

**DISERTASI**

**MODEL PENGATURAN PENAMPANG SALURAN UNTUK  
REKAYASA PEMELIHARAAN ALUR DI MUARA**

*The Regulation Model Of Cross-Sectional For Maintaining  
Channel In The River Mouth*

**IMAM ROHANI**

**D013181004**



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL  
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

**PENGAJUAN DISERTASI**

**MODEL PENGATURAN PENAMPANG SALURAN UNTUK  
REKAYASA PEMELIHARAAN ALUR DI MUARA**

Disertasi  
sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar doktor  
Program Studi Ilmu Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

**IMAM ROHANI**  
**D013181004**

kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

**DISERTASI**  
**MODEL PENGATURAN PENAMPANG SALURAN UNTUK**  
**REKAYASA PEMELIHARAAN ALUR DI MUARA**

**IMAM ROHANI**  
**D013181004**

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk  
dalam rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Ilmu Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
pada tanggal 06 Desember 2023  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,  
Promotor



**Prof. Daeng Paroka, ST., MT., Ph.D**  
NIP. 19720118199802 1 001

Co-Promotor



**Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT., IPM**  
NIP. 196012311986091001

Co-Promotor



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

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



**Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST, MT, IPM, AER**  
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi  
S3 Ilmu Teknik Sipil



**Prof. Dr. Eng. Ir. Rita Irmawaty, ST, MT**  
NIP. 197206192000122001

## PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Imam Rohani  
Nomor mahasiswa : D013181004  
Program studi : S3 Ilmu Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul Model Pengaturan Penampang Saluran Untuk Rekayasa Pemeliharaan Alur Di Muara adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Prof. Daeng Paroka, ST., MT., Ph.D sebagai promotor, Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT sebagai Co-Promotor I dan Dr. Eng. Mukhsan Putra H., ST., MT sebagai Co-Promotor II . Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Jurnal *SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology*, Volume 71 Issue 10, October 2023, 305-313, <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V71I10P227> sebagai artikel dengan judul "The Regulate Section Channel Model for Maintenance Channel in Estuary".

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, Desember 2023

Yang menyatakan



Imam Rohani

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT, atas rahmatnya sehingga disertasi ini dapat diselesaikan.

Gagasan utama penggelontoran (*flushing*) sedimen di muara dengan membuat sistem model pengaturan penampang saluran yang diharapkan dapat menggelontorkan sedimennya sendiri.

Bukanlah hal yang mudah untuk mewujudkan gagasan tersebut dalam sebuah tulisan disertasi, namun berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka disertasi ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Prof. Daeng Paroka, ST., MT., Ph.D sebagai promotor, Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT sebagai co-promotor-1, dan Dr. Eng. Mukhsan Putra H., ST., MT sebagai co-promotor-2.
2. Prof. Dr. Ir. H. Muh.Saleh Pallu, M. Eng, Prof. Dr. Eng. Farouk Maricar, MT, Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Tahir Lopa, MT, Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, ST., MT sebagai komisi tim penguji dan Dr. Eng. Mochammad Meddy Danial, S.T., M.T., IPM sebagai penguji eksternal
3. Rektor universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Dekan Fakultas Teknik, Kaprodi S3 Ilmu Teknik Sipil yang telah memfasilitasi kami dalam menempuh program doktor serta para dosen dan rekan sejawat mahasiswa dalam tim penelitian.
4. Kepala laboratorium teknik sungai, dan teknik pantai departemen Teknik sipil Unhas, atas fasilitas dan peralatan laboratorium dalam penelitian ini.
5. Kementerian Pendidikan Kebudayaan, Riset dan Teknologi Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi. Saya mengucapkan terima kasih atas beasiswa Beasiswa Afirmasi PTNB yang diberikan selama menempuh program pendidikan doktor.

Akhirnya, kepada kedua orang tua tercinta saya haturkan terima kasih dan sembah, sujud atas doa, pengorbanan dan memotivasi mereka yang tak terhingga selama studi. Penghargaan yang besar pula kami sampaikan kepada seluruh keluarga dan rekan sejawat atas motivasi dan dukungannya.

Penulis,

Imam Rohani

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN PENGAJUAN	ii
PERSETUJUAN DISERTASI	iii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	6
1.3. Tujuan Penelitian	7
1.4. Manfaat Penelitian	7
1.5. Batasan Masalah	8
1.6. Kebaruan/ Novelty	8
1.7. Penelitian Terdahulu	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	14
2.1. Penelitian Sebelumnya	14
2.2. Landasan Teori	14

2.2.1. Muara Sungai	14
a. Muara dominasi gelombang	15
b. Muara dominasi debit	16
c. Muara dominasi pasang surut	17
d. Klasifikasi Morfologi Muara	18
2.2.2. Tipe Pemeliharaan Alur muara	21
a. Pemeliharaan preventif	21
b. Pemeliharaan korektif.	21
2.2.3. Metode Pemeliharaan Alur Sungai	22
a. Pengerukan (dredging)	22
b. Struktur ambang bawah air	22
c. Konstruksi jetty dan breakwater	23
d. Fluidisasi	24
2.2.4. Aliran air Melalui Penampang	25
a. Rumus Chezy	25
b. Rumus Manning	26
c. Rumus Strickler	27
d. Debit pada pelimpah segitiga	27
e. Debit maksimum	27
f. Kemiringan kritis	28
g. Menentukan ukuran penampang	28
2.2.5. Perilaku Aliran	29
a. Bilangan Froude	29
b. Bilangan Reynold	30
2.2.6. Distribusi Kecepatan	32

2.2.7. Gaya Pada Gerak Partikel Sedimen	33
2.2.8. Sifat Sedimen Gabungan	35
a. Distribusi Ukuran Butir	35
2.2.9. Transportasi Sedimen Dasar (Bedload)	37
a. Metode Meyer Peter Muller (MPM)	39
b. Metode Einstein	40
c. Metode DuBoys	40
2.2.10. Penggelontoran Sedimen di Muara	42
a. Kapasitas transport penggelontoran aliran	42
b. Perhitungan kecepatan aliran dan debit air	42
c. Perhitungan besarnya debit dan konsentrasi sedimen	43
d. Perhitungan kecepatan aliran di dalam waduk	44
2.3. Hukum Dasar Model	45
2.3.1. Similaritas Geometris	45
2.3.2. Similaritas Kinematis	46
a. Skala kecepatan	46
b. Skala debit	46
c. Skala waktu	46
d. Skala percepatan	47
2.3.3. Similaritas Dinamis	47
2.4. Skala Model	48
2.5. Skala Model Distorsi	48
2.6. Hipotesis	51
2.7. Metode Analisis Bilangan Tak Berdimensi	52
2.8. Kerangka Pikir	53



BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	55
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	55
3.2	Jenis dan Sumber Data Penelitian	55
3.2.1	Jenis Penelitian	55
3.2.2	Sumber Data Penelitian	55
3.3	Alat dan Bahan Penelitian	55
3.3.1.	Alat	55
3.3.2.	Bahan	56
3.4	Variabel Penelitian	57
3.5	Skala dan Perancangan Model	57
3.5.1.	Penentuan Skala di Model	57
3.5.2.	Rancangan model	60
3.6	Prosedur Pengambilan Data	62
3.7	Bagan Alir Proses Penelitian Laboratorium dan Analisa Data	65
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	67
4.1.	Hasil Penelitian	67
4.1.1.	Data Laboratorium	67
a.	Data Geometri Penampang	67
b.	Data debit aliran	68
c.	Data pasang surut	68
d.	Data tinggi muka air	69
e.	Data kecepatan	70
f.	Data karakteristik sedimen	72
4.1.2.	Verifikasi Data	72
4.2.	Analisa Bilangan Tak Berdimensi	73

4.3. Pembahasan	77
4.3.1. Angka Froud dan Angka Reynold	77
4.3.2. Pengaruh Debit Terhadap Kecepatan Aliran	78
4.3.3. Pengaruh Tinggi Muka Air Pasang Surut Terhadap Kecepatan Aliran	81
4.3.4. Profil Kecepatan Aliran Arah Longitudinal.	84
4.3.5. Pengaruh Pengaturan Penampang Muara Terhadap Penggelontoran Sedimen	86
a. Pengaruh lebar penampang relatif terhadap rasio debit sedimen tergelontor	86
b. Pengaruh tinggi penampang relatif terhadap rasio debit sedimen tergelontor	87
c. Pengaruh bilangan Reynold ( $Re$ ) terhadap rasio debit sedimen tergelontor	88
d. Pengaruh periode waktu pasang surut relatif terhadap rasio debit sedimen tergelontor	89
4.3.6. Persamaan Penggelontoran Sedimen	90
4.3.7. Pola Penggelontoran Sedimen	90
a. Penampang segiempat	91
b. Penampang komposit	93
4.3.8. Perbandingan Penggelontoran Sedimen di Muara	95
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	97
5.1. Kesimpulan	97
5.2. Saran	98
DAFTAR PUSTAKA	99

## ABSTRACT

**IMAM ROHANI.** *The Regulation Model Of Cross-Sectional For Maintaining Channel In The River Mouth* (supervised by **Daeng Paroka, Muhammad Arsyad Thaha, Mukhsan Putra H**)

River estuaries play an important role apart from being the gateway for channeling floods to the sea, as well as being a water transportation channel. Shallowing, narrowing or displacement and closure of channels due to sedimentation have become serious problems that generally occur in estuary ports. So far, Treatment has been handled with training jetty, dredging, underwater sill and fluidization construction. Sediment flushing construction with regulation model of cross-sectional of river mouth, which at its flow can flush out sediment (*self flushing*) could be an alternative treatment option in estuaries. The parameters that influence this research are section parameters, flow parameters and sediment parameters formulated in the equation  $Q_s = f(b, b^*, h, h^*, u, t, Q, g, \rho_w, \mu, \rho_s)$ . The research used was experimental at Laboratory using a distorted model with a vertical scale of 1:20 and a horizontal scale of 1:150. It is found that the velocity increases as the flow discharge increases, and the higher the water level elevation causes the flow velocity to be smaller and vice versa. The velocity profile in the longitudinal direction varies, and tends to be greater towards the mouth of the river. By using the Buckingham method, we obtain dimensionless parameters. The influence of the parameters, the greater the value of the relative cross-sectional width, the relative cross-sectional height, the relative tidal period, causes the sediment discharge ratio to become smaller, while the larger the Reynolds number (Re), the greater the sediment discharge ratio. The flushing pattern in a rectangular cross-section, with a smaller relative cross-sectional width, causes sediment deposition from the upstream part and scouring downstream of the river mouth, while a composite cross-section with a relatively small cross-sectional width actually causes greater scouring in the upstream area of the river mouth. The equation for sediment flushing in the regulate sectional model is obtained  $\frac{Q_s}{Q} = -0.0004232 \frac{b^*}{b} - 0.0000112 \frac{h^*}{h} + 0.0000023 \frac{\rho_w u h}{\mu} + 0.0015344 T \sqrt{\frac{g}{h}} - 0.0023975 \frac{\rho_s}{\rho_w}$ .

**Key word** : cross-sectional regulation, section, flushing, sediment, estuary

## ABSTRAK

**IMAM ROHANI.** Model Pengaturan Penampang Saluran Untuk Rekayasa Pemeliharaan Alur Di Muara (dibimbing oleh **Daeng Paroka, Muhammad Arsyad Thaha, Mukhsan Putra H**)

Muara sungai mempunyai peranan penting selain sebagai saluran penyalur air banjir ke laut juga dapat dimanfaatkan untuk transportasi air. Pendangkalan, penyempitan atau perpindahan dan penutupan saluran muara akibat sedimentasi merupakan permasalahan yang umumnya terjadi di pelabuhan muara. Selama ini penanganannya dilakukan dengan pembangunan jetty, pengerukan, struktur bawah air, dan fluidisasi. Bangunan *flushing* sedimen dengan model sistem pengaturan penampang muara, yang dengan kecepatannya dapat menggelontorkan sedimen (*self flushing*) dapat menjadi alternatif pilihan penanganan di muara. Parameter yang berpengaruh meliputi parameter penampang, parameter aliran dan parameter sedimen dinyatakan dalam hubungan persamaan  $Q_s = f(b, b^*, h, h^*, u, T, Q, g, \rho_w, \mu, \rho_s)$ . Penelitian yang digunakan adalah penelitian eksperimental di laboratorium menggunakan model terdistorsi dengan skala vertikal 1:20 dan skala horizontal 1:150. Diperoleh, kecepatan aliran meningkat seiring peningkatan debit aliran, dan semakin tinggi elevasi muka air menyebabkan kecepatan aliran semakin kecil dan sebaliknya. Profil kecepatan aliran arah longitudinal bervariasi, dan cenderung semakin besar ke arah mulut muara. Dengan menggunakan metode Buckingham diperoleh parameter tak berdimensi. Pengaruh parameter, semakin besar nilai lebar penampang relatif tinggi penampang relatif, periode pasang surut relatif menyebabkan rasio debit sedimen yang semakin kecil, sedangkan bilangan Reynold ( $Re$ ) yang semakin besar menghasilkan rasio debit sedimen yang semakin besar pula. Pola penggelontoran pada penampang segiempat, lebar penampang relatif yang semakin kecil terjadi deposisi sedimen dari bagian hulu dan gerusan ke hilir muara, sedangkan penampang komposit dengan lebar penampang relatif yang terlalu kecil justru terjadi gerusan lebih besar di area hulu muara. Persamaan penggelontoran sedimen pada model pengaturan penampang diperoleh  $\frac{Q_s}{Q} = -0.000037 \frac{b^*}{b} - 0.000238 \frac{h^*}{h} + 0.000002 \frac{\rho_w u h}{\mu} + 0.001725 \frac{t \cdot \sqrt{g}}{\sqrt{h}} - 0.002812 \frac{\rho_s}{\rho_w}$

**Kata Kunci :** pengaturan penampang, penggelontoran, sedimen, muara

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Muara sungai mempunyai peranan penting selain sebagai penyalur banjir ke laut, namun juga digunakan untuk transportasi air. Kapal berlayar keluar masuk dermaga yang terletak di sungai, pelayaran juga menghubungkan daerah pedalaman yang terletak di hulu dengan kota yang terletak di muara sungai atau daerah pantai. Banyak daerah di Indonesia yang menjadikan sungai sebagai jalur pelayaran yang vital bagi penduduknya untuk memenuhi kebutuhan pergerakannya, terutama untuk angkutan umum, perdagangan, perikanan, industri, pertambangan dan lain sebagainya. Alur pelayaran di pelabuhan berfungsi sebagai jalur kapal menuju atau meninggalkan kolam pelabuhan. Kapasitas saluran ditentukan oleh kedalaman dan lebarnya, yang ditentukan berdasarkan ukuran dan jumlah kapal yang akan menggunakannya. Agar alur pelayaran dapat memberikan pelayanan yang berkelanjutan, dimensi saluran perlu dipelihara secara rutin, terutama di daerah dengan tingkat sedimentasi yang tinggi.

Pendangkalan, penyempitan, pergeseran dan penyumbatan saluran akibat sedimentasi menjadi permasalahan yang umumnya terjadi di pelabuhan muara. Foto pada Gambar 1 dan 2 menunjukkan contoh kasus penyempitan dan penutupan saluran yang terjadi di China dan di Indonesia. Akibat dari bencana banjir yang terjadi di hulu muara, debit sungai tidak leluasa dialirkan ke laut. Pada pelabuhan muara, kapal kesulitan memasuki area kolam pelabuhan atau terjebak di hulu muara dan tidak dapat keluar ketika air sudah surut. Gambar 3 menunjukkan contoh kasus pendangkalan yang terjadi di Pelabuhan Karangantu Serang, Banten (2018) saat air surut.



