya, dataran pasang surut, dan teluk antar-distribusi.

Umumnya, kawasan Delta Plain dibagi lagi menjadi 2 bagian yaitu:

1. *Upper Delta Plain*, yaitu bagian delta yang berada di atas area yang terpengaruh oleh pasang surut serta gelombang laut yang signifikan (di kawasan ini, pengaruh laut sangat kecil).
2. *Lower Delta Plain*, yaitu bagian yang terletak di area interaksi antara sungai dan laut, yang membentang dari batas terendah muka air laut (LWS) hingga batas maksimal air laut saat pasang. Di sini, pengaruh laut jauh lebih besar.

2) Delta Front

Delta front merupakan wilayah di mana sedimen yang terbawa oleh sungai mengalir ke dalam cekungan dan berinteraksi dengan berbagai proses cekungan. Delta front merupakan komponen yang sangat dinamis dalam pengendapan di delta, terutama di area mulut sungai yang mendepositkan material berbutir kasar. Distributary mouth bar merupakan ciri kecil pada delta masa kini yang terhasil akibat daripada kesan proses-proses laut. Di kedalaman yang lebih besar, lapisan lempung akan mendominasi delta yang terbentuk seiring dengan pergerakan lambat air laut yang tenang serta aktivitas ombak yang minim. Hal ini menyebabkan lahirnya saluran distribusi yang akan terbentuk dan bertahan dalam waktu yang cukup lama.

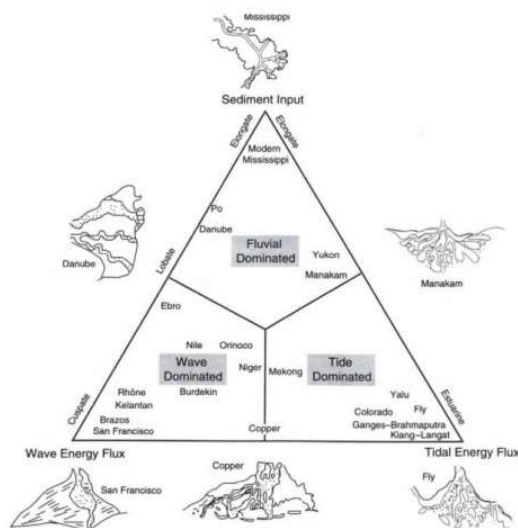
3) Prodelta

Prodelta merupakan bagian paling ujung dari delta yang menghadap ke laut, sering disebut sebagai lereng depan delta. Prodelta merupakan wilayah di mana partikel-partikel halus mengendap perlahan dari larutan. Di sini, aktivitas bioturbasi merambah ke lautan dengan sedimen halus yang menutupi dasar cekungan. Pengaruh delta biasanya terlihat dalam proses pengawetan laminasi lanau, yang memiliki perbedaan dengan dampak bioturbasi keseluruhan pada sedimen dasar cekungan. Sedimen bisa terlamina dengan rapi karena dipengaruhi oleh arus pasang.

1.2.3 Klasifikasi Delta

Galloway (1975) mengklasifikasikan delta berdasarkan penerapan energinya pada delta aluvial, yaitu:

1. Delta yang didominasi pasang-surut (tide-dominated delta)
2. Delta yang didominasi gelombang (wave-dominated delta)
3. Delta yang didominasi sungai (fluvial-dominated delta)



Gambar 1 Klasifikasi Delta Menurut Galloway (1975)

Delta Sungai Mississippi di Louisiana, Amerika Serikat memiliki ciri delta yang dikenal dengan sebutan delta elongate atau "birdfoot" yang didominasi oleh sungai. Delta ini memiliki tinggi gelombang rata-rata kurang dari setengah meter dan ketinggian rata-rata pasang-surut 0,43 meter (jenis mikrotidal). Debit air maksimum yang biasanya terjadi tiap bulannya berkisar antara 52. 000 hingga 55. 000 m³/s pada bulan Februari, April, dan Mei, namun puncak debit air minimum hanya mencapai 2. 900 m³/s pada bulan Oktober. Pengaruh positif manusia melalui pembangunan bendungan, kanal, dan tanggul telah berhasil mengurangi jumlah sedimen yang terbawa dari 400. 000. 000 ton setiap tahun menjadi 217. 000. 000 ton setiap tahun, menurut penelitian oleh Mikhailov dan Mikhailova pada tahun 2010.

Delta Sungai Mahakam di pesisir timur Kalimantan mengalami distribusi sedimen yang terpengaruh oleh pasang surut dan arus dari Selat Makassar. Perubahan air di daerah ini termasuk dalam kategori semidiurnal dengan rata-rata ketinggian 1,2 meter. Dampak gelombang terhadap delta sangat minim, saat angin berhembus pelan dan jarak tempuh gelombang singkat, sehingga mencapai ketinggian gelombang signifikan di bawah 0,6 meter (Karamma et al. , 2021). Aliran debit udara biasanya berkisar antara 1. 800 hingga 2. 800 meter kubik per detik.

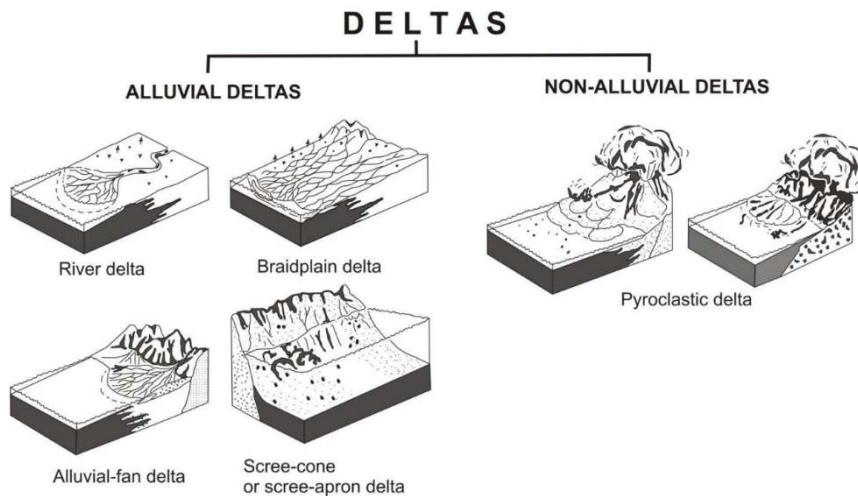
Peran penting dari arus pasang-surut terlihat dalam pengangkutan sedimen terendap dan bentuk lahan delta (Mandang dan Yanagi, 2008).

Delta Sungai Fly terdapat di Teluk Papua dan Selat Torres di barat Papua Nugini, merupakan sungai kedua terpanjang setelah Sungai Sepik di Papua Nugini. Perkiraan menunjukkan bahwa aktivitas penambangan di bagian hulu, baik di Ok Tedi sejak 1985 maupun di Strickland sejak 1991, telah meningkatkan aliran sedimen sebesar 40 persen. Sungai Fly terbagi menjadi tiga kanal yang mengalir ke arah utara, jauh ke utara, dan ke selatan. Kanal tersebut memiliki kedalaman antara 5 hingga 15 meter dan terdapat banyak pulau panjang yang berlumpur dan berpasir, dikelilingi oleh vegetasi mangrove. Cirikan pasang-surutnya yaitu semi-diolah, dengan fluktuasi pasang-surut di muara mencapai 4-5 meter pada pasang dan 1 meter ketika surut. Di Teluk Papua, energi gelombang puncak umumnya terjadi antara bulan Mei dan Oktober ketika angin muson bertiup. Meski begitu, ketinggian gelombang yang signifikan biasanya tidak melebihi 1,3 meter. Debit sedimen di delta Sungai Fly mencunai 85. 000 ton per tahun menurut penelitian oleh Canestrelli et al. , 2010.

