

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan, yaitu suatu negara yang mempunyai luas wilayah laut dibandingkan dengan luas daratnya antara 1 : 1 hingga 9 : 1. Indonesia memiliki sedikitnya 13.466 pulau dengan total luas wilayah 5.810.053 km² dengan panjang garis pantai hampir mendekati 100.000 km. Dengan berlimpahnya potensi yang ada di lautan Indonesia, maka merupakan peluang besar untuk menjadikan Indonesia sebagai Negara Maritim. (Djunarsjah et al., 2018).

Makassar New Port (MNP) merupakan salah satu pelabuhan utama di Indonesia yang memiliki peranan penting dalam kegiatan perdagangan dan transportasi laut. Aktivitas pelabuhan yang padat dapat mempengaruhi kondisi lingkungan perairan di sekitarnya, khususnya dalam hal sebaran padatan tersuspensi (*suspended sediment*) (Dijkstra et al., 2025). Padatan tersuspensi adalah partikel-partikel halus yang terdispersi dalam air dan dapat berasal dari berbagai sumber, termasuk limbah pelabuhan dan erosi tanah (Zulkarnain & Junaidi, 2020).

Sebaran padatan tersuspensi di perairan pelabuhan sangat dipengaruhi oleh fenomena pasang surut (*tide*), yang dapat mengubah arus dan dinamika aliran air (Prasetyo & Dewi, 2021). Kondisi pasang surut yang berbeda akan mempengaruhi distribusi dan konsentrasi padatan tersuspensi, sehingga penting untuk memodelkan hubungan ini. Model digunakan dalam penelitian ini karena sebaran padatan tersuspensi (TSS) dipengaruhi oleh dinamika pasang surut yang kompleks dan berubah terhadap waktu, sehingga diperlukan pendekatan numerik untuk merepresentasikan proses fisik tersebut secara akurat. Pemodelan memungkinkan analisis simultan antara arus, pasang surut, dan *transport* sedimen yang sulit diperoleh hanya melalui pengamatan lapangan. Selain itu, berbagai studi seperti (Prasetyo & Dewi, 2021) dan (Kurniawan et al., 2018) telah menunjukkan bahwa model hidrodinamika dan *transport* sedimen mampu memprediksi distribusi TSS secara spasial dan temporal, sehingga penggunaannya penting untuk memahami dinamika sedimen di wilayah pesisir maupun pelabuhan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa saat pasang, aliran air dapat membawa lebih banyak partikel dari daratan ke laut, sedangkan saat surut, partikel tersebut bisa terendapkan kembali (Kurniawan et al., 2018).

Total Suspended Solid (TSS) atau jumlah padatan tersuspensi merupakan salah satu indikator utama dalam penilaian mutu air. TSS terdiri dari partikel-partikel padat seperti tanah, lumpur, bahan organik dan berbagai material lain yang melayang di dalam air. Kadar TSS yang tinggi dapat berdampak negatif pada organisme akuatik dengan mengurangi penetrasi cahaya ke dalam air, sehingga menghambat proses fotosintesis yang dilakukan oleh fitoplankton maupun tumbuhan air lainnya. Hal ini dapat menurunkan kadar oksigen terlarut serta meningkatkan suhu air. Peningkatan TSS di sungai umumnya berasal dari aktivitas manusia seperti industri, pertambangan, pertanian, serta limbah rumah tangga yang dibuang ke sungai (Purba et al., 2018). Partikel tersuspensi ini juga menjadi tempat terjadinya reaksi kimia yang berperan dalam pembentukan endapan awal, sehingga turut mempengaruhi kualitas air. Jika konsentrasi TSS terlalu tinggi, proses fotosintesis dan regenerasi oksigen dalam perairan akan terganggu (Kurniawan et al., 2018).

Analisa TSS sebagai metode untuk mengetahui jumlah dan sebaran material tersuspensi pada daerah perairan. Kisaran TSS dapat menunjukkan kondisi sedimen pada suatu perairan (Siswanto, 2009). Perairan yang mempunyai konsentrasi TSS tinggi cenderung mengalami sedimentasi yang tinggi. (Siswanto, 2004) menyebutkan bahwa konsentrasi TSS yang tinggi ditemukan pada daerah muara sungai dan sepanjang pantai yang mengalami sedimentasi yang tinggi. Pola arus pada perairan pantai dan muara berpengaruh terhadap pola sedimentasi yang terjadi (Solikhin, 2004). Kisaran pasang surut memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap sebaran TSS (Sulistiyorini., 2004). Dengan mengetahui sebaran TSS, maka tingkat sedimentasi pada suatu daerah dapat diperkirakan sehingga dapat diminimalkan dampak pendangkalan yang terjadi.

Pasang surut merupakan proses naik turunnya permukaan air laut secara periodik yang disebabkan karena gravitasional antara matahari, bulan, dan bumi (Saputra., 2018). Berdasarkan teori keseimbangan, faktor yang mempengaruhi terjadinya pasang surut adalah rotasi bumi pada sumbunya, revolusi bulan terhadap matahari, dan revolusi bumi terhadap matahari. Sedangkan berdasarkan teori dinamis, pasang surut dipengaruhi oleh kedalaman dan luas perairan, pengaruh rotasi bumi (gaya coriolis), dan gesekan dasar. Terdapat pula beberapa faktor yang mempengaruhi pasang surut pada suatu perairan, yaitu topografi dasar laut, lebar selat, bentuk teluk, dan sebagainya. Hal ini menyebabkan pada suatu daerah memiliki tipe pasang surut yang berbeda (Diposaptono. 2007).

Pentingnya pemahaman tentang sebaran padatan tersuspensi menjadi semakin relevan mengingat dampaknya terhadap kualitas air dan ekosistem perairan, serta terhadap kesehatan manusia (Astuti et al., 2023). Oleh karena itu, pengembangan model sebaran padatan tersuspensi yang mempertimbangkan faktor-faktor lingkungan, termasuk pasang surut, menjadi suatu kebutuhan (Mardiyanto & Hadi, 2020).

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh gambaran 2D yang lebih jelas tentang bagaimana pasang surut memengaruhi sebaran padatan tersuspensi di sekitar Makassar New Port, serta implikasinya terhadap pengelolaan lingkungan perairan di daerah tersebut.

1.2 Tujuan dan Kegunaan

Bagian ini disusun untuk menjelaskan secara jelas arah penelitian yang dilakukan serta manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian. Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui model pola sebaran padatan tersuspensi pada kondisi *spring tide* dan *neap tide* di sekitar perairan Makassar New Port.
2. Mengetahui konsentrasi padatan tersuspensi pada kondisi *spring tide* dan *neap tide* di sekitar perairan Makassar New Port.