**Gambar 1** Sedimentasi Sungai Yangtze, Cina (Catherine Seavitt, 2013)



**Gambar 2** Foto citra satelit sungai saro, Kab. Takalar

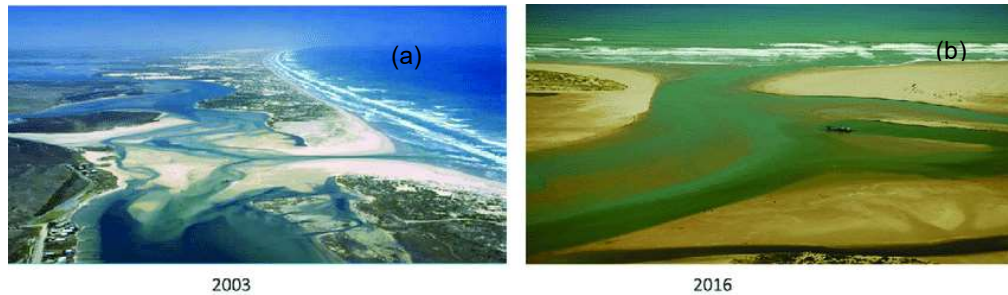
Selain itu, alur tersebut menimbulkan masalah tambahan karena kinerja saluran kantong lumpur yang buruk pada bangunan intake di hulu sungai dan kapasitas tampung waduk yang menurun. Performansi penggelontoran dipengaruhi oleh kecepatan atau debit aliran yang dapat diatur melalui pembukaan pintu. Namun, ada kondisi lapangan tertentu di mana mencapai kecepatan aliran menjadi sulit, sehingga penggelontoran tidak berjalan sepenuhnya. Gerak memutar kapal sangat dipengaruhi oleh variasi lebar garis air dengan memperhatikan stabilitas dan gesekan dasar air (Paroka & Asri, 2013).

Sebagian besar, sedimentasi di muara terjadi di sungai yang membawa sedimen dengan debit yang berubah-ubah (besar pada musim hujan dan kecil pada musim kemarau). Jika sedimen diangkut di sepanjang pantai, yang dikenal sebagai longshore sediment, jumlah sedimen di muara akan menurun, yang dapat menyebabkan aliran di mulut pelabuhan muara terganggu.



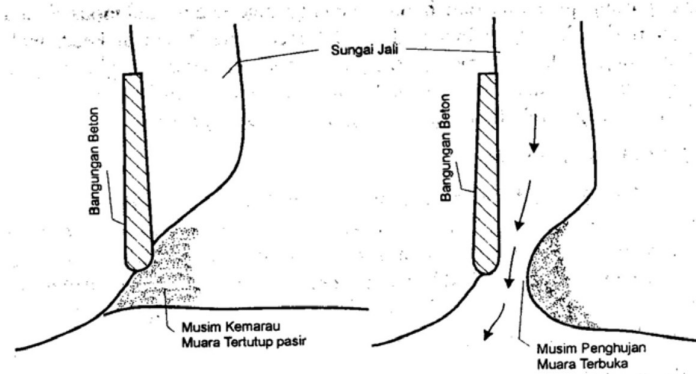
**Gambar 3** Pendangkalan di Pelabuhan Karangantu  
(<https://www.antaraneews.com>, 2018)

Sifat sedimen di dasar, aliran sungai, dan hidrodinamika pantai memengaruhi pola sedimentasi dan transpor. Adanya lidah pasir menyebabkan perubahan dan perpindahan alur, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



**Gambar 4** Muara Sungai Murray, Australia pada tahun 2003 dan 2016, (Ftse, 2017)

Gambar 1.4 (a) merupakan kondisi muara tahun 2003 dan Gambar 1.4 (b) merupakan kondisi yang terjadi pada tahun 2016. Contoh kasus lain seperti di Sungai Jali, Kutoarjo, meskipun muara sungai tersebut telah dilengkapi dengan beton. tanggul, muara ditutup pada musim kemarau, seperti terlihat pada Gambar 5.

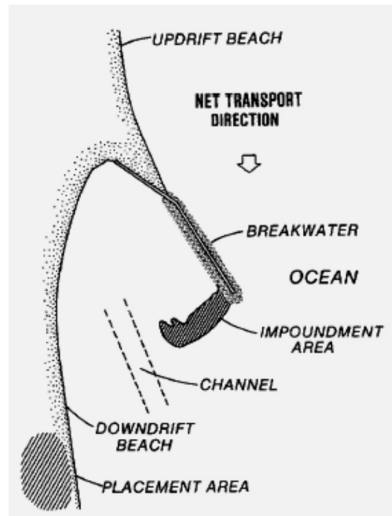


**Gambar 5** Perubahan musim di muara Sungai Jali (Triatmodjo, 1999)

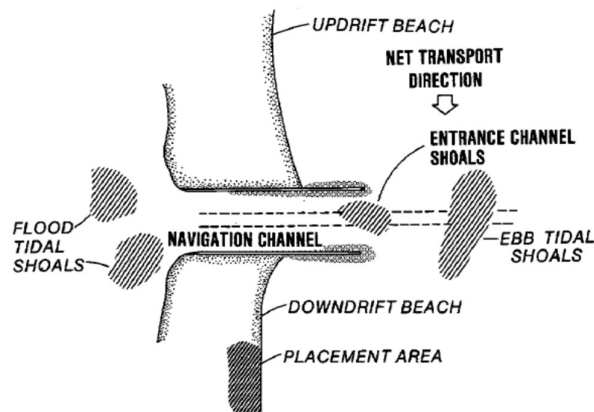
Sedimentasi pada alur pelayaran atau pada mulut pelabuhan muara dapat mengurangi kedalaman saluran sehingga menyulitkan kapal untuk berlabuh atau berlabuh di kolam pelabuhan. Gambar 6 merupakan contoh yang menunjukkan terbentuknya lidah pasir pada ujung struktur breakwater. Jika laju angkutan sedimen di sepanjang pantai tidak berubah, maka lidah pasir akan berkembang dan memotong jalur pelayaran (saluran) dan masuk ke kawasan pelabuhan. Pada pantai yang dominan oleh gelombang, penanganan sedimentasi saluran dengan menggunakan jetty terkadang kurang memuaskan karena umumnya terjadi



pendangkalan bahkan penutupan saluran. Penyebabnya mungkin karena jetty yang kurang panjangnya dan/ atau aliran sungai yang lemah. Contoh kasusnya dapat dilihat pada Gambar 7. Biaya pemeliharaan saluran cukup besar jika dilakukan pengerukan rutin (tahunan). Misalnya, biaya pekerjaan pengerukan alur Sungai Kapuas di Pelabuhan Dwikora Pontianak sebesar Rp. 60 miliar/tahun (PontianakPost, 2020).



**Gambar 6** Terbentuknya lidah pasir yang terjadi pada alur pelayaran (Thaha, 2006)



**Gambar 7** Pendangkalan yang terjadi pada alur pelayaran yang didominasi oleh pasang surut air laut (Thaha, 2006)

Pendangkalan dan penyempitan saluran yang diakibatkan sedimen, umumnya penanganan dengan pembangunan jetty dan pengerukan sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia, No. 125 Tahun 2018, tentang Pengerukan dan Reklamasi serta pembangunan ambang bawah air. Melihat fenomena diatas, masih perlu adanya inovasi sistem pengelolaan muara sungai yang dapat bekerja lebih maksimal dan efisien. Bangunan penggelontor sedimen dengan model sistem pengaturan penampang muara yang dengan kecepatannya mampu mengeluarkan sedimen (*self flushing*) dapat menjadi alternatif solusi terhadap sedimentasi yang terjadi di muara.

(Thaha, 2006) Meneliti tentang Sistem Fluidisasi Untuk Rekayasa Pemeliharaan Alur, (Rosati et al., 2013) meneliti Inlet navigasi pantai, (Safari et al., 2014) meneliti efek bentuk penampang terhadap gerakan endap sedimen di dasar saluran, (Schindfessel et al., 2015) meneliti pengaruh bentuk penampang terhadap pola aliran dalam percabangan saluran terbuka, (Silveira et al., 2016) meneliti metode terintegrasi untuk design pengerukkan penampang optimal.

Beberapa penelitian diatas, menginspirasi penulis untuk membuat Model sistem pengaturan penampang muara, yang dengan kecepatannya dapat menggelontorkan sedimen. Dimana muara dengan dominasi gelombang, pasang surut, aliran sungai, atau campuran dari ketiga kondisi tersebut menyebabkan kecepatan menjadi lebih rendah dan terjadi endapan yang dapat mengurangi kinerja alur.

Sebagaimana rumus debit  $Q = A \cdot v$ , dengan *meminimize* penampang sesuai kebutuhan debit yang akan ada, maka diperoleh kecepatan rencana. Hipotesa awal penelitian, bahwa endapan dan pendangkalan di muara sungai dapat diatasi dengan mendesign kecepatan dengan pengaturan penampang saluran. Sehingga penulis tertarik untuk meneliti model pengaturan penampang untuk rekayasa pemeliharaan alur.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian yang telah dikemukakan pada latar belakang, maka permasalahan yang akan diteliti dalam penelitian ini adalah model pengaturan

penampang untuk rekayasa pemeliharaan alur dengan menggunakan pengujian model fisik, dengan rumusan masalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana karakteristik aliran pada sistem pengaturan penampang saluran dalam rekayasa pemeliharaan alur?
- b. Bagaimana pola penggelontoran sedimen pada sistem pengaturan penampang saluran dalam pemeliharaan alur?
- c. Bagaimana persamaan penggelontoran sedimen, model pengaturan penampang saluran dalam rekayasa pemeliharaan alur?

### **1.3. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan uraian rumusan masalah diatas, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Mengetahui karakteristik aliran pada sistem pengaturan penampang dalam rekayasa pemeliharaan alur
- b. Melakukan analisis pola penggelontoran sedimen pada sistem pengaturan penampang saluran dalam rekayasa pemeliharaan alur
- c. Mendapatkan bentuk persamaan penggelontoran sedimen, model pengaturan penampang saluran dalam rekayasa pemeliharaan alur.

### **1.4. Manfaat Penelitian**

Adapun Manfaat yang diharapkan dapat diperoleh dari penelitian yang ditinjau adalah :

- a. Hasil penelitian yang diperoleh dapat digunakan sebagai referensi sistem penampang yang mampu memelihara alurnya sendiri.
- b. Hasil penelitian menjadi alternatif dalam mendesign sistem penampang saluran untuk rekayasa pemeliharaan alur.
- c. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai pedoman pelaksanaan dilapangan, model sistem penampang saluran untuk rekayasa pemeliharaan alur
- d. Mendapatkan area penampang efektif alur/ saluran, sehingga turunannya dapat menghasilkan area daratan baru yang dapat dimanfaatkan.

### **1.5. Batasan Masalah**

Ruang lingkup dan batasan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Gelombang dan arus tidak dimodelkan.
- b. Sedimen yang ditinjau adalah sedimen dasar
- c. Pasang surut yang ditinjau hanya tinggi elevasi muka air
- d. Sedimen yang dimodelkan adalah pasir
- e. Kekasaran dinding saluran tidak ditinjau
- f. Kemiringan dasar rata (tidak bergelombang)
- g. Penampang yang ditinjau adalah penampang segiempat dan komposit

### **1.6. Kebaruan/ Novelti**

Kebaruan atau novelti yang diharapkan didapatkan dari penelitian ini adalah model sistem penampang untuk rekayasa pemeliharaan alur muara yang dengan kecepatannya dapat menggelontorkan sedimentasi.

### **1.7. Penelitian Terdahulu**

Bab ini memberikan gambaran mengenai beberapa penelitian terdahulu yang telah dilakukan terkait model penataan penampang untuk rekayasa pemeliharaan saluran. Beberapa penelitian sebelumnya disajikan dalam bentuk matriks, seperti terlihat pada tabel 1.

**Tabel 1** Matriks Penelitian Terdahulu

No	Thn	Nama Penulis	Judul	Sumber	Tujuan Penelitian	Persamaan Rencana riset	Perbedaan Rencana Riset
1	2006	Muhammad Arsyad Thaha	Sistem Fluidisasi Untuk Rekayasa Pemeliharaan Alur	Disertasi Universitas Gadjah Mada Yogyakarta	Fluidisasi pada sedimen dasar, debit dan tekanan hidraulik, prototip, kinerja alur	Kinerja alur	Metode rekayasanya
2	2013	Julie Dean Rosati et all	<i>Coastal Inlet Navigation Research In The U.S. Army Corps Of Engineers</i>	<i>Coastal Dynamics</i>	Pemodelan inlet pantai, shoaling alur navigasi, dan pengendalian sedimen	Kinerja alur	Pemodelan numerik
3	2017	Lucas Silveira, Et All.	<i>Integrated Method For Optimal Channel Dredging Design</i>	<i>Terra et Aqua   Number 146   March 2017</i>	Desain saluran, pemodelan hidrodinamik dan sedimentasi	Desain penampang	Untuk pengerukan
4	2014	Klaudia Horváth et all.	<i>Gray-Box Model of Inland Navigation Channel: Application to the Cuiuchy–Fontinettes Reach</i>	<i>Journal of Intelligent Systems 2014; 23(2): 183–199</i>	pemodelan alur navigasi	Kinerja alur	Metode rekayasanya
5	2014	Jun Zhu et all.	<i>Influences of Channel Deepening and Widening on the Tidal and Nontidal Circulations of Tampa Bay</i>	<i>Coastal and Estuarine Research Federation 2014</i>	menentukan efek pendalaman dan pelebaran saluran di muara.	Kinerja alur	Metode rekayasanya
6	2013	Michael Jesson; Mark Sterling; and John Bridgeman	<i>Modeling Flow in an Open Channel with Heterogeneous Bed Roughness</i>	<i>Journal Of Hydraulic Engineering © Asce / February 2013 / 195</i>	Simulasi fisik dan numerik aliran saluran terbuka di atas lapisan yang heterogen	Simulasi kinerja alur/ saluran	Metode rekayasanya
7	2011	Yousry mahmoud Ghazaw	<i>Design and analysis of a canal section for minimum water loss</i>	<i>Alexandria Engineering Journal (2011) 50,337–344</i>	menentukan dimensi saluran optimal untuk debit irigasi	Dimensi optimum saluran	penampangnya
8	2011	Donatella Termini* and Mafalda Piraino	<i>Experimental analysis of cross-sectional flow motion in a large amplitude meandering bend</i>	<i>Earth Surface Processes And Landforms Earth Surf. Process. Landforms 36, 244–256 (2011)</i>	Karakteristik aliran cross-sectional sepanjang tikungan berkelok-kelok.	Karakteristik penampang	lokasinya
9	2011	YOU Yong, PAN Huali, LIU Jinfeng, OU Guoqiang	<i>The Optimal Cross-section Design of the “Trapezoid-V” Shaped Drainage Canal of Viscous Debris Flow</i>	<i>Science Press and Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011</i>	Desain bentuk dan ukuran penampang untuk aliran debris	Dimensi optimum penampang	Material debris
10	2012	Thanh-Tung Tran, Jacobus van de Kreeke, Marcel J.F. Stive, Dirk-Jan R. Walstra	<i>Cross-sectional stability of tidal inlets: A comparison between numerical and empirical approaches</i>	<i>Elsevier, Coastal Engineering 60 (2012) 21–29</i>	Mensimulasikan evolusi inlet pada berbagai kondisi pasang dan gelombang.	Simulasi penampang aliran	Empirik dan numerik
11	2014	Mir-Jafar-Sadegh Safari, Mirali Mohammadi, Golezar Gilanizadehdizaj	<i>On the effect of cross sectional shape on incipient motion and</i>	<i>J. Hydrol. Hydromech., 62, 2014, 1, 75–81</i>	Efek bentuk cross-sectional, gerak dan pengendapan partikel dalam saluran.	Karakteristik penampang	saluran