Pengaruh energi campuran gelombang dan pasang surut terasa di Delta Sungai Copper di Teluk Alaska, walaupun pasang surut lebih mendominasi. Delta ini memiliki variasi pasang-surut sebesar 3-4 meter dan ketinggian gelombang rata-rata berkisar antara 1,2 – 1,4 meter (Davis, 1994). Debit air terendah Sungai Copper mencapai 40 m³/s pada musim dingin, namun meningkat menjadi 7. 000 m³/s ketika es mencair pada musim panas (Galloway, 1976).

Delta Sungai Danube di Rumania menampilkan air pasang-surut yang bergerak secara periodik dengan variasi ketinggian antara 0,07 hingga 0,012 meter, sementara angin di wilayah barat laut Laut Hitam bertiup dengan kecepatan sekitar 5 hingga 6,5 m/s. Ukuran butiran sedimen yang biasanya terdapat di delta Sungai Danube ialah pasir sedang dengan ukuran antara 0,1 mm dan 0,5 mm (D50). Debit air mencapai 85. 000 m³/s, disertai dengan debit sedimen sebesar 67 juta ton per tahun, di mana luas area delta mencapai 8,99 x 10⁵ km² (Giosan et al. , 1998).

Sungai Sao Francisco, sebagai sungai terpanjang kedua di Brasil, memiliki delta seluas 40. 000 km² dengan rata-rata mengalirkan 6 juta ton sedimen setiap tahun dan 28. 000 m³/s air. Kekuatan gelombang rata-ratanya mencapai 30,4 x 10⁷ ergs per detik, jauh melebihi delta Sungai Mississippi yang hanya sebesar 0,034 x 10⁷ ergs per detik. Artinya, jumlah energi gelombang yang tercipta dalam waktu 10 jam di pantai São Francisco lebih tinggi daripada jumlah energi gelombang di Mississippi dalam satu tahun. Perubahan air di delta Sao Francisco terjadi dua kali sehari dengan ketinggian mencapai 2,5 meter (Seybold, 2009).



Gambar 2 Klasifikasi Delta menurut Galloway (1975) Klasifikasi Delta Menurut Sumber Endapannya

1.2.4 Faktor Utama Pembentukan Delta

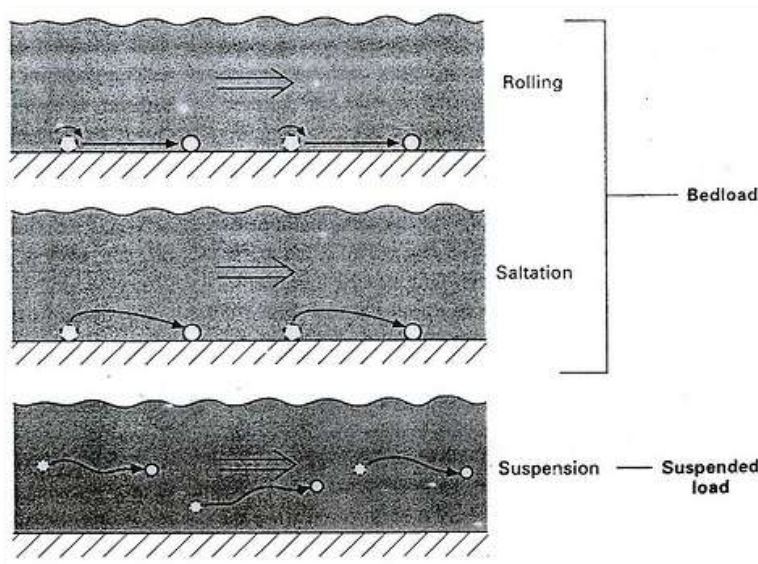
A. Sedimen dan Sungai

Salah satu hasil dari proses geomorfik di muara sungai adalah delta. Karena proses yang terjadi di wilayah pesisir, di mana muara sungai terletak, sangat dinamis, sehingga delta yang terbentuk terus berubah dan berkembang. Faktor utama dalam proses pembentukan delta ialah pasokan material dan aktivitas yang berlangsung di daerah endapan. Debit air dan material sedimen sungai sangat memengaruhi proses pembentukan delta. Keturunan air di sungai bervariasi tergantung pada jumlah air yang mengalir dan yang masuk ke dalamnya. Sumber utama air ialah dari hujan serta mata air. Pengaruh volume debit udara sangat ditentukan oleh jumlah hujan di daerah atas, jenis batuan yang dilalui, serta ukuran wilayah aliran sungai (DAS) (Karamma et al. , 2020).

Perbedaan dalam penyebaran sedimen di delta bisa dikenali melalui faktor-faktor seperti gelombang laut, arus sungai, dan pasang surut (Arafat dkk, 2016). Sifat-sifat ukuran partikel sedimen juga dapat memperlihatkan faktor-faktor utama yang berperan dalam proses pembentukan delta, sebagaimana disebutkan oleh Nichols (2009), bersandingan dengan faktor-faktor lainnya. Sebagai contoh, delta Sungai Mississippi di AS dikuasai oleh sungai dengan serbuk halus, sementara delta Sungai Rhone di Swiss dan Prancis dikuasai oleh gelombang dengan campuran pasir dan lumpur sebagai serbuknya. Selain itu, delta Skeidarasandur di Irlandia

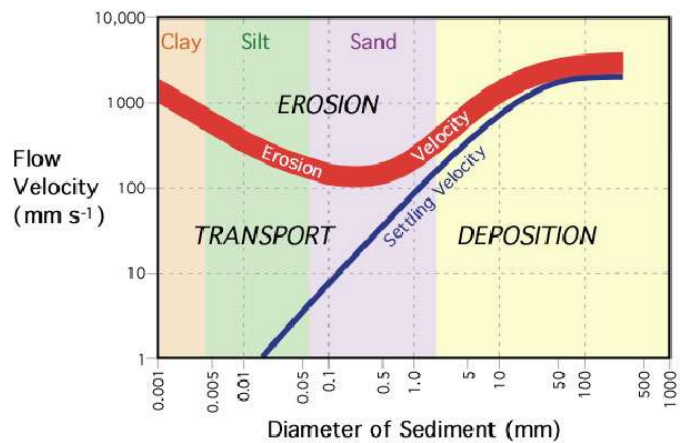
dipengaruhi baik oleh sungai maupun gelombang yang membawa serbuk berupa lempung. Di samping itu, pengangkutan dan penumpukan sedimen juga turut memengaruhi penampilan facies delta.

