SKRIPSI

SIMULASI KOMPUTASI POLA SEBARAN SEDIMEN TRANSPOR AKIBAT PENGARUH PASANG SURUT DI MUARA SUNGAI TALLO

Disusun dan diajukan oleh:

MUH. AGUNG BUDIMAN M
D011 19 1078

PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

SIMULASI KOMPUTASI POLA SEBARAN SEDIMEN AKIBAT PENGARUH PASUNG SURUT DI MUARA SUNGAI TALLO

Disusun dan diajukan oleh

MUH. AGUNG BUDIMAN M
D011 19 1078

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 4 Desember 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Pembimbing Utama,

Dr. Eng. Ir. Mukhsan Putra Hatta ST.,MT.
NIP: 197305121999031002

Ketua Program Studi,

Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP. 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama	: Muh. Agung Budiman M
NIM	: D011191078
Program Studi	: Teknik Sipil
Fakultas	: Teknik
Jenjang	: S1

Menyatakan bahwa Skripsi dengan Judul : **"SIMULASI KOMPUTASI POLA SEBARAN SEDIMEN TRANSPOR AKIBAT PENGARUH PASANG SURUT DI MUARA SUNGAI TALLO"** ini adalah karya penelitian saya sendiri dan bebas plagiat, serta tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik serta tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali tertulis digunakan sebagai acuan dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber acuan serta daftar pustaka. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan (Permendiknas No. 17, Tahun 2007).

Makassar, 17 September 2024

Muh.Agung Budiman M

NIM. D011191078

Scanned by CamScanner

ABSTRAK

Muh. Agung Budiman M. D011191078. “Simulasi Komputasi Pola Sebaran Sedimen Transpor Akibat Pengaruh Pasang Surut di Muara Sungai Tallo” **Mukhsan Putra Hatta** sebagai Pembimbing

Distribusi sedimen di wilayah pesisir atau muara memengaruhi proses geomorfologi seperti pergeseran garis pantai, serta pendangkalan pada muara sungai, misalnya muara Sungai Tallo. Wilayah ini begitu dinamis karena adanya pengaruh arus dan pasang surut air laut yang berperan penting dalam perpindahan sedimen, sehingga diperlukan adanya penelitian yang bertujuan untuk mengetahui model pola arus dan distribusi sedimen disekitar muara Sungai Tallo akibat pengaruh arus pasang surut. Untuk itu dilakukan pemodelan numerik dalam bentuk dua dimensi (2D). Hasil pemodelan 2D menunjukkan pada kondisi pasang arus bergerak dari laut menuju muara dengan kecepatan berkisar 0 - 0,04 m/s dan pergerakan sedimennya berkisar 4e-07 – 3,2e-06 m^3/s/m. Pada kondisi menuju pasang arus bergerak dari laut menuju muara dengan kecepatan berkisar 0 - 0,11 m/s dan pergerakan sedimennya berkisar 5e-07 – 6.5e-06 m^3/s/m. Pada kondisi surut arus bergerak dari muara menuju laut dengan kecepatan berkisar 0 - 0,105 m/s dan pergerakan sedimennya berkisar 2e-6 – 2e-5 m^3/s/m. Pada kondisi menuju surut arus bergerak dari muara menuju laut dengan kecepatan berkisar 0 - 0,18 m/s dan pergerakan sedimennya berkisar 8e-7 – 8e-6 m^3/s/m. Berdasarkan hasil tersebut maka dapat disimpulkan bahwa arus yang dibangkitkan oleh pasang surut sangat berpengaruh terhadap distribusi sedimen di muara Sungai Tallo.

Kata Kunci: Arus, Pasang Surut, Sedimen, Pemodelan Numerik.

ABSTRACT

Muh. Agung Budiman M. D011191078. “Computational Simulation of Sediment Transport Patterns Due to the Influense of Tides in the Tallo River Estuary” under the guidance of **Mukhsan Putra Hatta** as supervisor.

Sediment distribution in coastal areas or estuaries affects geomorphological processes such as shoreline shifts, as well as siltation in river estuaries, such as the Tallo River estuary. This region is so dynamic because of the influence of currents and tides that play an important role in sediment transfer, so research is needed that aims to determine the model of current patterns and sediment distribution around the Tallo River estuary due to the influence of tidal currents. For this reason, numerical modeling in the form of two dimensions (2D) was carried out. The results of 2D modeling show that at high tide the current moves from the sea to the estuary with speeds ranging from 0 - 0.04 m/s and the sediment movement ranges from 4e-07 - 3.2e-06 m3/s/m. In the condition towards the tide, the current moves from the sea to the estuary with speeds ranging from 0 - 0.11 m/s and the movement of sediment ranges from 5e-07 - 6.5e-06 m3/s/m. At low tide the current moves from the estuary to the sea with speeds ranging from 0 - 0.105 m/s and sediment movement ranging from 2e-6 - 2e-5 m3/s/m. In conditions towards low tide, the current moves from the estuary to the sea with speeds ranging from 0 - 0.18 m / s and the movement of sediment ranges from 8e-7 - 8e-6 m3 / s/m. Based on these results, it can be concluded that the currents generated by the tides greatly affect the distribution of sediment in the Tallo River estuary.

Keywords: Current, Tidal, Sediment, Numerical Modeling.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadirat Allah SWT, atas segala berkat dan rahmat-Nya sehingga saya sebagai penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul "Simulasi Komputasi Pola Penyebaran Sedimen Transpor Akibat Pengaruh Pasang Surut di Muara Sungai Tallo". Skripsi ini dibuat berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana pada Program Studi Teknik Sipil Universitas Hasanuddin.

Penyelesaian Skripsi ini tidak terlepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak baik berupa saran maupun kritikan yang bersifat membangun. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, ayahanda **Mustaking** dan ibunda **Namrah** atas segala doa, nasehat, kasih sayang, dukungan moral maupun materi, dan bimbingan hingga saat ini. Terima kasih telah berjuang dan mengantarkan penulis hingga berada pada titik ini.
2. Kakak penulis **Rachmat Budiaman dan Ratna Indah Sari** terima kasih selalu mendoakan, memberi semangat, dan dukungan material. Adik penulis **Muh. Chandra M** terima kasih atas canda tawa, semangat, serta dukungan terbaiknya kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak **Dr. Eng. Ir. Mukhsan Putra Hatta, S.T., M.T.** selaku dosen pembimbing utama yang telah meluangkan waktu dan pikirannya untuk mendampingi, membimbing, memberikan arahan, ilmu, semangat, masukan, dan saran kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini.
4. Teman-Teman seperjuangan di Perumahan Bukit Manggala Permai Antang. Kepada Ishaq, Kak Aslam, Rafa, Eki, Rey, Iyang, Thiya, Rifki, Kak Husnul dan Kak Adit, Terima kasih karena telah menjadi figur penting di dalam dinamika penyusunan tugas akhir ini.
5. *Member* C4, kepada Siddiq, Ipi, Randi, Ojan, terima kasih karena sudah menjadi saudara di tanah Gowa yang terpijak sejak 4 tahun yang lalu.
6. **Danish Hydraulic Institute (DHI) Water and Environment** yang telah memberikan MIKE Student License untuk menggunakan MIKE ZERO 2023 sehingga membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
7. Kepada diri sendiri dan untuk semua jiwa yang memelukku sepanjang perjalanan ini, untuk semua telinga yang mendengarkan, dan untuk semua hati yang

menerima, terimakasih atas semua penerimaan untuk jiwa kecil ini. Kalian semua hebat dan kalian semua terbaik, semoga dunia selalu menerimamu. Pinta ku tolong bantu peluk raga kecil lainnya, seperti kalian memelukku.