Lanjutan tabel 1 Matriks Penelitian Terdahulu

No	Thn	Nama Penulis	Judul	Sumber	Tujuan Penelitian	Persamaan Rencana riset	Perbedaan Rencana Riset
			<i>deposition of sediments in fixed bed channels</i>				
12	2012	L. Zeng a, G.Q. Chen b, Z. Wub, Z. Li b, Y.H. Wua, P. Ji a	<i>Flow distribution and environmental dispersivity in a tidal wetland channel of rectangular cross-section</i>	<i>Elsevier, Commun Nonlinear Sci Numer Simulat 17 (2012) 4192–4209</i>	Analisis teoritis tentang distribusi aliran dan dispersivitas lingkungan untuk saluran pasang surut penampang persegi panjang.	Kinerja penampang	Teoritis
13	2015	Laurent Schindfessel, Stéphan Créëlle & Tom De Mulder	<i>Influence Of Cross-Sectional Shape On Flow Patterns In An Open-Channel Confluence</i>	<i>E-proceedings of the 36th IAHR</i>	Pengaruh penampang cabang 3 pertemuan 90 ° dengan dasar tetap dan variasi aliran subkritis	Kinerja penampang	Percabangan
14	2017	Laurent Schindfessel, Stéphan Créëlle & Tom De Mulder	<i>How Different Cross-Sectional Shapes Influence the Separation Zone of an Open-Channel Confluence</i>	<i>Asce, J. Hydraul. Eng., 2017, 143(9): 04017036</i>	Pengaruh bentuk penampang terhadap pola aliran dalam pertemuan 90 °.	Kinerja penampang	Percabangan
15	2012	Ian Townend	<i>The estimation of estuary dimensions using a simplified form model and the exogenous controls</i>	<i>Earth Surface Processes And Landforms Earth Surf. Process. Landforms (2012)</i>	Definisi kondisi keseimbangan muara, korelasi antara prisma pasang surut dan luas penampang saluran.	Kinerja penampang	Keseimbangan bentuk
16	2005	C. P. Stark	<i>A self-regulating model of bedrock river channel geometry</i>	<i>Geophysical Research Letters, Vol. 33, L04402</i>	Efek pelebaran, kemiringan, belokan, dan kedalaman	Kinerja penampang	Pemodelan dasar
17	2014	W.B. Langbein	<i>The Hydraulic Geometry Of A Shallow Estuar</i>	<i>Central Michigan University</i>	Geometri saluran pengaruh: a) gaya persatuan penampang dasar, dan b) gaya dalam sistem secara keseluruhan .	Geometri saluran	Teoritis
18	2015	D.S. van Maren n, T.van Kessel, K.Cronin, L. Sittoni	<i>The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration</i>	<i>Elsevier, Continental ShelfResearch95(2015)1–14</i>	Efek pendalaman saluran terhadap SSC menggunakan model numerik oleh pasang surut, gelombang dan salinitas.	Efek perubahan geometri	Model numerik
19	2014	S.A. Kantoush	<i>Influence of geometry shape factor on trapping and flushing efficiencies</i>	<i>Taylor &amp; Francis Group, Reservoir Sedimentation – Schleiss et al. (Eds)</i>	mengendalikan sedimen dalam reservoir dangkal, terhadap efek geometri pada endapan dan pembuangan sedimen	Efek geometri	di reservoir
20	2016	Parsaie, A., Najafian, S. & Yonesi, H.	<i>Flow discharge estimation in compound open channel using theoretical approaches</i>	<i>H. Sustain. Water Resour. Manag. (2016) 2: 359.</i>	Konseptual dan teoretis penampang gabungan untuk debit sungai.	Kinerja penampang	Untuk debit

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Penelitian Sebelumnya**

Pemeliharaan Alur menggunakan Sistem Fluidisasi menunjukkan terjadi perpindahan slurry di hilir dari pipa fluidisasi yang berpengaruh pada optimasi dari ukuran alur (Thaha, 2006). Penelitian *Inlet* navigasi pantai, merekomendasikan pengaturan sistem navigasi, memprioritaskan rehabilitasi struktur, dan mengurangi waktu dan biaya yang terkait dengan kegiatan O & M (Rosati et al., 2013). Efek bentuk penampang terhadap gerakan endap sedimen di dasar saluran, Hasilnya menunjukkan bahwa bentuk penampang merupakan faktor penting untuk menentukan kecepatan minimum untuk partikel tanpa mengendap (Safari et al., 2014). Pengaruh bentuk penampang terhadap pola aliran dalam percabangan saluran terbuka di lakukan pada penampang persegi, talang persegi dan trapesium menunjukkan bahwa zona pemisahan aliran berbeda, distribusi momentum yang masuk dan bentuk sudut pertemuan adalah penyebab utama dari pemisahan aliran (Schindfessel et al., 2015). Metode terintegrasi untuk design pengerukkan penampang optimal dengan simulasi numerik diperoleh memungkinkan pengurangan kedalaman pengerukan penampang hingga 3 m (Silveira et al., 2016).

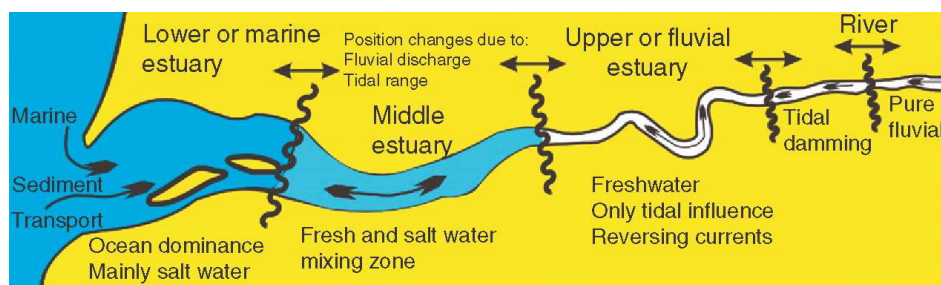
#### **2.2. Landasan Teori**

##### **2.2.1. Muara Sungai**

Muara merupakan bagian hilir sungai yang menghubungkan antara sungai dan laut. Permasalahan pada muara sungai umumnya terjadi pada muara sungai (river mouth) dan muara sungai. Muara sungai adalah bagian paling hilir dari muara yang dipengaruhi oleh siklus pasang surut. Namun, berdasarkan tinggi pasang surut, debit sungai, dan karakteristik muara (penampang aliran, dinding kekasaran, dll.), dampak pasang surut terhadap sirkulasi aliran di muara dapat mencapai daerah hulu sungai.

Muara sungai berfungsi sebagai saluran keluar atau pembuangan debit sungai, terutama saat banjir ke arah laut. Ini karena letaknya di bagian hilir, aliran sungai

lebih besar dibandingkan dengan tempat penampungan sungai di bagian hulu. Selain itu, muara juga membawa debit yang dihasilkan oleh pasang surut air laut, yang juga dapat lebih besar dari debit sungai. Muara sungai harus cukup lebar dan dalam untuk menampung aliran sesuai dengan fungsinya. Salah satu masalah yang sering terjadi adalah banyaknya sedimen di muara sungai, yang membuat aliran terlihat kecil dan dapat mengganggu aliran menuju laut. Kurangnya aliran ini dapat menyebabkan banjir di hulu muara. (Triatmodjo, 1999).



**Gambar 8** Skematis struktur muara. Batas jangkauan antara air laut dapat berubah posisi tergantung pada debit sungai dan pasang surut (Perillo & Piccolo, 2012)

Berdasarkan gambar 8, interaksi antara sungai dan pasang surut, sebuah muara dapat dibagi dalam tiga sektor: (1) lautan, muara bawah yang didominasi oleh pasang surut dan air asin; (2) muara tengah, dimana dominasi diberikan oleh pencampuran air tawar dan air asin dalam proporsi yang berbeda; dan (3) muara bagian atas dan fluvial dimana hanya ada air tawar yang terkena dampak pasang surut.

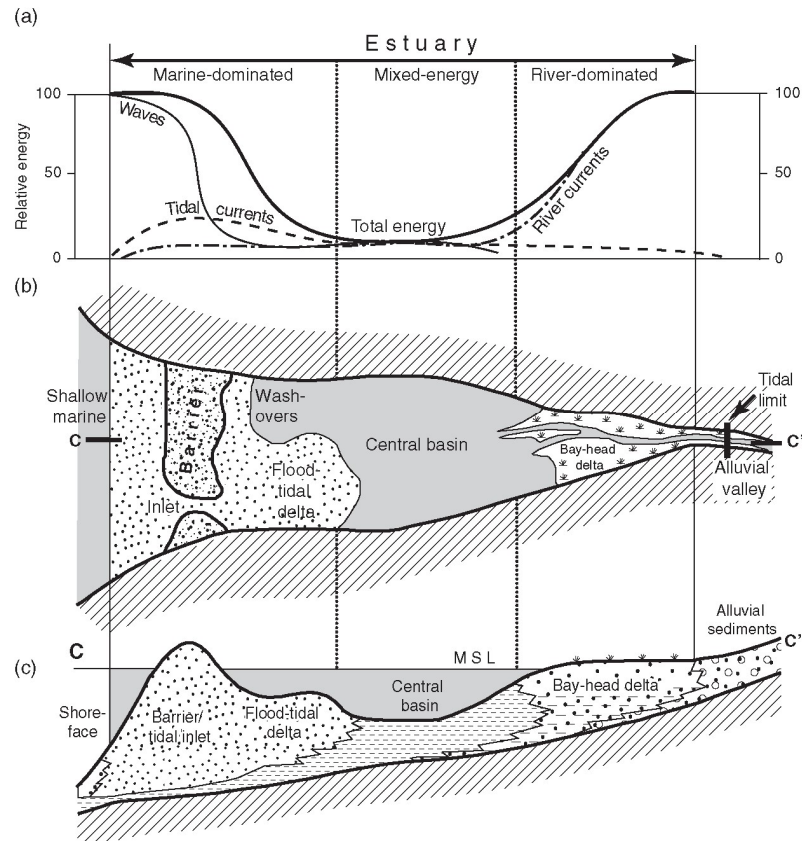
Menurut (Triatmodjo, 1999). muara sungai biasanya dapat dibagi menjadi tiga berdasarkan pengaruh yang paling dominan. Gelombang laut, debit sungai, dan pasang surut adalah ketiga faktor tersebut, meskipun masing-masing dapat berpengaruh secara bersamaan.

a. Muara dominasi gelombang

Apabila debit sungai kecil, kecepatan aliran tidak mampu mengalirkan sedimen, sehingga muara sungai tertutup dengan sedimen. Gelombang laut yang besar dapat mengangkat sedimen dari laut menuju muara, menyebabkan sedimen.



Jika debit banjir dari aliran sungai tidak sampai ke laut dengan cepat, itu akan menjadi masalah juga saat musim hujan. Akibatnya, banjir dapat terjadi di daerah hulu muara jika debit aliran sungai cukup besar sepanjang tahun, kecepatan aliran dapat menghancurkan sedimen, memungkinkan muara sungai tetap terbuka. Gambar 9 menunjukkan konsep estuari yang didominasi oleh gelombang.



**Gambar 9** Model konsep muara yang didominasi gelombang. (a) Rezim energi. (B) Bentuk morfologi. (c) Penampang terhadap MSL. (FitzGerald et al., 2015)

b. Muara dominasi debit

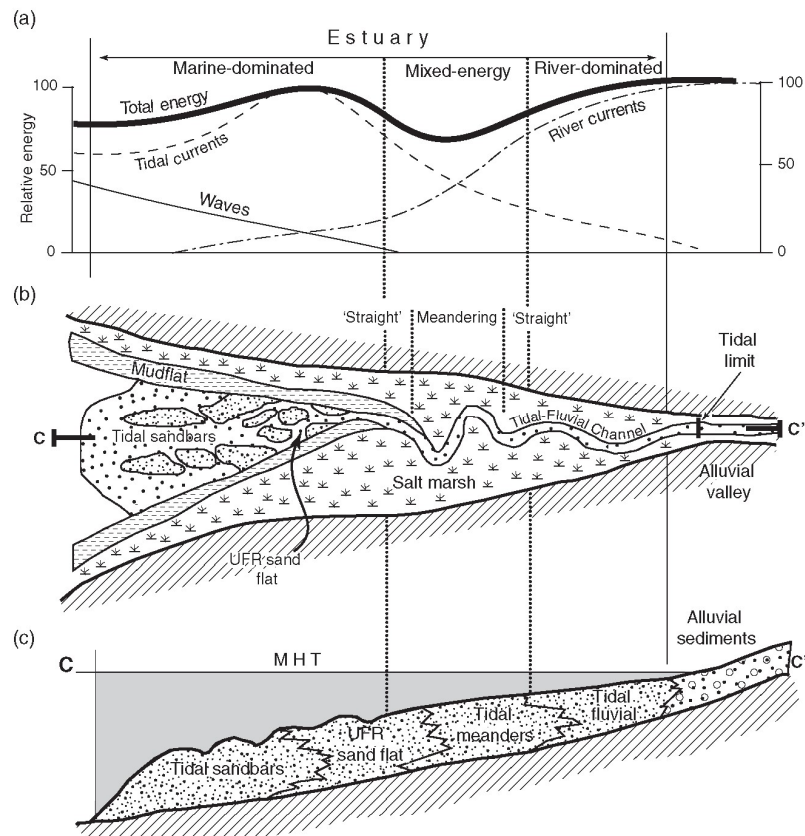
Muara sungai jenis ini terjadi ketika debit sepanjang tahun cukup besar meskipun gelombang laut tidak terlalu besar. Sungai dengan debit tinggi dapat mengangkut sedimen yang lebih besar dari wilayah hulu. Sesampainya di muara, sedimen yang terkandung terdiri dari sedimen tersuspensi dengan partikel yang sangat kecil, kira-kira berukuran mikro. Dibandingkan dengan gaya gravitasi, gaya tarik-menarik dan tolak-menolak, sifat sedimen ini lebih bergantung pada gaya

permukaan. Gaya tolak menolak antar partikel akan berkurang, dan partikel akan bergabung membentuk flokkon yang diameternya lebih besar dari partikel individu, ketika salinitas air berkisar antara 1 dan 3‰. Berkumpulnya partikel-partikel ini terjadi saat kecepatan sedimen meningkat (Triatmodjo, 1999).

Pada saat air surut, sedimen terdorong menuju muara dan dibawa ke laut. Pada titik balik ini, kecepatan aliran kecil, sebagian suspensi mengendap. Saat air pasang, kecepatan aliran meningkat, dan sebagian sedimen yang tersuspensi dari laut kembali ke sungai untuk bertemu dengan sedimen dari hulu. Pada saat air surut, kecepatan aliran meningkat, sehingga sebagian dari sedimen yang telah diendapkan dapat tersapu keluar dari saluran sungai. Akibatnya, jumlah sedimen yang terendapkan dalam satu siklus pasang surut lebih besar daripada yang tererosi. Ini menyebabkan endapan di bagian depan muara, yang pada akhirnya dapat membentuk delta.

c. Muara dominasi pasang surut

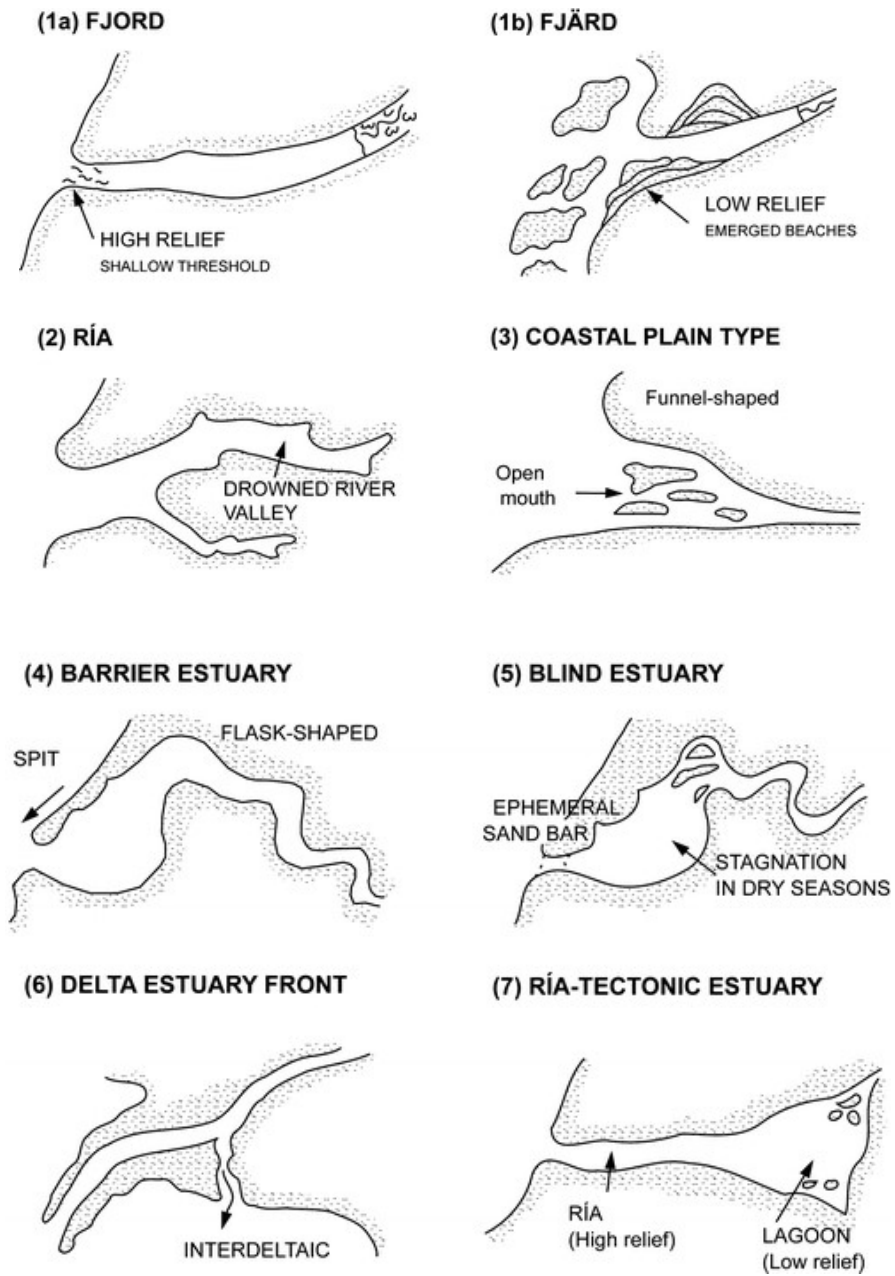
Air laut masuk ke sungai dengan debit yang cukup besar di daerah muara dengan siklus pasang surut tinggi. Air ini akan terakumulasi dengan air tawar dari hulu sungai dan akan mengalir kembali ke sungai dalam jangka waktu tertentu, tergantung pada jenis pasang surut yang terjadi. Oleh karena itu, kecepatan arus pada saat air surut sangat tinggi dan memiliki potensi untuk membentuk muara sungai. Pada akhirnya, muara sungai ini akan berbentuk seperti lonceng. seperti yang ditunjukkan pada gambar 10.