Mekanisme transportasi sedimen merupakan proses alami yang melibatkan berbagai teknik seperti menggelinding (rolling), melompat (saltasi), dan mengambang (suspensi). Butiran sedimen dapat dibawa oleh air melalui proses yang disebutkan itu. Transportasi sedimen oleh gaya rolling dan saltasi merupakan yang disebut sebagai sedimen dasar. Sementara itu, sedimen layang dihasilkan oleh proses suspensi. Transportasi sedimen, entah sedimen dasar atau sedimen di permukaan, tergantung pada ukuran partikel dan kecepatan aliran Sungai (Gambar 3).

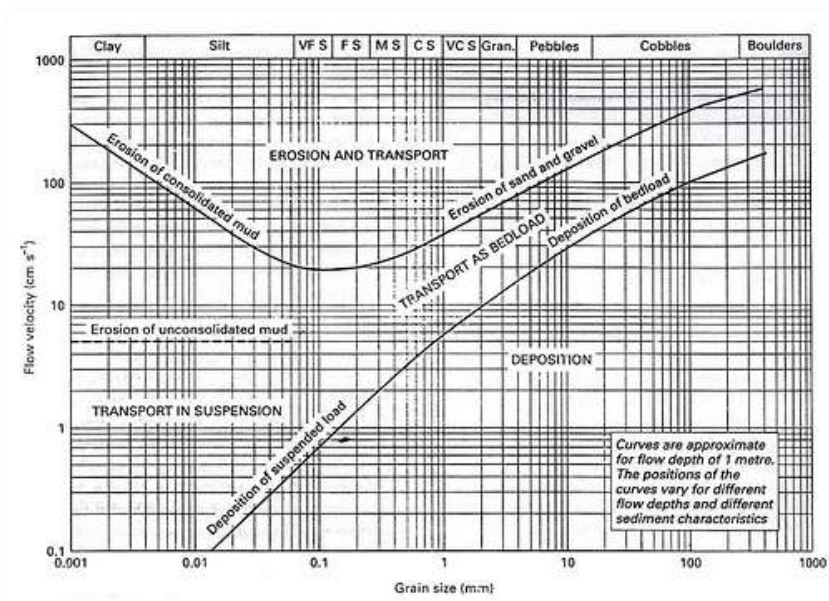


Gambar 3 Mekanisme Transportasi Partikel dalam Aliran

Sedimen halus berbutir akan terkumpul di lingkungan air yang sangat tenang, memerlukan energi lebih besar untuk berpindah daripada sedimen berbutir kasar. Sesudah berdiam diri dalam waktu yang cukup lama, partikel-partikel kecil di dalam sedimen jarang tergerus atau berpindah dengan mudah. Diagram Hjulström menampilkan hubungan antara ukuran butir sedimen dan kecepatan arus transportasi sedimen (Gambar 4).



Gambar 4 Diagram Hjulström menunjukkan hubungan antara ukuran butir dan kecepatan arus dalam transportasi sedimen

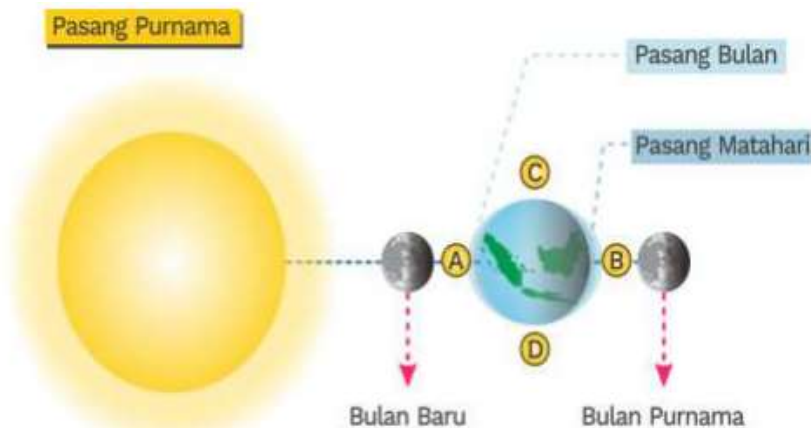


Gambar 5 Diagram Hjulström

Di kawasan pantai, sungai, dan mulut sungai, sedimentasi merupakan sesuatu yang tidak dapat dielakkan. Ini sering jadi persoalan yang signifikan, terutama bila ada kegiatan manusia di sekitarnya. Sedimentasi merupakan proses alami di mana sedimen terendapkan oleh air, angin, atau es, dan merupakan proses yang terus berubah (Putra Hatta, 2018). Jika terjadi peningkatan suplai sedimen di daerah pesisir, maka dapat mengakibatkan terjadinya pendangkalan di pantai (Holden, 2005).

1.2.5 Pasang Surut

Tiga ragam pasang surut dipunyai ing jagad iki: pasang surut atmosfer (atmospheric tide), pasang surut laut (oceanic tide), lan pasang surut bumi padat (tide of the solid earth) (Bambang, 1999). Daya tarik gravitasi memengaruhi pergerakan air laut menuju bulan dan matahari, menciptakan tonjolan pasang surut gravitasi di permukaan laut. Lintang pasang surut tonjolan ini ditentukan oleh deklinasi, yakni sudut antara sumbu rotasi bumi serta orbit bulan dan matahari (Bambang 1999). Kala bulan purnama menghampiri, gaya tarik gravitasi bulan menjadi yang paling kuat (Hatta, Thaha, dan Lakatua 2018). Gaya gravitasi bulan kali ini dua kali lipat lebih besar dibanding gaya gravitasi dari matahari karena bulan berada lebih dekat dengan bumi. Gaya gravitasi ini menarik air laut ke arah bulan dan matahari, yang menciptakan dua tonjolan air laut. Ada dua jenis pasang laut, yakni pasang purnama (spring tide) dan pasang perbani (neap tide). Ini adalah contoh dari fenomena pasang laut saat purnama (Gambar 6).



Gambar 6 Pasang Purnama

Gambar menunjukkan bahwa air laut naik dua kali dalam sebulan, saat bulan baru dan bulan purnama. Ini fenomena yang terjadi saat matahari, bumi, dan bulan berada dalam satu garis yang sejajar. Saat ini, di area yang mengalami purnama, permukaan air laut akan mencapai titik pasang tertinggi di titik A dan B, sedangkan di area yang tidak mengalami purnama, air laut akan merosot ke titik terendah di titik C dan D. Sebaliknya, pasang perbani (neap tide) berlaku apabila bumi, bulan, dan matahari berada dalam posisi yang membentuk sudut siku-siku di antara satu sama lain. Saat ini, air laut sedang mengalami pasang yang berada pada tingkat sedang di titik A dan B, serta surut yang tidak terlalu rendah di titik C dan D. Pemasangan perbani ini berlaku pada bulan kuartier pertama dan ketiga. Inilah gambaran mengenai fenomena pasang laut perbani (Gambar 7).