Penulis menyadari bahwa Skripsi ini masih terdapat kekurangan, sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun guna perbaikan dan kesempurnaan di masa yang akan datang. Semoga Skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Makassar, 23 September 2024

Penulis,

Muh. Agung Budiman M

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN iii
PERNYATAAN AUTHORSHIP ..... **iv**
ABSTRAK ..... **v**
ABSTRACT ..... **vi**
KATA PENGANTAR ..... **vii**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Tujuan Penelitian 2
1.4 Manfaat Penelitian 2
1.5 Ruang Lingkup 2
1.5.1 Ruang Lingkup Wilayah 3
1.5.2 Ruang Lingkup Masalah 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA **4**
2.1 Muara Sungai 4
2.2 Dinamika Arus Pasang Surut 5
2.3 Sedimen dan Sedimentasi 6
2.3.1.1 Pengertian Sedimen dan Sedimentasi 6
2.3.1.2 Transpor Sedimen 7
2.3.1.3 Mekanisme Pergerakan Sedimen 9
2.4 Karakteristik Sedimen 10
2.4.1Sedimen Tersuspensi 11
2.5 Parameter Oseanografi 12
2.5.1 Pasang Surut 13
2.5.2 Arus Pasang Surut 16
2.5.3 Kedalaman 18
2.6 Pendekatan dengan Model Hidrodinamika 18
2.6.1 Modul Hidrodinamika 21
2.6.2 Modul Sand Transport (ST) 22
BAB III METODE PENELITIAN **25**
3.1 Waktu dan Tempat 25
3.2 Alat dan Bahan 25
3.3 Prosedur Penelitian 26
3.3.1 Tahap Persiapan 26
3.3.2 Tahap Penentuan Stasiun 27
3.3.3 Tahap Pengambilan Sampel 27
3.3.3.1 Pengambilan Data Sekunder 27

a. Data Angin 27
b. Data Gelombang 27
3.3.3.2 Pengambilan Data Primer 27
a. Pasang Surut 27
b. Sedimen Tersuspensi 28
c. Arah dan Kecepatan Arus 28
d. Sedimen Dasar 28
3.3.4 Pengolahan Data 29
BAB IV HASIL & PEMBAHASAN 36
4.1 Gambaran Umum Lokasi 36
4.2 Pasang Surut 36
4.3 Batimetri 37
4.4 Total Suspended Solid (*TSS)* 39
4.5 Sedimen Dasar 40
4.6 Pemodelan Arus dan Besaran Beban Total (Total Load – Magnitude) 41
4.6.1. Model Arus 41
4.6.2. Model Besaran Total Beban (Total Load – Magnitude) 46
4.6.3 Validasi Model 51
BAB V PENUTUP 52
A. Kesimpulan 52
B. Saran 52
DAFTAR PUSTAKA 53
LAMPIRAN 58

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Skala Wentworth untuk mengklasifikasi partikel-partikel sedimen (Hutabarat *et al.*, 2012). 11
Tabel 2. Tipe dan ukuran partikel sedimen (Ji *et al.*, 2008) 12
Tabel 3. Alat dan Bahan di Lapangan 25
Tabel 4. Alat dan Bahan di Laboratorium 26
Tabel 5. Pengaturan skenario model hidrodinamika pada modul hidrodinamika Flow Model FM 32
Tabel 6. Pengaturan skenario model pada modul *Sand Transport* (ST) MIKE 21 FM 33
Tabel 7. Kriteria nilai RMSE 34
Tabel 8. Konstanta harmonik hasil perhitungan pasang surut menggunakan metode admiralty 37
Tabel 9. Jenis sedimen dasar di sekitar muara Sungai Tallo 40

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Partikel terangkut dengan cara *rolling* dan *saltating* (*bedload*) dan dengan 10
Gambar 2. Proses pengendapan sedimen kohesif dan non-kohesif (Ji *et al.*, 2008)12
Gambar 3. Posisi bulan, bumi, dan matahari pada kondisi: (a) pasang tinggi (*spring tide*) dan (b) surut rendah (*neap tide*). (Pearson Prentice Hall, Inc).....14
Gambar 4. Peta lokasi penelitian 25
Gambar 5. Tampilan MIKE 21 Flow Model FM pada MIKE Zero 2023 30
Gambar 6. Area Kajian Model 31
Gambar 7. Grafik pasang surut tanggal 17 Februari s/d 03 Maret 2024 di Sungai Tallo berdasarkan data yang diperoleh dari data pengamatan secara langsung di lapangan 36
Gambar 8. Peta batimetri daerah muara Sungai Tallo 38
Gambar 9. Nilai konsentrasi total suspended solid (TSS) pada Neep Tide dan Spring Tide 39
Gambar 10. Grafik D50 ukuran butir sedimen 40
Gambar 11. Model kecepatan dan arah arus pada kondisi menuju surut.....42
Gambar 12. Model kecepatan dan arah arus pada kondisi surut.....43
Gambar 13. Model kecepatan dan arah arus pada kondisi menuju pasang.....44
Gambar 14. Model konsentrasi sedimen pada kondisi menuju surut 47
Gambar 15. Model konsentrasi sedimen pada kondisi surut 48
Gambar 16. Model konsentrasi sedimen pada kondisi menuju pasang**Error! Bookmark not defined.**
Gambar 17. Model konsentrasi sedimen pada kondisi pasang 50
Gambar 18**.** Titik tinjauan validasi model 51

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data pasang surut 17 Februari – 03 Maret 2024 pada lokasi penelitian 59
Lampiran 2. Data angin sekunder 17 Februari - 03 Maret 2024 pada lokasi penelitian 60
Lampiran 3.Data Gelombang sekunder 17 Februari – 03 62
Lampiran 4. Data input pasang surut 16 hari (17 Februari – 03 Maret 2024)..... 64
Lampiran 5. Hasil analisis nilai TSS menggunakan metode gravimetri..... 73
Lampiran 6. Hasil validasi RMSE perhitungan arus lapangan (current meter) dan model 74
Lampiran 7. Dokumentasi 75

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Arus laut merupakan pergerakan massa air, baik secara vertikal maupun horizontal. Arus laut memiliki peran penting dalam perpindahan sedimen, karena sedimen berkaitan dalam pengangkutan (*transport*) dan pengendapan (*sedimentation*). Arus memiliki fungsi sebagai media transport sedimen dan agen pengerosi yang bergantung pada gaya pembangkitnya (Arvianto *et al*., 2016). Proses pengangkutan terjadi ketika sedimen tersuspensi ke kolom perairan, kemudian menyebar ke wilayah laut yang lebih luas. Arus mengakibatkan sedimen yang telah mengalami pengendapan kembali terangkat ke kolom perairan, karena terjadi proses turbulensi (Poerbondono *et al*., 2005).

Pasang surut merupakan peristiwa pergerakan naik turunnya permukaan air laut secara periodik yang diakibatkan oleh kombinasi gravitasi dan gaya tarik menarik benda-benda astronomi, terutama oleh matahari, bumi dan bulan. Pasang surut dan arus yang dihasilkan oleh pasang surut sangat dominan dalam proses sirkulasi massa air di perairan pantai (Duxbury *et al.,* 2002). Pengetahuan mengenai pola sirkulasi arus dan arus pasang surut di perairan pesisir dapat memberikan gambaran pergerakan massa air dan hubungannya sebagai faktor yang dapat mempengaruhi distribusi material di kolom air (Mann *et al.*, 2006). Berdasarkan penelitian Arifin *et al.,* (2012), perairan pantai Makassar memiliki tipe pasang surut tipe campuran yang cenderung diurnal (harian tunggal) dengan amplitudo sebesar 0,88-2,18 meter dari muka laut rata-rata (*Mean Sea Level*).

Sedimen tersuspensi atau *Total Suspended Matter* (TSM) merupakan material tersuspensi (diameter > 1 µm) yang tertahan pada saringan *millipore* dan terdiri dari lumpur, pasir halus, dan jasad-jasad renik (Effendi, 2003). Sedimen tersuspensi yang menyebar di perairan laut berasal dari darat yang dibawa oleh debit sungai menuju muara. Muara menjadi tempat terjadinya pertukaran sistem transport dari debit ke arus laut. Sumber sedimen tersuspensi berasal dari hasil erosi daerah atas (*up land*), hasil erosi dasar sungai, hasil degradasi makhluk hidup, serta limbah industri dan rumah tangga (Arvianto *et al*., 2016).

