

**SKRIPSI**

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH JARAK LUBANG  
PERFORASI TERHADAP PERUBAHAN TEKANAN DI  
SEPANJANG PIPA**

**Disusun dan diajukan oleh:**

**MUHAMMAD NAUFAL FAUZY  
D011 19 1147**



**PROGRAM STUDI SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024**



# LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

## Studi Ekperimental Pengaruh Jarak Lubang Perforasi terhadap Perubahan Tekanan di Sepanjang Pipa

Disusun dan diajukan oleh

**Muhammad Naufal Fauzy**  
**D011191147**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian  
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
Pada tanggal 16 Agustus 2024  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, S.T, M.Eng  
NIP 196805292002121002

Menyetujui,  
Dosen Pembimbing,



Dr. A. Ildha Dwipuspita, S.T, M.T  
NIP 198907142024062001



## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Muhammad Naufal Fauzy  
NIM : D011191147  
Program Studi : Teknik Sipil  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{ STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH JARAK LUBANG PERFORASI  
TERHADAP PERUBAHAN TEKANAN DI SEPANJANG PIPA }

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 17 Agustus 2024

Menyatakan



Muhammad Naufal Fauzy



## ABSTRAK

**MUHAMMAD NAUFAL FAUZY.** Studi Eksperimental *Pengaruh Jarak Lubang Perforasi Terhadap Perubahan Tekanan Di Sepanjang Pipa* (dibimbing oleh Dr. A. Ildha Dwipuspita, ST, MT)

Masalah yang sering terjadi pada muara sungai yaitu salah satunya pendangkalan atau sedimentasi. Peningkatan konsentrasi sedimen di sekitar muara menyebabkan pendangkalan serta tertutupnya aliran sungai. Metode fluidisasi bekerja dengan cara memanfaatkan gaya pancaran air melalui lubang-lubang kecil pada sisi pipa yang tertanam dalam endapan untuk mengangkat sedimen menjadi sedimen suspensi kemudian terbawa oleh arus laut menuju laut dalam. Dalam menerapkan metode tersebut di lapangan, perlu memperhatikan besarnya tekanan yang akan dipancarkan oleh lubang fluidisasi untuk mengangkat sedimen. Jenis penelitian yang digunakan adalah pemodelan fisik secara eksperimental di laboratorium dimana kondisi tersebut dibuat dan diatur oleh peneliti dengan mengacu pada literatur-literatur yang berkaitan dengan penelitian tersebut.

Adapun Hasil eksperimen menunjukkan jarak lubang perforasi dengan perubahan tekanan berbanding lurus, yang artinya semakin besar jarak lubang yang digunakan maka semakin besar pula tekanan yang terjadi pada fase fluidisasi penuh. Begitu juga seiring bertambahnya ketebalan sedimen, maka semakin besar pula tekanan yang terjadi serta nilai kehilangan tinggi tenaga ( $h_e$ ) yang lebih besar terjadi pada fluidisasi sedimen kasar dibandingkan sedimen halus dan sedang. Hal ini disebabkan karena porositas sedimen kasar yang besar. Sehingga debit yang dibutuhkan pada saat fluidisasi cenderung lebih kecil.

Kata Kunci: Fluidisasi, Perforasi, Eksperimental



## ABSTRACT

**NAMA LENGKAP MAHASISWA.** *An experimental study on the effect of perforation hole spacing on pressure changes along the pipe (supervised by Mrs. Dr.A. Ildha Puspita, S.T., M.T)*

Problems that often occur at river mouths are siltation or sedimentation. An increase in sediment concentration around the estuary causes siltation and closure of river flows. The fluidization method works by utilizing the force of water jets through small holes on the side of the pipe embedded in the sediment to lift the sediment into suspension sediment then carried by ocean currents to the deep sea. In applying the method in the field, it is necessary to pay attention to the amount of pressure that will be emitted by the fluidization hole to lift the sediment. The type of research used is experimental physical modeling in the laboratory, where the conditions are created and regulated by the researcher by referring to the literature related to the research.

The experimental results show that the perforation hole distance is directly proportional to the pressure change, which means that the larger the hole distance used, the greater the pressure that occurs in the full fluidization phase. Likewise, as the thickness of the sediment increases, the greater the pressure and the greater value of the high loss of energy ( $h_e$ ) occurs in the fluidization of coarse sediments compared to fine and medium sediments. This is due to the large porosity of coarse sediment. So that the discharge needed at the time of fluidization tends to be smaller.

Keywords: Fluidization, Perforation, Experimental



## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI .....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK .....	iii
ABSTRACT .....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR .....	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL .....	ix
KATA PENGANTAR .....	xi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
1.5 Ruang Lingkup.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Muara (Estuary) .....	5
2.2 Sedimentasi .....	8
2.3 Pemeliharaan Alur.....	14
2.4 Fluidisasi .....	17
2.5 Penelitian Sebelumnya .....	29
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	30
3.1 Lokasi Penelitian.....	30
3.2 Jenis Penelitian dan Sumber Data .....	30
3.3 Benda Uji dan Alat.....	31
3.4 Prosedur Penelitian.....	35
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	43
4.1 Pemeriksaan Material Sedimen.....	43
4.2 Data Hasil Penelitian.....	49
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN .....	71
5.1 Kesimpulan .....	71
5.2 Saran.....	71
DAFTAR PUSTAKA .....	72



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Tipe muara yang didominasi gelombang laut .....	6
Gambar 2 Tipe muara yang didominasi aliran sungai .....	7
Gambar 3 Tipe muara yang didominasi pasang surut.....	8
Gambar 4 Gaya seret ( <i>drag force</i> ) dan gaya angkat ( <i>lift force</i> ).....	14
Gambar 5 Contoh sistem pengerukan dengan jenis Cutter Suction Dredger Digambar Kembali sesuai Bray, 1797 (Thaha, 2006).....	15
Gambar 6 Penggunaan sistem <i>sand by passing</i> untuk berbagai jenis <i>littoral barrier</i> (US Army CERC, 1984 dalam (pratikno et.all 2014) (Dalam (Azis, 2022)).....	15
Gambar 7 Skematik denah underwater sill pada kolam pelabuhan PT. Semen Gresik (Persero) Tbk., Tuban Jawa Timur (Dalam (Thaha, 2006))...	16
Gambar 8 Pola erosi & sedimentasi dengan adanya jetty (Triatmodjo B. , 1999) (Dalam (Thaha, 2006)).....	17
Gambar 9 Prinsip Dasar Fluidisasi (Triatmadja, 2001) .....	19
Gambar 10 Tahapan-tahapan pembentukan alur dengan fluidisasi .....	20
Gambar 11 Empat tipe lubang yang dikaji Taufik, dkk.....	22
Gambar 12 Perbandingan sedimen masuk ke dalam pipa pada 4 tipe lubang .....	22
Gambar 13 Liku Gradien Hidraulik Fluidisasi (Thaha, 2006).....	23
Gambar 14 Lokasi Penelitian .....	30
Gambar 15 Flume Percobaan .....	32
Gambar 16 Bak Penampungan.....	32
Gambar 17 Mesin Pompa (Dynamo) .....	33
Gambar 18 Flow Meter .....	33
Gambar 19 Manometer .....	34
Gambar 20 Katup .....	34
Gambar 21 Percobaan Fluidisasi 2 Dimensi .....	39
Gambar 22 Model Sirkulasi Aliran pada Fluidisasi.....	39
Gambar 23 Diagram Alir .....	40
Gambar 24 Grafik distribusi ukuran butir sedimen halus .....	44
Gambar 25 Grafik distribusi ukuran butir sedimen sedang .....	44
Gambar 26 Grafik distribusi ukuran butir sedimen kasar .....	45
Gambar 27 Pelaksanaan Proses Fluidisasi .....	49
Gambar 28 Fluidisasi Sedimen Halus db 30.....	59
Gambar 29 Fluidisasi Sedimen Sedang db 30.....	59
Gambar 30 Fluidisasi Sedimen Kasar db 30.....	60
Gambar 31 Hubungan $\Delta h$ terhadap Jarak Lubang Perforasi $d_b$ 20.....	61
Gambar 32 Hubungan $\Delta h$ terhadap Jarak Lubang Perforasi $d_b$ 30.....	61
Gambar 33 Hubungan $\Delta h$ terhadap Jarak Lubang Perforasi $d_b$ 40.....	62
Gambar 34 Hubungan $\Delta h$ terhadap Jarak Lubang Perforasi $d_b$ 20.....	62
Gambar 35 Hubungan $\Delta h$ terhadap Jarak Lubang Perforasi $d_b$ 30.....	63
Gambar 36 Hubungan $\Delta h$ terhadap Jarak Lubang Perforasi $d_b$ 40.....	63
Gambar 37 Hubungan $\Delta h$ terhadap Jarak Lubang Perforasi $d_b$ 20.....	64
Gambar 38 Hubungan $\Delta h$ terhadap Jarak Lubang Perforasi $d_b$ 30.....	64
Gambar 39 Hubungan $\Delta h$ terhadap Jarak Lubang Perforasi $d_b$ 40.....	65
Gambar 40 Hubungan $h_e$ dan Jarak Lubang Sedimen Halus.....	65



Gambar 41 Hubungan $h_e$ dan Jarak Lubang Sedimen Sedang .....	66
Gambar 42 Hubungan $h_e$ dan Jarak Lubang Sedimen Kasar.....	66
Gambar 43 Hubungan antara Tekanan ( $h_e$ ) dan Porositas ( $\epsilon$ ) .....	68
Gambar 44 Hubungan antara Tekanan ( $h_e$ ) dan Tebal Sedimen ( $d_b$ ).....	70