Gambar 7 Pasang Perbani

Tiga ragam gerakan arus pasang surut ialah gerakan rotasi, gerakan bolak-balik, dan tipe hidrolik. Di tengah laut, terdapat gerakan arus pasang surut yang berbentuk seperti elips. Arus ini berputar searah dengan arah jarum jam di belahan bumi utara dan berlawanan dengan arah jarum jam di belahan bumi selatan. Arus pasang surut terus bergerak dengan lancar, mengikuti arah yang berubah seiring waktu, entah searah jarum jam atau tidak, saat satu periode pasang surut berlangsung. Di lepas pantai, aliran pasang surut berputar dengan pola semidiurnal dan menyelesaikan satu putaran lengkap dalam waktu 12 jam 25 menit. Pengaruh deklinasi bulan menimbulkan variasi dalam tinggi rendahnya air laut dan arus setiap harinya. Apabila perbedaan ini mencukupi besar, vektor arus akan menunjukkan dua elips yang mempunyai saiz berbeza selama tempoh 24 jam 50 menit. Ketidaksamaan cuaca ini berlaku ketika bulan mencapai titik paling jauhnya dari ekuator (28 derajat) pada

pasang tropis. Di sisi lain, saat bulan berada persis di atas ekuator bumi, tidak terjadi variabilitas harian dalam arus di pasang ekuatorial.

1. Jenis-Jenis Pasang Surut

a. Pasang Surut Harian Tunggal (*Diurnal Tide*)

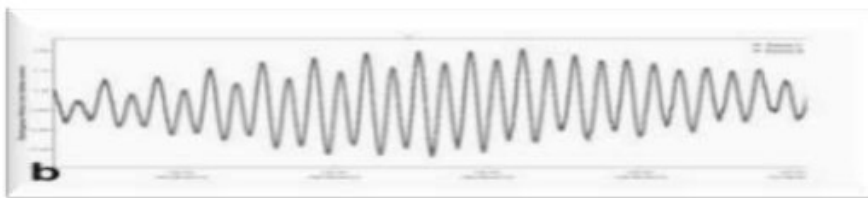
Terjadi satu kali pasang dan satu kali surut air dengan periode rata-rata 12 jam 24 menit.



Gambar 8 Pasang Surut harian Tunggal

b. Pasang Surut Harian Ganda (*Semi Diurnal Tide*)

Dalam satu hari, terjadi dua kali pasang dan dua kali surut dengan tinggi yang hampir sama secara teratur. Biasanya periode pasang surut berlangsung selama 24 jam 50 menit menurut penelitian oleh Puspita, Thaha, dan Hidayah pada tahun 2022.



Gambar 9 Pasang Surut Harian ganda

c. Pasang Surut Campuran Condong Harian Tunggal

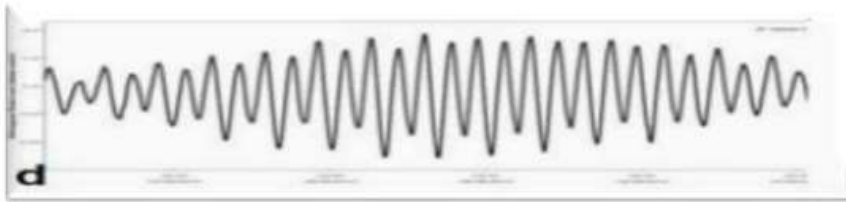
Biasanya, fenomena pasang surut terjadi sekali sehari, namun terkadang bisa terjadi dua kali pasang dan surut dalam waktu tertentu.



Gambar 10 Pasang Surut Condong ke harian Tunggal

d. Pasang Surut Campuran Condong Harian Ganda

Setiap harinya, terjadi dua kali pasang dan dua kali surut, dengan tinggi permukaan laut dan periode yang berbeda-beda. (Prima Tegar Anugrah, 2013).



Gambar 11 Pasang Surut Campuran Condong ke harian Ganda

2. Alat Pengukuran Pasang surut

Beberapa alat yang digunakan untuk mengukur pasang surut termasuk yang berikut ini:

a. Tide Staff

Alat ini berbentuk papan dengan skala dalam meter atau sentimeter, umumnya dipakai untuk mengukur pasang surut di lapangan. Tide Staff, atau yang dikenal sebagai papan Pasut, merupakan alat yang sangat sederhana untuk mengukur pasang surut. Biasanya digunakan untuk memantau ketinggian permukaan laut atau tinggi gelombang air laut. Biasanya, bahan yang digunakan terdiri dari kayu, aluminium, atau bahan lain yang dilapisi cat anti karat.

b. Tide Gauge

Perangkat ini dipakai untuk mengukur perubahan tinggi permukaan laut secara mekanis dan otomatis. Alat ini mempunyai sensor yang mampu mengukur ketinggian air laut serta menyimpan data ke dalam komputer.

c. Satelit

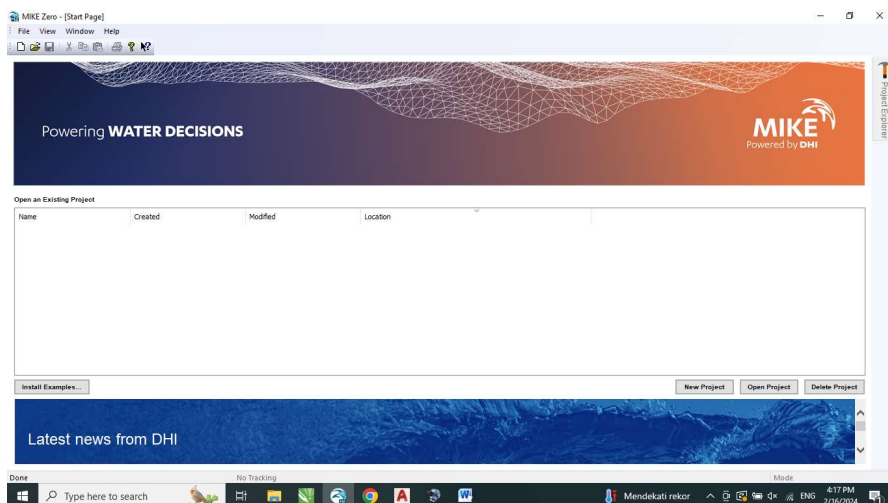
Sejak tahun 1975, sistem satelit altimetri telah berkembang seiring dengan diluncurkannya satelit Geos-3. Saben kasempatan, sistem iki duwe tiga tujuan ilmiah sing dawa saklawase: nglacak sirkulasi samudra global, nggoleki volume lempengan es ing kutub, lan nglacak perubahan muka samudra global. Prinsip dasar dari satelit altimetri ialah satelit ini memiliki pemancar radar yang mengirimkan pulsa, penerima pulsa radar yang sensitif, serta jam yang sangat akurat. Dalam sistem ini, satelit dilengkapi dengan altimeter radar yang mengirimkan pulsa gelombang elektromagnetik ke permukaan laut. Prinsip utama dalam menentukan perubahan posisi permukaan laut melalui teknik altimetri adalah dengan menggunakan satelit altimetri yang mengukur jarak vertikal dari satelit ke permukaan laut. Karena kita memiliki informasi tentang ketinggian satelit di atas permukaan ellipsoid referensi, kita dapat mengidentifikasi tinggi muka laut (Sea Surface Height atau SSH) pada saat pengukuran dengan menghitung perbedaan antara ketinggian satelit dan jarak

vertikal tersebut. Perubahan topografi laut yang terjadi secara cepat harus dihilangkan agar pengamatan kenaikan permukaan laut dapat dilakukan melalui analisis data secara berurutan. Analisis deret waktu dilakukan untuk mengidentifikasi perbedaan durasi yang bervariasi serta tren jangka panjangnya.