Sungai Tallo terletak di Provinsi Sulawesi Selatan dan bermuara di Selat Makassar yang melewati tiga kabupaten atau kota, yaitu Makassar, Maros, dan Gowa. Muara sungai Tallo merupakan daerah peralihan antara daratan dan laut lepas,

sehingga terjadi interaksi antara keduanya. Kondisi muara sangat dinamis karena adanya pengaruh arus laut dan pasang surut, sehingga berpengaruh terhadap sebaran sedimen yang tersuspensi di sekitar Muara Sungai Tallo (Batti, 2021). Sepanjang aliran sungai Tallo terdapat banyak area pemukiman dan industri dengan intensitas aktivitas masyarakat cukup besar di sekitar Sungai Tallo, sehingga dinamika pola arus pasut sangat berpengaruh terhadap distribusi sedimen, baik akibat antropogenik maupun bentukan secara alami. Kasus inilah yang menjadi dasar untuk mengkaji lebih jauh terkait studi arus pasang surut terhadap distribusi sedimen di sekitar muara sungai Tallo, Makassar.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas maka dapat dirumuskan pertanyaan penelitian sebagai berikut:

1. Bagaimana model pola aliran di muara Sungai Tallo??
2. Bagaimana model pola sebaran sedimen transpor akibat pengaruh pasang surut di muara Sungai Tallo?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui model 2D pola arus yang dipengaruhi oleh pasang surut di perairan muara sungai Tallo Kota Makassar.
2. Mengetahui model 2D distribusi sedimen akibat pengaruh arus pasang surut di perairan muara Sungai Tallo Kota Makassar.

1.4 Manfaat Penelitian

Kegunaan penelitian ini adalah memberikan gambaran terkait model pola distribusi sedimen disekitar perairan muara Sungai Tallo Kota Makassar akibat pengaruh pasang surut dalam bentuk dua dimensi (2D) sehingga menjadi bahan rujukan untuk penelitian selanjutnya dan menjadi informasi tambahan terkait pengelolaan pada kawasan muara Sungai Tallo.

1.5 Ruang Lingkup

Dalam rangka memberikan fokus dan arahan yang jelas untuk mencapai tujuan penelitian, didefinisikan ruang lingkup penelitian ini. Ruang lingkup tersebut terbagi menjadi dua bagian, yaitu ruang lingkup wilayah dan ruang lingkup substansi

permasalahan penelitian, yang bertujuan untuk membatasi objek-objek yang akan dikaji selama penelitian

1.5.1 Ruang Lingkup Wilayah

Pentingnya menetapkan batasan pada obyek penelitian tercermin dalam penentuan ruang lingkup wilayah penelitian. Dalam konteks penelitian ini, wilayah yang dikaji adalah Sungai Tallo yang dimulai dari Jembatan Sungai Tello sampai muara Sungai Tallo. Penelitian difokuskan di daerah muara Sungai Tallo.

1.5.2 Ruang Lingkup Masalah

Ruang lingkup penelitian dibatasi juga berdasarkan masalah atau tujuan penelitian yang dikaji meliputi

1. Pengumpulan data primer lokasi kajian yang meliputi pasang surut, batimetri, kecepatan aliran sungai, debit sungai, sedimen melayang dan sedimen dasar.
2. Pengumpulan data sekunder muara Sungai Tallo meliputi data angin dan data gelombang.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Muara Sungai

Sungai merupakan aliran air besar yang memanjang dan mengalir secara terus-menerus dari tempat yang lebih tinggi ke tempat yang lebih rendah dan bermuara di laut, danau, atau sungai yang lebih besar. Aliran sungai yang berliku-liku dapat disebabkan karena terjadinya proses pengikisan dan pengendapan di sepanjang sungai (Syarifuddin, 2000). Muara sungai merupakan bagian hilir dari sungai yang berhubungan dengan laut. Mulut sungai adalah bagian paling hilir dari muara sungai yang langsung bertemu dengan laut, sedangkan estuari adalah bagian dari sungai yang dipengaruhi oleh pasang surut. Pengaruh pasang surut terhadap sirkulasi aliran (kecepatan/debit, profil muka air, instrusi air asin) diestuari dapat sampai jauh ke hulu sungai yang tergantung pada tinggi pasang surut, debit sungai, dan karakteristik estuari (tampang aliran, kekasaran dinding, dan sebagainya) (Mutiara *et al.*, 2021).

Estuari sebagai daerah pantai semi tertutup yang berhubungan langsung dengan laut dimana air laut tercampur dengan air yang berasal dari daratan. Secara singkat, estuari didefinisikan sebagai bagian dari sungai yang dipengaruh oleh pasang surut. Estuaria yang merupakan tempat bertemunya arus air sungai yang mengalir ke laut dengan arus pasang surut air laut yang keluar-masuk ke sungai. Aktivitas ini menyebabkan pengaruh yang kuat terhadap terjadinya sedimentasi, baik yang berasal dari sungai maupun dari laut atau sedimen yang tercuci dari daratan disekitarnya (Triatmodjo, 1993).

Dua faktor yang paling berpengaruh dalam hidrodinamika diestuari adalah debit sungai yang berasal dari hulu, dan pasang surut diujung hilir estuari (muara), yaitu:

- Debit sungai dan evolusi musimannya merupakan salah satu parameter penting dalam sirkulasi estuari.
- Pasang surut mempengaruh evolusi sepanjang estuari dalam kualitas air berupa salinitas dan kekeruhan (sedimen suspensi), yaitu bergerak ke hulu pada waktu air pasang dan ke hilir pada waktu air surut. Konsentrasi dan posisi sedimen suspensi sangat tergantung pada variasi tinggi pasang surut dan debit sungai.

Menurut Triatmodjo (1999) muara sungai dapat dibedakan dalam tiga kelompok, yang tergantung pada faktor dominan yang mempengaruhinya, ketiga faktor dominan tersebut adalah gelombang, debit sungai dan pasang surut. Di suatu muara sungai, ketiga faktor tersebut bekerja secara simultan, tetap biasanya salah satunya mempunyai pengaruh yang lebih dominan dari yang lainnya. Gelombang memberikan pengaruh yang lebih

dominan pada sungai kecil yang bermuara dilaut terbuka (luas). Sebaliknya sungai besar yang bermuara dilaut tenang akan didominasi oleh debit sungai. Bertemunya arus air sungai yang mengalir ke laut dengan arus pasang surut air laut yang keluar masuk ke sungai dapat menyebabkan pengaruh yang kuat terhadap terjadinya sedimentasi, baik yang berasal dari sungai maupun dari laut atau sedimen yang tercuci dari daratan disekitarnya.

Muara sungai berfungsi sebagai pengeluaran atau pembuangan debit sungai terutama pada waktu banjir ke laut. Karena letaknya yang berada pada ujung hilir, maka debit aliran dimuara sungai lebih besar dibanding pada tampang sungai disebelah hulu. Selain itu muara sungai juga harus melewatkan debit yang ditimbulkan oleh pasang surut, yang bisa lebih besar dari debit sungai. Sesuai dengan fungsinya tersebut, muara sungai harus cukup lebar dan dalam. Permasalahan yang sering dijumpai adalah banyaknya endapan dimuara sungai sehingga tampang alirannya kecil yang dapat mengganggu pembuangan debit sungai ke laut. Ketidaklancaran pembuangan tersebut dapat mengakibatkan banjir pada daerah sebelah hulu muara (Triatmodjo, 1999).

2.2 Dinamika Arus Pasang Surut

Arus merupakan pergerakan massa air secara vertikal dan horizontal maupun gerakan mengalir suatu massa air yang disebabkan tiupan angin, perbedaan densitas, atau pergerakan gelombang panjang. Pergerakan arus dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti arah angin, perbedaan tekanan air, perbedaan densitas air, gaya coriolis, arus ekman, topografi dasar laut, arus permukaan, *upwelling*, dan *downwelling* (Abrianto & Jaelani, 2016). Arus di estuaria merupakan pergerakan air yang terjadi di daerah pertemuan antara sungai dan laut. Terdapat berbagai jenis arus di daerah estuaria, seperti arus pasang (tide), arus sungai, arus balik (*backwash*), dan arus silang (*crosscurrent*). Arus tersebut menciptakan kondisi lingkungan yang berubah-ubah di dalam wilayah estuaria. Salah satu faktor yang menciptakan dinamika arus di estuaria adalah pasang surut (*tides*). Fenomena arus yang diciptakan oleh pasang surut disebut arus pasang surut.