Kegunaan dari penelitian ini yaitu untuk memberikan ilustrasi mengenai model sebaran padatan tersuspensi di Makassar New Port dalam format dua dimensi (2D).

1.3 Landasan Teori

1.3.1 Sedimen tersuspensi

Sedimen tersuspensi yang menyebar di perairan laut berasal dari berbagai sumber, seperti sungai, erosi pantai, dan aktivitas manusia. Muara sungai menjadi tempat pertemuan sedimen tersuspensi yang berasal dari darat yang terbawa oleh arus

sungai menuju muara hingga ke laut melalui sistem angkutan dari arus sungai dengan arus laut (Ikhwan et al., 2015).

Total Suspended Solid (TSS) adalah bahan-bahan tersuspensi (diameter lebih dari $1\mu\text{m}$) terdiri dari lumpur dan pasir halus serta jasad-jasad renik yang tertahan pada saringan milipore dengan diameter pori $0.45\mu\text{m}$. Penyebab TSS yang utama merupakan erosi tanah yang terbawa ke badan air. Secara umum masukan (*load*) sedimen dibagi menjadi dua komponen, yaitu masukan sedimen dasar (*bed load*) dan sedimen tersuspensi (*suspended load*). Pembagian tersebut berdasarkan ukuran partikel sedimen, partikel lebih besar dari $150\mu\text{m}$ (pasir) masuk kategori sedimen dasar, sedimen tersuspensi lebih kecil dari $63\mu\text{m}$ ($0,063\text{ mm}$; 11 *silt* dan *clay*; Tabel 1) (Ji et al., 2008). TSS masuk kedalam kategori sedimen melayang sedimen tersuspensi.

Tabel 1. Tipe dan ukuran partikel sedimen

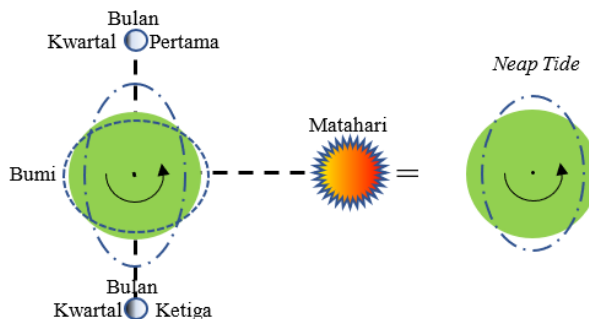
Tipe	Kisaran ukuran (mm)
Gravel	2,0 – 20,0
Sand	0,063 – 2,0
Silt	0,0039 – 0,063
Clay	<0,0039

Perairan jernih memiliki kisaran nilai TSS berada dibawah 10 mg/L dan untuk perairan keruh nilainya diatas 100 mg/L . Proses dinamika TSS sangat dipengaruhi oleh kedalaman perairan dan komposisinya. Pada umumnya sedimen yang berada di daerah pantai (perairan pantai, muara sungai atau estuari, teluk) adalah sedimen kohesif. Sedimen kohesif adalah partikel yang sangat halus dan sifat sedimen lebih tergantung pada gaya-gaya permukaan daripada gaya berat (Ji et al., 2008).

1.3.2 Pasang surut

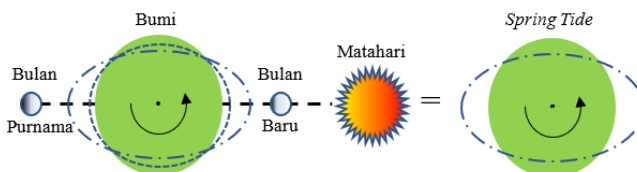
Pasang surut merupakan proses naik turunnya permukaan air laut secara periodik yang disebabkan karena gravitasional antara matahari, bulan, dan bumi (Saputra, 2018). Berdasarkan teori keseimbangan, faktor yang mempengaruhi terjadinya pasang surut adalah rotasi bumi pada sumbunya, revolusi bulan terhadap matahari, dan revolusi bumi terhadap matahari. Sedangkan berdasarkan teori dinamis, pasang surut dipengaruhi oleh kedalaman dan luas perairan, pengaruh rotasi bumi (gaya coriolis), dan gesekan dasar. Terdapat pula beberapa faktor yang mempengaruhi pasang surut pada suatu perairan, yaitu topografi dasar laut, lebar selat, bentuk teluk, dan sebagainya. Hal ini menyebabkan pada suatu daerah memiliki tipe pasang surut yang berbeda (Diposaptono, 2007).

Umumnya pasang-surut terbagi menjadi dua yaitu pasang surut purnama (*spring tide*) dan pasang-surut perbani (*neep tide*). Pasang surut air laut di permukaan bumi dengan kedudukan tertinggi terjadi pada saat titik pusat bumi, bulan dan matahari berada dalam satu garis lurus dan saling memperkuatnya pengaruh dari masing-masing gaya penggerak pasut (bulan dan matahari), pasang ini biasa disebut dengan pasang purnama (*spring tide*). Sedangkan pasang surut laut dengan tunggang minimum terjadi pada keadaan di mana garis hubung titik-titik pusat bumi dan matahari tegak lurus dengan garis hubung titik-titik pusat bumi dengan bulan yang dinamakan pasang perbani (*neap tide*) (Yona et al., 2017).



Gambar 1. Kedudukan bumi, bulan dan matahari saat *neap tide* (Sumber: Yusuf, 2018).

Neap tide atau pasang mati, terjadi ketika posisi Matahari membentuk sudut tegak lurus dengan garis yang menghubungkan Bumi dan Bulan. Pada saat ini, ketinggian pasang surut mencapai minimum pada titik-titik di permukaan Bumi yang juga berada pada sudut tegak lurus terhadap sumbu Bumi-Bulan diilustrasikan pada **Gambar 1**. Kondisi astronomis ini bertepatan dengan fase perempat awal dan perempat akhir Bulan. Perbedaan ketinggian air antara pasang tertinggi dan terendah (tunggang pasut) jauh lebih kecil selama *neap tide* dibandingkan dengan saat terjadi *spring tide* (Yusuf, 2018).



Gambar 2. Kedudukan bumi, bulan dan matahari saat *spring tide* (Sumber: Yusuf, 2018).

Pasang maksimum (*spring tide*) terjadi ketika Matahari, Bumi, dan Bulan berada dalam satu garis lurus, menyebabkan efek gravitasi yang saling memperkuat pada titik-titik tertentu di permukaan Bumi yang searah dengan sumbu relatif ketiganya, seperti yang digambarkan pada **Gambar 2**. Kondisi ini bertepatan dengan fase bulan baru dan bulan purnama (Yusuf, 2018).