1. Macam-Macam Elevasi Air Laut

- Muka air tinggi rerata (*mean high water level*, MHWL) adalah rata-rata dari muka air tinggi yang dicapai selama periode 19 tahun.
- Muka air rendah rerata (*mean low water level*, MLWL) adalah rata-rata dari muka air rendah yang dicapai selama periode 19 tahun.
- Higher high water level* adalah titik tertinggi dari dua puncak pasang dalam satu hari, seperti yang terjadi pada tipe pasang surut campuran.
- Muka air rendah (*low water level*) adalah kedudukan terendah yang dicapai air saat surut dalam satu siklus pasang surut.
- Muka air laut rerata (*mean sea level*, MSL) adalah rata-rata antara muka air tinggi rerata dan muka air rendah rerata. Elevasi ini digunakan sebagai referensi untuk elevasi di daratan.
- Muka air tinggi tertinggi (*highest high water level*, HHWL) adalah ketinggian air tertinggi yang dicapai saat pasang surut purnama atau bulan mati.
- Muka air rendah terendah (*lowest low water level*, LLWL) adalah ketinggian air terendah yang dicapai saat pasang surut purnama atau bulan mati.
- Lower low water level adalah titik terendah dari dua puncak surut dalam satu hari.
- Muka air tinggi (*high water level*) adalah titik tertinggi yang dicapai air saat pasang dalam satu siklus pasang surut.

1.2.6 Software Mike Zero



Gambar 12 Program Mike Zero

DHI Mike merupakan perangkat lunak pemodelan hidrodinamika yang sangat stabil dan lengkap yang dikembangkan oleh DHI (Danish Hydrodynamic Institute). Salah satu modul canggih yang disertakan dalam paket DHI Mike ialah Spectral Wave (SW), dimaksudkan untuk mengeksplorasi pemodelan pengaruh angin pada gelombang laut (wind-wave) (DHI 2013). MIKE 21 HD adalah sistem model numerik yang sering dipakai untuk mensimulasikan muka air dan aliran di estuari, teluk, dan pantai. DHI Mike merupakan perangkat lunak pemodelan hidrodinamika yang sangat stabil dan lengkap yang dikembangkan oleh DHI (Danish Hydrodynamic Institute). Salah satu modul canggih yang disertakan dalam paket DHI Mike ialah Spectral Wave (SW), dimaksudkan untuk mengeksplorasi pemodelan pengaruh angin pada gelombang laut (wind-wave) (DHI 2013). MIKE 21 HD adalah sistem model numerik yang sering dipakai untuk mensimulasikan muka air dan aliran di estuari, teluk, dan pantai :

Persamaan Kontinuitas:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

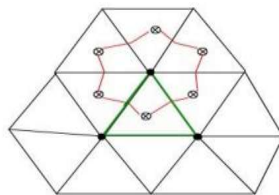
Persamaan Momentum arah x:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = f_h v - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\tau_{fx}}{\rho_0} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} + \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y} \quad (2)$$

Persamaan Momentum arah y:

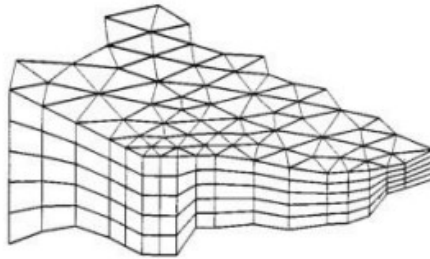
$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hvu}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = -f_h u - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\tau_{fy}}{\rho_0} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y} \quad (3)$$

Penyelesaian dilakukan dengan menggunakan sistem koordinat kartesian dan sigma dalam menyelesaikan masalah 2D/3D. Diskritisasi persamaan dasar diterapkan dengan metode volume hingga yang fokus pada sel-sel pusat (Gambar 13).



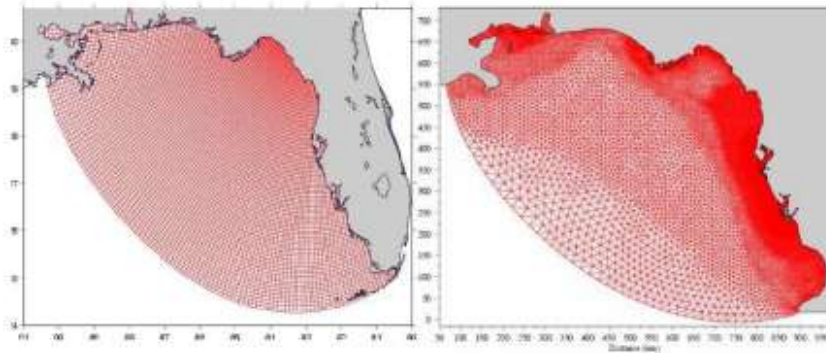
Gambar 13 Ilustrasi unstructured triangular mesh dengan cell-centered Node • : H, z, w,D; Centroid × : u, v

Pada penyelesaian kasus 2D, elemen yang digunakan berbentuk segitiga tidak teratur. Pada penyelesaian kasus 3D, untuk penyelesaian horizontal digunakan grid segitiga tidak berstruktur, sementara untuk penyelesaian vertikal, mesh dibentuk dengan sistem koordinat sigma atau kombinasi antara koordinat sigma dan koordinat $-z$.

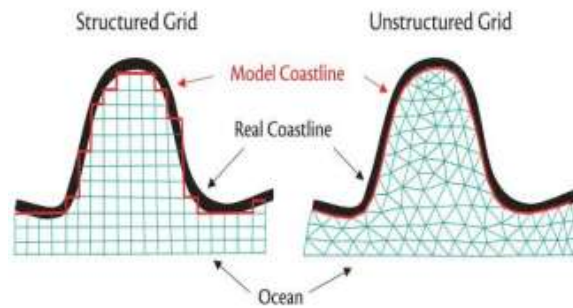


Gambar 14 Prinsip Bentuk *Mesh* pada Kasus 2D/3D

Pemodelan 3D dengan konfigurasi koordinat sigma memiliki keunggulan dalam menggambarkan keadaan bawah laut dengan detail dan ketepatan yang tinggi, tapi masih dapat terpengaruh oleh gangguan aliran yang tidak realistis. Di sisi lain, pada koordinat $-z$, kekurangannya adalah dalam keakuratan representasi batimetri, tetapi lebih mudah dalam menghitung perubahan tekanan horizontal.