Gerakan air secara vertikal yang berkaitan dengan naik turunnya pasang surut dan diiringi oleh gerakan air secara horizontal disebut dengan arus pasang surut. Permukaan air laut akan selalu berubah-ubah setiap saat akibat gerakan pasang surut dan terjadi pada tempat-tempat yang sempit, seperti teluk dan selat, sehingga menyebabkan terjadinya arus pasang surut (*Tidal current*). Gerakan arus pasang surut dari laut lepas yang merambat menuju perairan pantai akan mengalami perubahan akibat berkurangnya

kedalaman (Mihardja *et al.*, 1994). Pada wilayah estuaria, arus pasang surut terjadi karena perubahan tinggi permukaan laut yang disebabkan oleh pasang surut. Saat pasang air laut naik dan masuk ke muara sungai dan mengalir ke hulu sungai, hal ini disebut arus pasang. Pada saat surut air laut mundur dari muara sungai dan bergerak menuju ke arah muara sungai dari hulu, hal ini disebut arus surut (Keith, 1998).

Arus yang terjadi di laut, teluk, dan laguna diakibatkan oleh massa air yang mengalir dari permukaan yang lebih tinggi ke permukaan yang lebih rendah yang disebabkan oleh pasang surut. Pada saat gelombang pasang surut merambat memasuki perairan dangkal seperti muara sungai atau teluk, maka badan air daerah ini akan bereaksi terhadap aksi dari perairan lepas. Pada wilayah yang memiliki arus pasang surut yang cukup kuat, tarikan gesekan pada dasar laut akan menghasilkan potongan arus vertikal dan resultan turbulensi yang menyebabkan bercampurnya lapiran air bawah secara verikal. Namun pada wilayah yang memiliki arus pasang surut yang lebih lemah akan terjadi pencampuran yang sedikit, sehingga terjadi stratifikasi (lapisan- lapisan air dengan kepadatan berbeda) (King, 1962).

2.3 Sedimen dan Sedimentasi

2.3.1.1 Pengertian Sedimen dan Sedimentasi

Secara umum, sedimen adalah kumpulan rombakan material (batuan, mineral, dan bahan organik) yang mempunyai ukuran butir tertentu. Sedimen juga dapat diartikan sebagai partikel material yang umumnya terbentuk melalui proses fisik dan kimia pecahan batuan. Partikel tersebut terdiri dari ukuran besar (*boulder*) hingga sangat halus (*coloid*) dan memiliki bentuk yang beragam, seperti lonjong, bulat, persegi, dan lain-lain. Salah satu sumber sedimen berasal dari limpasan sungai, yaitu pecahan mineral atau material organik yang berpindah atau terangkut melalui media angin, air, maupun es (Usman, 2014).

Sedimentasi dapat diartikan sebagai pengangkutan, melayangnya (suspensi) atau mengendapnya material fragmentasi oleh air dan biasanya terjadi pada bagian *downstream* (Saputra, 2018). Sedimentasi merupakan proses pengendapan material batuan yang diangkut oleh tenaga air atau angin. Sedimentasi dapat diartikan sebagai proses terangkutnya sedimen oleh suatu aliran air yang diendapkan pada suatu wilayah yang kecepatan airnya melambat atau terhenti, seperti pada saluran sungai, waduk, danau, maupun kawasan tepi teluk atau laut (Khatib *et al.*, 2013). Proses sedimentasi akan terus

berlangsung selama suplai muatan sedimen yang banyak dari daratan masih terus terjadi (Damerianne, 2013).

Media pengendapan pada proses sedimentasi dapat melalui media air, angin, dan es. Hasil sedimentasi menggunakan media air (air sungai) dapat berupa delta yang terdapat pada ujung hilir sungai, hasil sedimentasi menggunakan media angin dapat berupa kumpulan maupun gundukan pasir yang terdapat pada gurun pasir dan tepi pantai, sedangkan hasil sedimentasi dengan menggunakan media es dapat berupa glester. Sedimentasi terjadi karena terdapat suplai muatan sedimen yang tinggi di sekitar lingkungan pantai. Proses tersebut akan terus berlangsung selama suplai muatan sedimentasi yang banyak masih terus terjadi di daratan (Putra, 2016).

Sedimen yang tersusun dari batuan, mineral, dan material organik, secara alami berada dalam sungai, danau, estuari, dan air laut. Sedimen yang terbawa oleh aliran air dari satu daerah ke daerah lain hingga mengendap pada wilayah tertentu dan berujung pada air laut. Arus yang disebabkan oleh pasang surut membawa material sedimen dalam jumlah yang cukup besar. Selain dari pengaruh arus, energi gelombang juga berpengaruh terhadap sebaran sedimen (Rachman, 2019).

2.3.1.2 Transpor Sedimen

Transpor sedimen merupakan gerakan sedimen pada daerah pantai yang diakibatkan oleh gelombang dan arus pembangkitnya (Saputra, 2018). Transpor sedimen dapat dikategorikan menjadi dua, yaitu transport sedimen menuju dan meninggalkan pantai (*onshore-offshore transport*) yang memiliki arah rata-rata tegak lurus terhadap pantai dan transport sepanjang pantai (*longshore transport*) yang memiliki arah rata-rata sejajar terhadap pantai. Transpor sedimen yang tegak lurus terhadap pantai dapat dilihat berdasarkan kemiringan pantai dan bentuk dasar lautnya. Proses transpor sedimen yang tegak lurus biasanya terjadi di daerah teluk dan pantai yang memiliki gelombang yang relatif tenang (Triatmodjo, 1999).

Banyaknya sedimen transport dapat ditentukan dari perpindahan tempat sedimen melalui suatu penampang melintang selama periode waktu. Pengetahuan ini dapat membantu kita untuk mengetahui apakah pada kondisi tertentu akan terjadi keadaan seimbang (*equilibrium*), erosi (*erosion*), pengendapan (*deposition*), dan kuantitas sedimen yang terangkut dalam proses transpor (Mardjikoen, 1987). Sedimen transport memiliki peranan penting dalam berbagai masalah teknik pantai. Pengetahuan mengenai sedimen transpor berguna dalam memperkirakan kecepatan dan jumlah transport sedimen, sehingga segala kemungkinan permasalahan yang diketahui sebelumnya dan pengaruhnya dapat diminimumkan (Suntoyo, 2014).

Pada dasarnya, transportasi sedimen membahas dua arus fase, yaitu fase padat dan fase fluida (udara atau air). Fase padat terdiri dari butiran-butiran sedimen yang terangkut oleh arus fluida, sedangkan fase fluida terdiri dari air atau fluida lainnya yang membawa sedimen. Transportasi sedimen tergantung pada sifat fisik dari agen transportasi, sifat material, sifat fisik dari campuran agen transportasi dan material, dan gaya yang menyebabkan transportasi (Hafli *et al.*, 2022).

Pergerakan sedimen terdiri dari pengangkatan (*entraiment*), transpor sedimen, dan pengendapan (*settling*). Ketiga peristiwa ini bekerja pada waktu yang bersamaan dan bisa saling berinteraksi. Laju pergerakan sedimen dapat diartikan sebagai konsentrasi sedimen perunit waktu yang melewati sebuah bidang vertikal dengan unit lebar yang tegak lurus dengan arah aliran (Van Rijn, 1993). Sedimen dapat ditemukan di berbagai lokasi dalam aliran, tergantung pada keseimbangan antara kecepatan ke alas pada partikel (gaya tarik dan gaya angkat) dan kecepatan pengendapan partikel. Terdapat tiga macam pergerakan angkutan sedimen (Ronggodigdo, 2011), yaitu:

2.3.1.2.1 *Bed Load Transport*

Partikel kasar yang bergerak di sepanjang dasar sungai secara keseluruhan disebut dengan *bedload*. Adanya *bedload* ditunjukkan oleh gerakan partikel di dasar sungai yang ukurannya besar, gerakan itu dapat bergeser, menggelinding atau meloncat-loncat, akan tetapi tidak pernah lepas dari dasar sungai. Pada kondisi ini pengangkutan material terjadi pada aliran yang mempunyai kecepatan aliran yang relatif lambat, sehingga material yang terbawa arus sifatnya hanya menggelinding sepanjang saluran.

2.3.1.2.2 *Wash Load Transport*

Wash load adalah angkutan partikel halus yang dapat berupa lempung (*silk*) dan debu (*dust*), yang terbawa oleh aliran sungai. Partikel ini akan terbawa aliran sampai ke laut, atau dapat juga mengendap pada aliran yang tenang atau pada air yang tergenang. Sumber utama dari *washload* adalah hasil pelapukan lapisan atas batuan atau tanah di dalam daerah aliran sungai. Pada kondisi ini pengangkutan material terjadi pada aliran yang mempunyai kecepatan aliran yang relatif cepat, sehingga material yang terbawa arus membuat loncatan-loncatan akibat dari gaya dorong pada material tersebut.