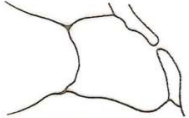
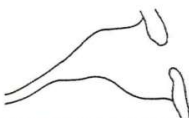
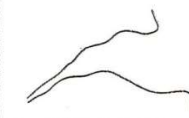
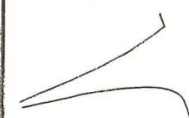
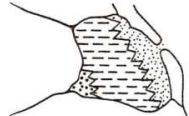
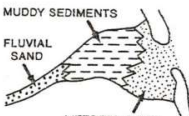
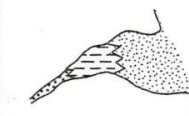
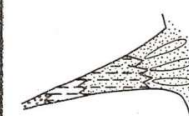
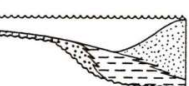
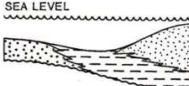
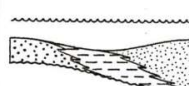
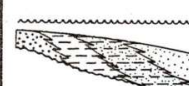
**Gambar 10** Model konsep muara yang didominasi oleh pasang surut. (a) Rezim energi. (B) bentuk morfologi. (c) Penampang terhadap MHT (FitzGerald et al., 2015)

d. Klasifikasi Morfologi Muara

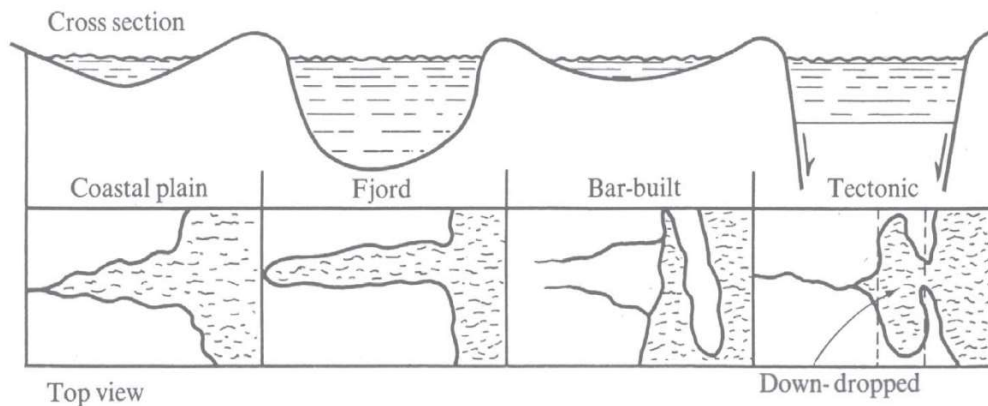
klasifikasi harus membatasi diri pada identifikasi sejumlah tipe dasar yang dapat dengan mudah diidentifikasi berdasarkan beberapa parameter karakteristik (menerima bahwa, pada kenyataannya, akan ada banyak transisi antara, dan subdivisi dalam, klasifikasi dasar) . Pada prinsipnya, kondisi tersebut menyatakan bahwa semakin besar jumlah tipe dasar, semakin membingungkan gambar. Dalam konteks geotektonik-morfologis, klasifikasi yang sering dipergunakan yang memenuhi kriteria kesederhanaan, berikut klasifikasi muara seperti ditunjukkan pada Gambar 11-13.



**Gambar 11** Tipe morfologis utama muara. (Perillo, 1995)

	Wave-dominated			tide-dominated
	← WAVE DOMINATED →			← TIDE DOMINATED →
	LAGOONAL	PARTIALLY-CLOSED	OPEN-ENDED	TIDAL
MORPHOLOGICAL CONFIGURATION	CLOSED, PARTIALLY OPEN, SHORE-PARALLEL 	SHORE-PARALLEL TO SHORE-NORMAL 	SHORE-NORMAL 	SHORE-NORMAL 
TIDAL RANGE	MICROTIDAL	MICROTIDAL TO MESOTIDAL	MESOTIDAL TO LOW MACROTIDAL	HIGH MACROTIDAL (EXTREME TIDAL RANGES)
CIRCULATION PATTERN	PARTIALLY MIXED	PARTIALLY MIXED TO WELL STRATIFIED (DEPENDENT ON RIVER DISCHARGE)		HOMOGENEOUS (VERTICALLY AND LaterALLY)
SEDIMENT DISTRIBUTION PATTERN		MUDDY SEDIMENTS FLUVIAL SAND LITTORAL SAND 		
AXIAL SECTION		SEA LEVEL 		

**Gambar 12** Klasifikasi muara (berdasarkan volume prisma pasang surut) yang menggambarkan karakteristik morfologi, oseanografi, dan sedimentologis dari masing-masing jenis muara (W.A. Anikouchine Et All 2007)



**Gambar 13** Klasifikasi berdasarkan asalnya (Dalam, W.A. Anikouchine Et All 2007)

### **2.2.2. Tipe Pemeliharaan Alur muara**

Ada beberapa jenis pemeliharaan, (Liria Montanes, 2005) secara detail diklasifikasikan di bawah ini:

#### **a. Pemeliharaan preventif**

Pemeliharaan preventif dilakukan secara rutin sebelum ditemukan adanya kegagalan atau kerusakan dalam bangunan dan satu upaya untuk mengurangi kemungkinan presentasi atau masalah terhadap layanan. Biasanya, dilaksanakan sesuai yang telah diprogramkan sebelumnya yang dapat direncanakan selama jangka waktu tertentu atau tergantung pada timbulnya indikasi tertentu.

Dalam banyak kasus pemisahan waktu antara urutan preventif dan operasi pemeliharaan dapat dipilih dan ini harus ditetapkan sesuai dengan kriteria profitabilitas seperti manfaat / biaya. Untuk tujuan pedoman berkala, kita dapat mengatakan bahwa biasanya satu tahun diperbolehkan mendapatkan antara dua inspeksi pemeliharaan preventif untuk elemen elektromekanis, yang terutama mencakup pintu, perpipaan dan sambungannya. Tergantung pada kondisi penggunaannya, kabel penyangga dan rantai dapat memiliki periode inspeksi antara satu bulan dan satu tahun.

#### **b. Pemeliharaan korektif.**

Pemeliharaan korektif, dilakukan setelah masalah terjadi. Masalah aktual itu sendiri umumnya akan menentukan tingkat urgensi dan kedalaman ruang lingkup yang diperlukan. Ia biasanya terdiri dari perbaikan yang diperlukan untuk mempertahankan atau mengembalikan layanan dan tujuan ini akan menjadi dasar bagi setiap keputusan yang akan diambil.

Kadang-kadang, masalahnya mungkin sangat kompleks sehingga diperlukan proyek rehabilitasi menjadi perlu. Namun, bukan ide yang baik untuk membiarkan situasi seperti ini timbul, karena ini dapat mengindikasikan bahwa level manajemen pemeliharaan yang tidak memenuhi standar.

### 2.2.3. Metode Pemeliharaan Alur Sungai

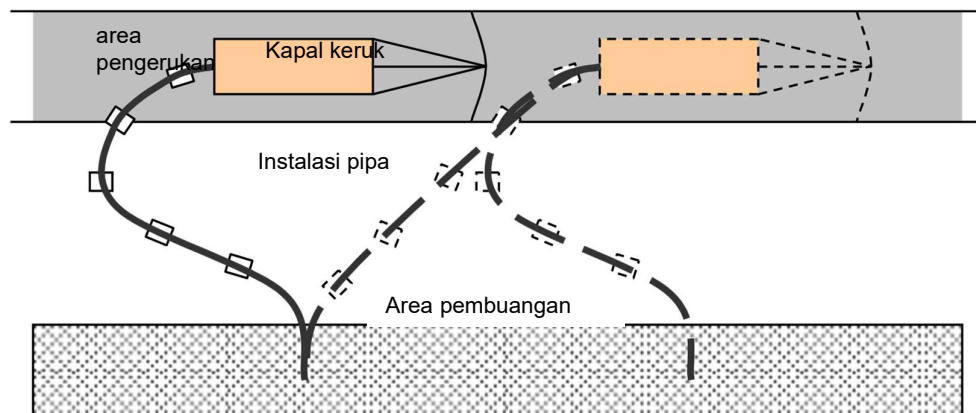
#### 2.2.3. Metode Pemeliharaan Saluran Sungai

Untuk menangani sedimen di alur pelayaran pelabuhan sungai, metode yang umum digunakan termasuk *dredging*, ambang bawah air, *jetty*, *breakwater*, dan fluidisasi.

##### a. Pengerukan (*dredging*)

Pengerukan adalah jenis penggalian di bawah air dengan menggunakan alat gali. Alat gali di daratan seperti ekskavator biasanya digunakan untuk pekerjaan skala kecil, tetapi pengerukan sedimen pada skala besar dilakukan dengan menggunakan kapal keruk.

Jenis sedimen menentukan jenis kapal keruk. Gambar 14 menunjukkan contoh operasi pengerukan dengan kapal keruk *Dredger Suction Cutter*.



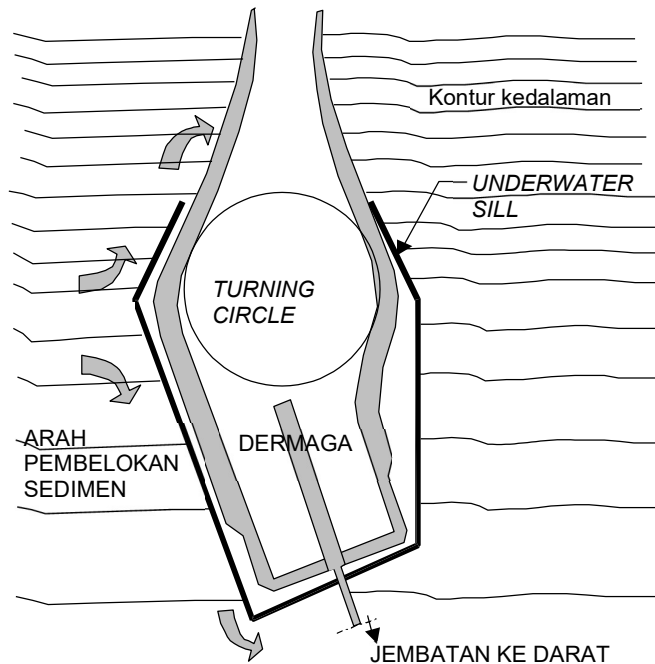
**Gambar 14** Pengerukan sedimen menggunakan kapal keruk *Cutter Suction* (Thaha, 2006)

Kegiatan operasional pelayaran dan pelabuhan akan terganggu jika saluran sungai dipelihara dengan cara pengerukan rutin. Selain itu, proses pemeliharaan ini cukup mahal.

##### b. Struktur ambang bawah air

Aliran angkutan sedimen dialihkan dari alur pelayaran yang digunakan melalui struktur bawah air yang dikenal sebagai sill bawah air. Kolam pelabuhan PT. Semen Gesik (Persero) Tbk di Tuban, Jawa Timur, saat ini dirawat oleh struktur ini.

Gambar 15 menunjukkan rencana penempatan ambang bawah air. Karena relatif murah dan merupakan bangunan ambang bawah air pertama di Indonesia, bangunan ini diberi penghargaan pada tahun 2003 oleh Menteri Pembangunan Daerah. Meskipun sangat terbatas pada kondisi geometris dan lingkungan yang sesuai, tujuan dari struktur ini adalah untuk membelokkan sedimen tersuspensi.

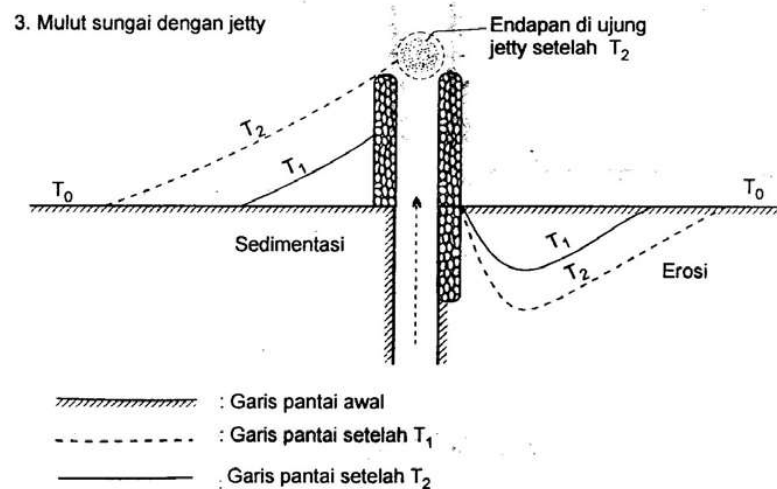


**Gambar 15** Skema penempatan ambang bawah air pada kolam pelabuhan PT. Semen Gresik (Thaha, 2006)

c. Konstruksi *jetty* dan *breakwater*

*Jetty* adalah struktur yang menjorok ke laut di sisi muara sungai yang digunakan untuk mengarahkan aliran sungai untuk mengalirkan sedimen dan mencegah sedimen dari mengendap di sepanjang pantai. Dengan demikian, kedalaman dan lebar jalur pelayaran atau muara dapat dipertahankan sesuai kebutuhan. Banyak negara maju menggunakan struktur ini untuk stabilisasi alur pelayaran dan muara sungai. Ini juga telah digunakan di Indonesia untuk menstabilkan muara sungai dan saluran pelabuhan, tetapi masih dalam jumlah kecil. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 16, kelemahan struktur ini disebabkan oleh erosi di satu sisi dan pengendapan akibat angkutan sedimen sepanjang pantai di sisi lain.