## DAFTAR TABEL

Tabel 1 Klasifikasi ukuran butir dan sedimen menurut Wentworth .....	10
Tabel 2 Ukuran Butir Sedimen .....	36
Tabel 3 Variasi Tebal Sedimen dan Identifikasi Keruntuhan Sedimen .....	36
Tabel 4 Variasi Tipe, Diameter, Spasi Lubang untuk Uji Lubang Perforasi .....	37
Tabel 5 Gradasi Ukuran Butir .....	43
Tabel 6 Berat jenis sampel 1 (Sedimen gradasi Kasar).....	45
Tabel 7 Berat jenis sampel 2 (Sedimen gradasi Sedang) .....	46
Tabel 8 Berat jenis sampel 3 (Sedimen gradasi Halus).....	46
Tabel 9 Permeabilitas Sedimen .....	48
Tabel 10 Uji Kecepatan Endap Sedimen .....	48
Tabel 11 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 4 cm pada Sedimen Halus.....	50
Tabel 12 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 4 cm pada Sedimen Sedang .....	51
Tabel 13 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 4 cm pada Sedimen Kasar.....	52
Tabel 14 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 5 cm pada Sedimen Halus.....	53
Tabel 15 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 5 cm pada Sedimen Sedang .....	54
Tabel 16 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 5 cm pada Sedimen Kasar.....	55
Tabel 17 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 6 cm pada Sedimen Halus.....	56
Tabel 18 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 6 cm pada Sedimen Sedang .....	56
Tabel 19 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 6 cm pada Sedimen Kasar.....	57



## DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
$\Delta h$	Kebutuhan tekanan
$dh/dL$	Gradien hidraulik
$\Delta$	Rapat massa relative sedimen
$\Delta P_0$	Selisih tekanan di dalam dan di luar pipa
$\alpha$	Porositas
$A$	Luas
$a$	Jarak antar lubang
$A_h$	Luas tiap lubang
$B$	Lebar
$C_D$	<i>Drag Coefficients</i>
$C_d$	Koefisien debit
$C_L$	<i>Lift Coefficients</i>
$C_s$	Koefisien Sharing
$D$	Diameter
$d_b$	Ketebalan sedimen
$D_f$	Diameter lubang perforasi
$D_p$	Daya
$f$	Faktor gesek
$F_D$	<i>Drag Force</i>
$F_L$	<i>Lift Force</i>
$g$	Percepatan gravitasi
$G_s$	<i>Specific Gravity</i>
$H$	Tinggi
$h_e$	Tinggi tekanan
$H_f$	Tekanan fluidisasi
$h_{oc}$	Tinggi kehilangan energi
	Koefisien
	Massa
	Debit



---

$Q_f$	Debit fluidisasi
$Q_h$	Debit tiap lubang
$Re$	Angka Reynolds
$S$	Ukuran butiran
$t$	Waktu
$T$	Lebar alur
$t_f$	Tekanan fluidisasi
<i>Tipe WL</i>	Tipe Weisman dan Lennon
$U$	Kecepatan aliran permukaan
$V$	Volume
$v_a$	Kecepatan aliran
$v_m$	Kecepatan minimum fluidisasi
$W$	Berat
$Z$	Ketinggian diatas datum yang di tentukan
$\omega$	Densitas partikel
$v$	Kecepatan
$v.r$	<i>Void ratio</i>
$\gamma$	Berat jenis
$\gamma_d$	Berat isi kering
$\varepsilon$	Porositas sedimen
$\mu$	Permeabilitas
$\rho$	Rapat massa
$\varphi$	Sudut gesek



## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Puji dan Syukur kepada Allah SWT atas limpahan Rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH JARAK LUBANG PERFORASI TERHADAP PERUBAHAN TEKANAN DI SEPANJANG PIPA**” yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa banyak kendala yang dihadapi dalam menyusun tugas akhir ini, namun berkat bantuan dari berbagai pihak, maka tugas akhir ini dapat terselesaikan. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. **Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. **Bapak Prof. Dr. Ir. H. M. Wihardi Tjaronge S.T., M.Eng.**, selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
3. **Ibu Dr. A. Ildha Dwi Puspita, S.T., M.T.**, selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan penulisan tugas akhir ini hingga selesai.
4. **Dr. Ir. Riswal K, S.T., M.T.**, selaku Kepala Laboratorium Hidrolika Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas semua fasilitas yang digunakan selama melakukan penelitian.
5. Seluruh Dosen, staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Yang istimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, yaitu Ayahanda **H.M. Nawir Fachdan, SE** dan Ibunda **Selviana Nawir**, atas doa yang tiada hentinya, memberi perhatian, dukungan, kasih sayang, serta menjadi motivasi terbesar penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Saudara dan Saudari penulis, **Ir. Muhammad Fadhil Fauzan, ST** dan **Ratu Ania** yang memberi semangat serta dukungan.



3. Rekan Tim Riset Pantai, terkhusus **Bapak Rudi Aziz**. Terima kasih telah memberikan bimbingan dari awal penelitian hingga penyusunan Tugas Akhir ini hingga banyak ilmu dan pengetahuan baru yang penulis dapatkan.
4. Saudari **Nadya Zulfia** selaku rekan penelitian dalam menyelesaikan Tugas Akhir mulai dari tahap awal hingga selesai. Terima kasih telah sama-sama berjuang dan memberikan bantuan.
5. Saudari **Tzabita Aqilah Suwandi** yang telah memberi semangat serta membantu dan menemani penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Saudari dan saudari, sebagai sahabat yang telah menemani penulis selama di dunia perkuliahan. Terima kasih telah berbagi suka dan duka serta semua pengalaman bersama yang didapatkan.
7. Saudara-saudari se-**PORTLAND 2020** yang senantiasa berproses bersama dan menjalani dinamika kehidupan kampus 4 tahun terakhir. Terima kasih telah memberikan begitu banyak warna baru dan pengalaman yang tidak akan dilupakan penulis.
8. Teman-teman **KKD Keairan 2019**, senantiasa bersama-sama saling memberikan semangat dan dorongan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Teman-teman Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak, terkhusus dalam dunia Teknik Sipil meskipun dalam Tugas Akhir ini masih banyak terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun.

Gowa,

Penulis



# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Muara (Estuari) adalah wilayah badan air tempat masuknya air sungai ke laut, samudera, danau, atau bahkan sungai yang lebih besar. Muara sungai berfungsi sebagai tempat keluarnya debit sungai yang berlebih terutama pada saat banjir terjadi menuju laut. Karena terletak di ujung hilir sungai, maka debit aliran di muara adalah lebih besar dibandingkan pada tampang sungai di bagian hulu. Selain itu muara (estuari) mempunyai nilai ekonomis yang penting karena dapat berfungsi sebagai alur penghubung antara laut dan daerah yang cukup dalam di daratan. Nelayan yang berada di sekitar pesisir pun dapat memanfaatkan muara sebagai jalur pelayaran untuk menangkap ikan di laut.

Masalah yang sering terjadi pada muara sungai yaitu salah satunya pendangkalan atau sedimentasi. Peningkatan konsentrasi sedimen di sekitar muara menyebabkan pendangkalan serta tertutupnya aliran sungai. Pendangkalan muara dapat menyebabkan terhambatnya jalur transportasi kapal dengan draft tertentu pada wilayah yang umumnya menjadikan muara sebagai jalur menuju pelabuhan (Triatmodjo B. , 2014). Sedangkan pada tertutupnya aliran sungai menjadi hambatan bagi distribusi air saat terjadi curah hujan tinggi di daerah hulu sehingga dapat menyebabkan banjir pada daerah sekitar sungai. Pada alur pelayaran, sedimentasi mengurangi kedalaman alur sehingga kapal tidak dapat tertambat sedangkan pada pelabuhan yang berada di sisi alur muara peran sedimentasi dapat menyebabkan pendangkalan pada kolam pelabuhan. Jika laju transportasi sedimen menyusuri pantai tidak berubah maka dapat menyebabkan lidah pasir yang akan berkembang memotong alur pelayaran masuk kawasan pelabuhan (Thaha, 2006).

Dalam mengatasi masalah alur maupun penyempitan akibat sedimentasi telah dilakukan dengan berbagai cara dan teknologi. Pembangunan jetty ataupun underwater sill telah dilakukan untuk mengurangi pengaruh gelombang. Di kondisi

uga telah dilakukan pengerukan (dredging) menggunakan kapal keruk  
mindahkan tumpukan sedimen tersebut. Namun, teknologi tersebut tidak  
n efisien dilakukan karena membutuhkan biaya yang sangat besar. Metode



fluidisasi merupakan metode yang dinilai cocok untuk pemeliharaan alur di muara sungai. Selain itu, biaya yang dibutuhkan relatif lebih murah. Metode ini sudah pernah dikaji oleh Weisman dkk (1977-1994). Metode fluidisasi bekerja dengan cara memanfaatkan gaya pancaran air melalui lubang-lubang kecil pada sisi pipa yang tertanam dalam endapan untuk mengangkat sedimen menjadi sedimen suspensi kemudian terbawa oleh arus laut menuju laut dalam. Dalam menerapkan metode tersebut di lapangan, perlu memperhatikan besarnya tekanan yang akan dipancarkan oleh lubang fluidisasi untuk mengangkat sedimen.

Berdasarkan maksud tersebut maka penulis bermaksud melakukan penelitian tentang **“Studi Eksperimental Pengaruh Jarak Lubang Perforasi Terhadap Perubahan Tekanan Di Sepanjang Pipa”**.



## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, diperoleh rumusan masalah dalam penelitian yakni sebagai berikut:

1. Bagaimana hubungan antara jarak lubang perforasi terhadap perubahan tekanan dalam fluidisasi penuh?
2. Bagaimana pengaruh jarak lubangperforasi terhadap perubahan tekanan pada fluidisasi penuh?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Dengan adanya penelitian ini, diharapkan mampu memenuhi tujuan sebagai berikut:

1. Dapat mengetahui dan memahami hubungan antara jarak lubang perforasi terhadap perubahan tekanan dalam fluidisasi penuh.
2. Dapat menganalisis pengaruh jarak lubang perforasi terhadap perubahan tekanan pada fluidisasi penuh.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang bisa diperoleh dari penelitian ini yakni sebagai berikut:

1. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai pedoman dan pendekatan teknis perencanaan bilamana model ini menjadi pilihan aplikatif di suatu wilayah yang mengalami masalah sedimentasi atau pendangkalan air..
2. Memberikan manfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan dalam studi terkait dan dapat dijadikan sebagai bahan referensi untuk kajian penelitian lebih lanjut.

## 1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam menjalankan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengkaji karakteristik partikel sedimen seperti butiran sedimen, distribusi ukuran butiran ( $S$ ), dan densitas partikel ( $\omega$ ).  
Mengkaji besaran bukaan katup pada proses flushing dan fluidisasi terhadap waktu ( $t$ ), kebutuhan tekanan ( $\Delta h$ ), dan kecepatan ( $v$ ).



3. Sedimen yang digunakan adalah jenis pasir muara (non-kohefif).
4. Penelitian ini bersifat eksperimental laboratorium dan tidak membutuhkan skala model di laboratorium.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Muara (Estuary)

Muara (Estuari) menurut kamus besar Bahasa Indonesia adalah perairan pantai setengah tertutup tempat air laut bertemu dengan air tawar. Estuari juga berarti muara sungai yang berbentuk corong yang melebar ke arah laut karena pengaruh pasang. Pertemuan aliran air Sungai dengan pasang surut laut serta gelombang memberi banyak permasalahan pada wilayah muara terutama pada bagian mulut Sungai (river mouth) yang merupakan bagian hilir muara Sungai (Afni, Mudin, & dan Rahman, 2019).

Muara Sungai terbagi menjadi tiga kelompok yang tergantung pada factor dominan yang mempengaruhi. Ketiga faktor tersebut adalah gelombang, debit sungai, dan pasang surut (Yuwono, 1994).

#### 2.1.1 Muara yang didominasi gelombang laut

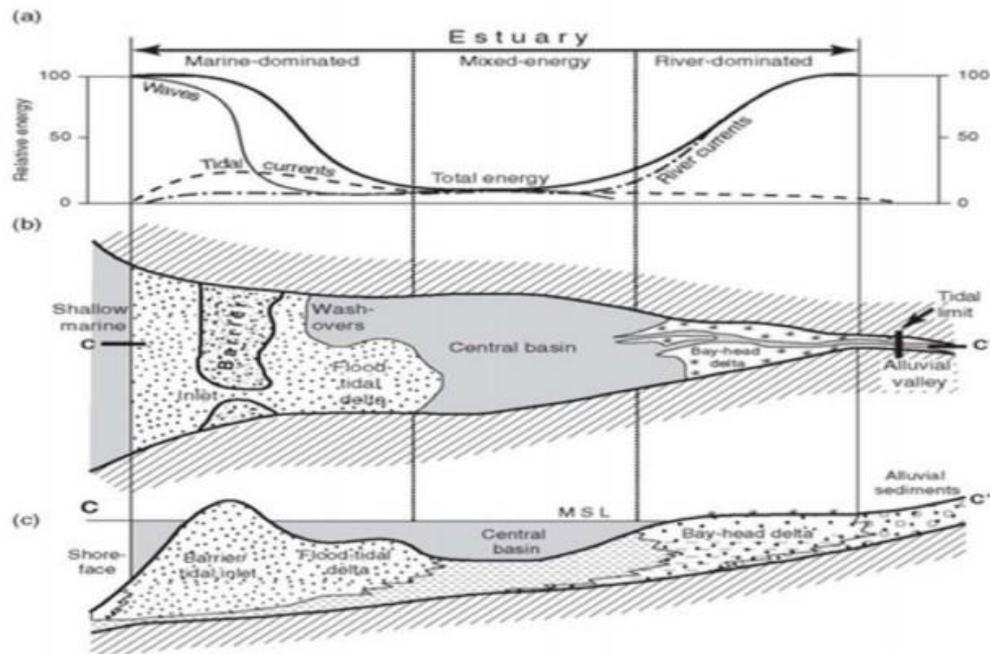
Pada tipe ini biasanya muara tertutup oleh lidah pasir dengan pola sedimentasi. Semakin besar gelombang, semakin besar angkutan sedimen dan semakin banyak sedimen yang mengendap di muara (Triatmodjo B. , 1999).

Apabila debit sungai kecil, kecepatan arus tidak mampu mengerosi (menggelontor) endapan tersebut sehingga muara sungai dapat benar-benar tertutup oleh sedimen. Permasalahan timbul pada musim hujan, dimana debit banjir tidak lancar terbuang ke laut karena adanya penutupan muara. Akibatnya, banjir dapat terjadi di daerah sebelah hulu muara. Jika debit sungai sepanjang tahun cukup besar, kecepatan arus dapat mengerosi endapan tersebut, sehingga mulut sungai selalu terbuka (Triatmodjo B. , 1999).

Pada muara sungai yang membelok, mulut sungai selalu bergerak (berpindah-pindah). Perpindahan tersebut dipengaruhi oleh angkutan sedimen sepanjang pantai dan debit. Gelombang pecah yang membentuk sudut terhadap garis pantai

akan limpasan energi yang dapat diuraikan dalam komponen tegak lurus sepanjang pantai.





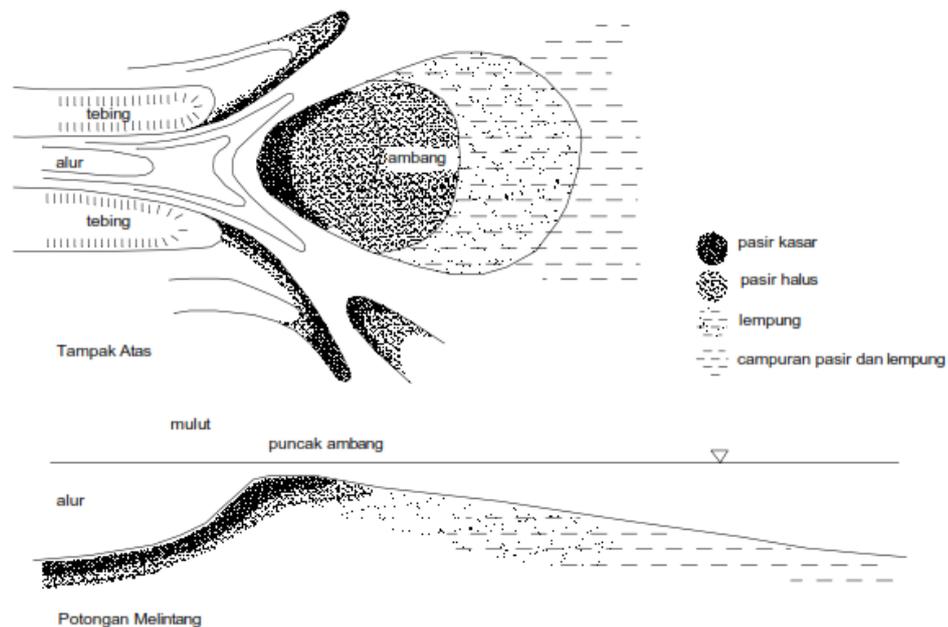
Gambar 1 Tipe muara yang didominasi gelombang laut

### 2.1.2 Muara yang didominasi debit sungai

Tipe muara ini ditandai dengan debit sungai yang menyusur setiap tahun cukup besar sehingga debit tersebut merupakan parameter utama pembentukan muara sungai. Pada tipe muara ini pada umumnya tidak terjadi pendangkalan yang serius. Di alur sungai, terutama pada waktu air surut kecepatan aliran besar, sehingga sebagian sedimen yang telah diendapkan tererosi kembali. Tetapi di depan muara dimana aliran telah menyebar, kecepatan aliran lebih kecil sehingga tidak mampu mengerosi semua sedimen yang telah diendapkan. Dengan demikian dalam satu siklus pasang surut jumlah sedimen yang mengendap lebih banyak daripada yang tererosi, sehingga terjadi pengendapan di depan mulut sungai. Proses tersebut terjadi terus menerus sehingga muara sungai akan maju ke arah laut membentuk delta.

Pada perubahan musim, perlu diperhatikan pendangkalan biasanya terjadi tidak pada alur sungai, tetapi terjadi pada pantai di depan muara tersebut. Di depan muara mungkin terjadi beberapa alur sungai yang akan berubah pada setiap musim dengan arus laut dan angkutan pasir pada waktu itu. Hal ini sangat penting untuk diperhatikan, terutama untuk keperluan navigasi.