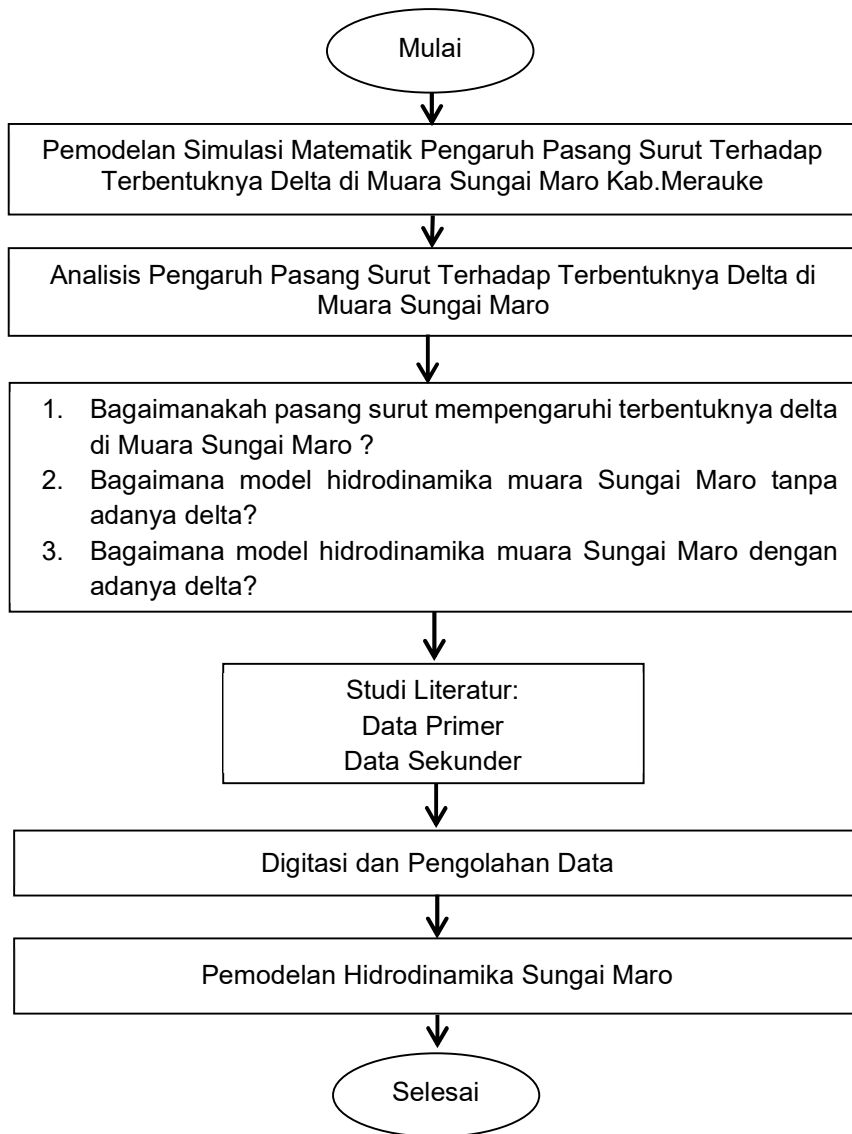
Gambar 15 Mengatur desain pesisir pada sistem grid teratur (POM) dan sistem grid segi tiga tidak teratur (FVCOM)



Gambar 16 Pada penyelesaian numerik 2D, perbedaan bentuk mesh dapat diilustrasikan melalui penggunaan konfigurasi mesh segitiga yang tidak beraturan untuk memvisualisasikan garis pantai

Mesh 2D punya aspek positif yang unik tiap jenisnya. Pemanfaatan mesh segitiga tanpa struktur memberikan gambaran garis pantai yang lebih tepat, walaupun terkadang terdapat kesalahan akibat adanya bias aliran yang tidak terlihat secara jelas. Pendapat ini bisa berdampak pada penerapan batas yang ketat dan permasalahan terkait cairan di sepanjang pantai. Dengan menyelesaikan masalah mesh, kita dapat mengatasi masalah ini. (Marshall, 1998). Daerah spasial telah dibagi menjadi beberapa bagian yang berkesinambungan dan tidak saling bertindihan dari setiap elemennya. Bidang jala tidak terstruktur segitiga dalam integrasi skema eksplisit waktu (DHI Water and Environment, 2012). Penggunaan grid teratur tidak mampu dengan persis mencitrakan garis pantai, tetapi justru mendukung kemudahan dalam perhitungan.

1.2.7 Kerangka Pemikiran

**Gambar 17** Kerangka Pemikiran

1.2.8 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu berfungsi sebagai upaya untuk memperoleh bahan perbandingan dan referensi yang dapat memperkaya materi penulisan, sehingga penulis dapat lebih fokus pada penyelesaian masalah yang dikembangkan.

Penelitian terdahulu dapat memberikan referensi berupa kajian simulasi matematik, alternatif perhitungan, dan kesamaan kondisi atau karakter lokasi, sehingga bisa lebih dikembangkan pada objek penelitian yang dipilih penulis. Namun, meskipun ada penelitian terdahulu dengan judul atau tujuan yang serupa, kondisi objek penelitian, metode perhitungan, ataupun skenario penanganan masalah dapat berbeda karena perbedaan karakteristik lokasi yang signifikan. Oleh karena itu, kolaborasi dari berbagai referensi diharapkan dapat memberikan pandangan yang lebih komprehensif. Beberapa penelitian terdahulu yang telah mengeksplorasi model matematik pengaruh pasang surut di daerah muara sungai antara lain:

Tabel 1 Penelitian Terdahulu

No.	Judul	Penulis, Tahun	Tujuan	Metode	Hasil	GAP Analisis
1	Preliminary modeling of characteristics of current and batimetry in the condluence of Mahakam River and Karang Mumus river	Mur, Mukhsan Putra Hatta, Muh. Arsyad Thaha, D. A. Suriamihardja. (2019).	Membandingkan kontur sungai diukur dengan peta batimetri dari Dishidros TNI AL dan arus, pola aliran vertikal dan horizontal.	Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dan dilakukan pada tanggal 21-22 Januari 2019 saat pasang purnama (spring tide). Data yang digunakan meliputi kecepatan arus, arah arus, kedalaman, dan peta batimetri dari Hishidros TNI AL. Distribusi arus vertikal dan horizontal dianalisis menggunakan software Surfer 11.	Pergerakan arus di pertemuan Sungai Mahakam dan Sungai Karang Mumus sangat dipengaruhi oleh pasang surut dan debit fluvial, yang dapat menyebabkan pergerakan massa air.	Metode simulasi komputasi pola arus menggunakan perangkat lunak yang memperhitungkan perbedaan serta karakteristik geografisnya.
2	Hydrodynamic analysis at the confluence of the Mahakam River and the Karang Mumus tributary	Nur, D. A. Suriamihardja, M. A. Thaha, and M. P. Hatta (2021)	Memodelkan pola sebaran massa air dengan mempertimbangkan bagian hulu debit dan elevasi pasang surut di hilir.	Penelitian ini dilakukan di lapangan untuk mengamati data yang diperlukan dalam melakukan simulasi numerik. Pengukuran pasang surut dilaksanakan	Intrusi salinitas diamati di pertemuan Sungai Mahakam dan anak Sungai Karang Mumus, yang berada sekitar 60 km dari garis pantai. Nilai minimum salinitas berkisar antara 0,065 hingga 0,240 PSU.	Metode simulasi komputasi pola arus menggunakan perangkat lunak yang mempertimbangkan perbedaan, tujuan, serta karakteristik geografisnya.