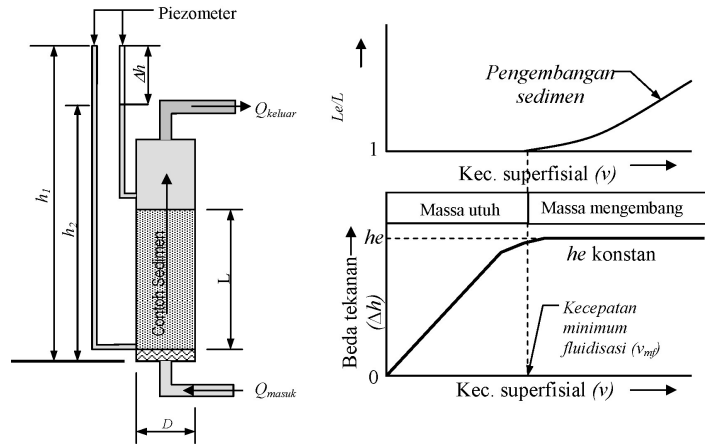
**Gambar 16** Pola erosi dan sedimentasi di struktur jetty (Triatmodjo, 1999)

Oleh karena itu, sistem ini masih memerlukan *sand by passing* untuk menyalurkan endapan sedimen ke lokasi erosi. Kelemahan metode ini adalah biaya yang tinggi untuk membangunnya dan operasinya masih membutuhkan sarana tambahan seperti *sand by passing*. (Putra hatta et al., 2018) Bangunan pantai dengan metode groin lebih tepat diterapkan pada energi gelombang tereduksi dengan tinggi gelombang relatif lebih kecil dibandingkan detached breakwater.

#### d. Fluidisasi

Dalam material non-kohefif, cairan dapat mengalir melalui pori-pori bangunan, menciptakan gaya *drag* yang bekerja pada material yang alirannya searah. Selain itu, gaya gravitasi dan gaya apung suatu bahan sama dengan volume dikalikan berat jenis zat cair. Jika aliran bahan bergerak dari bawah ke atas, gaya drag akan mengangkat bahan bersamaan dengan gaya apung dan berlawanan dengan gaya berat yang bergerak ke bawah. Jika gaya ke atas lebih kecil daripada gaya ke bawah, bahan akan tetap berada di dasar saluran sampai beratnya turun. Hukum Darcy dan Persamaan Cozeny-Carman berlaku dalam situasi ini, di mana laju aliran sebanding dengan jumlah energi yang hilang. Gaya *drag* meningkat seiring dengan kecepatan aliran hingga suatu titik tertentu. Setelah mencapai titik

ini, gaya ke atas sama dengan gaya ke bawah, dan kondisi fluidisasi dimulai. sebagai ditunjukkan pada gambar 17.



**Gambar 17** Skematik defenisi proses fluidisasi 1-D dan parameternya (Thaha, 2006)

#### 2.2.4. Aliran air Melalui Penampang

Penampang dari suatu saluran harus direncanakan sedemikian rupa sehingga aliran airnya tidak mengalami erosi atau sedimentasi. Untuk mencapai tujuan ini, perancangan ukuran saluran harus dilakukan dengan menggunakan analisis hidrolis. Teknik ini kemudian akan memungkinkan untuk menghasilkan ukuran yang efisien dan menghasilkan model ukuran penampang yang paling ekonomis dan dapat diterapkan.

##### a. Rumus Chezy

Seperti yang diketahui, untuk menghitung aliran melalui saluran terbuka, persamaan empiris dapat digunakan. Ini karena banyak variabel yang diperlukan untuk melakukannya. Untuk alasan ini, persamaan empiris berikut digunakan secara luas dalam merencanakan penampang saluran terbuka.

Chezy menemukan bahwa ketika cairan mengalir melalui saluran terbuka, ia akan menimbulkan tegangan geser, atau resistensi, pada dinding saluran. Pada aliran seragam, komponen gaya berat searah aliran diseimbangkan dengan tegangan geser, tetapi tegangan geser ini bergantung pada kecepatan aliran. Persamaan umum ditemukan setelah beberapa derivasi:

$$u = C \sqrt{R \cdot S} \quad (1)$$

dimana:

$u$  = Kecepatan aliran ( $m/s$ )

$R$  = jari-jari hidraulik penampang ( $m$ )

$S$  = Kemiringan dasar saluran

$C$  = koefisien Chezy

Persamaan ini telah banyak digunakan karena beberapa ahli telah menemukan berbagai jenis koefisien Chezy yang bergantung pada bentuk penampang, jenis bahan dinding saluran, dan kecepatan aliran.

b. Rumus Manning

Persamaan berikut diusulkan oleh Robert Manning:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (2)$$

Oleh karena itu, persamaan kecepatan aliran adalah:

$$u = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (3)$$

Dimana koefisien Manning, fungsi material dinding saluran, adalah  $n$ . Tabel 2 menunjukkan nilai koefisien Manning.

**Tabel 2** Nilai koefisien Manning

Bahan	Koefisien Manning $n$
Besi tuang dilapis	0,014
Kaca	0,010
Saluran beton	0,013
Bata dilapis mortar	0,015
Pasangan Batu yang disemen	0,025
Saluran tanah yang bersih	0,022
Saluran tanah	0,030
Saluran dengan dasar batu dengan tebing rumput	0,040
Saluran dari galian batu padas	0,040

c. Rumus Strickler

Koefisien Strickler ( $k_s$ ) menyarankan persamaan berikut untuk permukaan saluran dengan jenis material yang tidak koheren:

$$k_s = \frac{1}{n} = 26 \left( \frac{R}{d_{35}} \right)^{1/6} \quad (4)$$

Dimana R adalah jari-jari hidrolis, dan  $d_{35}$  adalah diameter (dalam  $m$ ), yang merupakan perbandingan berat bahan 35% dengan diameter butir. dengan nilai koefisien ini. Selanjutnya, persamaan kecepatan alirannya adalah:

$$u = k_s R^{2/3} S^{1/2} \quad (5)$$

d. Debit pada pelimpah segitiga

Debit aliran ( $Q$ ) dapat dihitung dengan persamaan berikut karena kondisi aliran dan debit aliran melalui pelimpah ambang tajam segitiga yang dirancang memenuhi syarat (Nasional, 2015).

$$Q = \left( \frac{8}{15} \right) \sqrt{2g} C_d \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) (H_{ef})^{5/2} \quad (6)$$

Keterangan:

$Q$  = debit ( $m^3/s$ )

$G$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

$H_{ef}$  = tinggi energi efektif ( $m$ )

$Cd$  = koefisien debit

Nilai energi efektif,  $H_{ef}$  didapat dari persamaan:

$$H_{ef} = h + \delta h_t \quad (7)$$

e. Debit maksimum

Untuk mendapatkan nilai debit maksimum yang diperoleh pada energi spesifik yang konstan, digunakan rumus energi spesifik:

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (8)$$

Sehingga persamaan menjadi:

$$Q = \sqrt{2g} \cdot A (E_s - y)^{1/2} \quad (9)$$

Setelah menurunkan formula di atas, debit energi spesifik konstan maksimum akan diperoleh pada kedalaman kritis berikut:

$$y_c + \frac{D_c}{2} = E_s \quad (10)$$

f. Kemiringan kritis

Kemiringan kritis dasar saluran  $S_c$  diperoleh dengan menggabungkan persamaan Manning dan menghasilkan nilai aliran seragam pada saluran pada kedalaman kritis.

$$u = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (11)$$

Dengan kecepatan kritis:

$$u_c = \sqrt{gD_c} \quad (12)$$

Dalam situasi ini, persamaan Manning menjadi kritis, karena nilai  $R = R_c$  dan  $S = S_c$ .

$$S_c = \frac{gD_c n^2}{R_c^{4/3}} \quad (13)$$

$R_c = y_c = D_c$  untuk saluran lebar, jadi:

$$S_c = \frac{gn^2}{y_c^{1/2}} \quad (14)$$

Aliran seragam terjadi pada saluran dengan kemiringan dasar lebih besar dari kemiringan kritis ( $S_0 > S_c$ ). Jika kemiringan dasar lebih kecil dari kemiringan kritis ( $S_0 < S_c$ ), aliran tersebut bersifat subkritis dan kemiringannya curam.

g. Menentukan ukuran penampang

langkah-langkah yang digunakan untuk menentukan ukuran penampang saluran:

1. Mengumpulkan data dan informasi yang ada, kemudian menentukan nilai  $N$  berdasarkan jenis material yang digunakan untuk dinding saluran. Nilai kemiringan, atau  $n$ , ditentukan berdasarkan kegunaan dan fungsi saluran. Untuk mencegah sedimentasi atau erosi saluran, kecepatan maksimum dan minimum juga ditentukan.
2. Faktor penampang,  $AR^{2/3}$  dihitung menggunakan persamaan:

$$AR^{2/3} = \frac{nQ}{\sqrt{S}} \quad (15)$$

3. Jika ada suatu ukuran penampang saluran yang tidak diketahui, misalnya  $b$  (lebar), maka nilai-nilai tersebut diestimasi, sehingga dapat diperoleh kombinasi

ukuran, sehingga nantinya ditentukan ukuran penampang tersebut berdasarkan pada efisiensi hidrolis dan aspek praktis penerapannya.

4. Kecepatan minimum yang telah ditentukan diperiksa, terutama pada kondisi aliran yang mengandung lanau.
5. Tambahkan tinggi jagaan sesuai kebutuhan kedalaman air pada penampang saluran.

Prosedur untuk menghitung kecepatan aliran yang diijinkan adalah sebagai berikut:

- a) Tentukan nilai  $n$  berdasarkan jenis material dinding saluran, dan tentukan kemiringan dinding saluran, serta kecepatan maksimum.
- b) Hitung jari-jari hidrolis  $R$  menggunakan persamaan Manning.
- c) Hitung luas penampang basah dengan laju aliran yang diketahui dan kecepatan yang diijinkan menggunakan rumus  $A = \frac{Q}{u}$
- d) Hitung nilai keliling basah  $P$  menggunakan persamaan  $P = \frac{A}{R}$
- e) Tambahkan ketinggian jagaan, dengan mempertimbangkan kepraktisan dalam konstruksi saluran.

### 2.2.5. Perilaku Aliran

#### a. Bilangan Froude

Bilangan Froude adalah bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk mengukur hambatan suatu benda yang bergerak melalui saluran air, dan untuk membandingkan benda-benda yang berbeda ukuran. Dinamai menurut penemunya, William Froude. Angka ini berdasarkan nilai kecepatan dibagi selisih jarak.

Berdasarkan nilai bilangan Froude, jenis-jenis aliran dapat dibedakan sebagai berikut:

1. Aliran kritis, yaitu aliran yang mengalami gangguan permukaan, seperti yang disebabkan oleh riak air yang terjadi akibat pelemparan batu ke dalam air pada suatu sungai, yang mana riak tersebut tidak bergerak dan menyebar melawan arus. Aliran dikategorikan aliran kritis jika nilai bilangan Froude sama dengan satu ( $F_r = 1$ ).

2. Aliran subkritis, dimana pada aliran ini kedalaman aliran umumnya lebih besar dibandingkan pada aliran dengan kecepatan rendah, semua riak yang timbul dapat bergerak melawan arus. Jika nilainya lebih kecil dari satu ( $F_r < 1$ ) maka dianggap aliran subkritis.
3. Aliran super kritis, pada aliran ini kedalaman alirannya cenderung lebih kecil dan kecepatan alirannya relatif lebih tinggi, riak-riak akibat adanya gangguan dapat mengikuti arah aliran. Jika nilai bilangan Froude lebih besar dari satu ( $F_r > 1$ ) maka aliran tersebut merupakan aliran super kritis.

Persamaan dalam perhitungan nilai bilangan Froude adalah:

$$F_r = \frac{u}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (16)$$

Dimana :

$F_r$  = bilangan Froude

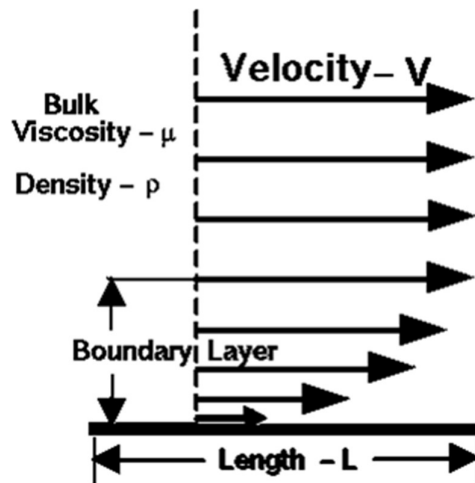
$u$  = kecepatan aliran ( $m/s$ )

$g$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

$h$  = kedalaman aliran ( $m$ )

#### b. Bilangan Reynold

Berdasarkan ciri-ciri alirannya, aliran viskos dibedakan menjadi dua, yaitu tipe aliran laminar dan tipe aliran turbulen. Dalam aliran laminar, partikel-partikel cairan bergerak secara teratur sepanjang jalur paralel. Aliran ini terjadi pada kecepatan kecil dan/atau pada viskositas besar. Pengaruh kekentalan aliran sangat besar karena dapat meredam gangguan-gangguan yang dapat menyebabkan aliran menjadi turbulen. Menurunnya nilai viskositas dan meningkatkan kecepatan permukaan pada nilai batas pertemuan akan mengakibatkan terjadinya perubahan aliran dari aliran laminar menjadi aliran turbulen. Pada aliran turbulen jenis ini, pergerakan partikel-partikel cairan dalam jalur yang tidak beraturan. Aliran ini terjadi bila kecepatannya besar dan nilai viskositasnya kecil. Diagram kecepatan pada aliran viskositas tertentu diperlihatkan pada Gambar 18.



**Gambar 18** Diagram kecepatan aliran viskos

Bilangan Reynolds ditemukan oleh Osborne Reynolds pada tahun 1884, yang telah melakukan eksperimen yang bertujuan untuk menunjukkan sifat aliran laminar dan aliran turbulen. Pada percobaan aliran yang terjadi pada pipa, nilai bilangan Reynolds dibawah 500, aliran pada kondisi tersebut adalah laminar. Aliran akan menjadi turbulen jika bilangan Reynolds lebih besar dari 1000. Umumnya aliran yang melalui saluran terbuka merupakan aliran turbulen, karena kecepatan aliran dan kekasaran dinding relatif lebih besar.

Angka Reynolds dihitung menggunakan persamaan berikut ini:

$$R_e = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (17)$$

Dengan  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  maka  $R_e$  menjadi

$$R_e = \frac{u L}{\nu} \quad (18)$$

Dimana:

$R_e$  = Angka Reynolds,

$u$  = kecepatan aliran ( $m/s$ ),

$L$  = Panjang karakteristik ( $m$ ), pada saluran terbuka  $L = R$ ,

$R$  = jari-jari hidrolis penampang saluran ( $m$ ),

$\rho$  = berat jenis fluida

$\mu$  = Kekentalan fluida ( $kg/m.s$ )



$\nu$  = Viskositas kinematik ( $m^2/s$ )  $(1,14 - 0,013 (T^\circ - 15) + 0,00068 (T^\circ - 15)^2) 10^{-6}$   
( $m^2/s$ ).

Dari beberapa penelitian disimpulkan bahwa nilai bilangan Reynolds pada saluran terbuka:

- Laminer :  $Re < 500$
- Transisi :  $500 < Re < 1000$
- Turbulen :  $Re > 1000$

### 2.2.6. Distribusi Kecepatan

Mempertimbangkan aliran *steady*, seragam, saluran terbuka memiliki kedalaman rata-rata  $H$  dan kecepatan aliran rata-rata  $U$  (gambar 19). Saluran memiliki lebar rata-rata nilai  $B$  yang lebih besar dari pada kedalaman aliran rata-rata  $h$ , dan dasarnya memiliki kemiringan rata-rata  $S$  dan kekasaran permukaan yang dapat digambarkan dengan ketinggian efektif  $h_s$  (Brownlie 1981). Untuk saluran yang luas ( $B / H \geq 1$ ), jari-jari hidrolis saluran,  $R_h$  (luas penampang parameter basah), dapat diperkirakan dengan kedalaman aliran rata-rata  $H$ . Ketika bagian bawah saluran ditutupi dengan sedimen yang memiliki ukuran rata-rata atau diameter  $D$ , ketinggian kekasaran  $k_s$  akan sebanding dengan diameter ini. Karena berat air, aliran yang diberikan di bawah gaya tangensial per unit dasar yang dikenal sebagai tegangan geser dasar, yang dalam aliran *steady*, yang seragam dapat dinyatakan sebagai:

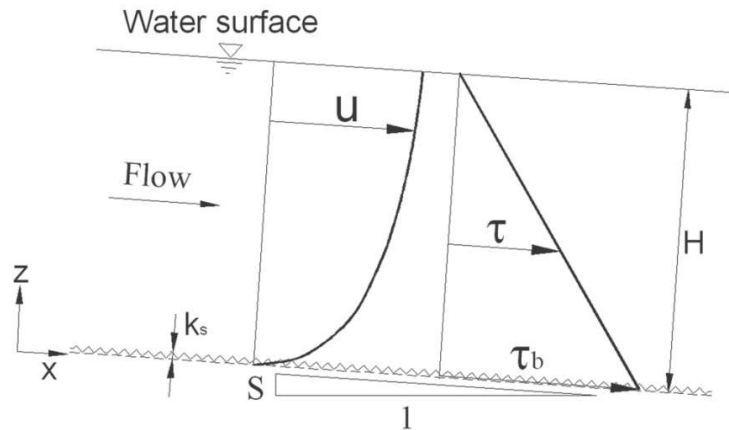
$$\tau_b = \rho g H S \quad (19)$$

dimana

$\rho$  = Rapat massa air

$g$  = percepatan gravitasi.