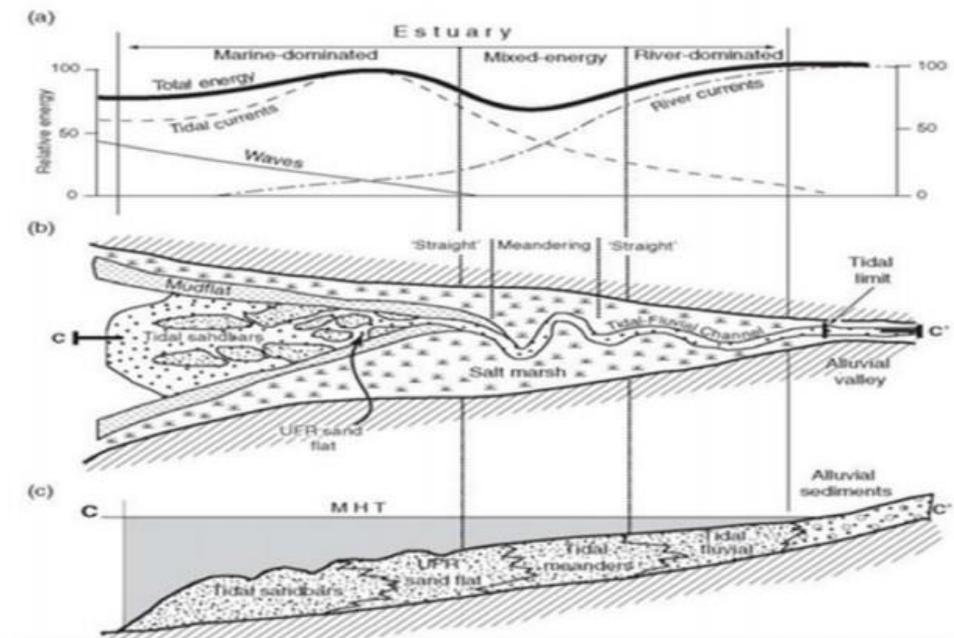


Gambar 2 Tipe muara yang didominasi aliran sungai

### 2.1.3 Muara yang didominasi pasang surut

Tipe muara ini ditandai dengan proses pasang surut yang cukup besar sehingga arus yang terjadi akibat pasang surut ini cukup potensial untuk membentuk muara sungai. Pada tipe ini terjadi angkutan sedimen dua arah (arah laut dan arah darat). Muara biasanya berbentuk corong atau lonceng dengan beberapa alur pendangkalan. Permasalahan utama pada tipe muara ini bukan penutupan muaranya, tetapi pendangkalan yang terjadi di muara Sungai dapat mengganggu pelayaran atau navigasi.





Gambar 3 Tipe muara yang didominasi pasang surut

## 2.2 Sedimentasi

Sedimentasi adalah proses mengendapnya material hasil erosi di suatu tempat tertentu. Pengendapan material dapat diakibatkan oleh air, angin, es atau gletser pada suatu cekungan yang kemudian membentuk jenis batuan baru yang dinamakan batuan sedimen. Endapan-endapan yang terkumpul menjadi batuan baru terdiri dari komponen abiotik, seperti tanah dan pasir yang berasal dari pelapukan atau pengikisan dalam jangka waktu yang lama.

Sedimen adalah bahan utama pembentuk morfologi pesisir. Sedimen berasal dari fragmentasi (pemecahan) batuan. Pemecahan tersebut terjadi karena pelapukan yang dapat berlangsung secara fisik, kimiawi, atau biologis. Berubahnya morfologis pesisir terjadi sebagai akibat berpindahnya sedimen yang berlangsung melalui mekanisme erosi, pengangkutan (transport) dan pengendapan.

Pengendapan sedimentasi Pantai antara lain:

- a. Terjadi pengangkutan sumber material (transport) oleh angin, es, maupun

r.

erlangsungnya pengendapan karena perbedaan arus dan gaya  
danya lingkungan pengendapan yang cocok



- d. Kompaksi akibat gaya berat dari material sedimen yang memaksa volume lapisan sedimennya menjadi berkurang
- e. Lithifikasi akibat kompaksi terus menerus sehingga sedimen akan mengeras

### 2.2.1 Muatan Sedimen Dasar

Partikel-partikel kasar yang bergerak sepanjang dasar Sungai secara keseluruhan disebut dengan muatan sedimen dasar (*bed load*). Adanya muatan sedimen dasar ditunjukkan oleh Gerakan partikel-partikel dasar Sungai. Gerakan itu dapat bergeser, menggelinding, atau meloncat-loncat, akan tetapi tidak pernah lepas dari sungai. Gerakan ini kadang-kadang dapat sampai jarak tertentu dengan ditandai bercampurnya butiran partikel tersebut bergerak ke arah hilir (Soewarno, 1991).

### 2.2.2 Muatan Sedimen Melayang

Muatan sedimen melayang (*suspended load*) dapat dipandang sebagai material dasar Sungai (*bed material*) yang melayang di dalam aliran Sungai dan terdiri terutama dari butiran-butiran pasir halus yang senantiasa didukung oleh air dan hanya sedikit sekali interaksinya dengan dasar Sungai, karena selalu didorong ke atas oleh turbulensi aliran (Soewarno, 1991).

### 2.2.3 Transpor Sedimen

Sedimen transpor secara umum diartikan sebagai proses perpindahan horizontal dari satu tempat ke tempat lainnya baik dalam bentuk campuran sedimen dengan fluida pengangkutnya (*river and coastal transport*) maupun aliran massa oleh fluida yang mengangkutnya (*mass flows*). Laju transport sedimen adalah ukuran volume sedimen yang melintasi suatu penampang dalam satuan waktu (Thaha, 2006).

Transpor sedimen pantai dibedakan menjadi dua macam (Triatmodjo B. , 1999), yaitu transport menuju dan meninggalkan pantai (*onshore-offshore transport*) yang mempunyai arah rata-rata tegak lurus garis pantai, sedangkan sepanjang pantai (*longshore transport*) mempunyai arah rata-rata sejajar di dalam laut, gerak partikel air karena gelombang jarang mencapai dasar yang di laut dangkal, partikel air dekat dasar bergerak maju dan mundur



secara periode. Kecepatan partikel air di dekat dasar naik dengan bertambahnya tinggi gelombang dan berkurang dengan kedalaman (Triatmodjo B. , 1999).

#### 2.2.4 Karakteristik Sedimen

Sedimen didefinisikan sebagai partikel-partikel solid yang terangkut dalam media cair atau ditemukan menjadi deposit endapan setelah terangkut oleh aliran air, angin, gelombang, gletser maupun oleh pengaruh gravitasi lainnya (Chien & Wan, 1999). Sedimen yang ditemukan di pantai dan muara sungai berasal dari erosi garis pantai, dari daratan hulu yang terbawa oleh aliran sungai dan dari laut yang terbawa oleh arus ke pantai.

Bentuk butiran sedimen akan mempengaruhi kecepatan endap dan proses angkutan sedimen. Koefisien dan parameter dari bentuk-bentuk butiran sedimen dikelompokkan dalam tiga macam yaitu *shape* (faktor bentuk), *sphericity* (koefisien kebulatan), dan *roundness* (koefisien kekasaran permukaan). Dalam teknik sipil klasifikasi sedimen dibedakan menjadi lempung (*clay*), lumpur (*silt*), pasir (*sand*), kerikil (*gravel*), koral (*pebble*) atau kerakal (*cabbles*), dan batu (*boulders*). Menurut Wentworth klasifikasi berdasar ukuran butir dapat dilihat pada tabel:

Tabel 1 Klasifikasi ukuran butir dan sedimen menurut Wentworth

	Klasifikasi	Diameter Partikel (mm)
Berangkal	Sangat besar	4096-2048
	Besar	2048-1024
	Sedang	1024-512
	Kecil	512-256
Kerakal	Besar	256-128
	Kecil	128-64
Koral (Kerikil Besar)	Sangat kasar	64-32
	Kasar	32-16
	Sedang	16-8
	Halus	8-4
Kerikil		4-2
Pasir	Sangat kasar	2-1
	Kasar	1-0.5
	Sedang	0.5-0.125
	Halus	0.125-0.062
Lumpur	Sangat halus	
	Kasar	0.062-0.031
	Sedang	0.031-0.016
	Halus	0.016-0.008
	Sangat halus	0.008-0.004



	Klasifikasi	Diameter Partikel (mm)
Lempung	Kasar	0.004-0.002
	Sedang	0.002-0.001
	Halus	0.001-0.0005
	Sangat halus	0.0005-0.00024

### 2.2.5 Klasifikasi dan Sifat Dasar Sedimentasi

Beberapa klasifikasi dan sifat dasar dari sedimen adalah sebagai berikut:

#### 1. Rapat Massa, Berat Jenis dan Rapat Relatif

Rapat massa ( $\rho$ ) adalah massa tiap satuan volume (Triatmodjo B, 1999). Rapat massa berpengaruh terhadap berat jenis sedimen, dimana berat jenis sedimen ini akan mempengaruhi dari mekanisme transport sedimen dalam arti mudah atau tidaknya sedimen tersebut untuk melakukan transport sedimen dan dapat dirumuskan dengan:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Ket :

$\rho$  = rapat massa (kg/m<sup>3</sup>)

M = Massa (kg)

V = Volume (m<sup>3</sup>)

Rapat massa air pada suhu 4°C dan tekanan atmosfer standard adalah 1000 kg/m<sup>3</sup>. Sedimen umumnya berasal dari *desintegrasi* atau *dekomposisi* batuan (Mardjiko P, 1987), seperti lempung (pecahan *feldspar* dan *mica*), lumpur (silikat), dan pasir (kuarts).

Berat jenis ( $\gamma$ ) adalah berat benda tiap satuan volume pada temperatur dan tekanan tertentu. Sedangkan berat suatu benda adalah massa kali percepatan gravitasi, sehingga hubungan antara rapat massa dengan berat jenis adalah:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{Mg}{V} \quad (2)$$

Ket :

$\gamma = \rho \cdot g$ , dengan :

$\gamma$  = berat jenis

(kgf/m<sup>3</sup> , atau N/m<sup>3</sup>)



$\rho$  = rapat massa (kg/m<sup>3</sup> , atau kgm/m<sup>3</sup>)

$g$  = percepatan gravitasi (m/dt<sup>2</sup>)

$M$  = Massa (kg)

Berat jenis air pada suhu 4°C dan tekanan atmosfer adalah 1000 kgf/m<sup>3</sup> atau 1 ton/m<sup>3</sup>.

## 2. Kecepatan Endap Sedimen (*Fall Velocity*)

Kecepatan endap butiran ditentukan oleh persamaan keseimbangan antara berat butiran dalam air dengan hambatan butiran selama butiran mengendap, dengan kata lain berat butir di dalam air sama dengan gaya hambatan butiran.