				selama 15 hari, dimulai dari tanggal 14 hingga 28 Juli 2018.		
3	A 2D numerical model of salinity distribution pattern on the estuary of Jeneberang River	Riswal Karamma, Muhammad Saleh Pallu, Muh. Arsyad Thaha, Mukhsan Putra Hatta. (2020)	Menganalisis pola distribusi salinitas di muara Sungai Jeneberang dengan pemodelan numerik 2D.	Penelitian ini menggunakan model numerik untuk memahami dinamika dan karakteristik perairan Sungai Jeneberang selama musim kemarau. Pengukuran pasang surut, kecepatan aliran, suhu, dan salinitas dilakukan sebelum pemodelan numerik untuk menggambarkan sirkulasi aliran pasang surut.	Hasil pemodelan menunjukkan adanya penurunan salinitas di hilir muara Sungai Jeneberang. Tingkat salinitas di bagian hilir berkisar antara 34,5 PSU hingga 35 PSU, menunjukkan pola salinitas yang cukup dinamis.	Metode simulasi komputasi digunakan untuk memahami dinamika dan karakteristik perairan muara serta kondisi geografisnya.
4	Spatial mapping of water mass structure in the estuary of Jeneberang River	R Karamma, Muhammad Saleh Pallu, Muh. Arsyad Thaha, Mukhsan Putra Hatta, and Muhammad Ihsan (2021).	Melihat pengaruh pasang surut terhadap stratifikasi dan distribusi struktur massa air, serta area pencampuran yang terjadi di Muara Sungai Jeneberang.	Metode simulasi komputasi digunakan untuk mempelajari dinamika dan karakteristik perairan muara serta kondisi geografisnya.	Terdapat hubungan antara densitas dan suhu terhadap kecepatan, dengan kecenderungan meningkatnya kedalaman lapisan tercampur akibat kecepatan yang besar. Salinitas adalah parameter yang sangat berpengaruh terhadap densitas pada saat <i>neap tide</i> dan <i>spring tide</i> .	Terdapat perbedaan tujuan, penggunaan instrument penelitian serta geografisnya.

5	2D modeling of current patterns and sediment patterns on Pasir Beach, Kebumen	AID Puspita, Muh. Arsyad Thaha, B Hidayah (2022)	Menentukan pola arus dan pola sedimentasi di pantai Pasir khususnya di Kawasan Pelabuhan pendaratan ikan dengan pemodelan 2D.	Pemodelan 2 dimensi menggunakan software RMA2 dan SED2D. Mensimulasikan sebaran konsentrasi sedimen selama 10 hari di lokasi Pelabuhan pendaratan ikan.	Fluktuasi kecepatan arus tidak signifikan karena kecepatannya kecil. Peningkatan kecepatan arus lebih dominan disebabkan oleh lebar sempit dari mulut Pelabuhan, yang menyebabkan badan air menyebar sehingga kecepatan arus juga menyebar.	Terdapat perbedaan antara metode simulasi komputasi pola arus yang menggunakan perangkat lunak, geografis dan penelitian ini menentukan pola sedimentasi yang terjadi.
6	Study of the characteristics of the sea water zone of the estuary zone on the coast of Makassar	Mukhsan Putra Hatta (2018)	Menggambarkan sebaran suhu, salinitas, ruang klorofil-a dan kekeruhan	Penelitian menggunakan alat CTD. Pengamatan dilakukan pada tanggal 7 dan 8 Agustus 2016. Di 50 titik di sekitar pantai Makassar.	1. Salinitas rendah hanya terjadi di dekat mulut sungai. 2. Klorofil-a di perairan bagian utara tinggi. Tingkat kekeruhan tertinggi terjadi pada dasar laut dekat muara sungai.	Perbedaan tujuan, penggunaan instrument penelitian serta geografisnya.
7	Pemodelan pola arus di Kawasan pesisir Pantai Kawal Kabupaten Bintan	Iqbal Faiz Sarmada, Yales Veva Jaya, Risandi Dwirama Putra, Mario Putra Suhana. (2018)	Meneliti pola arus yang timbul akibat pasang surut dan angin serta menganalisis fenomena arus di sekitar wilayah pesisir pantai Kawal.	Pemodelan arus berlangsung selama 5 hari menggunakan perangkat lunak Mike 21 dengan memasukkan parameter angin dan pasang surut sebagai pembangkit gaya dalam pemodelan arus.	Arus di kawasan tepi Pantai Kawal adalah arus pasang surut. Kala pasang, arus melaju ke selatan-barat daya, sementara pada waktu surut, arus beralih ke arah utara. Kecepatan arus mencapai puncaknya saat pasang berkisar antara 0,6 hingga 1,80 m/s, yang hampir sebanding	Perbedaan ada pada jenis alat yang dipakai dalam penelitian, cara penelitian dilakukan, dan di mana tempat penelitian berlangsung.

					dengan kecepatan arus terendah selama surut, yakni di antara 0,4 hingga 1,80 m/s.	
8	Model 2D coherens angin terhadap pola arus permukaan dan distribusi salinitas di muara sungai Palu	I U Meidji, Y Mudin, H Jayadi, M U Botjing (2020)	Menganalisis pengaruh angin dalam mempengaruhi pola arus di permukaan serta distribusi salinitas di sekitar muara Sungai Palu.	Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data primer dan sekunder. Data primer meliputi data topografi, salinitas, temperature, dan kecepatan aliran sungai. Data sekunder meliputi data batimetri, pasang surut serta data angin.	Angin mempengaruhi pola arus permukaan dan distribusi salinitas di daerah muara Sungai Palu, dengan arah aliran dari timur laut ke barat yang kemudian berbelok ke arah selatan dekat mulut muara Sungai Palu, menyebabkan penurunan nilai salinitas di mulut muara tersebut.	Metode simulasi komputasi pola arus menggunakan perangkat lunak yang terdapat perbedaan serta data yang digunakan dalam penelitian.
9	Hubungan antara debit dan besaran angkutan sedimen pada Sungai Palu	Andi Rusdin, Asnah Abu, Petra Kalawawo (2014)	Memahami kaitan antara jumlah air yang mengalir dengan transportasi partikel sedimen di dasar sungai dan perubahan tinggi dasar sungai akibat pergerakan sedimen.	Menggunakan data geometrik panjang Sungai tersebut adalah 6726. 71 m. Manggonake tiga kondisi debit, saben kali, normal, lan paling minimale saka data pengukuran. Sama transportasi sedimen digunakake kanggo persamaan Meyer Petter Muller.	Simulasi menunjukkan bahwa debit aliran meningkat seiring dengan jumlah angkutan sedimen. Di masa air sedikit mengalir, debit air adalah $9,19 \text{ m}^3/\text{det}$ dan besar angkutan sedimen adalah $0,00779 \text{ kg}/\text{det}/\text{m}$. Saat kondisi normal, debit air mencapai $83,659 \text{ m}^3/\text{det}$ dengan besar angkutan sedimen $0,07267 \text{ kg}/\text{det}/\text{m}$. Pada saat air melimpah, debit air mencapai puncaknya	Ada perbedaan dalam metode, perangkat lunak yang dipakai, penggunaan instrumen penelitian, serta durasi penelitian.

					hingga 423,110 m^3/det dan besar angkutan sedimen adalah 0,42244 kg/det/m. Tingkatan dasar mengalami variasi antara -4,680 cm hingga +2,931 cm.	
10	Pola pergerakan aliran di muara sungai musi dengan program Mike 21 flow model	Achmad Syarifudin, Eka Puji Agustini. (2015)	Menganalisis pola pergerakan aliran di muara Sungai Musi	Penelitian dilaksanakan dengan menggunakan pendekatan model perangkat lunak Mike 21 Flow Model	Gerakan aliran air melibatkan arah, kecepatan, dan model hidrodinamika kedalaman sungai dari ambang sungai Musi hingga daerah yang terkena pengaruh oleh pasang surut.	Perbedaan metode penelitian, penggunaan instrument penelitian serta letak geografis dimana dilakukan penelitian.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Waktu

2.1.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan di Sungai Maro, Kabupaten Merauke, Provinsi Papua Selatan, Indonesia.