Persamaan ini hanyalah persamaan konservasi momentum satu dimensi untuk saluran mencapai bawah



**Gambar 19** Diagram definisi aliran saluran terbuka pada sedimen dasar.

Dengan bantuan tegangan geser batas, dimungkinkan untuk menentukan kecepatan geser  $u^*$  sebagai

$$u_* = \sqrt{\tau_b / \rho} \quad (20)$$

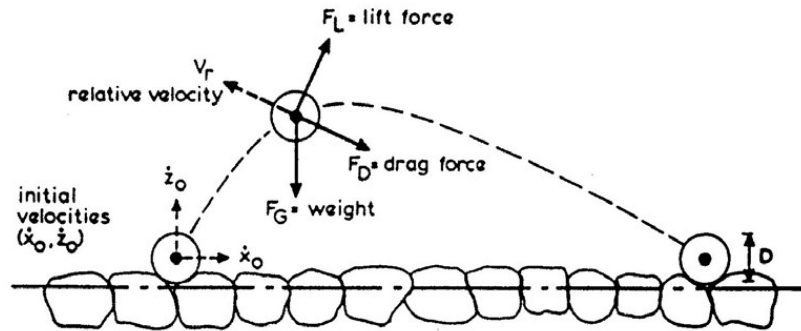
Kecepatan geser, dan demikian tegangan geser batas, memberikan ukuran langsung dari intensitas aliran dan kemampuannya untuk bergerak dan mengangkut partikel sedimen. Ukuran partikel sedimen di bagian bawah menentukan kekasaran permukaan, yang pada gilirannya mempengaruhi distribusi kecepatan aliran dan kapasitas pengangkutan sedimennya. Karena hambatan aliran dan laju transpor sedimen saling terkait, penting untuk dapat menentukan peran yang dimainkan oleh kekasaran dasar.

### 2.2.7. Gaya Pada Gerak Partikel Sedimen

Jika terjadi pergerakan antara butiran sedimen dan aliran fluida, butiran sedimen dalam aliran fluida akan menerima gaya fluida. Pergerakan ini terjadi jika ada perbedaan kecepatan aliran antara butiran sedimen dan aliran fluida, misalnya, butiran sedimen akan bergerak lebih lambat atau lebih cepat daripada aliran fluida.

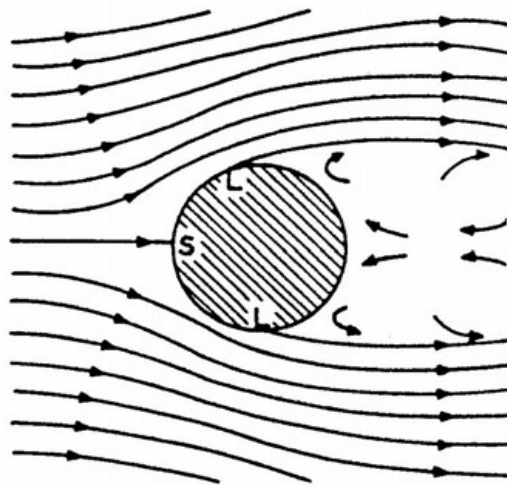
Gaya angkat disebut gaya drag. Gaya drag bekerja dalam arah normal atau tegak lurus terhadap arah pergerakan butiran sedimen. Gaya *drag* dan *lift* pada butiran sedimen di dasar saluran digambarkan pada Gambar 20. Ketika kecepatan gerak butiran lebih kecil dari kecepatan aliran fluida, perbedaan kecepatan disebut kecepatan relatif  $v_r$ . Metode umumnya menggunakan koefisien *drag* and *lift* ( $C_D$

dan  $C_L$ ), yang telah ditentukan dalam penelitian sebelumnya. Nilai koefisien ini sangat dipengaruhi oleh jenis aliran laminar, turbulen, atau transisi yang terjadi di sekitar butir berdasarkan bilangan Reynolds ( $Re$ ). Oleh karena itu, kita dapat mengatakan bahwa  $C_D$  dan  $C_L$  adalah fungsi dari  $Re$ . Gambar 20 menunjukkan gaya drag dan lift yang terjadi pada butiran.



**Gambar 20** Gaya drag dan lift untuk butiran sedimen (Rijn, 1990)

Gambar 21 menunjukkan aliran melalui silinder pada nilai  $Re$  yang berbeda. Daerah aliran di sebelah silinder, yang menunjukkan aliran, sama, dan kondisi sampel sama di kedua sisi. Namun, dimensi sampel berbeda di daerah belakang (*wake region*), yang menghasilkan nilai koefisien drag  $C_D$  yang berbeda. Titik  $s$  dan  $L$  adalah titik pemisahan.



**Gambar 21** Aliran turbulen disekitar silinder

Pada dasarnya, gaya drag pada butiran sedimen terdiri dari dua komponen: tekanan fluida dan gesekan viskositas fluida. Tekanan fluida biasanya bekerja pada permukaan butiran, dan gesekan fluida bekerja sejajar dengan permukaan butiran. Karena tekanan dominan bekerja pada butiran kecil, pengaruh gesekan juga dapat diperhitungkan dalam nilai  $C_D$  (Rijn, 1990). Persamaan gaya drag  $F_D$  berikut dapat dirumuskan dengan menggunakan rumus Bernoulli dengan melihat garis aliran stagnasi (titik  $s$  di Gambar 21).

$$\frac{U_0^2}{2g} + \frac{P_0}{\rho g} + z_0 = \frac{U_s^2}{2g} + \frac{P_s}{\rho g} + z_s \quad (21)$$

Persamaan di atas dapat dituliskan pada kondisi stagnasi  $u_s = 0$  dan pada ketinggian elevasi yang sama  $z_0 = z_s$  :

$$P_s - P_0 = \frac{1}{2}\rho U_0^2 \quad (22)$$

Tekanan di titik  $S$  sebesar setengah  $\frac{1}{2}\rho u_0^2$ , dan nilai tekanan mengecil di area di belakangnya, menurut Persamaan 22. Dengan demikian, persamaan gaya drag ( $F_D$ ) adalah:

$$F_D = C_D \frac{1}{2}\rho U_0^2 A \quad (23)$$

Dimana  $F_D$  adalah gaya drag,  $C_D$  adalah koefisien drag,  $\rho$  adalah rapat massa fluida ( $kg/m^3$ ), dan  $A$  adalah luas permukaan aliran yang tertahan ( $m^2$ ).

Dalam kasus di mana butiran sedimen bergerak dengan kecepatan  $u_1$  dimana  $u_1 < u_0$ , kecepatan relatif ( $u_0 - u_1$ ) diperoleh, seperti yang ditunjukkan dalam persamaan 23. Koefisien  $C_D$  dipengaruhi oleh bilangan Reynolds ( $Re$ ) yang dihasilkan..

### 2.2.8. Sifat Sedimen Gabungan

#### a. Distribusi Ukuran Butir

Sedimen dalam teknik sipil dapat diklasifikasikan menjadi lempung (*clay*), lumpur (*silt*), pasir (*sand*), kerikil (*gravel*), koral (*pebble*) atau kerakal (*cabbles*), dan batu (*boulders*). Tabel 3 menunjukkan bagaimana Whitworth mengklasifikasikan berdasarkan ukuran butir sedimen.

**Tabel 3** Klasifikasi ukuran butir sedimen berdasarkan skala *Wentworth*

Klasifikasi		Diameter Partikel (mm)
<i>Berangkal</i>	Sangat Besar	4096 – 2048
	Besar	2048 – 1024
	Sedang	1024 – 512
<i>Kerakal</i>	Besar	256 – 128
	Kecil	128 - 64
<i>Koral (kerikil besar)</i>	Sangat kasar	64 – 32
	Kasar	32 – 16
	Sedang	16 – 8
	Halus	8 - 4
<i>Kerikil</i>		4 – 2
<i>Pasir</i>	Sangat kasar	2 – 1
	Kasar	1 – 0.5
	Sedang	0.5 – 0.25
	Halus	0.25 – 0.125
	Sangat halus	0.062 – 0.031
<i>Lumpur</i>	Kasar	0.031 – 0.016
	Sedang	0.016 – 0.008
	Halus	0.008 – 0.004
<i>Lempung</i>	Kasar	0.004 – 0.002
	Sedang	0.002 – 0.001
	Halus	0.001– 0.0005
	Sangat halus	0.0005– 0.00024

Menurut (Triatmodjo, 1999), ukuran butiran pasir adalah median ukuran butiran sedimen  $d_{50}$ , yang merupakan ukuran butiran pasir. Berdasarkan distribusi log normal, simpangan baku  $\sigma_D$ , dan rata-rata ukuran butiran sedimen  $D_m$ , derajat distribusi ukuran butiran sedimen sering digunakan terhadap nilai rata-rata. Koefisien  $S_o$  dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$d_m = \sqrt{d_{16} \cdot d_{84}} \quad (24)$$

$$S_o = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} \quad (25)$$

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \quad (26)$$

Jika nilainya antara 1.0 dan 1.5, maka ukuran butir pasir seragam, jika antara 1.5 dan 2.0, maka sebaran ukurannya sedang, dan jika lebih dari 2.0, maka sebaran ukurannya tidak seragam.

Berat jenis dan rapat massa adalah fungsi dari komposisi mineral. Rapat massa ( $\rho$ ) adalah fungsi dari massa per satuan volume, dan berat jenis ( $\gamma$ ) adalah fungsi dari berat per satuan volume, dengan  $\rho = \rho.g$ . Terdapat hubungan erat antara keduanya.

Sedimen lempung terutama terdiri dari feldstar dan mika, sedangkan lumpur dan pasir terdiri dari silika. Massa jenis relatif seperempat adalah perbandingan berat jenis sedimen dengan berat air pada suhu  $4^c$ , di mana massa jenis air  $1000 \text{ kg/m}^3$ , sehingga massa jenis relatifnya 2,65 (Triatmodjo, 1999).

### 2.2.9. Transportasi Sedimen Dasar (Bedload)

Pergerakan sedimen melalui aliran di sungai terdiri dari sedimen tersuspensi dan sedimne dasar yang bergerak sepanjang dasar sungai dengan cara bergeser, menggelinding dan melompat. Pengangkutan sedimen menuju pusaran turbulen menyebabkan pengendapan partikel akibat gravitasi. Konsentrasi terbesar material tersuspensi terjadi di dekat dasar sungai, sehingga pusaran yang bergerak ke atas mengangkut lebih banyak sedimen dibandingkan pusaran yang bergerak ke bawah. Sistem ini berada dalam keadaan setimbang jika pergerakan akibat gravitasi dan transpor turbulen serta jumlah material tersuspensi tetap konstan. . (Ray K. Linsley, Max A. Kohler, 1989). Partikel sedimen yang berukuran kecil seperti tanah liat dan debu dapat terbawa aliran dalam bentuk terlarut (*suspended load*). Sedangkan partikel yang lebih besar, seperti pasir, cenderung bergerak dengan cara melompat. Partikel sedimen yang bahkan lebih besar dari pasir, misalnya kerikil, bergerak mengikuti kecepatan aliran dengan cara merambat atau menggelinding di dasar sungai (*bed load*).

Volume sedimen tersuspensi tergantung pada perubahan kecepatan aliran yang dipengaruhi oleh perubahan musim hujan dan kemarau serta perubahan kecepatan

aliran yang disebabkan oleh berbagai aktivitas manusia. Morfologi sungai, kekasaran dasar sungai dan tebing, serta kemiringan sungai. Pengaruh interaksi seluruh faktor di atas menentukan jumlah dan jenis sedimen terhadap kecepatan pengangkutan sedimen. Akibat perubahan volume angkutan sedimen akibat degradasi yang terjadi pada beberapa lokasi sungai seperti pada tebing dan dasar sungai, hal ini akan berdampak pada aggradasi pada bagian hilir daerah yang tererosi, sehingga secara umum terjadi perubahan. di dasar sungai.

Pengangkutan sedimen dasar (*bed load*) didasarkan pada persamaan klasik du Boys sebagai berikut (Ray K. Linsley, Max A. Kohler, 1989):

$$G_i = Y \frac{\tau_0}{\gamma} (\tau_0 - \tau_c) \quad (27)$$

Dimana:  $G_i$  adalah laju pengangkutan beban dasar sungai per satuan lebar sungai;  $Y$  adalah koefisien empiris yang bergantung pada ukuran dan bentuk partikel sedimen (lihat Tabel 3);  $\gamma$  adalah massa jenis air ( $kg/cm^3$ );  $\tau_0$  adalah gaya geser pada dasar sungai;  $\tau_c$  adalah besarnya gaya geser pada awal pengangkutan. Faktor pergerakan beban dasar ditunjukkan pada tabel 4.

**Tabel 4** Faktor-faktor gerakan muatan dasar (*bed load movement*)

No	Diameter partikel (mm)	Koefisien empiris (Y)	Besar gaya geser ( $\tau_c$ )
1	1/8	0.0032	0.078
2	1/4	0.0019	0.083
3	1/2	0.0011	0.107
4	1	0.0007	0.156
5	2	0.0004	0.249
6	4	0.0002	0.439

Sumber : (Ray K. Linsley JR., Max A. Kohler, Joseph L.H. Faulhus, Yandi Hermawan, 1986)

Berdasarkan konsep aliran turbulen dan variasi statistik gaya aliran pada suatu titik. Pendekatan yang banyak digunakan adalah pendekatan Einstein, yang menentukan intensitas angkutan sedimen dasar sungai sebagai berikut:

$$\Phi = \frac{G_i}{\gamma} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \frac{1}{gd^3}} \quad (28)$$

Dan intensitas alirannya adalah sebagai berikut:

$$\Phi = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{d}{SR} \quad (29)$$

Di mana;  $\gamma$  adalah berat jenis air,  $\rho$  adalah massa jenis air;  $\rho_s$  adalah massa jenis bahan dasar,  $d$  adalah diameter butiran ( $mm$ ),  $s$  adalah kemiringan saluran; dan  $R$  adalah radius hidrolis. Sedangkan besarnya gaya hambat (gaya tarik) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\tau_o = \gamma \cdot h \cdot S \quad (30)$$

Di mana;  $\tau_o$  adalah gaya drag,  $\gamma$  adalah massa jenis fluida ( $kg/cm^2$ );  $h$  adalah kedalaman air ( $m$ );  $S$  adalah kemiringan garis energi. .

Dalam buku (Blazejewski et al., 1995) dan (Pallu, 2010). dijelaskan untuk menghitung tegangan geser ( $\tau_o$ ) yang dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan persamaan berikut:

$$\tau_o = \rho_w \cdot g \cdot h \cdot S \quad (31)$$

Dimana:  $\tau_o$  adalah tegangan geser ( $kg/m^2$ );  $\rho_w$  adalah massa jenis air ( $kg/m^3$ ),  $h$  adalah kedalaman aliran ( $m$ );  $S$  adalah kemiringan dasar saluran (%) dan  $g$  adalah nilai percepatan gravitasi ( $9,81 m/s^2$ ). Sedangkan untuk menghitung kecepatan geser ( $u^*$ ) digunakan persamaan sebagai berikut:

$$u^* = \sqrt{g \cdot h \cdot s} \quad (31)$$

$$\tau_{*c} = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gD} = \frac{u_*^2}{(s-1)gD} \quad (32)$$

Dimana:  $u^*$  adalah kecepatan geser ( $m/s$ ),  $h$  adalah kedalaman aliran ( $m$ );  $S$  adalah kemiringan dasar saluran dan  $g$  adalah nilai konstan percepatan gravitasi.