Tipe pasang surut juga dapat ditentukan secara kuantitatif dengan menggunakan bilangan *Formzahl*, yakni bilangan yang dihitung dari nilai perbandingan antara amplitudo (tinggi gelombang) komponen harmonik pasang surut tunggal utama dan amplitudo komponen harmonik pasang surut ganda utama (Anindra & Wulansari, 2024). secara matematis formula tersebut ditulis sebagai berikut:

$$F = \frac{O_1 + K_1}{M^2 + S_2}$$

Dimana :

- F = bilangan *formzahl*
- O_1 = amplitudo komponen pasang surut tunggal utama yang disebabkan oleh gaya tarik bulan
- K_1 = amplitudo komponen pasang surut tunggal yang disebabkan oleh gaya tarik bulan dan matahari
- M_2 = amplitudo komponen pasang surut ganda utama yang disebabkan oleh gaya tarik bulan
- S_2 = amplitudo komponen pasang surut ganda utama yang disebabkan oleh gaya tarik matahari.

Berdasarkan nilai F, tipe pasang surut dapat di kelompokkan sebagai berikut :

- $F < 0.25$: pasang surut tipe ganda
- $0.26 < F < 1.5$: pasang surut campuran condong bertipe ganda
- $1.5 < F < 3$: pasang surut campuran condong bertipe tunggal
- $F > 3$: pasang surut tunggal

Akibat adanya fenomena pasang surut tersebut, maka elevasi muka air laut selalu berubah secara periodik. Maka dari itu diperlukan suatu elevasi yang dapat dijadikan sebagai pedoman dalam kegiatan yang dilakukan di pesisir. Beberapa elevasi tersebut adalah permukaan air tertinggi *High Water Springs* (HWS), elevasi muka air rata-rata *Mean Sea Level* (MSL), elevasi muka air terendah *Low Water Springs* (LWS). Mengingat elevasi muka air laut selalu berubah setiap saat, maka diperlukan suatu elevasi yang ditetapkan berdasarkan data pasang surut. Apabila suatu perairan memiliki tipe pasang surut semidiurnal, maka untuk menentukan tunggang air, tinggi dan 14 rendahnya pasang surut ditentukan dengan rumus-rumus (Ongkosongo & Suyarso, 1989) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} HHWL &= LLWL + 2(AK_1 + AO_1 + AS_2 + AM_2) \\ LLWL &= MSL - AK_1 - AO_1 - AS_2 - AM_2 \\ MSL &= S_0 \\ MHWL &= S_0 + (AM_2 + AK_1 + AO_1) \\ MLWL &= S_0 - (AM_2 + AK_1 + AO_1) \end{aligned}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} HHWL &= \text{Tinggi air tertinggi (High Highest Water Level)} \\ LLWL &= \text{Tinggi air terendah (Low Lowest Water Level)} \\ MSL &= \text{Rata-rata tinggi muka air laut (Mean Sea Level)} \\ MHWL &= \text{Rata-rata muka air tinggi (Mean High Water Level)} \\ MLWL &= \text{Rata-rata muka air terendah (Mean Low Water Level)} \end{aligned}$$

1.3.3 Model hidrodinamika

Pemodelan adalah deskripsi yang berupa objek dan seringkali merupakan

penyederhanaan atau idealisasi. Pesatnya perkembangan teknologi komputer telah memudahkan komunitas pemodelan numerik untuk membuat simulasi model numerik. Dengan model hidrodinamika, pengguna dapat memperoleh gambaran tentang pola aliran pada suatu bidang dua dimensi atau ruang/volume tiga dimensi. Simulasi model ini juga membantu untuk memahami pergerakan arus dalam arah tertentu, meskipun data pengukuran hanya tersedia di satu titik atau lebih (Suharyo & Adrianto, 2018).

Mike Zero adalah *software* yang digunakan untuk sistem pemodelan kelautan numerik. Dalam *software* Mike Zero terdapat banyak modul yang dapat digunakan untuk membuat model arus, gelombang, sedimentasi baik di lautan, area pantai serta area lain sesuai kebutuhan pembuatan model. Menurut pengaturan model, desain model, dalam hal ini permukaan model, data input yang digunakan dan keberadaan data validasi memiliki pengaruh besar pada stabilitas dan akurasi model yang dibuat, sehingga semakin realistis. Selama proses pemodelan arus, MIKE 21 adalah alat utama, mulai dari pengumpulan data garis pantai dan kedalaman, hingga pembuatan model arus dan pola arus (Bricheno et al., 2014).

Hidrodinamika mempelajari pergerakan air dan gaya-gaya yang bekerja pada air tersebut. Model hidrodinamika dapat menyediakan informasi tentang transpor sedimen termasuk kecepatan air, pola percampuran, dan dispersi (Ji et al., 2008). Dalam mempelajari hidrodinamika dinyatakan dalam persamaan-persamaan. Persamaan hidrodinamika dalam pemodelan dua dimensi, yaitu persamaan kontinuitas dan kekekalan momentum dengan berbagai asumsi untuk penyederhanaan (Wati, 2020).

Dinamika pasang surut dan arus pasang surut dapat dipelajari dari persamaan hidrodinamika 2 dimensi (2D) atau 3 dimensi (3D). Persamaan hidrodinamika 2D yang dirata-ratakan terhadap kedalaman tanpa memperhatikan gaya pembangkit pasang surut yang langsung (Kasim, 2020), dirumuskan sebagai berikut:

Persamaan gerak :

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - f\bar{v} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{mx}}{\rho(h + \zeta)}$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - f\bar{u} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_{sn} - \tau_{mn}}{\rho(h + \zeta)}$$

Dimana :

- u, v = komponen vektor kecepatan pada sumbu x dan y (m/s)
- g = gravitasi (m/s²)
- ρ = densitas air (kg/m³)
- ζ = elevasi permukaan air laut dari *Mean Sea Level*
- f = gaya luar yang bekerja pada fluida
- ∂ = gradien fluida
- h = kedalaman air (m)
- τ_{sx}, τ_{sn} = gaya viskositas geser (*shear stress*) yang bekerja tegak lurus terhadap arah fluida
- τ_{mx}, τ_{mn} = gaya viskositas tekanan (*pressure stress*), yang bekerja sejajar

dengan arah aliran fluida.