Selanjutnya pergerakan sedimen mengalami percepatan dan gaya penahan meningkat dengan meningkatnya kecepatan jatuh. Setelah menempuh jarak tertentu, kecepatan menjadi konstan dan gaya drag penahan ( $F_D$ ) akan sama dengan gaya berat ( $W$ ).

## 3. Porositas Bahan dan *Bulk Density*

Porositas bahan dinyatakan dalam perbandingan volume pori bahan dengan volume padat bahan dan bulk density ( $A$ ) adalah massa leering tiap satuan volume sedimen di tempat (Mardjiko P, 1987) yang masing-masing dinyatakan sebagai berikut:

$$\text{Porositas } (\alpha) = \frac{\text{Volume rongga}}{\text{Volume rongga} + \text{bahan padat}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{Void ratio } (v.r) = \frac{\text{Volume rongga}}{\text{Volume bahan padat}} \times 100\% \quad (4)$$

## 4. Permeabilitas Sedimen

Hubungan linier antara gradien hidraulik ( $dh/dl$ ) dengan kecepatan aliran melalui pori diperlihatkan pada persamaan kecepatan yang diberikan oleh Hukum Darcy sebagaimana diekspresikan berikut:

$$v_a = K \frac{dh}{dL} \quad (5)$$

Dimana:

$v_a$  = kecepatan aliran (m/detik)

$\frac{dh}{dL}$  = gradien hidraulik



$K$  = konduktivitas hidraulik pada  $10^\circ$  atau  $20^\circ\text{C}$  (m/detik)

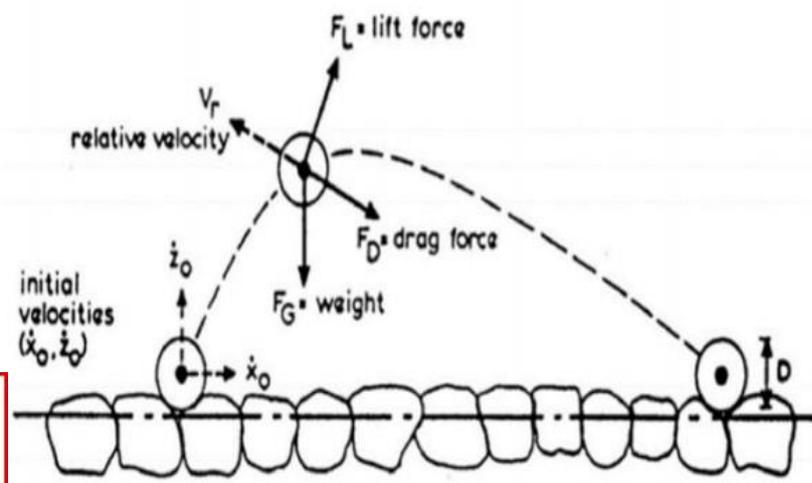
Angka-angka permeabilitas ( $K$ ) yang umum digunakan:

Gravel	1 m/detik
Coarse sand	$10^{-2}$ m/detik
Fine sand	$10^{-5}$ m/detik
Silts	$10^{-9}$ m/detik
Clays	$10^{-11}$ m/detik

### 2.2.6 Gaya-Gaya yang Bekerja pada Butiran Sedimen dalam Air

Suatu butiran sedimen dalam aliran fluida akan menerima gaya-gaya fluida apabila terdapat pergerakan relatif antara butiran dan fluida tersebut. Pergerakan relatif yang dimaksud adalah jika antara butiran dan fluida terdapat perbedaan kecepatan aliran misalnya pergerakan butiran lebih lambat atau lebih cepat dari aliran fluida (Mehta, 1993). Gaya fluida yang bekerja searah dengan pergerakan butiran disebut gaya seret (*drag force*), sedangkan gaya fluida yang bekerja dengan arah normal atau tegak lurus arah pergerakan butiran disebut gaya angkat (*lift force*) (L.C, 1990).

Pada umumnya pendekatan dilakukan dengan menggunakan koefisien yang disebut koefisien seret dan angkat (*drag and lift coefficients  $C_D$  dan  $C_L$* ) yang ditentukan secara eksperimental. Kedua koefisien ini sangat dipengaruhi oleh tipe aliran laminar, turbulen, atau transisi di sekitar butiran melalui angka Reynold ( $Re$ ). Dengan demikian dapat dikatakan bahwa  $C_D$  dan  $C_L$  adalah fungsi  $Re$ .



Gambar 4 Gaya seret (*drag force*) dan gaya angkat (*lift force*)

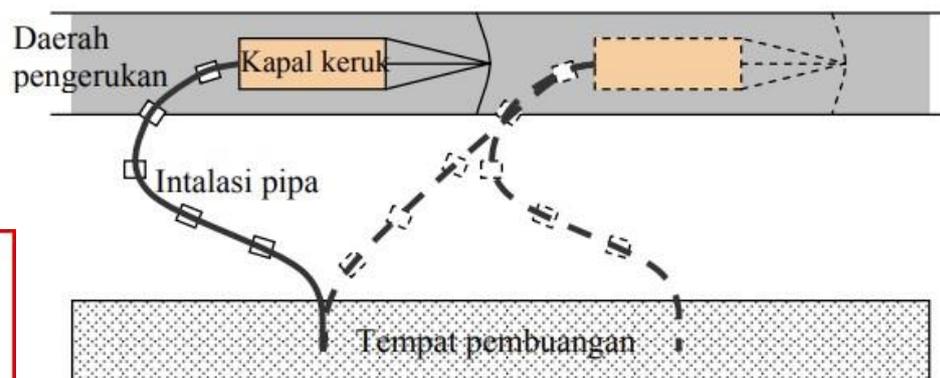
## 2.3 Pemeliharaan Alur

Pemeliharaan alur meliputi usaha untuk mengatasi sedimentasi pada alur pelayaran maupun alur muara yang umumnya dilakukan dengan metode pengerukan (*dredging*), *sand by passing*, pembangunan *underwatersill*, *jetty* dan *breakwater*.

### 1. Pengerukan (*Dredging*)

Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 5 Tahun 2010 pekerjaan pengerukan adalah pekerjaan mengubah dasar perairan untuk mencapai kedalaman dan lebar yang dikehendaki atau untuk mengambil material dasar laut/perairan yang dipergunakan untuk keperluan tertentu. Kegiatan untuk membuat alur pelayaran serta merawat alur pelayaran adalah melalui pekerjaan pengerukan pada alur pelayaran dengan menggunakan peralatan.

Menurut (Eisma, 2006) pekerjaan pengerukan dapat dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu Pengerukan awal (*capital dredging*) yang dilakukan pada tipe tanah yang telah lama mengendap. Pengerukan jenis ini biasanya digunakan dalam pengerjaan pelabuhan, alur pelayaran, waduk, atau area yang akan digunakan sebagai industri; Pengerukan perawatan (*maintenance dredging*) yang dilakukan pada tipe tanah yang belum lama mengendap. Pengerukan ini dilakukan untuk membersihkan *siltation* yang terjadi secara alami. Pengerukan ini biasanya diterapkan pada perawatan alur pelayaran dan pelabuhan; Pengerukan ulang (*remedial dredging*) yang dilakukan pada wilayah yang telah dikeruk namun mengalami kesalahan, biasanya berupa kesalahan kedalaman.

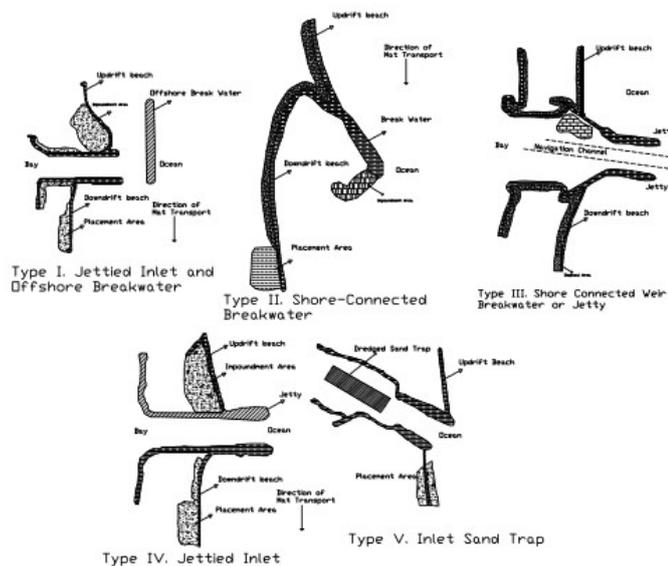


Gambar 5 Contoh sistem pengerukan dengan jenis Cutter Suction Dredger Digambar Kembali sesuai Bray, 1797 (Thaha, 2006)

## 2. Sand by Passing

*Sand by passing* merupakan proses pemindahan pasir yang berada di sepanjang pantai yang dipindahkan secara sengaja melewati *inlet*. *Inlet* merupakan jalan air yang pendek dan sempit yang berhubungan dengan laut atau dapat juga berupa danau besar dengan air didalamnya, *inlet* itu ada yang alamiah (teluk) dan ada pula yang sengaja di buat untuk keperluan navigasi (Pelabuhan) dengan jalan menahan laju transportasi sedimen sejajar pantai (Azis, 2022).

Cara yang biasa dilakukan untuk memperbaiki kondisi inlet dilakukan dengan memasang jetties atau break water pada kedua sisi saluran inlet, bangunan ini digunakan untuk menghalangi transportasi sedimen sepanjang pantai. Jetties mempunyai lebih dari satu fungsi antara lain untuk menahan masuknya littoral drift ke dalam channel, berfungsi sebagai training wall selama terjadi tidal current pada inlet, untuk stabilitas posisi dari *navigation channel*.