Pendekatan yang digunakan dalam memperkirakan jumlah sedimen dasar pada saluran terbuka adalah dengan menggunakan persamaan empiris metode Meyer Peter Muller (MPM), Einstein dan DuBoys. Persamaan antara ketiga metode ini dijelaskan di bawah ini.

a. Metode Meyer Peter Muller (MPM)

Penggunaan metode empiris ini harus memenuhi syarat seperti partikel sedimen yang digunakan dengan diameter seragam berkisar antara  $0,4-29 mm$  dan berat jenis berkisar antara  $1,25 - 4,0 ton/m^3$  dengan kondisi kemiringan dasar saluran berkisar antara  $4 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-2}$ . (Soewarno, 1991).



Persamaan Meyer Peter Muler (MPM) sebagai berikut :

$$q_b = \phi \sqrt{\left[\frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w}\right]} \times g D_{50}^3 \quad (33)$$

b. Metode Einstein

Metode Einstein menggunakan persamaan yang sama dengan metode Meyer Peter Muler (MPM), dengan perbedaan penggunaan diameter material sedimen. Untuk metode Einstein digunakan ukuran sedimen  $d_{35}$  sedangkan untuk MPM  $d_{50}$  digunakan. Jadi hasil analisis secara umum menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan atau tidak jauh berbeda. Persamaan metode Einstein adalah:

$$q_b = \phi \sqrt{\left[\frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w}\right]} \times g D_{35}^3 \quad (34)$$

Tahapan analisis dengan menggunakan kedua metode tersebut adalah:

1. Menghitung koefisien kekasaran Manning yang sebenarnya

Dengan kecepatan aliran yang diperoleh melalui pengukuran maka dapat diperoleh nilai  $n$  berdasarkan persamaan Manning sebagai berikut;

$$u = \frac{1}{n} \times R^{2/3} I^{1/2} \quad (35)$$

2. Hitung koefisien kekasaran Manning untuk dasar datar

$$n' = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} \quad (36)$$

3. Hitung radius hidrolis untuk bagian yang mempunyai angkutan sedimen dasar

$$R' = R \times \left(\frac{n'}{n}\right)^{1.5} \quad (37)$$

4. Hitung intensitas aliran

$$\psi = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \times \frac{D_{50}}{R \left(\frac{n'}{n}\right)^{1.5} \times S} \quad (38)$$

5. Menghitung nilai intensitas transpor sedimen

$$\phi = \left[\left(\frac{4}{\psi}\right) - 0.188\right]^{1.5} \quad (39)$$

c. Metode DuBoys

Prinsip penggunaan metode empiris DuBoys adalah pengangkutan sedimen diawali dengan tegangan gesek atau gaya angkat hingga mencapai nilai kritis. Transportasi sedimen merupakan fungsi dari rasio antara tegangan gesekan dan nilai kritis. Metode DuBoys direkomendasikan untuk ukuran diameter partikel

berkisar antara 0,1 mm sampai 4 mm dengan ukuran rata-rata partikel sedimen dan tegangan gesek kritis (Soemarto, 1999). Persamaan besarnya angkutan sedimen dasar saluran (*Bed Load*) dengan metode DuBoys adalah sebagai berikut:

$$q_b = \Psi_D \frac{\tau_o}{\rho_w} \left( \frac{\tau_o - \tau_c}{\rho_w} \right) \quad (40)$$

Dengan tegangan geser kritis pada bagian dasar dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\tau_o = \rho_w h \cdot S \quad (41)$$

Sedangkan nilai parameter  $\Psi_D$  merupakan fungsi dari ukuran sedimen dengan persamaan sebagai berikut:

$$\Psi_D = \left( \frac{\rho_s D_{50} U}{2 \tau_c} \right) \quad (42)$$

Di mana;  $q_b$  adalah sedimen dasar ( $kg/s/m$ ),  $\phi$  adalah intensitas transpor sedimen,  $\rho_s$  adalah berat jenis sedimen ( $kg/m^3$ ),  $\rho_w$  adalah berat jenis air ( $kg/m^3$ ), percepatan gravitasi bumi ( $9,807 m/s^2$ ),  $d_{50}$  adalah diameter butiran sedimen ( $mm$ ) untuk metode MPM,  $d_{35}$  adalah diameter butiran sedimen ( $mm$ ) untuk metode Einstein,  $R$ = radius hidrolik ( $m$ ),  $u$  = kecepatan aliran ( $m/s$ ).  $\psi$  adalah intensitas aliran,  $\tau_o$  adalah tegangan geser ( $kg/m^2$ ),  $\tau_c$  adalah tegangan geser kritis dasar ( $kg/m^2$ ),  $d_{50}$  adalah diameter butir sedimen untuk metode DuBoys,  $h$  adalah kedalaman drainase ( $m$ ),  $s$  adalah kemiringan dasar saluran.

Nilai  $\psi$  dan  $\tau_c$  didasarkan pada rata-rata diameter butir sedimen dasar, yang digunakan dari nilai pada tabel 5. di bawah (Soemarto, 1999).

**Tabel 5** Hubungan antara  $\psi$  dan  $\tau_c$

No	Diameter Butiran Rerata Sedimen dasar (mm)	Parameter partikel Intensitas pengaliran ( $\psi$ )	Tegangan geser $\tau_c$ ( $kg/m^2$ )
1	0.125	523000	0.0162
2	0.25	312000	0.0172
3	0.5	187000	0.0217
4	1	111000	0.0316
5	2	66200	0.0513
6	4	39900	0.0890

konstanta 1,  $u_s$  = nilai kecepatan rata,  $u^*$  adalah kecepatan geser ( $m/s$ ).

### 2.2.10. Penggelontoran Sedimen di Muara

Perencanaan letak dan ukuran saluran keluar bawah atau gorong-gorong penguras sedimen (*drawdown culvert*) yang terletak di dasar waduk, serta tinggi muka air pada waduk akan mempengaruhi kecepatan aliran penggelontoran sedimen dan banyaknya butiran yang keluar. keluar dari waduk.

#### a. Kapasitas transport penggelontoran aliran

Kapasitas angkut aliran pembilasan dapat diperkirakan dengan menggunakan metode empiris (E Atkinson, 1996). Metode ini didasarkan pada pengamatan terhadap penggelontoran pada reservoir, dimana pelaksanaannya didominasi oleh penggelontoran tahunan, sehingga menghasilkan kombinasi penggelontoran. Metode ini berdasarkan persamaan:

$$Q_s = \psi \frac{Q_f^{1.6} S^{1.2}}{w^{0.6}} \quad (43)$$

dimana

$Q_s$  adalah kapasitas angkutan sedimen (*t/s*)

$Q_f$  adalah aliran pembilasan (*m<sup>3</sup>/s*)

$S$  adalah kemiringan dasar

$w$  adalah lebar saluran (*m*), dan

$\psi$  adalah konstanta tipe sedimen:

1600 untuk sedimen lepas

650 untuk sedimen dengan ukuran rata-rata lebih kecil dari 0,1 mm

300 untuk sedimen dengan ukuran rata-rata lebih besar dari 0,1 mm

180 untuk pembilasan pada debit rendah

#### b. Perhitungan kecepatan aliran dan debit air

Analisis terhadap kecepatan aliran penggelontoran sedimen, dimaksudkan untuk mengetahui tingkat kemampuan air dalam membilas sedimen yang tertimbun di waduk, untuk dibuang keluar melalui saluran pembuangan yang ada.

##### 1) Kecepatan aliran penggelontoran sedimen

Jika tinggi muka air pada waduk pada saat penggelontoran sedimen dilambangkan dengan  $H$ , maka besarnya kecepatan aliran penggelontoran sedimen adalah sebagai berikut:

$$u = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (44)$$

Dengan :

$u$  = Kecepatan air penggelontoran ( $m/s$ )

$g$  = Gravitasi  $9,81 m/s^2$

$H$  = tinggi air dalam waduk ( $m$ )

2) Debit air dalam penggelontoran sedimen

Perhitungan debit air pada penggelontoran sedimen melalui suatu saluran tergantung pada kecepatan aliran dan luas penampang saluran. Jadi besarnya debit air pada penggelontoran sedimen adalah :

$$Q = u \cdot A \quad (45)$$

Dengan :

$Q_w$  = Debit air ( $m^3/s$ )

$u$  = Kecepatan air ( $m/s$ )

$A$  = Luas penampang saluran yang digunakan ( $m^2$ )

Luas penampang muara sungai dirancang dengan model persegi dan komposit sehingga diperoleh luas penampang :

$$\text{Persegi :} \quad A = b^* \cdot h \quad (46)$$

$$\text{Komposit :} \quad A = b^* \cdot h + (b - b^*) \cdot (h - h^*) \quad (47)$$

dimana

$A$  = Luas penampang saluran ( $m^2$ )

$b$  = Lebar Sungai ( $m$ )

$h$  = Tinggi muka air ( $m$ )

$b^*$  = Lebar model penampang saluran ( $m$ )

$h^*$  = Tinggi model penampang ( $m$ )

c. Perhitungan besarnya debit dan konsentrasi sedimen

Debit sedimen pada drawdown gorong-gorong dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Q_s = C \cdot k \cdot Q_w \quad (48)$$

dengan konsentrasi sedimen :

$$C = \frac{Q_s}{Q_w} \cdot k \quad (49)$$

dengan :

$$k = 0,0864$$

$C$  = konsentrasi sedimen ( $mg/l$ )

$Q_w$  = debit air ( $m^3/s$ )

$Q_s$  = debit sediment ( $ton/hari$ )

d. Perhitungan kecepatan aliran di dalam waduk

Apabila dilakukan penggelontoran sedimen, maka akan terjadi aliran dari waduk menuju gorong-gorong drawdown. Untuk mengetahui seberapa besar kecepatan aliran pada drawdown culvert ( $u$ ) digunakan persamaan 44, sedangkan untuk kecepatan air waduk ( $u_{sec}$ ) digunakan persamaan 50.

Dalam menghitung  $u_{sec}$ , yang perlu diketahui terlebih dahulu adalah luas penampang masing-masing bagian reservoir. Pengukuran terhadap air di waduk dilakukan dengan menggunakan metode Survei Hidrografi, yaitu suatu metode pengamatan yang terdiri dari pengukuran dan pemetaan jumlah sedimen yang terakumulasi dari sedimen yang ada di waduk. Pengukuran menggunakan alat pengeras suara gema yang diletakkan di atas perahu dan disusun dengan observasi atau pengukuran permukaan tanah.

Pengukuran bawah air dilakukan dengan cara mengukur kedalaman air di bawah perahu yang terletak di atas permukaan waduk. Sedangkan pengukuran tanah dimaksudkan untuk mengetahui ketinggian permukaan tanah dengan menggunakan metode terestrial. Data dari kedua titik data tersebut digabungkan sehingga diperoleh penampang melintang, sehingga dapat diketahui luas penampangnya ( $A_{sec}$ ).

Jadi kecepatan aliran dalam penggelontoran sedimen pada reservoir pada saat penggelontoran sedimen, adalah sebagai berikut :

$$u_{sec} = Q_w / A_{sec} \quad (50)$$

dengan :

$Q_w$  = Debit penggelontor sedimen ( $m^3/s$ )

$A_{sec}$  = Luas penampang melintang waduk ( $m^2$ )

$u_{sec}$  = Kecepatan aliran penggelontor di waduk ( $m/s$ )

### 2.3. Hukum Dasar Model

Tujuan utama pemodelan dengan model skala adalah untuk memodelkan masalah atau fenomena yang ada pada prototipe dengan skala yang lebih kecil sehingga fenomena yang terjadi pada model akan sama atau mirip dengan prototipe. Kesesuaian dinamis, geometri, dan kinematik termasuk dalam kategori ini (Yuwono et al., 2020), (Rahayu, 2013).

Skala menunjukkan hubungan antara prototipe dan model; setiap parameter memiliki skalanya sendiri dan nilainya mungkin berbeda. Skala dapat digambarkan sebagai rasio antara nilai parameter model dan nilai prototipe.

#### 2.3.1. Similaritas Geometris

Kesesuaian geometri terjadi ketika bentuk model dan prototipe sama, tetapi dimensinya dapat berbeda. Perbandingan ukuran yang dilakukan antara model dan prototipe adalah identik. Dua jenis kongruensi geometri adalah sempurna (tidak terdistorsi) dan terdistorsi. Dalam kongruensi geometri sempurna, skala horizontal (panjang) dan vertikal adalah sama, tetapi dalam model terdistorsi, skala panjang dan vertikal tidak sama. Skala model harus dibuat tanpa distorsi jika kondisi memungkinkan; namun, jika diperlukan, skala model dapat dibuat dengan distorsi. Kesesuaian geometri dapat diwakili sebagai berikut:

- Panjang, lebar

Skala panjang, yang umumnya dinotasikan  $n_L$

$$n_L = \frac{L_p}{L_m} = \frac{\text{Panjang pada prototipe}}{\text{Panjang pada model}} \quad (51)$$

- Tinggi atau kedalaman

Skala tinggi umumnya dinotasikan  $n_h$

$$n_h = \frac{h_p}{h_m} = \frac{\text{Tinggi pada prototipe}}{\text{Tinggi pada model}} \quad (52)$$

- Skala Luas

$$n_A = \frac{A_p}{A_m} = \frac{\text{Panjang} \times \text{lebar pada prototipe}}{\text{Panjang} \times \text{lebar pada model}} = n_L^2 \quad (53)$$

- Skala Volume

$$n_V = \frac{V_p}{V_m} = \frac{\text{Volume pada prototipe}}{\text{Volume pada model}} = n_L^3 \quad (54)$$

dimana :

$n_L$  = skala panjang

$n_h$  = skala tinggi/kedalaman

$L_p$  = panjang pada prototype

$L_m$  = panjang model

$h_p$  = tinggi pada prototipe

$h_m$  = tinggi pada model

### 2.3.2. Similaritas Kinematis

Perbedaan kecepatan dan percepatan aliran pada dua titik pada model dan prototipe yang arahnya sama bernilai sama dikenal sebagai kongruensi kinematik. Pada model tidak terdistorsi, perbandingan kecepatan dan percepatan aliran adalah sama pada segala arah, tetapi pada model terdistorsi, perbandingan adalah sama hanya pada satu arah, yaitu vertikal atau horizontal. Berikut ini adalah deskripsi skala waktu  $n_t$ , skala debit  $n_Q$ , dan skala kecepatan  $n_v$  :

a. Skala kecepatan

$$\frac{u_p}{u_m} = \frac{g_p}{g_m} \left( \frac{h_p}{h_m} \right)^{1/2}$$

karena  $n_g = 1$  maka :

$$n_u = (n_h)^{1/2} \quad (55)$$

b. Skala debit

Debit dapat dinyatakan dengan hubungan berikut:

$Q = u \cdot A$ , dimana  $A$  adalah luas penampang basah aliran

Hubungan ini dapat dijelaskan lebih lanjut sebagai:

$$\left. \begin{array}{l} n_Q = n_u n_A \\ n_u = (n_h)^{1/2} \\ n_A = n_L n_h \end{array} \right\} \Rightarrow n_Q = (n_h)^{3/2} n_L \quad \text{maka :}$$
$$n_Q = (n_h)^{5/2} \quad (56)$$

c. Skala waktu

Waktu dapat dijabarkan sebagai:

$$t = \frac{\text{jarak } (L)}{\text{kecepatan } (u)} \quad (57)$$

Hubungan tersebut dapat dijabarkan menjadi:

$$\left. \begin{array}{l} n_t = \frac{n_L}{n_u} \\ n_u = (n_h)^{1/2} \end{array} \right\} \Rightarrow n_t = \frac{n_L}{(n_h)^{1/2}} \quad \text{atau} \quad n_t = (n_h)^{1/2} \quad (58)$$

d. Skala percepatan

$$Acceleration = \frac{u}{T} \quad (59)$$

$$a_r = \frac{a_p}{a_m} = \frac{\left(\frac{u}{T}\right)_p}{\left(\frac{u}{T}\right)_m} = \frac{u_p}{T_p} \times \frac{T_m}{u_m} = \frac{u_p}{u_m} \times \frac{T_m}{T_p} = \sqrt{L_r} \times \frac{1}{\sqrt{L_r}} = 1$$

$$\frac{u_p}{u_m} = \sqrt{L_r}, \quad \frac{T_m}{T_p} = \sqrt{L_r}$$

$$n_a = \frac{a_p}{a_m} = \frac{n_L}{n_T^2} \quad (60)$$

### 2.3.3. Similaritas Dinamis

Jika model dan prototipe secara geometris dan kinematis kongruen, dan gaya yang bekerja pada keduanya mengalir dalam arah yang sama, maka keduanya disebut kongruen dinamis. Pastikan bahwa setiap gaya yang bekerja pada model dapat dihasilkan dalam rasio yang tetap terhadap prototipe karena kepatuhan dinamis selalu terjadi dan termasuk dalam kepatuhan kinematik dan dinamis. Parameter kesamaan dinamis mencakup:

- Berat spesifik
- Energi
- Gaya
- Impuls
- Kerja
- Massa
- Momen
- Rapat massa
- Tegangan permukaan
- Tekanan
- Tenaga
- Viskositas dinamis

Untuk mencapai kecocokan dinamis antara model dan prototipe, hanya gaya-gaya yang disebutkan di atas yang memiliki nilai perbandingan yang sama. Sebaliknya, hanya gaya-gaya yang relevan dengan masalah yang dihitung dan



dipelajari yang harus dipilih. Berikut ini adalah contoh penggunaan bilangan tak berdimensi untuk menghasilkan persamaan dinamis.