2.3.1.2.3 Suspended Load Transport

Suspended load adalah material dasar sungai (*bed material*) yang melayang di dalam aliran dan terutama terdiri dari butir pasir halus yang senantiasa mengambang di atas dasar sungai, karena selalu didorong ke atas oleh turbulensi aliran. Jika kecepatan

aliran semakin cepat, gerakan loncatan material akan semakin sering terjadi sehingga apabila butiran tersebut tergerus oleh aliran utama atau aliran turbulen ke arah permukaan, maka material tersebut tetap bergerak (melayang) di dalam aliran dalam selang waktu tertentu.

Sedimen transport memiliki peranan penting dalam berbagai masalah teknik pantai. Erosi yang tidak diinginkan pada bangun pantai, abrasi garis pantai, atau pengendapan sedimen atau pelumpuran pada alur pelabuhan atau muara merupakan permasalahan yang berkaitan dengan sedimen transport (Putra, 2016). Secara garis besar terdapat dua jenis sedimen yang di transportasikan, yaitu kohesif dan non-kohesif. Transport sedimen kohesif diistilahkan sebagai *Suspended Load Transport* karena kebanyakan sifatnya melayang di air, sementara transport sedimen non-kohesif diistilahkan sebagai *Littoral Transport* atau *Bed Load Transport* (Pratikto, 1997).

2.3.1.3 Mekanisme Pergerakan Sedimen

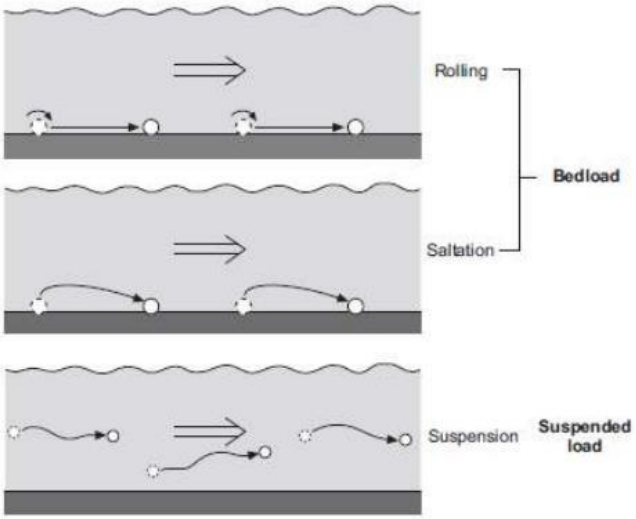
Mekanisme transpor sedimen mengontrol keberadaan, karakteristik dan sebaran sedimen pada suatu lingkungan. Menurut Rifardi (2012), terdapat dua mekanisme transpor sedimen berlawanan yang di dasarkan atas dua jenis muatan yaitu:

2.3.1.3.1 Muatan tersuspensi, pada mekanisme ini kekuatan arus dari air atau udara menyebarkan partikel-partikel sedimen halus seperti lanau, lempung dan ukuran pasir, kemudian memindahkannya dalam aliran. Dengan kata lain partikel-partikel tersebut berada dalam kolom air.

2.3.1.3.2 Muatan pada lapisan dasar perairan atau muatan yang tidak secara terus menerus berada dalam bentuk suspensi dalam kolom air, seperti partikel-partikel yang lebih besar dan berat (*boulder, pebbles* dan *gravel*), dirollingkan (transport) sepanjang dasar perairan.

Terdapat tiga cara partikel terdistribusi (Nichols, 2009), yaitu:

a. *Rolling* atau *sliding* merupakan perpindahan partikel dengan cara menggelinding di sepanjang bagian bawah dari arus udara atau air tanpa kehilangan kontak dengan bagian dasar permukaan.
b. *Saltating* atau *hopping* merupakan perpindahan partikel dengan cara melompat secara periodik meninggalkan bagian dasar permukaan, dan terbawa dengan jarak yang pendek dalam suatu tubuh fluida sebelum dikembalikan kembali di dasar permukaan.
c. *Suspended* merupakan pengaruh turbulen dalam arus yang dapat menggerakan partikel keatas secara terus menerus.



Gambar 1. Partikel terangkut dengan cara *rolling* dan *saltating* (*bedload*) dan dengan *suspension* (*suspensionload*) (Nichols,2009).

Pada umumnya partikel yang terdistribusi dengan cara *rolling, sliding*, dan *saltating* disebut *bedload transport*, sedangkan partikel yang tertransportasi dengan cara suspension disebut dengan *suspended load transport*. *Bedload* dan *suspended load* dapat muncul secara simultan akan tetapi zona transisi antara kedua mode transportasi tersebut masih belum dapat didefinisikan (Nichols, 2009).

Pada arus dengan kecepatan yang rendah dalam air hanya akan membawa partikel halus (*fine silt* dan *clay*) dan partikel yang mempunyai densitas yang rendah akan tertransportasi dengan cara suspensi dimana partikel yang berukuran pasir akan berpindah dengan cara rolling dan beberapa partikel menjadi *saltasi*. Pada aliran dengan kecepatan tinggi semua partikel yang berukuran lanau dan beberapa berukuran pasir dapat tetap tertransportasi dengan cara suspensi, partikel berukuran kerakal dan kerikil halus akan tertranspor dengan cara *saltation* dan material kasar akan tertranspor dengan cara *rolling* (Nichols, 2009).

2.4 Karakteristik Sedimen

Sedimen dasar dapat diolah menggunakan metode pengayakan (APHA, 2005). Presentase dari berat total yang tertinggal pada ayakan dan ukuran butir dapat ditampilkan dalam bentuk grafik histogram. Hasilnya adalah distribusi asimetris dengan presentase yang besar merupakan sedimen dengan ukuran butir halus, dari diameter rata-rata. Diameter rata-rata merupakan ukuran yang berhubungan dengan nilai tengah dari area dibawah kurva distribusi frekuensi ukuran butir sedimen. Kurva tersebut sangat berguna

untuk mengetahui keberadaan dari beberapa jenis dalam campuran sedimen (Cahyo, 2012).

Ukuran butir merupakan hal yang paling mendasar dari partikel sedimen yang dapat mempengaruhi proses sedimentasi, transportasi dan pengendapan. Ukuran butir sedimen cenderung semakin halus apabila berada di daratan atau dekat dengan muara sungai, sedangkan pada daerah yang berhadapan lansung dengan laut lepas dan jauh dari muara sungai cenderung akan memiliki ukuran butir sedimen yang lebih halus (Gemilang, 2018).

Distribusi ukuran butir merupakan salah satu sifat paling penting yang dapat mempengaruhi proses transport sedimen, sehingga akan mempengaruhi besar kecilnya kemungkinan erosi atau abrasi. Ukuran partikel dapat menunjukkan proses pengangkutan dan pengendapan material, seperti kemampuan air atau angin dalam memindahkan partikel. Ukuran partikel sangat penting dalam menentukan tingkat pengangkutan sedimen ukuran tertentu dan tempat sedimen terakumulasi di laut (Wahyuni, 2014).

Tabel 1. Skala Wentworth untuk mengklasifikasi partikel-partikel sedimen (Hutabarat *et al.*, 2012).

Kelas Ukuran Butir	**Diameter Butir (mm)**
Boulders (Kerikil Besar)	>256
Gravel (Kerikil kecil)	2 – 256
Very coarsesand (Pasir sangat kasar)	1 – 2
Coarsesand (Pasir kasar) *Medium*	0.5 – 1
Sand (Pasir sedang) *Fine sand*	0.25 – 0.5
(Pasir halus)	0.125 – 0.25
Very finesand (Pasir sangat halus)	0.0625 – 0.125
Slit (Debu)	0.002 – 0.0625
Clay (Lempung)	0.0005 – 0.002
Dissolved material (Material terlarut)	<0.0005

2.4.1Sedimen 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).