Dengan ketentuan :

$$\bar{u} = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} u dz$$

$$\bar{v} = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} v dz$$

Karena elevasi muka air jauh lebih kecil daripada kedalaman air (h) maka ζ diabaikan terhadap h.

$$\zeta \ll h \rightarrow (h + \zeta) \approx h$$

Persamaan hidrodinamika 2D yang dirata-ratakan terhadap kedalaman dan dilinierkan dinyatakan oleh :

Persamaan gerak :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - f \bar{v} &= g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{K \bar{u}}{h} \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} - f \bar{u} &= g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{K \bar{v}}{h} \end{aligned}$$

Modul Hydrodynamic (HD) dalam MIKE21 adalah sebuah model matematik yang dirancang untuk mensimulasikan perilaku hidrodinamika air akibat berbagai gaya, seperti kondisi angin tertentu dan batasan muka air yang ditetapkan pada model terbuka. Modul HD ini mampu mensimulasikan variasi muka air dan pola arus di danau, estuari, dan wilayah pantai. Model ini merepresentasikan aliran dua dimensi yang tidak stasioner dalam fluida satu lapisan yang homogen secara vertikal (Yusuf, 2018). MIKE21 HD *Flow Model* (FM) merupakan sistem pemodelan yang menggunakan pendekatan mesh fleksibel dan dikembangkan untuk aplikasi di oseanografi, rekayasa pantai, dan lingkungan muara sungai (DHI, 2017).

Pemodelan menggunakan modul MIKE21 Hidrodinamika (HD) FM didasarkan pada model matematik numerik, di mana persamaan fundamentalnya adalah persamaan kekekalan massa dan momentum. Persamaan-persamaan ini diintegrasikan secara vertikal untuk mereduksi dimensi dari tiga menjadi dua. Model ini mensimulasikan aliran yang tidak stabil (*unsteady*) dalam fluida satu lapisan yang homogen secara vertikal, yang telah terintegrasi dalam menu MIKE21. Persamaan berikut merepresentasikan kekekalan massa dan momentum, menggambarkan aliran, serta perbedaan muka air (DHI, 2017).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial d}{\partial t} \\ \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{d} \right) + gd \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{m^2 \cdot d^2} - \frac{1}{pw} \left[\frac{\partial}{\partial x} (d\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (d\tau_{xy}) \right] - \Omega q - fVV_x + \frac{d}{pw} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) &= 0 \\ \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pd}{d} \right) + gd \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 - q^2}}{m^2 \cdot dh^2} - \frac{1}{pw} \left[\frac{\partial}{\partial y} (d\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (d\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fVV_y + \frac{d}{pw} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) &= 0 \end{aligned}$$

Dimana :

$h(x,y,z)$	= kedalaman air ($n-d,m$)
$d(x,y,z)$	= kedalaman air dalam berbagai waktu (m)
$\zeta(x,y,z)$	= elevasi muka air laut (m)
$p,q(x,y,t)$	= <i>flux density</i> dalam arah x dan y ($m^3/s/m$) = (u_h,v_h) (u,v) = <i>depth averaged velocities</i> dalam arah x dan y
$M(xy)$	= <i>Manning number</i> ($m^{1/3}/s$)
g	= kecepatan gravitasi bumi ($9,81/m/s^2$)
$V, V_x, V_y(x,y,t)$	= kecepatan angin dalam arah x dan y (m/s)
$\Omega(x,y)$	= Coriolis parameter (s^{-1})
$p_a(x,y,t)$	= tekanan atmosfer ($kg/m/s^2$)
p_w	= berat jenis air (kg/m^3)
$\tau_{xx}\tau_{yy}\tau_{xy}$	= komponen effective shear stress

Modul Mud Transport (MT) adalah aplikasi pemodelan yang khusus digunakan untuk mensimulasikan pergerakan sedimen kohesif. MIKE 21 *Flow Model FM*, yang merupakan sistem pemodelan dengan pendekatan mesh fleksibel, menjadi dasar pengembangan modul ini untuk aplikasi di oseanografi, rekayasa pantai, dan lingkungan muara sungai. *Mud Transport Module* menghitung hasil pergerakan material kohesif berdasarkan kondisi aliran yang disimulasikan oleh modul hidrodinamik serta kondisi gelombang yang diperoleh dari perhitungan gelombang (*modul spectral wave*) (Yusuf, 2018). Formula yang digunakan dalam modul ini mengintegrasikan pengaruh arus dan gelombang terhadap pergerakan sedimen (DHI, 2017) :

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{z(1+a-e^z)}{e^z(z-1)+1} \frac{1}{U_0} \frac{dU_0}{dt} + \frac{30K}{k} \frac{\sqrt{K^2 U_0^2 + z^2 U_{f0}^2 + 2KzU_{f0}U_0 \cos\gamma}}{e^z(z-1)+1}$$

Dimana :

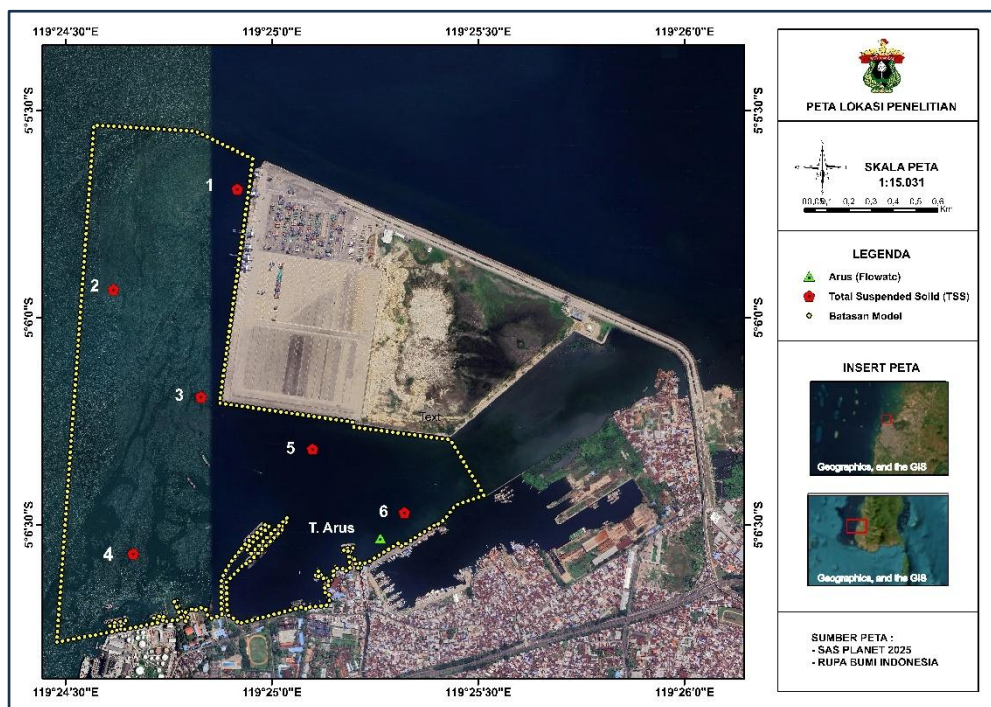
K	= Konstanta Von Karman
t	= Waktu (s)
z	= Parameter tebal boundary layer (m)
U_0	= Kecepatan orbit dasar gelombang terdekat (m/s)
U_{f0}	= Kecepatan geser arus dalam lapisan batas gelombang (m/s)
γ	= Sudut antara arus dan gelombang (rad)
k_R	= <i>Ripple</i> yang berkaitan dengan kekasaran (m)

BAB II METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei 2025 yang meliputi pengumpulan data melalui *study* literatur, survei awal, penentuan lokasi dan metode penelitian, pengambilan data lapangan yang dilakukan pada kondisi *spring tide* dan *neap tide*. Pelabuhan Makassar New Port (MNP) berlokasi di bagian barat pesisir Kota Makassar, Sulawesi Selatan. Secara geografis, pelabuhan ini berada di sisi timur Selat Makassar dan termasuk dalam jaringan pelabuhan penting di wilayah timur Indonesia. Lokasinya cukup strategis karena berada di jalur pelayaran utama yang menghubungkan bagian barat dan timur Indonesia.