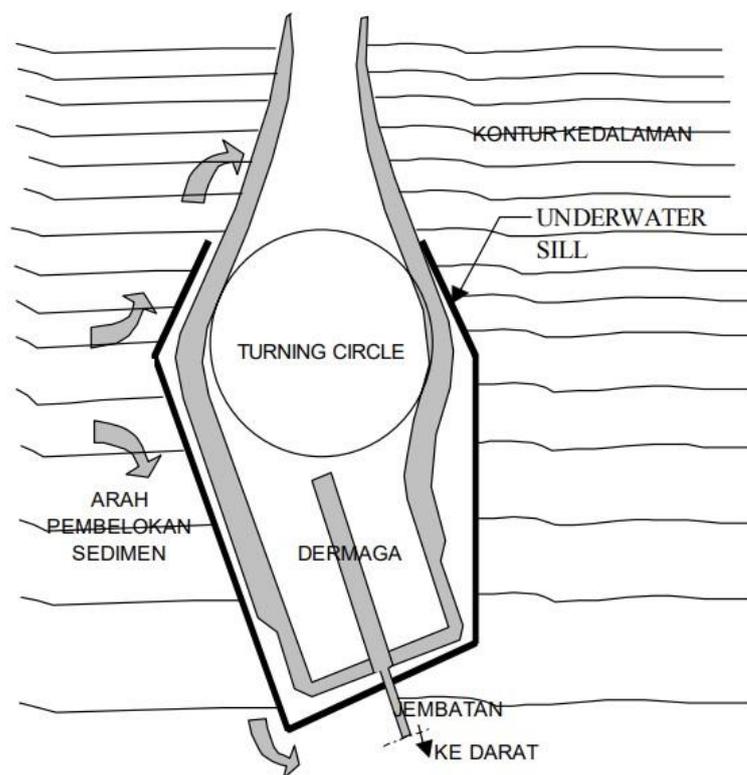


Gambar 6 Penggunaan sistem *sand by passing* untuk berbagai jenis littoral barrier (US Army CERC, 1984 dalam (pratikno et.all 2014) (Dalam (Azis, 2022))



### 3. Bangunan Ambang Bawah Air (*Underwater Sill*)

*Underwater sill* adalah bangunan bawah air yang berfungsi membelokkan aliran aliran transport sedimen agar tidak memasuki alur pelayaran yang dirawat (Thaha, 2006). Pembuatan bangunan underwater sill dapat digunakan untuk menghindari dan mengurangi pendangkalan di Pelabuhan. Bangunan ambang bawah air atau underwater sill ini menggunakan konsep pengendalian sedimen dengan cara melindungi kolam-kolam labuh menggunakan bangunan underwater sill sehingga sebagian arus yang membawa sedimen setinggi underwater sill akan terdefleksi dan tidak mampu masuk ke area kolam labuh.



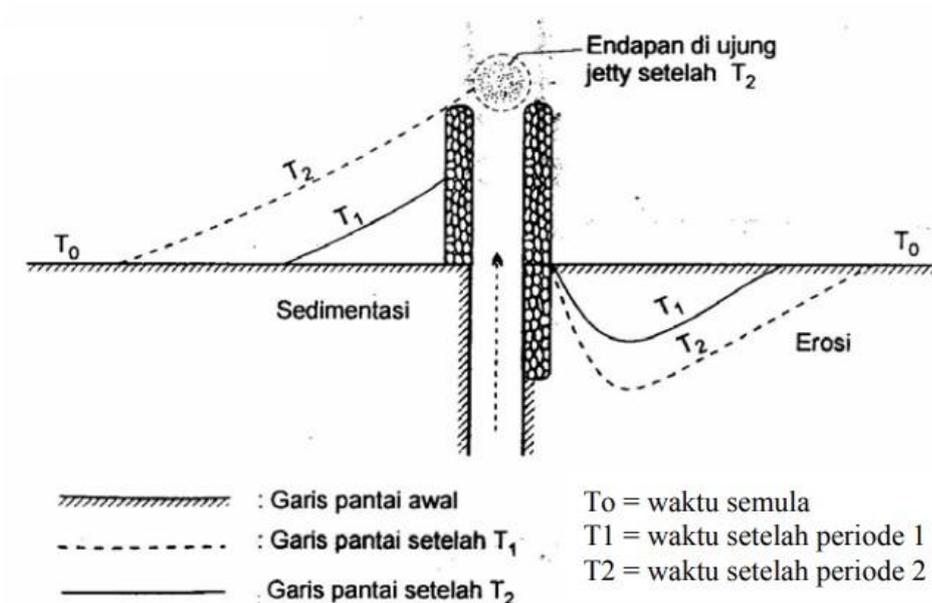
Gambar 7 Skematik denah underwater sill pada kolam pelabuhan PT. Semen Gresik (Persero) Tbk., Tuban Jawa Timur (Dalam (Thaha, 2006))

### 4. Bangunan *Jetty* dan *Breakwater*

*Jetty* adalah bangunan yang menjorok ke laut yang terletak di sisi mulut sungai yang dimaksudkan secara bersama-sama mengarahkan aliran debit air menggelontor sedimen dan memotong transport sedimen menyusuri pantai yang berpotensi mengendap di mulut alur. Dengan demikian alaman dan lebar mulut sungai atau alur pelayaran dapat terpelihara sesuai



kebutuhan. Bangunan ini banyak dipakai khususnya oleh negara-negara maju untuk menstabilkan alur pelayaran dan muara sungai (Thaha, 2006).



Gambar 8 Pola erosi & sedimentasi dengan adanya jetty (Triatmodjo B. , 1999) (Dalam (Thaha, 2006))

Sedangkan pemecah gelombang adalah merupakan suatu bentuk konstruksi yang terletak agak jauh dari pantai dan biasanya sejajar pantai ataupun tegak lurus arah datangnya gelombang. Berdasarkan bentuknya, pemecah gelombang terdiri dari pemecah gelombang sisi miring, pemecah gelombang sisi tegak dan pemecah gelombang campuran (Triatmodjo B. , 2014).

## 2.4 Fluidisasi

Fluidisasi adalah fluida dengan fraksi solid dasar (*bed deposit*) yang umumnya berbentuk butiran granular menyebabkan butiran tersebut terangkat, teragitasi, dan berpindah dari posisinya semula. Beberapa penelitian terkait pengembangan fluidisasi alur terutama pada muara Sungai seperti pada penanganan pendangkalan sungai (Ni'am, 2002).

Tujuan utama penggunaan metode fluidisasi di lingkungan pantai dan sungai untuk membentuk alur seoptimal mungkin. Dengan demikian pembentukan alur optimal merupakan pertimbangan utama dalam proses desain. Prinsip fluidisasi pada penanggulangan sedimentasi di alur adalah untuk mengubah padat yang mengendap di dasar alur atau muara menjadi *fluid*. Fluidisasi



dilakukan dengan mengalirkan air bertekanan melalui pipa fluidisasi atau pipa bermulut banyak yang tertanam di bawah sedimen. Pancaran air yang keluar dari lubang diharapkan mampu mengusik dan mengangkat sedimen untuk selanjutnya ditranspor oleh arus permukaan yang ada. Bagian yang ditinggalkan berupa lubang yang bermanfaat untuk berbagai hal. Bila daerah yang terfluidisasi berupa garis, maka akan terbentuk alur dengan panjang, lebar dan kedalaman tertentu.

Penguasaan teknologi fluidisasi khususnya untuk tujuan pemeliharaan alur perlu didukung oleh tersedianya referensi dengan uraian yang lebih luas tentang fenomena fluidisasi sedimen oleh jet air. Kenyataan menunjukkan bahwa referensi tentang metode fluidisasi untuk pemeliharaan alur termasuk hasil-hasil penelitaian yang ada, belum mampu mendukung keandalan teknologi ini untuk diterapkan di lapangan (Thaha, 2006).

#### 2.4.1 Prinsip Kerja Fluidisasi

Metode fluidisasi adalah metode yang menggunakan prinsip mengagitasi (mengusik) sedimen dari pipa fluidizer yang ditanam di dasar saluran (di bawah sedimen), dengan memanfaatkan pancaran air bertekanan mengakibatkan sedimen bed load berubah menjadi suspended load, yang pada akhirnya dapat mengalir secara gravitasi ke area yang lebih rendah.

Metode fluidisasi ini dilakukan dengan menggunakan pipa dengan diameter relative besar yang ditanam memanjang di dasar saluran atau di dalam lidah pasir yang akan dibuka. Pemilihan diameter pipa ditetapkan sedemikian rupa sehingga kecepatan aliran kecil dan kehilangan tinggi tenaga akibat gesekan dengan pipa juga kecil. Jika daerah yang difluidisasi merupakan garis, ia dapat membuka lidah pasir di muara sungai atau memperdalam alur pelayaran sebuah pelabuhan (Triatmadja, 2001).

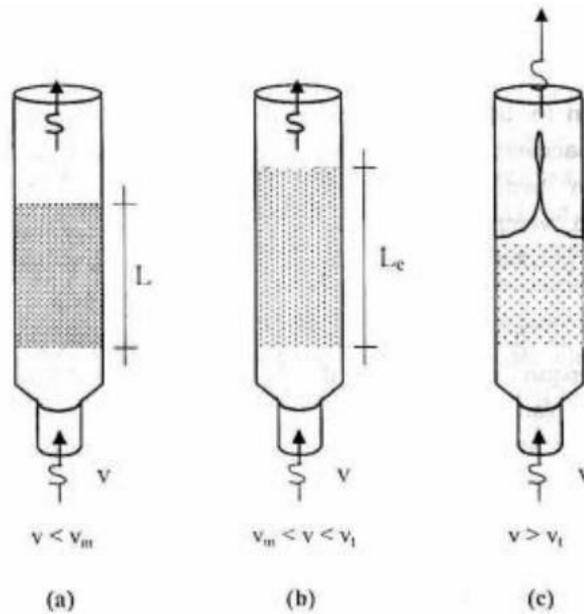
Fluidisasi zat cair dalam hubungannya dengan sedimen adalah terjadinya keseimbangan antara gaya ke atas cairan dengan berat butiran sedimen. Gerakan air ke atas di antara sedimen menunjukkan bahwa energi air di bawah lebih besar

ng dengan berat sedimen.

ses fluidisasi seperti yang dijelaskan Gambar 9 adalah dimana material  
 ebal L dalam tabung akan dialiri zat cair dengan kecepatan V. Menurut



(Chase, 2002), jika kecepatan aliran lebih kecil dari kecepatan minimum fluidisasi ( $V < V_m$ ) material pasir tak terusik (Gambar 9. a). Jika kecepatan aliran ditambah sehingga berada di antara kecepatan minimum fluidisasi dan kecepatan endap butiran ( $V_m < V < V_1$ ), maka pasir akan mengembang mencapai ketebalan  $L_c$  (Gambar 9. b). Dan pasir akan mengikuti kecepatan aliran, jika  $V > V_1$  (Gambar 9. c).