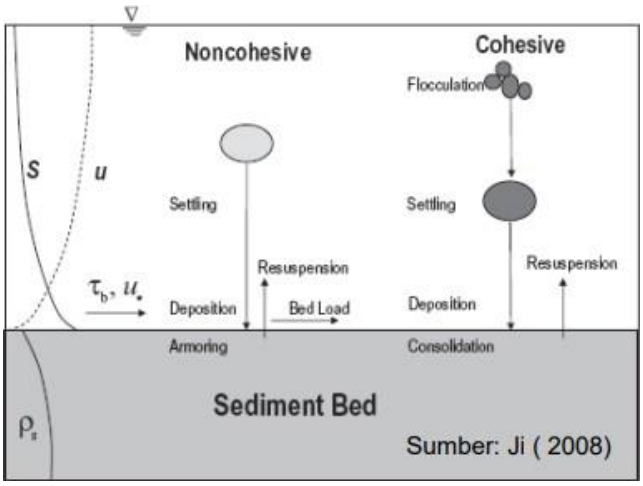
Total Suspended Solid (TSS) atau Materi Padatan Tersuspensi (MPT) adalah bahan-bahan tersuspensi (diameter lebih dari 1μm) terdiri dari lumpur dan pasir halus serta jasad-jasad renik yang tertahan pada saringan milipore dengan diameter pori 0.45 μm. Penyebab MPT yang utama merupakan erosi tanah yang 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 150μm (pasir) masuk kategori sedimen dasar, sedimen tersuspensi lebih kecil dari 63μm (0,063 mm; *silt* dan *clay* ; Tabel 2) (Ji *et al.*, 2008). MPT masuk kedalam kategori sedimen melayang sedimen tersuspensi.

Tabel 2. Tipe dan ukuran partikel sedimen (Ji *et al.*, 2008)

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

Perairan jernih memiliki kisaran nilai MPT berada dibawah 10 mg/L dan untuk perairan keruh nilainya diatas 100 mg/L. Proses dinamika MPT sangat dipengaruhi oleh kedalaman perairan dan komposisinya. Pada umumnya sedimen yang berada didaerah 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), dengan ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 2. Gaya-gaya permukaan tersebut adalah gaya tarik dan gaya tolak. Apabila resultannya merupakan gaya tarik, partikel akan berkumpul dan membentuk flokon dengan dimensi yang lebih besar daripada dimensi partikel individu, fenomena ini sering disebut dengan flokulasi. Sebagian besar sedimentasi yang terjadi di daerah pantai merupakan hasil flokulasi sedimen kohesif (Triatmodjo, 1999).



Gambar 2. Proses pengendapan sedimen kohesif dan non-kohesif (Ji *et al.*, 2008)

2.5 Parameter Oseanografi

Menurut Bahar (2015), oseanografi merupakan ilmu yang mempelajari tentang

lautan dan segala aspek yang ada di dalamnya, yaitu sifat-sifat fisika dan kimia air laut, dinamika air laut yang dipengaruhi oleh gaya astronomis, meteorologis dan geologis, zat-zat yang terlarut dan kehidupan organisme yang hidup di dalam laut, dan lain-lain. Karakteristik pada suatu perairan dapat didefiniskan sebagai perubahan dinamika yang terjadi yang diakibatkan oleh faktor lingkungan. Pengamatan karakteristik pada suatu perairan perlu dikaji dengan memperhatikan perubahan-perubahan dinamika perairan, yaitu gambaran terkait beberapa parameter oseanografi (perubahan pasang surut, arus, kedalaman, dan lain-lain). Peristiwa oseanografi tersebut dapat memberikan gambaran mengenai karakteristik suatu wilayah perairan.

2.5.1 Pasang Surut

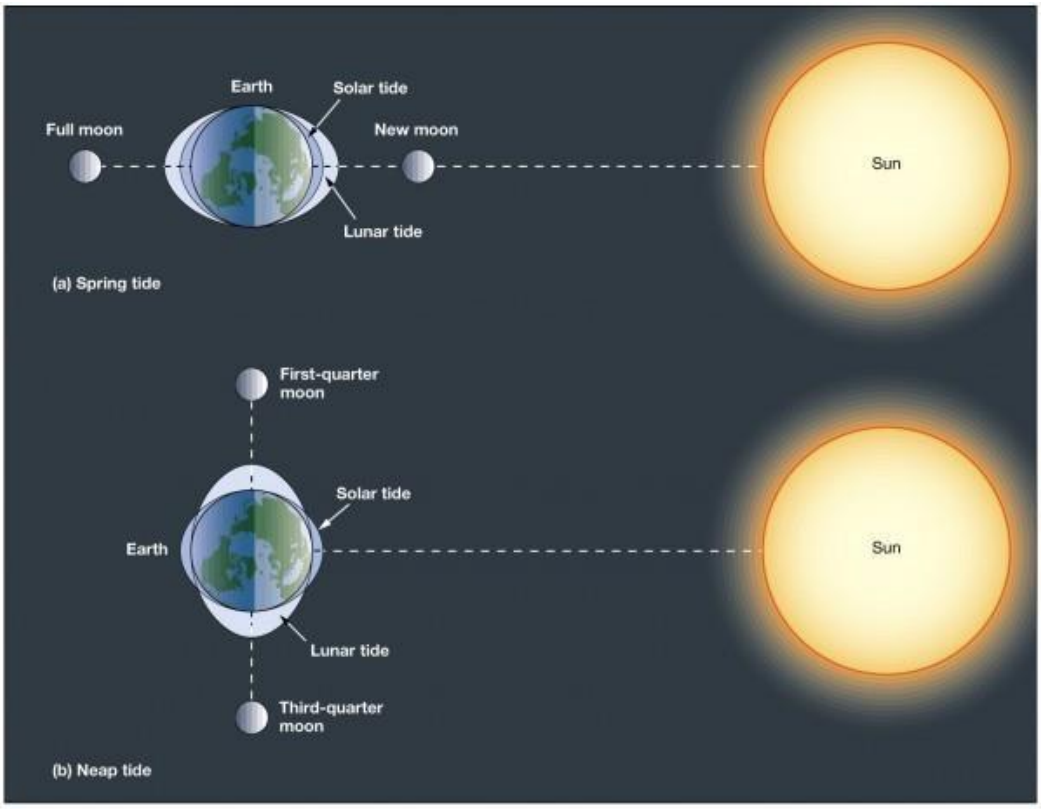
Pasang surut merupakan proses naik turunnya permukaan air laut secara periodik yang disebabkan karena gravitasional antara matahari, bulan, dan bumi (Saputra, 2018). Berdasarkan teori keseimbangan, faktor yang mempengaruhi terjadinya pasang surut adalah rotasi bumi pada sumbunya, revolusi bulan terhadap 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).

Dari sekian banyak benda-benda langit, hanya matahari dan bulan yang sangat mempengaruhi proses pembentukan pasang surut air laut melalui tiga gerakan utama yang menentukan pergerakan muka air laut di bumi (Zakaria, 2009), yaitu:

a. Revolusi bulan terhadap bumi, dimana orbitnya berbentuk elips dan memerlukan waktu 29,5 hari untuk menyelesaikan revolusinya.
b. Revolusi bumi terhadap matahari, dengan orbitnya berbentuk elips dan memerlukan waktu 365,25 hari.
c. Rotasi bumi yang memerlukan waktu 24 jam (23 jam, 56 menit, dan 4,091 detik).

Bulan mengikuti siklus sinodik dengan melalui berbagai fase, termasuk bulan baru, perempat pertama, perempat kedua, perempat ketiga, dan kembali ke fase bulan baru, yang berlangsung selama sekitar 29,5 hari. Saat bulan muncul di atas horizon, berpengaruh terhadap pasang surut yang menyebabkan keterlambatan sekitar 50 menit setiap harinya. Ketika bulan berada dalam fase bulan baru atau bulan purnama, pasang laut mencapai tinggi tertinggi dan surut laut mencapai tingkat terendah, menyebabkan

perbedaan besar antara pasang dan surut laut. Keadaan ini disebut sebagai pasang tinggi (*spring tide*). Namun, saat bulan berada pada perempat pertama dan perempat kedua, bulan berada sekitar 90 derajat dari garis yang menghubungkan bumi dan matahari. Pada saat ini, gaya tarik bulan dan gaya tarik matahari saling meniadakan satu sama lain, sehingga pasang laut menjadi terendah dan surut laut mencapai tingkat tertinggi. Ini dikenal sebagai surut rendah (*neap tide*). (Kisnarti & Prasita, 2019)



Gambar 3. Posisi bulan, bumi, dan matahari pada kondisi: (a) pasang tinggi (*spring tide*) dan (b) surut rendah (*neap tide*). (Pearson Prentice Hall, Inc).