Pengambilan sampel akan dilakukan pada enam titik yang dimana enam titik ini mewakili lokasi Makassar New Port. Analisis sampel akan dilakukan di Laboratorium Oseanografi Kimia, Laboratorium Oseanografi Fisika, dan Geomorfologi Pesisir, Departemen Ilmu Kelautan, Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan, Universitas Hasanuddin.



Gambar 3. Peta penelitian

2.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan di lapangan disajikan dalam **Tabel 2**, sedangkan untuk analisis di laboratorium disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 2. Alat dan bahan yang digunakan di lapangan.

No	Alat dan Bahan	Kegunaan
1	Perahu	Sebagai alat transportasi untuk mengambil data
2	<i>Flowatch</i>	Untuk mengukur arah dan kecepatan arus
3	<i>GPS Map Sounder 585 Plus</i> Garmin	Untuk mengukur batimetri
4	Tiang skala	Untuk mengukur pasang surut air laut
5	Botol	Untuk menyimpan air sampel
6	Kamera <i>Handphone</i>	Untuk mengambil dokumentasi kegiatan
7	<i>Kammerer Water Sampler</i>	Untuk mengambil sampel air
8	<i>Cool box</i>	Untuk menyimpan botol sampel
9	Alat tulis	Untuk mencatat data lapangan yang terukur
10	<i>Avenza maps</i>	Untuk menentukan titik kordinat pada lokasi penelitian
11	Air Laut	Objek yang akan di analisis
12	Tissue	Untuk membersihkan alat yang telah digunakan
13	Label	Penanda sampel

Tabel 3. Alat dan bahan yang digunakan di Laboratorium

No	Alat dan Bahan	Kegunaan
1	<i>Software MIKE 21 (Student Licenses)</i>	Software pemodelan hidrodinamika dan Mud transport
2	MS Excel	Software pengolahan data
3	Timbangan Analitik	Untuk menimbang berat sampel sedimen
4	Oven	Untuk pengeringan sampel sedimen
5	Tissue	Untuk membersihkan alat yang telah digunakan
6	Label	Penanda sampel
7	Alat Tulis	Untuk mencatat data yang terukur
8	<i>Filter Funnel (Corong kaca)</i>	Untuk menyaring sampel air

Lanjutan Tabel 3.

No	Alat dan Bahan	Kegunaan
9	Pompa Vakum	Sebagai alat bantu dalam penyaringan sampel air
10	Kamera <i>Handphone</i>	Untuk mengambil dokumentasi kegiatan
11	Kertas Saring Whatman 0, 45 μ m GF/C	Penyaring sampel air

2.3 Prosedur Penelitian

2.3.1 Tahapan persiapan

Tahap persiapan dalam penelitian ini meliputi studi literatur, yang dilakukan untuk mempelajari dan penguatan kerangka teoritis, perumusan masalah, serta penyusunan metodologi. Selanjutnya dilakukan tahap observasi awal untuk mengetahui kondisi lapangan serta membuat perencanaan penelitian yang sesuai dengan objek penelitian serta mempersiapkan alat-alat dan bahan yang digunakan selama penelitian di lapangan.

2.3.2 Tahapan penentuan stasiun

Penentuan lokasi stasiun penelitian dilakukan dengan menggunakan *purposive sampling methode* dengan pertimbangan 6 titik yang berjarak 750 meter. Pengambilan sampel dilakukan pada 6 titik yang disusun mengikuti pola zig-zag mulai dari titik 1 di dekat dermaga dan selanjutnya berpindah menuju laut lepas pada titik 2, kembali mendekati dermaga pada titik 3, dan seterusnya hingga titik 6. Pola zig-zag ini dipilih untuk menangkap gradien spasial dan arah dominan keluarnya sumber TSS antara area dekat dermaga dan area laut lepas, serta untuk meminimalkan bias akibat fitur lokal (misalnya bayangan dermaga, muara kecil, atau struktur bawah air). Penempatan bergantian antara dekat dermaga dan ke arah laut lepas memungkinkan identifikasi apakah sumber TSS lebih dominan berasal dari aktivitas pelabuhan (*near-field*) atau masuk dari laut (*far-field*) pada berbagai kondisi pasang-sur. Metode ini adalah teknik pengambilan sampel yang dilakukan berdasarkan pertimbangan tertentu, sehingga dapat mewakili kondisi lokasi penelitian dengan tepat.

2.3.3 Pengambilan data

Pasang Surut. Data pasang surut diperoleh dari prediksi pasang surut *online* yang disediakan oleh Sistem Referensi Geospasial Indonesia (SRGI), yang dapat diakses melalui situs web [Sistem Referensi Geospasial Indonesia](#). Data yang digunakan berasal dari stasiun Makassar-Sulsel selama periode 30 hari, dengan rata-rata pengukuran setiap satu jam. Pengambilan data pasang surut lapangan dilakukan selama 39 jam dengan interval waktu satu jam sebagai validasi terhadap data sekunder yang telah diakses. Pengambilan data pasang surut diambil menggunakan bak ukur yang telah terpasang pada kolom perairan dengan membaca

tinggi muka air laut pada rambu bak ukur saat pengamatan berlangsung.

Angin. Data angin diperoleh dari sumber *online* yang disediakan oleh Copernicus Data Space Ecosystem, yang dapat diakses melalui situs web [Copernicus Data Space Ecosystem | Europe's eyes on Earth](#) Data yang diambil mencakup periode 30 hari dengan rata-rata per jam, yang mencakup informasi mengenai kecepatan dan arah angin yang dijadikan sebagai salah satu faktor input pada *MIKE 21*.