- Bilangan Reynold

$$R_e = \frac{U_L}{\nu} \rightarrow n_{Re} = \frac{R_{ep}}{R_{em}} = \frac{n_u n_L}{n_u} \quad (61)$$

- Froude

$$Fr = \frac{u}{g \cdot L} = n_{Fr} = \frac{n_u}{(n_L)^{0,5}} \quad (62)$$

#### 2.4. Skala Model

Prinsip pembuatan model skala adalah membangun kembali masalah yang ada pada prototipe dengan nilai komparatifnya, sehingga peristiwa yang terjadi pada model sesuai dengan kondisi yang ada pada prototipe. Faktor-faktor berikut dipertimbangkan saat memilih skala model (Rahayu, 2013) :

- Ada ruang untuk membuat model.
- Ketersediaan aliran dan tekanan (pompa, sumber air)
- Ketersediaan bahan dan instrumen
- Ketersediaan sistem kontrol dan instrumentasi
- Ketersediaan karyawan peneliti (dengan pengalaman)
- Ukuran dari prototipe
- Pelaksanaan proyek

#### 2.5. Skala Model Distorsi

Dalam beberapa situasi, model harus dibuat dengan skala yang berbeda dari kondisi prototype. Selain itu, ketika model mencakup area yang sangat besar, seperti sungai, muara, pelabuhan, dan pesisir pantai, model tidak dapat dibuat sebesar yang seharusnya.

Membuat model yang lebih kecil merupakan pilihan yang lebih hemat biaya dan ruang, tetapi ini dapat menghasilkan kedalaman aliran hanya milimeter, yang berarti bahwa kekasaran permukaan dan kondisi turbulen tidak dapat dicapai. Akibatnya, solusi yang mempertimbangkan biaya dan ketersediaan ruang diperlukan untuk memenuhi kedua kebutuhan tersebut. Salah satu cara untuk mencapai hasil ini adalah dengan membuat model terdistorsi atau model dengan

skala dimensi horizontal yang berbeda dari skala vertikal. Dalam model seperti ini, skala Dalam beberapa situasi, model harus dibuat dengan skala yang berbeda dari kondisi prototype. Selain itu, ketika model mencakup area yang sangat besar, seperti sungai, muara, pelabuhan, dan pesisir pantai, model tidak dapat dibuat sebesar yang seharusnya.

Membuat model yang lebih kecil merupakan pilihan yang lebih hemat biaya dan ruang, tetapi ini dapat menghasilkan kedalaman aliran hanya milimeter, yang berarti bahwa kekasaran permukaan dan kondisi turbulen tidak dapat dicapai. Akibatnya, solusi yang mempertimbangkan biaya dan ketersediaan ruang diperlukan untuk memenuhi kedua kebutuhan tersebut. Salah satu cara untuk mencapai hasil ini adalah dengan membuat model terdistorsi atau model dengan skala dimensi horizontal yang berbeda dari skala vertikal. vertikal biasanya lebih besar daripada skala horizontal. Ini bertujuan untuk menghasilkan model yang tidak selaras dalam hal ketersediaan ruang, kemudahan pengoperasian, dan hasil representatif.

Model skala distorsi mempertimbangkan parameter karakteristik dominan tertentu untuk mencapai kesesuaian atau kesetaraan yang sedekat mungkin dengan proses alami. Ketika kongruensi geometri model dengan skala yang sama—juga dikenal sebagai model tidak terdistorsi—secara teknis sulit dibuat, model ini banyak digunakan.

Selain itu, terdapat beberapa pertimbangan dalam memilih model terdistorsi; namun, ada beberapa batasan yang perlu diperhatikan saat membuat model terdistorsi, sebagai berikut:

1. Ukuran maksimum model yang dapat dibuat dibatasi oleh ruang laboratorium.
2. Besar model yang dapat dibuat dibatasi oleh toleransi tertinggi yang diperbolehkan selama proses pembuatan model.
3. Kekasaran model  $K_m$  tidak boleh lebih dari 10 kali lipat kekasaran pada prototipe  $K_p$  ( $K_m \leq 10 K_p$ ) atau ( $K_s \leq 10$ ). Ketentuan ini juga penting untuk menentukan ukuran model  $K_s = K_m/K_p$ . Tujuannya adalah untuk menghindari kekasaran yang berlebihan pada model.

4. Untuk bahan yang berbentuk granular dan tidak kohesif, model alas tidak tetap atau alas yang bergerak digunakan. Ukuran partikel harus cukup besar untuk mencegah partikel melewati aliran (batas kehalusan).
5. Besar atau kecilnya model yang akan dibuat juga dipengaruhi oleh kapasitas aliran maksimum laboratorium.

Jika skala vertikal dilambangkan dengan  $n_v$  dan skala horizontal dilambangkan dengan  $n_h$  maka diperoleh hubungan:

$$n_L = \frac{L_p}{L_m} \text{ dan } n_h = \frac{h_p}{h_m} \quad (63)$$

dan nilai koefisien distorsi ( $r$ ) berikut:

$$r = \frac{L_p}{L_m} \quad (64)$$

rumusan dari beberapa parameter utama pada model distorsi :

1. Skala luas ( $n_A$ ) dan skala volume ( $n_v$ )

- Skala Luas

$$n_A = \frac{A_p}{A_m} = \frac{b_p h_p}{b_m h_m}$$

$$n_A = n_L n_h \quad (65)$$

- Skala Volume

$$n_v = \frac{V_p}{V_m} = \frac{L_p b_p h_p}{L_m b_m h_m}$$

$$n_v = n_L^2 n_h \quad (66)$$

2. Skala Kecepatan ( $n_u$ )

$$n_u = \frac{U_p}{U_m} = \left[ \frac{h_p}{h_m} \right]^{1/2} \quad (67)$$

3. Skala debit ( $n_Q$ )

$$n_Q = n_A n_u$$

$$n_Q = n_L n_h n_h^{1/2}$$

$$n_Q = n_L n_h^{3/2} \quad (68)$$

4. Skala waktu ( $n_t$ )

$$n_t = \frac{t_p}{t_m} = \frac{L_p/u_p}{L_m/u_m} = \frac{n_L}{n_u}$$

$$n_t = n_L n_h^{-1/2} \quad (69)$$

5. Skala koefisien Chezy

$$n_L^{1/2} = n_C n_h^{1/2} \frac{n_h^{1/2}}{n_L^{1/2}}$$

$$n_C = \left[ \frac{n_L}{n_h} \right]^{1/2} = 1 \tag{70}$$

6. Skala koefisien Manning

$$n_u = \frac{1}{n_n} n_R^{2/3} \frac{n_h^{1/2}}{n_L^{1/2}}$$

$$n_n = n_L^{2/3} n_h^{-1/2} \tag{71}$$

7. Skala transport sedimen

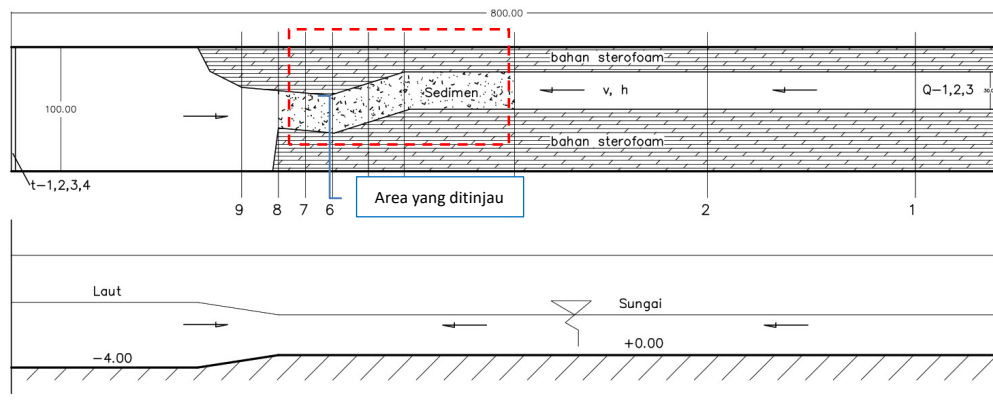
$$ns = n\Delta^{1/2} .nh^{3/2} \tag{72}$$

$$n\Delta = \frac{\rho^s - \rho}{\rho}$$

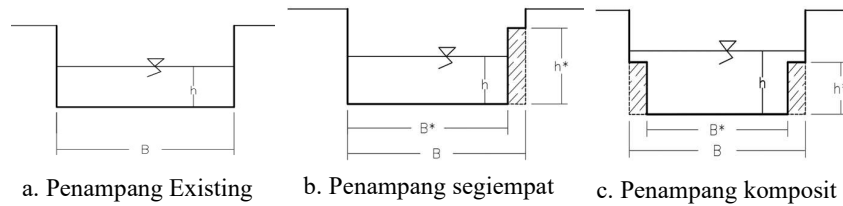
**2.6. Hipotesis**

Pada alur/ saluran, *kecepatan* adalah fungsi dari debit *Q* dibagi penampang *A*. Kecepatan yang di design mampu menggelontorkan sedimen, dengan memperkecil penampang pada debit *Q*. Dengan memberikan penampang A desain pada sisi kiri dan kanan saluran, dapat membentuk penampang baru didasar efek dari sedimen transpor karena perubahan kecepatan aliran.

Berdasarkan penelitian terdahulu dan tinjauan pustaka, parameter yang berpengaruh pada penelitian ini adalah parameter penampang, parameter aliran, parameter tinggi pasang surut dan parameter sedimen. Bentuk skematik profil memanjang dan melintang seperti ditunjukkan pada gambar 22-23.



**Gambar 22** Penampang memanjang saluran



**Gambar 23** Penampang melintang saluran

Hipotesis penelitian sebagaimana uraian diatas dapat dinyatakan secara matematis sebagai berikut :

$$Q_s = f(b^*, h^*, b, h, u, T, Q, g, \rho_w, \mu, \rho_s) \quad (73)$$

dimana  $Q_s$  adalah debit sedimen (gr/s),  $b$  adalah Lebar sungai (cm),  $b^*$  adalah lebar penampang flushing (cm),  $h^*$  merupakan tinggi penampang flushing,  $h$  adalah tinggi muka air (cm),  $u$  adalah kecepatan aliran (cm/s),  $T$  adalah periode pasang surut (s),  $Q$  adalah debit sungai (cm<sup>3</sup>/s),  $g$  adalah gravitasi (cm/s<sup>2</sup>),  $\rho_w$  adalah rapat massa air (gr/cm<sup>3</sup>),  $\mu$  adalah kekentalan fluida (gr/cm.s) dan  $\rho_s$  adalah rapat massa sedimen (gr/cm<sup>3</sup>).

Berdasarkan hipotesis sebelumnya, uji pemodelan fisik dilakukan di laboratorium. Bab berikutnya akan membahas spesifikasi model dan pendukung lainnya secara rinci.

## 2.7. Metode Analisis Bilangan Tak Berdimensi

Bilangan tak berdimensi digunakan untuk menunjukkan hubungan antar parameter penelitian dan hasilnya. Analisis dimensional digunakan untuk menemukan bilangan-bilangan tak berdimensi. Metode matrik eselon, metode Buckingham, metode Rayleigh, metode stepwise, dan metode Langhaar adalah beberapa metode atau teknik yang sering digunakan dalam analisis dimensi. Dalam kasus ini, metode Buckingham digunakan.

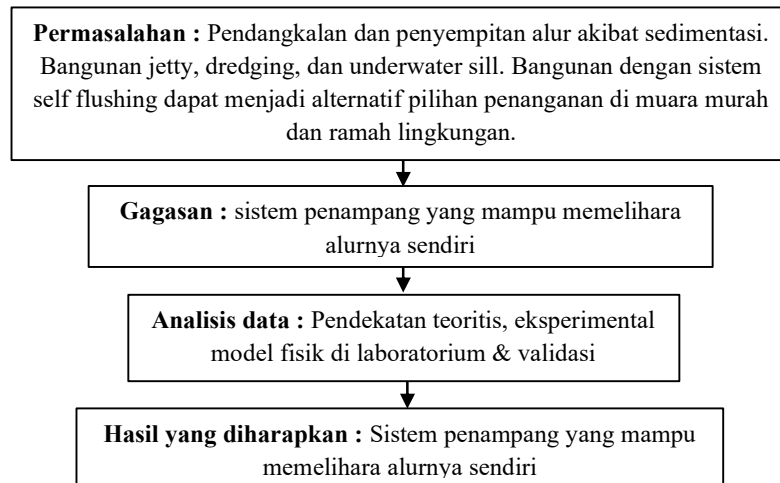
Prosedur analisis dimensi menggunakan metode Buckingham meliputi (Rohani et al., 2021a) :

1. Identifikasi semua parameter penelitian dalam sistem yang diteliti,

2. Pilih 3 variabel berulang. Variabel-variabel tersebut harus tidak berdimensi, dan tidak ada satupun yang mempunyai dimensi yang sama. Gabungan ketiga variabel ini mengandung tiga dimensi utama, dan dari ketiga variabel tersebut tidak menghasilkan variabel tak berdimensi. Dalam hidrolika, biasanya:
  - Karakteristik dimensi linier
  - Karakteristik kecepatan
  - Karakteristik massa jenis air
3. Tuliskan persamaan umum tersebut ke dalam variabel  $\pi$ . Variabel ini merupakan hasil perkalian tiga variabel berulang yang eksponennya tidak diketahui dan satu variabel sisa.
4. Hitung nilai eksponensial yang belum diketahui dengan cara menyamakan eksponen 3 besaran pokok pada kedua ruas setiap persamaan dimensi,
5. Tuliskan hasil akhir persamaan penelitian secara umum dalam bentuk  $\pi$
6. Untuk memperoleh persamaan akhir diperlukan langkah-langkah sebagai berikut:
  - a. Variabel tak berdimensi, secara langsung sebagai  $\pi$ ,
  - b. Apapun  $\pi$  yang dapat digantikan dengan  $\pi$  adalah apapun yang bersifat arbitrer. Misalnya  $\pi_1$  diganti  $\pi_1^2$  dst.
  - c. Apa pun  $\pi$  dapat di *replace* dengan mengalikan  $\pi$  p dengan bilangan numerik apa pun. Misalnya  $\pi_1$  diganti  $3\pi_1$  dst, dan ditambah atau dikurangi dengan  $\pi$  lainnya.
  - d. Apapun  $\pi$  dapat diganti dengan  $\pi$  lainnya
  - e. Apa pun  $\pi$  dapat diganti dengan mengalikan  $\pi$  ini dengan  $\pi$  lainnya. Misalnya  $\pi_1$  diganti  $\pi_1 \times \pi_2$ , dst.

## 2.8. Kerangka Pikir

Kerangka pikir penelitian yang dilakukan, disajikan dalam bentuk bagan alir, seperti pada gambar 24.



**Gambar 24** Kerangka pikir penelitian