Pasang surut merupakan perubahan periodik dari permukaan air laut pada suatu tempat tertentu. Seperti halnya ombak, ritme perubahan pasang surut disepanjang mintakat pantai ini sudah diketahui sejak lama dan merupakan suatu proses alam yang mudah untuk diamati. Adanya variasi muka air laut (pasang surut) diakibatkan oleh posisi atau letak aksi gelombang panjang yang selalu bergerak atau berpindah, sehingga daerah pantai yang terserang gelombang panjang sangat luas. Apabila tinggi pasang surut cukup besar, volume air pasang yang masuk ke sungai sangat besar. Air tersebut akan berakumulasi dengan air dan hulu sungai. Pada waktu air surut, volume air yang sangat besar tersebut mengalir keluar dalam periode waktu tertentu yang tergantung pada tipe pasang surut (Triatmodjo, 1999).

Tipe pasang surut dapat ditentukan oleh frekuensi air pasang dengan air surut

setiap harinya. Pasang surut diperairan Indonesia menjadi empat tipe (Wismadi *et al.*, 2014), yaitu:

1. *Diurnal tide* (pasang surut harian tunggal), dimana suatu perairan mengalami satu kali pasang dan satu kali surut dalam satu hari.
2. *Semi diurnal tide* (pasang surut harian ganda), dimana suatu perairan mengalami dua kali pasang dan dua kali surut.
3. *ixed tide, prevailing diurnal* (pasang surut campuran condong harian tunggal), merupakan pasang surut yang tiap harinya terjadi satu kali pasang dan satu kali surut, namun terkadang juga dua kali pasang dan dua kali surut.
4. *Mixed tide, prevailing semidiurnal* (pasang surut campuran condong harian ganda), dimana pasang surut yang tiap harinya terjadi dua kali pasang dan dua kali surut, namun ada kalanya mengalami satu kali pasang dan satu kali surut.

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, secara matematis formula tersebut ditulis sebagai berikut:

$$F = \frac{O_1+K_1}{M_2+S_2} \tag{1.1}$$

Dimana:

F = bilangan *Formzhal*

O_1 = amplitudo komponen pasang surut tunggal utama yang disebabkan oleh gaya tarik bulan

K_1 = amplitudo komponen pasang surut tunggal utama 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 dikelompokkan 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

`

Pasang surut memiliki pengaruh yang penting dalam pengangkutan sedimen di perairan karena pasang surut dapat membangkitkan arus yang merupakan pergerakan massa air yang membawa material sedimen tersuspensi (Wibowo *et al.*, 2016). Pasang surut merupakan faktor lingkungan yang sangat penting yang mempengaruhi zona intertidal. Tenaga pasang surut dan arus merupakan sumber energi utama terjadinya proses turbulensi dan percampuran air di perairan pantai dan muara. Sumber ini memegang peranan penting dalam membawa benda-benda terlarut dan tersuspensi yang menyebabkan perubahan fisika, kimia dan biologi (Ramli *et al.*, 2017).

2.5.2 Arus Pasang Surut

Arus pasut adalah gerakan massa air laut secara periodik dari suatu wilayah ke wilayah yang lain secara mendatar maupun horizontal, berupa arus permukaan atau arus dasar dan dapat berupa gerakan massa air secara vertikal dari lapisan air bagian bawah menuju lapisan atas atau sebaliknya. Terdapat dua gaya yang berpengaruh terhadap arus, yaitu gaya primer dan gaya sekunder. Gaya primer terdiri atas gravitasi, gesekan angin (*wind stress*), gaya dorong ke atas dan ke bawah (*bouyancy*), dan tekanan atmosfir. Gaya ini berpengaruh dalam menggerakkan arus dan menentukan kecepatannya. Gaya sekunder terdiri atas gaya coriolis dan gesekan air laut itu sendiri yang dapat mempengaruhi arah gerakan dan kondisi arus (Samskerta *et al.*, 2011).

Aliran massa air yang diukur dari kecepatan aliran (*velocity*) atau yang sering disebut sebagai arus (*current*) dinyatakan dalam satuan meter/detik. Aliran biasanya cenderung mengarah ke arah laut khususnya pada saat air surut, tetapi dapat pula mengarah pada arah sebaliknya pada saat air pasang, biasanya disebut *back water*. Arah aliran pada daerah muara di bagian atas dapat berbeda dengan daerah di bagian bawah, begitu pula arah pada satu sisi tepi sungai dapat berlawanan dibandingkan pada sisi sungai yang lainnya. Demikian juga pada kombinasi perbedaan arah yang sangat kompleks, baik pada penampang vertikal maupun lateral (Ongkosongo, 2010).

Luas perairan estuaria yang pada umumnya sempit dan dangkal dapat meminimalisir pengaruh ombak dari laut yang masuk ke daerah estuaria secara cepat. Sehingga pada daerah estuaria memiliki arus air yang tenang. Arus di estuaria dipengaruhi oleh kegiatan pasang surut dan aliran sungai. Pada bagian hulu terjadi masukan air tawar yang terus menerus, kemudian sebagian air tawar ini bergerak ke hilir estuaria dan bercampur sedikit atau banyak dengan air laut. Sebagian besar air tersebut pada akhirnya akan mengalir keluar estuaria atau menguap untuk mengimbangi air berikutnya yang masuk di bagian hulu (Nybakken, 1988).

Arus pasang surut merupakan arus yang mendatar yang disebabkan atau dibangkitkan oleh pasang surut. Pada waktu pasang naik arus akan mengalir kearah pantai menyebabkan tertutupnya pantai oleh air laut atau yang disebut *flood tide*, sebaliknya pada saat surut disebut *webb tide* (Komar, 1976). Meskipun arus pasang surut tidak penting pengaruhnya pada laut terbuka, tetapi pasang surut dapat membangkitkan arus yang cukup kuat pada daerah teluk selat, estuari, sungai, dan tempat-tempat dangkal lainnya. Meskipun arus pasang surut bukan merupakan media utama proses erosi dan angkutan sedimen, tetapi bila pasang surut ini terjadi pada suatu *inlet* yang sempit, maka arus pasang surut dapat menjadi masalah yang cukup serius, karena dapat menjadikan *inlet* tersebut tertutup (Dahuri *et al.*, 1996).

Menurut Dahuri *et al.*, (1996) gelombang yang datang menuju pantai dapat menimbulkan arus pantai (*nearshore current*) yang berpengaruh terhadap proses sedimentas dipantai. Pola arus pantai ini ditentukan terutama oleh besarnya sudut yang dibentuk antara gelombang yang datang dengan garis pantai. Jika sudut datang itu cukup besar, maka akan terbentuk arus susur pantai (*longshore current*) yang disebabkan oleh perbedaan tekanan hidrostatik. Jika sudut datang gelombang tersebut kecil atau sama dengan nol, maka akan terbentuk arus tolak pantai (*rip current*) dengan arah menjauh pantai disamping terbentuknya arus susur pantai.

2.5.3 Kedalaman

Batimetri adalah ilmu yang mempelajari kedalaman di bawah air dan studi tentang tiga dimensi lantai samudera. Sebuah peta batimetri umumnya menampilkan relief lantai atau daratan dengan garis kontour yang disebut kontur kedalaman (*depth contour* atau *isobath*) dan dapat memiliki informasi tambahan berupa informasi navigasi permukaan. Peta batimetri menggambarkan bentuk konfigurasi dasar lauy yang dinyatakan dengan angka-angka kedalaman dan garis-garis kedalaman. Peta batimetri dapat divisualiasikan dalam tampilan 2 dimensi (2D) maupun 3 dimensi (3D). Peta batimetri sangat berguna dalam melakukan pekerjaan di laut, seperti perencanaan bangunan pelindung pantai, studi proses morfologi pantai, pembangunan pelabuhan, dan lain-lain (Wahyuni, 2014).

Kedalaman perairan sangat menentukan tingkat pengendapan sedimen pada suatu wilayah, semakin dalam perairan maka akan mengalami pengendapan yang semakin lama pula. Jika kedalaman perairan tidak terlalu dalam maka pengendapan akan lebih cepat, terlepas jika pada kawasan tersebut arusnya tergolong lemah. Semua material sedimen termasuk material akan ditransportasi secara fisika sebagai material padat sebelum diendapkan. Dalam hal ini termasuk transportasi material-material yang berkembang atau tumbuh di dasar perairan sampai pada tempat pengendapan akhir sangat bergantung pada kondisi oseanografi pada perairan (Rifardi, 2012).