Sedimen Tersuspensi. Sampel air diperoleh dengan *kemmerer water sampler* dengan kriteria pengambilan sampel pada saat kondisi menuju pasang dan menuju surut. Prosedur pengambilan sampel dengan mempersiapkan penutup otomatis *kemmerer water sampler* lalu dimasukkan pada kolom perairan, lalu lepaskan *messenger* yang akan menutup botol sampler, lalu diangkat dan sampel air dimasukkan pada botol sampel dan dimasukkan ke *coolbox*. Sampel air selanjutnya digunakan untuk mengetahui konsentrasi TSS.

Data konsentrasi TSS diperoleh dengan menganalisa sampel air dilaboratorium dengan metode *gravimetry* (APHA, 2005), dilakukan di Laboratorium Oseanografi Kimia, Departemen Ilmu Kelautan Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan Universitas Hasanuddin.

Batimetri. Kedalaman atau batimetri diukur menggunakan *Echosounder*. Pengukuran ini dilakukan dengan alat yang terdiri dari *transducer* dan antena yang dipasang di perahu. *Transducer* dipasang pada balok penyangga di lambung kapal agar tetap tegak dan tidak terpengaruh oleh arus dan gelombang. Selanjutnya, pengukuran dilakukan dengan metode *bar-check* untuk memastikan bahwa data kedalaman yang terekam secara digital sesuai dengan tampilan *echogram*. Jalur perum yang digunakan adalah jalur tegak lurus pantai dengan pola *zigzag*, dilengkapi dengan lintasan *cross line check*. Alat ini mampu menyimpan data kedalaman, koordinat lokasi, dan waktu pengukuran. Data tersebut kemudian diunggah ke komputer menggunakan perangkat lunak, lalu difilter untuk menampilkan data yang relevan dan mengoreksi data yang terdistorsi (*noise*). Selain itu, hasil pengukuran juga dikoreksi dengan data pasang surut, sehingga kedalaman sebenarnya dapat diketahui dengan menggunakan acuan MSL (*Mean Sea Level*) (Darmiati, 2013).

Arah dan Kecepatan Arus. Pengukuran arus dilakukan menggunakan pendekatan *Eulerian*. Pendekatan tersebut dilakukan dengan cara pengamatan arus pada suatu posisi tertentu di suatu kolom air, sehingga data yang didapatkan merupakan data arus dalam suatu titik tertentu dan dalam fungsi waktu tertentu. Pengambilan data arus dilakukan menggunakan alat *current meter flowatch*. Pengukuran arus dilakukan selama delapan jam dengan interval satu jam dengan cara memasukan *propeller* pada kolom perairan, hasil pengukuran akan ditampilkan pada *display* alat. Hasil pengukuran arus dimasukan sebagai data validasi model yang akan di buat pada modul hidrodinamika *MIKE21*.

2.3.4 Pengolahan data

Pasang Surut. Proses pengolahan data pasang surut dilakukan menggunakan

Microsoft Excel dengan metode Admiralty dengan 8 skema dan 11 tahap analisis, menggunakan metode ini bertujuan untuk mendapatkan konstanta harmonik pasang surutnya (S0, K1, S2, M2, O1, N2, M4, dan MS4) dan nilai formzhal untuk mengetahui karakteristik pasang surut di perairan tersebut. Persamaan yang digunakan yaitu:

$$F = \frac{A_{o1} + A_{K1}}{A_{M2} + A_{S2}}$$

Keterangan :

AO1 dan AK1 = Amplitudo komponen pasang surut harian utama

AM2 dan AS1 = Amplitudo komponen pasang surut ganda utama

Batimetri. Pengukuran draft *transducer* (kedalaman terkoreksi) perlu mempertimbangkan koreksi tinggi muka air saat dilakukan pemeruman, koreksi draft *transducer* dan koreksi *bar-check* dengan menggunakan persamaan:

$$d_t = d_s + h_t$$

Keterangan:

dt = Kedalaman suatu titik pada dasar laut pada pukul t yang telah dikoreksi dengan kedalaman transducer (m)

ds = Kedalaman hasil pemeruman (m)

ht = Kedalaman transducer (m)

Perhitungan nilai kedalaman sebenarnya dapat dilakukan dengan rumus di bawah ini:

$$d_{MSL} = d_t - (h_t - MSL)$$

Keterangan:

dMSL = Kedalaman terhadap MSL

MSL = Muka air rata-rata (m)

dt = Kedalaman pada waktu t terkoreksi transducer

ht = Ketinggian permukaan air pasang surut pada waktu pemeruman

Sedimen Tersuspensi. Metode pengukuran yang digunakan untuk menganalisis zat padatan tersuspensi yaitu: Pertama, menimbang berat awal kertas saring whatman berukuran 0,45µm menggunakan timbangan analitik. Kemudian, 500 mL sampel air dikocok dan dituangkan ke dalam gelas ukur lalu dipindahkan ke erlenmeyer yang terhubung dengan selang dari pompa vakum. Kertas saring diletakkan pada corong Buchner, dan sampel air dimasukkan perlahan hingga seluruhnya tersaring dan partikelnya ditampung menggunakan kertas saring whatman ukuran 0,45µm. Setelah itu, kertas saring dikeringkan ke dalam oven selama 2 jam dengan suhu ±105°C. Terakhir, kertas saring ditimbang kembali agar diperoleh berat akhir. Proses penimbangan dilakukan berulang kali

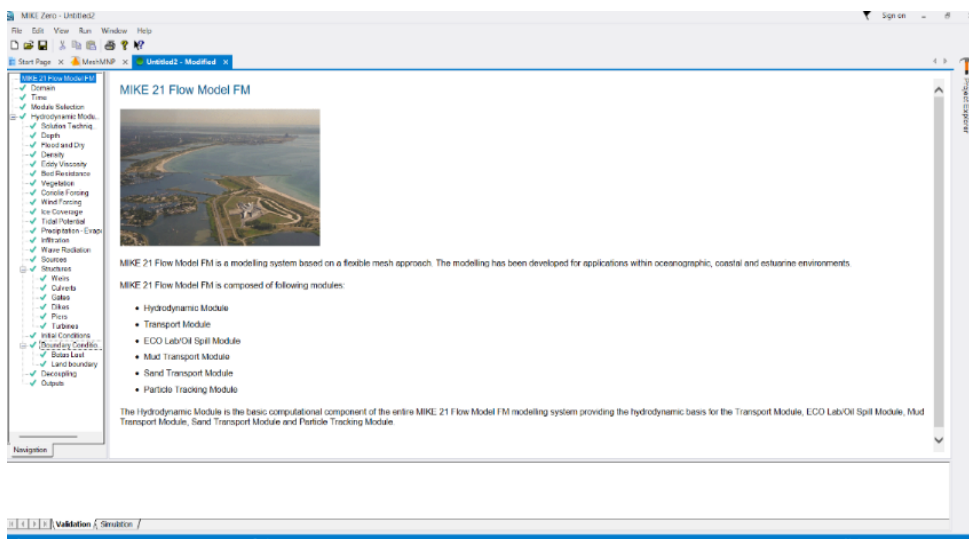
untuk mendapatkan berat konstan. Hasil perhitungan TSS digunakan persamaan:

$$TSS = \frac{(A - B)}{V} \times 1000$$

Keterangan :