Gambar 9 Prinsip Dasar Fluidisasi (Triatmadja, 2001)

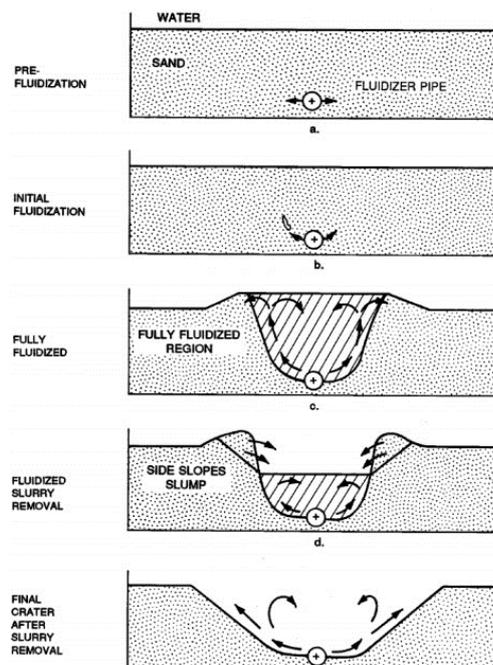
#### 2.4.2 Tahapan-Tahapan Fluidisasi

Tahapan-tahapan fluidisasi menurut Wiesman dan Lennon (1994) terdiri atas lima tahapan yang diuraikan sebagai berikut.

1. Prafluidisasi (Prefluidization)

Jika kecepatan aliran melalui lubang perforasi cukup lambat, maka sedimen (pasir) tidak akan terganggu, air mengalir melalui pori-pori dan tidak terfluidisasi.





Gambar 10 Tahapan-tahapan pembentukan alur dengan fluidisasi  
(US Army Corps of Engineers, 1991)

2. Awal Fluidisasi (*Initial fluidization*)

Fluidisasi awal (*Initial fluidization*) terjadi bilamana aliran air dipercepat, mulai terlihat kantong-kantong terisolasi atau pasir terusik di sekitar lubang perforasi dan selanjutnya bergerak ke atas hingga menyembur (*spout*) dipermukaan sedimen. Keadaan ini merupakan awal dari proses fluidisasi.

3. Fluidisasi Penuh (*fully fluidization*)

Jika kecepatan air ditingkatkan, maka fase fluidisasi penuh (*fully fluidization*) akan terjadi dengan indikasi seluruh sedimen di atas pipa telah terfluidisasi dan membentuk *slurry*. Zona yang terfluidisasi terlihat mempunyai permukaan yang lebih tinggi daripada zona di luarnya.

4. Pembuangan *Slurry* (*Fluidized slurry removal*)

Bila daerah di atas pipa telah terfluidisasi sempurna maka *slurry* dengan mudah dapat diangkut oleh aliran permukaan yang ada.

5. Erosi Pancaran Aliran

ika *slurry* terbuang/terpindahkan semua, maka akan terbentuk alur yang lebar oleh gerusan di sekitar pipa dimana terdapat lubang perforasi. ah *slurry* terangkut, akan terbentuk alur dengan lebar atas sebesar:



$$T = \frac{2d_b}{\tan\phi} + B \quad (6)$$

dengan  $d_b$  = ketebalan sedimen (m),  $\phi$  = sudut gesek dalam material ( $^\circ$ ), dan  $B$  = lebar dasar termasuk diameter pipa ( $D$ ) ditambah lebar gerusan yang terbentuk oleh pancaran air melalui lubang perforasi (m). Dengan demikian bentuk geometri alur yang didapatkan dipengaruhi oleh parameter aliran melalui pipa. Parameter-parameter aliran tersebut adalah diameter pipa ( $D$ ), diameter lubang perforasi ( $D_f$ ), jarak antar lubang ( $a$ ), debit fluidisasi ( $Q_F$ ), dan tinggi tekanan ( $h_e$ ).

### 2.4.3 Pipa Fluidisasi dan Lubang Perforasi

Pipa fluidisasi adalah manifold yang berfungsi menyediakan aliran yang seragam keluar dari lubang perforasi. Untuk itu diperlukan diameter pipa yang memberikan tekanan sepanjang pipa yang relatif konstan (McNown, 1953 dalam Weisman dan Lennon, 1994) (dalam (Thaha, 2006)).

Orientasi lubang perforasi direkomendasikan horisontal di samping kiri kanan pipa. Rekomendasi ini didasarkan pada:

1. Kelley (1977) dalam Weisman dan Lennon (1994) memperlihatkan pembentukan lebar alur optimum dengan posisi lubang tersebut,
2. Weisman et.al (1979) dalam Weisman dan Lennon (1994) memperlihatkan bahwa jet ke atas mudah tersumbat/terisi oleh pasir saat tidak digunakan, sedangkan jika mengarah ke bawah akan menyebabkan pipa tenggelam.
3. Kebutuhan tekanan dan debit fluidisasi untuk menghasilkan  $T$  yang sama antara jet vertikal dan horisontal pada dasarnya sama, namun karena alasan mudah terisi pasir, maka jet horisontal tetap lebih baik (Thaha dkk., 2005).

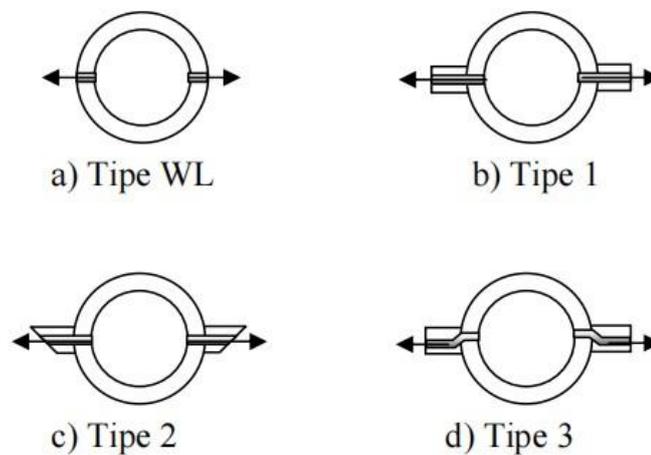
Kajian diameter, spasi dan orientasi lubang perforasi, telah dilakukan pada dua macam ukuran material (diameter tengah 0.15 mm dan 0.45 mm), dua macam kedalaman (25.4 dan 42.0 cm), empat diameter lubang perforasi (1.59; 3.175; 4.76 dan 6.35 mm), empat macam jarak-jarak lubang (2.54; 5.08; 7.62 dan 10.16 cm). Evaluasi didasarkan pada besarnya debit yang dibutuhkan untuk mencapai full fluidization pada masing-masing variasi tersebut. Berdasarkan hasil studi tersebut

direkomendasikan ukuran lubang yang baik berada pada kisaran 3.175- dengan kisaran jarak 2.54-5.08 cm (Weisman dkk., 1988; 1990; 1991; dkk., 1990 dalam Weisman dan Lennon, 1994).

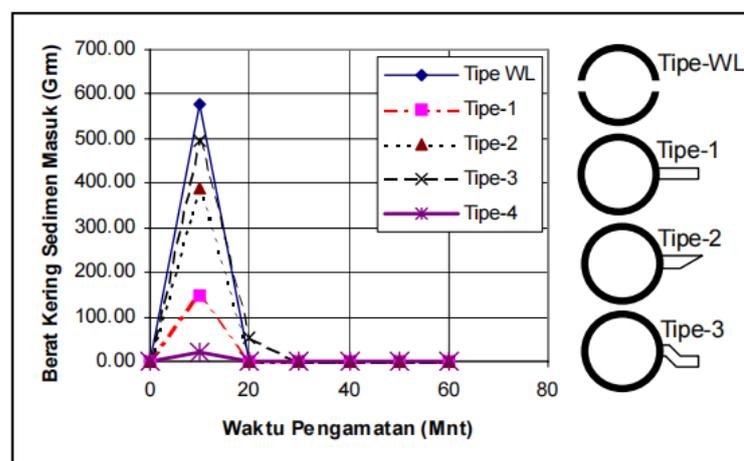


Taufik (2004), Darmawan (2004) dan Triyanto (2005) mengkaji 4 model lubang perforasi untuk mendapatkan model lubang yang mampu meminimalisasi masuknya sedimen ke dalam pipa. Ke empat tipe lubang tersebut adalah tipe WL (Weisman dan Lennon).

Kriteria yang digunakan untuk menilai kinerja tipe lubang adalah jumlah sedimen yang masuk ke dalam pipa setelah operasional dihentikan. Hasil penelitian menunjukkan lubang Tipe 3 yang paling sedikit kemasukan sedimen dengan kata lain dapat meminimalisasi jumlah sedimen yang masuk sekitar 60% dari pada Tipe WL. Tipe 1 dan 2 masing-masing dapat meminimalisasi jumlah sedimen masuk sebesar 30% dan 45% dari pada Tipe WL.