2.6 Pendekatan dengan Model Hidrodinamika

Sistem perairan pantai dan estuari adalah suatu sistem yang sangat kompleks dan sangat bergantung pada ruang dan waktu. Untuk mengetahui hubungan antar sejumlah variabel dan parameter, maka cara terbaik untuk mengkajinya adalah melalui pendekatan model (Sugianto, 2009), salah satunya dengan model matematik. Persamaan yang digunakan dalam model matematik, yaitu persamaan hidrodinamika untuk pola arus, sedangkan untuk sedimen melayang digunakan persamaan transpor sedimen.

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, 2008). Dalam mempelajari hidrodinamika dinyatakan dalam persamaan-persamaan. Persamaan hidrodinamika dalam pemodelan dua dimensi, yaitu persamaan kontinyuitas 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), diberikan oleh:

Persamaan gerak:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - f\bar{v} = -g\frac{\partial \varsigma}{\partial y} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho(h+\varsigma)} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - f\bar{u} = -g\frac{\partial \varsigma}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho(h+\varsigma)} \quad (2.2)$$

Dimana :

u, v = komponen vektor kecepatan pada sumbu x dan y (m/s) g = gravitasi (m/s^2)

ρ = densitas air (kg/m^3)

ς = elevasi permukaan air laut dari *Mean Sea Level*

f = gaya luar yang bekerja pada fluida

∂ = gradien fluida

h = kedalaman air (m)

τ_{sx}, τ_{sy} = gaya viskositas geser (*shear stress*) yang begerja tegak lurus terhadap arah aliran fluida

τ_{bx}, τ_{by} = gaya viskositas tekanan (pressure stress), yang bekerja sejajar dengan arah aliran fluida

Persamaan kontinuitas:

$$\frac{\partial}{\partial x}[(h+\varsigma)\bar{u}] + \frac{\partial}{\partial y}[(h+\varsigma)\bar{v}] + \frac{\partial \varsigma}{\partial t} = 0 \quad (2.3)$$

Dengan ketentuan:

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

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

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 di linierkan dinyatakan oleh:

Persamaan gerak:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - f\bar{v} = -g\frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{K\bar{u}}{h} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} - f\bar{u} = -g\frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{K\bar{v}}{h} \quad (2.5)$$

Persamaan kontinuitas:

$$\frac{\partial}{\partial x}(h\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\bar{v}) = -\frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (2.6)$$

Salah satu *software* model numerik yang digunakan untuk mengetahui karakteristik hidrodinamika adalah perangkat lunak MIKE 21. *Software* MIKE 21 merupakan perangkat lunak rekayasa profesional yang berisi sistem pemodelan yang komperehensif untuk program komputer *2D free surface flows*. MIKE 21 dapat digunakan untuk simulasi hidrolika dan fenomena terkait di sungai, danau, estuaria, teluk, pantai, dan laut. Program ini dikembangkan oleh Danish Hydraulic Institute (DHI) *Water and Environment* (DHI *Water and Environment*, 2007).

2.6.1 Modul Hidrodinamika

Modul MIKE 21 yang digunakan terdiri dari modul hidrodinamika dan modul *sand transport*. MIKE 21 hidrodinamika (HD) modul merupakan model matematik untuk menghitung perilaku hidrodinamika air terhadap berbagai macam fungsi gaya, seperti kondisi angin tertentu dan muka air yang sudah ditentukan pada *open model boundaries*. Modul ini mensimulasi perbedaan muka air dan arus dalam menghadapi berbagai fungsi gaya di danau, estuaria, dan pantai. MIKE 21 HD *Flow Model* (FM) merupakan suatu sistem modeling berbasis pada suatu pendekatan mesh yang fleksibel dan dikembangkan untuk aplikasi di dalam bidang oseanografi, rekayasa pantai, dan alam lingkungan muara sungai (DHI, 2017).

Pemodelan menggunakan modul MIKE 21 Hidrodinamika (HD) FM dibangun melalui model matematik secara numerik, dimana persamaan dasar pada model hidrodinamika adalah persamaan kekekalan massa dan kekekalan momentum. Persamaan persamaan akan diintegrasikan terhadap kedalaman untuk mengubah persamaan dari tiga dimensi menjadi dua dimensi. Model ini mensimulasikan arus *unsteady* (tidak stabil) dalam fluida satu lapisan (secara vertikal homogen) yang sudah

terdapat dalam menu MIKE 21. Persamaan berikut merupakan konversi massa dan momentum, menggambarkan aliran, dan perbedaan muka air (DHI, 2017):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \tag{2.7}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p^2}{h}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{pq}{h}\right) + gh\left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right) + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2.h^2} - \frac{1}{\rho w}\left[\frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{xy})\right] - \Omega q - fVV_x + \frac{h}{\rho w}\frac{\partial}{\partial x}(p_a) = 0 \tag{2.8}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q^2}{h}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{pq}{h}\right) + gh\left(\frac{\partial \zeta}{\partial y}\right) + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2.h^2} - \frac{1}{\rho w}\left[\frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{xy})\right] - \Omega q - fVV_y + \frac{h}{\rho w}\frac{\partial}{\partial y}(p_a) = 0 \tag{2.8}$$

Dengan:

H (x, y, z) = Kedalaman air (m)

d (x, y, z) = Kedalaman air dalam berbagai waktu (m)

ζ (x, y, z) = Elevasi permukaan (m)

p, q = *Flux density* dalam arah x dan y ($m^3/s/m$) = (uh, vh) = *Depth averaged velocity* dalam arah x dan y

ρw = Berat jenis air (kg/m^3)

x, y = Koordinat ruang (m)

C (x, y) = Tahanan Chezy ($m^{1/2}/s$)

g = Percepatan gravitasi bumi (9,81 m/s^2)

f(V) = Faktor gesekan angin

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ = Komponen *effective shear stress*

2.6.2 Modul Sand Transport (ST)

Salah satu metode yang digunakan dalam mengkaji proses sedimentasi yang terjadi di sungai (hulu-hilir) dan estuaria adalam pemodlen angkutan sedimen. Pemodelan angkutan sedimen merupakan proses pergerakan transpor sedimen menggunakan model numerik (matematika) yang terdiri dari model hidrodinamika dan model angkutan sedimen. Pemodelan angkutan sedimen dapat ditinjau melalui pendekatan perubahan kuantitas pada suatu lapisan ke lapisan berikutnya (Kusuda & Futawatari, 1992).

Modul *Sand Transport* (ST) merupakan aplikasi model dari angkutan sedimen non kohesif. Modul ini menghitung hasil dari pergerakan material non kohesif berdasarkan kondisi aliran di dalam modul hidrodinamik serta kondisi gelombang dari perhitungan gelombang (modul *spectral wave*). Pendekatan formula yang digunakan dalam modul sedimen transport adalah *Engelund-Hansen* model, *Van-Rijn* model, *Englund-Fredsoe* model, serta *Meyer-Peter-Muller* model. Formula yang digunakan tersebut memadukan

antara pengaruh arus dan gelombang dalam pergerakan sedimen (DHI, 2017):

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{z\,(1+a-e^{z})}{e^{z}(z-1)+1}\left(\frac{1}{\overline{U_0}}\right)\left(\frac{dU_0}{dt}\right) + \frac{30K}{k}\left(\frac{\sqrt{K^2U_0^2+z^2U_{f0}^2+2Kz\;U_{f0}\;U_0\;cosy}}{e^{z}(z-1)+1}\right) \quad (2.9)$$

Dimana:

K = Konstanta *Von Karman*

t = Waktu

z = Parameter tebal boundary layer

U_0 = Kecepatan orbit dasar gelombang terdekat

U_{f0} = Kecepatan geser arus dalam lapisan batas gelombang

γ = Sudut antara arus dan gelombang

k = Kekesaran dasar permukaan 2.5 D50 untuk lapisan *plane bed* dan 2.5 D50 + kg untuk *ripple covered ved*

D50 = Rata-rata ukuran diameter

k_R = *Ripple* yang berkaitan dengan kekasaran

Nilai transport sedimen vertikal dalam modul *sand transport* dihitung menggunakan persamaan difusi, sebagai berikut:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = w\frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial y}\right) \quad (2.10)$$

Dimana:

ε_S = Koefisien turbulensi

c = Konsentrasi sedimen tersuspensi

w = Kecepatan vertikal