- TSS = Jumlah Padatan Tersuspensi (mg/L)
 A = Berat kertas saring dan berat TSS yang berada di kertas saring (mg)
 B = Berat kertas saring (mg)
 C = Volume sampel air (L)

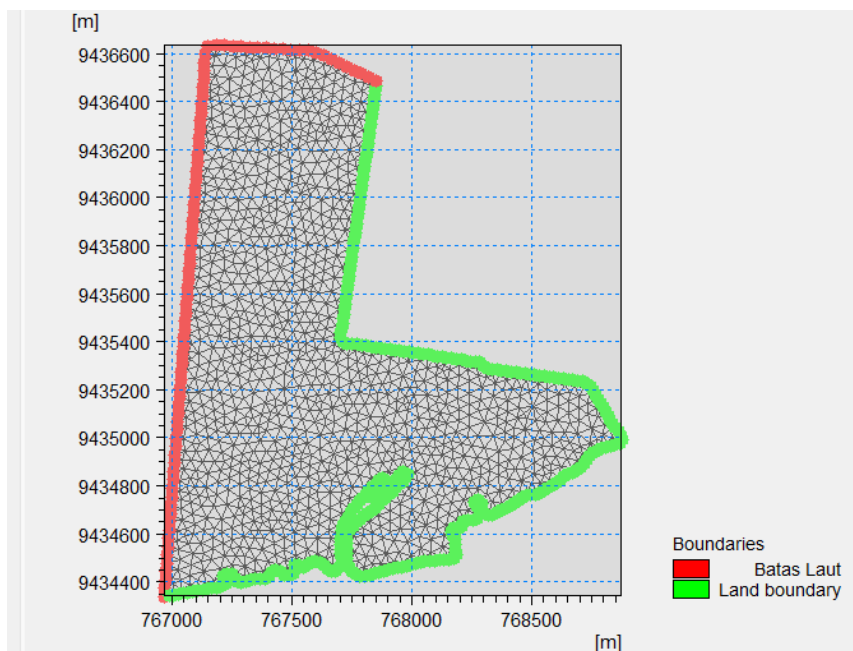
Model. Penelitian ini akan menerapkan pendekatan hidrodinamika numerik 2D menggunakan *software* MIKE Zero untuk memprediksi pola arus dan distribusi sedimen di area studi. Model akan menyelesaikan persamaan air dangkal dengan mempertimbangkan berbagai gaya yang bekerja pada massa air. Modul Transport Sedimen akan digunakan untuk menghitung perpindahan material sedimen non-koheif berdasarkan kondisi aliran yang dihasilkan oleh model hidrodinamika. Hasil simulasi akan divisualisasikan dalam bentuk 2D.



Gambar 4. Tampilan MIKE21 Flow Model FM pada MIKE Zero 2024

Langkah-langkah yang dilakukan dalam melakukan simulasi Hidrodinamika yaitu *Pembuatan Grid dan Mesh*. Pembuatan model dimulai dengan membangun *grid* atau peta digital dari wilayah penelitian menggunakan *MIKE Zero Toolbox*. *Grid* terdiri dari *node-node* yang terhubung, membentuk jaringan yang membatasi area model berdasarkan garis pantai dan wilayah studi. Jaringan ini kemudian disempurnakan menjadi *mesh* yang lebih halus dengan mengintegrasikan data batimetri, sehingga menghasilkan representasi topografi dasar laut dalam bentuk 2D. *Mesh* ini berfungsi sebagai kerangka dasar untuk menjalankan simulasi model hidrodinamika.

Selanjutnya, dibuatlah *mesh* yang merupakan pengan 2D dari bentuk topografi lokasi penelitian. Pembuatan *mesh* dilakukan pada sistem *mesh* generator pada modul MIKE Zero yang merupakan sistem untuk membuat *mesh* tak terstruktur sesuai dengan jarak *node* yang telah dibuat pada *grid*. *Mesh* pada penelitian ini diatur lebih rapat pada area penelitian (Area Dermaga) dibandingkan pada area laut, hal ini dimaksudkan untuk *prosesing* data lebih efisien dan detail. Setelah *mesh* terbentuk, dibuat kategori batasan model yang lebih spesifik seperti batas laut dan daratan. *Mesh* yang terbentuk kemudian digabungkan dengan data *grid* serta data batimetri yang kemudian untuk dilakukannya interpolasi data.



Gambar 5. Area Kajian Model

Model Definition. Model numerik dalam penelitian ini dibuat menggunakan modul *MIKE Flow Model FM* pada perangkat lunak MIKE21. Modul ini menggunakan metode elemen hingga dua dimensi untuk menghitung berbagai parameter hidrodinamika seperti kedalaman, gelombang, dan angin. *Mesh* yang telah dibuat sebelumnya pada MIKE Zero akan menjadi dasar perhitungan dalam model ini. Dengan mempertimbangkan faktor-faktor tersebut, model akan mampu memprediksi perilaku air di area yang sedang diteliti.

Skenario Model. Skenario model dibangun berdasarkan serangkaian batasan, meliputi data garis pantai sebagai batas daratan, data pasang surut selama 480 jam (20 hari) dengan interval waktu 1 jam yang digunakan sebagai input pada batas laut, data batimetri yang direferensikan terhadap datum kenaikan muka air laut. Data-data ini menjadi batasan-batasan krusial dalam menetapkan kondisi awal dan batas-batas pada model.

Konfigurasi parameter dan besaran input pada modul hidrodinamika *Flow Model FM* dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Setting parameter dan nilai input model hidrodinamika