Gambar 18 Lokasi Penelitian

2.1.2. Waktu Penelitian

Waktu pelaksanaan penelitian ini ialah berlangsung mulai bulan September sampai November.

2.2 Jenis dan Sumber Penelitian

Penelitian ini melaksanakan beberapa pengujian di lapangan, yang terdiri dari pengambilan data lapangan dan model matematik. Untuk memperoleh data, digunakan dua metode pengumpulan data, yaitu:

- a. Studi Pustaka, yang bertujuan untuk mendapatkan data sekunder melalui pembacaan berbagai buku, jurnal, dan artikel ilmiah sebagai landasan teori dalam penelitian ini.
- b. Survei pelaksanaan penelitian dan pemodelan matematik, yang bertujuan untuk memperoleh data yang akan digunakan dalam menganalisis hasil penelitian ini.

2.3 Alat dan Bahan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Alat tulis
2. Current meter
3. Laptop lengkap dengan Software pendukung
4. Meteran ukur
5. Waterpass
6. GPS Handheld Garmin
7. Speed boat
8. Kamera digital

2.3.1 Data Lainnya

1. Data primer berupa debit sungai, pasang surut air laut dan arus sungai
2. Data sekunder berupa data angin, data garis pantai, dan data batimetri

2.4 Teknik Pengumpulan Data

Untuk mendapatkan data yang akurat, teknik pengumpulan data dilakukan dengan metode sebagai berikut:

2.4.1 Pengamatan Tinggi Muka Air

1. Pengamatan muka air telah dilakukan selama 2 minggu guna mendapatkan parameter pasang surut dan debit aliran. Data ini mencakup pasang purnama (Spring Tide) dan pasang perbani (Neap Tide), yang menjadi masukan penting dalam model matematik. Dari data yang dianalisis, akan dihasilkan prediksi pasang surut, tingkat pasang rata-rata, tingkat air laut maksimum saat air pasang besar, dan tingkat air laut minimum saat air pasang kecil. Pengukuran ini dilakukan dengan menggunakan AWLR, di mana elevasi dasar AWLR diposisikan pada datum referensi.
2. Pengamatan muka air dilakukan secara bersamaan di daerah muara dan hulu sungai (lokasi pengukuran). Pengamatan pasang surut secara simultan selama periode pengukuran pasut, bertujuan untuk mengetahui kecepatan rambatan pasang surut.

2.4.2 Pengukuran Kecepatan Aliran

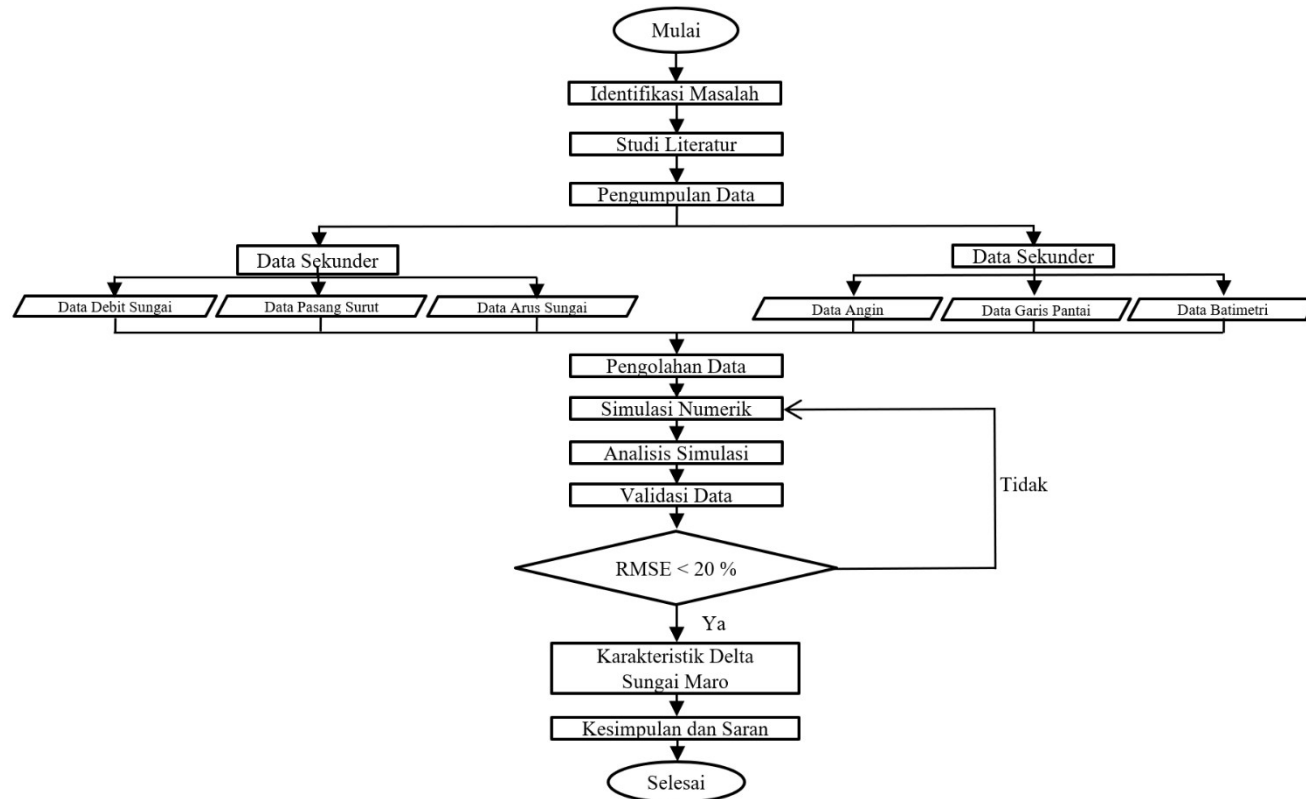
Pengukuran kecepatan aliran dilakukan dengan menggunakan current meter. Ada tiga jenis pengukuran kecepatan aliran, yaitu:

1. Pengukuran kecepatan aliran sesaat dilakukan pada satu penampang lintang di setiap lokasi. Tujuannya adalah memperoleh titik representatif untuk pengukuran kecepatan aliran. Titik representatif ini akan digunakan untuk mendapatkan kecepatan aliran selama pengukuran simultan. Pengukuran kecepatan dilakukan secara vertikal. Selain itu, untuk sungai yang lebar, pengukuran kecepatan distribusi lateral juga akan dilakukan. Jumlah titik pengamatan distribusi lateral tergantung pada lebar sungai, dengan minimal tiga

titik pengukuran

2. Pengamatan laju aliran air atas beberapa titik utama dilakukan secara bersamaan selama 26 jam. Maksudnya adalah untuk mendapatkan data agar dapat mengetahui seberapa cepat pasang surut bergerak. Pengukuran kecepatan arus diamati selama 26 jam dengan interval satu jam pada saat pasang purnama (spring tide) dan pasang perbani (neap tide) secara bersamaan
3. Pengukuran arus dilakukan menggunakan current meter stasioner.

2.5 Bagan Alir Penelitian



Gambar 19 Bagan Alir Penelitian