Parameter	Nilai Input
<i>Specification File</i>	HD.M21FM
<i>Domain</i>	<p><i>Domain Specification: - Map projection: WGS 84 / World Mercator</i></p> <ul style="list-style-type: none"> · <i>Nodes in file: 1068</i> · <i>Elements in file: 1881</i> <p><i>Simulation Period:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> · <i>No. of time steps: 480</i> · <i>Time step interval: 3600 sec</i>
<i>Time</i>	<ul style="list-style-type: none"> · <i>Simulation start date: 5/10/2025 12:00:00 AM</i> · <i>Simulation end date: 5/30/2025 12:00:00 PM</i> <p><i>Shallow Water Equations:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> · <i>Time integration: Higher order</i> · <i>Space discretization: Higher order</i> · <i>Minimum time step: 0.01 sec</i> · <i>Maximum time step: 3600 sec</i> · <i>Critical CFL number: 0.8</i>
<i>HD: Solution Technique</i>	<ul style="list-style-type: none"> · <i>Time integration: Higher order</i> · <i>Space discretization: Higher order</i> · <i>Minimum time step: 0.01 sec</i> · <i>Maximum time step: 3600 sec</i> · <i>Critical CFL number: 0.8</i>
<i>HD: Flood and Dry</i>	<i>Drying depth: 0.005 m Wetting depth: 0.1 m</i>
<i>HD: Density</i>	<i>Density type: Barotropic</i>
<i>HD: Eddy Viscosity</i>	<p><i>Eddy type: Smagorinsky formulation Constant: 0.28</i></p> <p><i>Resistance type: Manning number</i></p>
<i>HD: Bed Resistance</i>	<i>Constant: 36,7 m^{1/3}/s</i>
<i>HD: Coriolis Forcing</i>	<i>Coriolis type: Varying in domain</i>
<i>HD: Wind Forcing</i>	<i>Varying in time, constant in domain</i>
<i>HD: Initial Conditions</i>	<p><i>Constant</i></p> <ul style="list-style-type: none"> · <i>Batas Laut:</i> <p><i>Type: Specified Level</i></p> <p><i>Format: Varying in time, constant along boundary</i></p>
<i>HD: Boundary Conditions</i>	<p><i>Boundary Data Corrections: Include Coriolis Correction, Include Wind Correction</i></p> <ul style="list-style-type: none"> · <i>Land Boundary</i> <p><i>Type: Land (zero normal velocity)</i></p>

Lanjutan Tabel 4.

Parameter	Nilai Input
<i>HD: Outputs</i>	<p><i>Output specification:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> · <i>Field type: 2D (Horizontal)</i> · <i>Data type: Discrete values</i> · <i>Output format: Area series</i> · <i>Flood and dry: Only real wet area</i> · <i>Output file: RUN HD MNP REVISI.dfsu</i>

Modul Mud Transport (MT) merupakan salah satu modul dari MIKE21 yang berfungsi untuk pemodelan simulasi Transport sedimen yang dihasilkan dari proses erosi dan sedimentasi. Nilai rata-rata sedimen tersuspensi sebesar 51,1425 mg/L di area kajian Makassar New Port diatur sebagai input pada bagian *Sources* dalam penelitian ini,. Untuk penempatan *Sources* adalah titik yang mewakili pergerakan sebaran TSS pada Lokasi kajian tersebut, serta menjadi kondisi awal yang akan menyebar pada area kajian. Informasi lengkap mengenai konfigurasi parameter dan besaran input yang diterapkan pada *modul Mud Transport* tersedia di **Tabel 5**.

Tabel 5. Setting parameter dan nilai input model mud transport

Parameter	Nilai Input
Specification File	MT.M21FM
<i>MT: Parameter selection</i>	<p><i>Parameter Selection:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> · <i>Number of Fractions: 1</i> · <i>Number of Layers: 2</i>
<i>MT: Solution Technique</i>	<p><i>Time integration: Higher order</i></p> <p><i>Space discretization: Higher order</i></p> <ul style="list-style-type: none"> · <i>Settling:</i> <p><i>Flocculation: Include flocculation calculations</i></p> <p><i>Density of sediment: 2650 kg/m³</i></p>
<i>MT: Water Column Parameters</i>	<p><i>Concentration for flocculation: 0.01 kg/ m³</i></p> <p><i>Concentration for hindered settling 10 kg/ m³</i></p> <p><i>Settling velocity coefficient: Constant, 0.0005 m/s –</i></p> <ul style="list-style-type: none"> · <i>Deposition:</i> <p><i>Deposition parameters: Apply teeter profile</i></p> <p><i>Critical shear stress: Constant, 0.07 N/m²</i></p>

Lanjutan Tabel 5.

<i>Parameter</i>	<i>Nilai Input</i>
<i>MT: Bed Parameters</i>	<ul style="list-style-type: none"> · <i>Erosion:</i> <i>Layer 1</i> <i>Erosion description: Soft mud 8.3</i> <i>Density of Bed Layer: 180 kg/m³</i> <i>Layer 2</i> <i>Erosion description: Hard mud 1</i> <i>Density of Bed Layer: 300 kg/ m³</i>
<i>MT: Source</i>	<i>Type of component: Constant. 51, 1425 mg/L</i>
<i>MT: Initial Conditions</i>	<i>Fraction Concentration: Constant. 51, 1425 mg/L</i>
<i>MT: Boundary Conditions</i>	<i>Batas Laut:</i> <i>Type: Zero Gradient</i> <i>Output specification:</i>
<i>MT: Outputs</i>	<ul style="list-style-type: none"> · <i>Field type: 2D (Horizontal)</i> · <i>Data type: Discrete values</i> · <i>Output format: Area series</i> · <i>Flood and dry: Only real wet area</i> · <i>Output file: RUN MUD MNP REVISI.dfsu</i>

Validasi Model. Proses validasi dilakukan untuk menilai akurasi hasil simulasi dengan membandingkannya dengan data pengamatan lapangan. Metode *Root Mean Square Error* (RMSE) digunakan sebagai tolok ukur. Nilai RMSE yang diperoleh menunjukkan tingkat kesalahan antara hasil model dengan data lapangan. Jika nilai RMSE berada di bawah ambang batas 40%, maka hasil simulasi dianggap dapat diterima.

Koefisien determinasi (R^2) merupakan ukuran statistik yang menunjukkan proporsi varian data yang dapat dijelaskan oleh model, dengan rentang nilai dari 0 hingga 1, di mana nilai yang lebih tinggi menunjukkan kecocokan model yang lebih baik terhadap data pengamatan. Dalam konteks evaluasi model, nilai R^2 dievaluasi sesuai dengan tujuan dan kompleksitas fenomena yang dimodelkan karena tidak ada *threshold* tunggal yang universal untuk semua jenis model (Chicco, D et al., 2021).

Tabel 6. Kriteria Nilai RMSE

RMSE	Tingkat Kesalahan
0,00 – 0,299 (0% - 29,9%)	Kecil
0,30 – 0,599 (30% - 59,9%)	Sedang
0,60 – 0,899 (60% - 89,9%)	Besar
>0,90 (>90%)	Sangat Besar

Nilai RMSE akan menggambarkan seberapa tersebar nya selisih nilai peramalan dan pengukuran dengan membandingkan antara hasil simulasi dengan hasil pengukuran lapangan (Milasari et al., 2021). Nilai RMSE dihitung berdasarkan persamaan :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{Obs} - X_{Mod})^2}{n}}$$

Keterangan :

- RMSE : *Root Mean Square Error*
- x_{obs} : Data Lapangan
- x_{mod} : Data Hasil Pemodelan
- n : Jumlah Data