Gambar 11 Empat tipe lubang yang dikaji Taufik, dkk (dalam (Thaha, 2006))

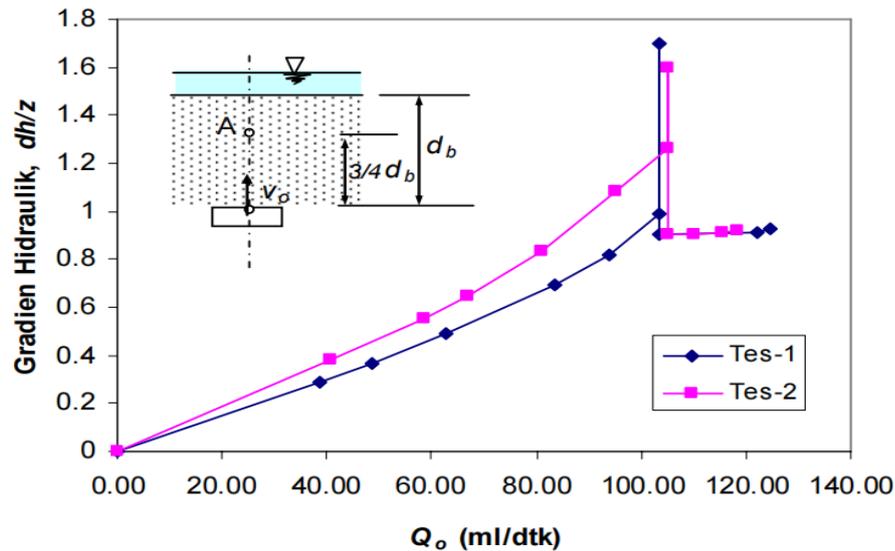


Gambar 12 Perbandingan sedimen masuk ke dalam pipa pada 4 tipe lubang



#### 2.4.4 Gradien Hidraulik Fluidisasi

Debit dan tekanan ketika mencapai ketinggian kritis, maka menyebabkan terjadinya kondisi fluidisasi penuh. Dalam (Thaha, 2006), dilakukan pengukuran tinggi tenaga dengan piezometer untuk mendapatkan gambaran perkembangan gradien hidraulik ( $dh/z$ ) mulai dari pra-fluidisasi hingga fluidisasi penuh 2D.



Gambar 13 Liku Gradien Hidraulik Fluidisasi (Thaha, 2006)

Peningkatan nilai  $dh/z$  yang linier hingga  $Q_{oc}$  menunjukkan kondisi masih pada tahap prafluidisasi dimana tipe aliran masih mengikuti persamaan Darcy. Pada nilai  $Q_o$  mencapai nilai  $Q_{oc}$ , nilai  $dh/z$  meningkat tajam menunjukkan kondisi kritis terjadinya fluidisasi. Peningkatan  $dh/z$  berlangsung beberapa saat hingga aliran air yang menggerus di puncak pusran menyembur di permukaan. Pada tahap ini  $dh/z$  turun drastis yang menunjukkan telah terjadi fluidisasi, dan tipe aliran Darcy berubah menjadi aliran Non Darcy.

#### 2.4.5 Pompa Fluidisasi

Metode fluidisasi tidak dapat dipisahkan dengan sistem perpipaan dan prinsip-prinsip utama aliran melalui pipa (saluran tertutup). Pancaran air yang dihasilkan dari lubang perforasi disuplai pompa dengan debit dan tinggi *head*

gian mendasar yang dipakai untuk menentukan ukuran dan kemampuan dapat dilihat dari:



- Debit (Q) yang dihasilkan,
- Total head (H) yang dibutuhkan,
- Daya (D<sub>p</sub>) yang dibutuhkan dan efisiensi.

Debit atau laju aliran atau kapasitas dari pompa adalah volume zat cair yang mengalir melalui pompa per satuan waktu. Untuk menghitung debit aliran dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$Q = v \cdot A \quad (7)$$

Dengan:

$$Q = \text{debit aliran} \quad (\text{m}^3/\text{detik})$$

$$V = \text{kecepatan aliran} \quad (\text{m}/\text{detik})$$

$$A = \text{luas penampang} \quad (\text{m}^2)$$

Total head adalah panjang atau tinggi total kemampuan pompa untuk mengalirkan air. Daya adalah energi yang diperlukan pompa untuk menaikkan atau mengalirkan zat cair setinggi H.

#### 2.4.6 Kebutuhan Tekanan Fluidisasi

Kebutuhan tekanan atau tinggi tenaga dalam pipa fluidisasi untuk mengangkat sedimen adalah sama dengan kehilangan tinggi tenaga di lubang dan di lapisan sedimen. Bentuk persamaan kebutuhan tinggi tenaga fluidisasi ( $h_e$ ) adalah sebagai berikut (dalam Thaha, 2006):

$$h_e = [1 + k] \frac{v^2}{2g} + d_b \Delta(1 - \varepsilon) \quad (8)$$

Dimana:

$$h_e = \text{kebutuhan tinggi tenaga fluidisasi} \quad (\text{m})$$

$$h_f = \text{kebutuhan tinggi tenaga full fluidisasi} \quad (\text{m})$$

$$d_b = \text{ketebalan sedimen} \quad (\text{m})$$

$$v = \text{kecepatan fluidisasi} \quad (\text{m}/\text{s})$$

$$k = \text{koefisien kehilangan energi di lubang}$$

$$g = \text{gaya gravitasi} \quad (\text{m}/\text{s}^2)$$

kapasitas sedimen

massa relative sedimen



Dari penelitian Weisman-Lennon terlihat bahwa setelah penggelontoran *slurry* berlangsung, tekanan pada pipa fluidisasi penuh berkisar 1 m per meter kedalaman pipa. Tekanan yang dibutuhkan dapat dihitung dengan rumus lubang terendam (dalam Thaha, 2006):

$$Q_h = C_d A_h \sqrt{\frac{2g \times \Delta p_0}{\gamma}} \quad (9)$$

Dimana:

$Q_h$  = debit tiap lubang (liter/detik)

$C_d$  = koefisien debit

$A_h$  = luas tiap lubang ( $m^2$ )

$\Delta P_0$  = selisih tekanan di dalam dan di luar pipa ( $kg/cm^2$ )

$\gamma$  = berat jenis air ( $kg/cm^3$ )

Dengan demikian tinggi tekanan yang diperlukan dihitung dengan persamaan (8) di atas yaitu  $Q_h$ . Selanjutnya, untuk menghitung kehilangan tenaga untuk aliran air yang keluar dari pipa, ditambahkan dengan 1 meter per meter kedalaman pipa.

#### 2.4.7 Kebutuhan Debit Fluidisasi

Persamaan yang dihasilkan dari hukum kontinuitas dimana debit yang keluar melalui lubang jet ( $Q_0$ ) sama dengan debit yang keluar di permukaan sedimen melalui tabung khayal berdiameter  $D_s$  ditambah dengan debit hilang (keluar dari tabung khayal) yang diasumsikan sebesar  $\psi Q_0$ . Persamaan dapat ditunjukkan sebagai berikut (dalam Thaha, 2006):

$$Q = C_D A_h \sqrt{2gh_e} \quad (10)$$

Dimana:

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

$C_D$  = koefisien debit

$A_h$  = luas tiap lubang ( $m^2$ )

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

$h_e$  = kebutuhan tinggi tenaga fluidisasi (m)



### 2.4.8 Aliran pada Lubang Terendam

Aliran melalui lubang jika permukaan zat cair di sebelah hilir lubang keluar adalah di atas sisi lubang, maka lubang tersebut terendam. Rumus Bernoulli dapat digunakan untuk menghitung kecepatan aliran melalui lubang terendam tersebut. Adapun persamaan Bernoulli dapat dirumuskan sebagai berikut (Triatmodjo, 2014):

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad (11)$$

Dimana  $P_1/\gamma = h_1$ ,  $P_2/\gamma = h_2$  dan  $v_1 = 0$  maka kecepatan aliran melalui lubang ( $v_2$ ) dapat diturunkan sebagai berikut:

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (12)$$

Debit yang melalui lubang terendam dapat dihitung dengan rumus:

$$Q = C_D A_h \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (13)$$

Dimana:

$Q$  = debit lubang terendam (liter/detik)

$C_D$  = koefisien debit

$A_h$  = luas penampang ( $m^2$ )

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

$h_1 - h_2$  = selisih elevasi muka air di hulu dan hilir lubang (m)

### 2.4.9 Aliran pada Saluran Tertutup (Pipa)

Jenis aliran dalam saluran tertutup ada 2 jenis, yaitu aliran laminar dan aliran turbulen. Dua jenis aliran tersebut hanya dibedakan berdasarkan besarnya nilai bilangan *Reynold* ( $Re$ ) bilangan *Reynold* ini adalah bilangan yang tak berdimensi dan sama dengan hasil kali kecepatan karakteristik dari sistem dibagi dengan kecepatan kinematic dari cairan dan secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$Re = \frac{vD}{\mu} \quad (14)$$

bilangan *Reynold*

kecepatan aliran

(m/s)



- D = diameter pipa (m)  
 $\mu$  = kekentalan kinematik zat cair ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

### 1. Aliran Laminer

Aliran laminer adalah aliran air yang mempunyai bilangan Reynold kurang dari 2000. Pada aliran ini partikel-partikel zat cair bergerak di sepanjang lintasan – lintasan lurus, sejajar dalam lapisan – lapisan. Besarnya kecepatan dari lapisan yang berdekatan tidak sama. Aliran laminar ini dipengaruhi oleh tegangan geser dan laju perubahan bentuk sudut, yaitu hasil kali kekentalan zat cair dan gradien kecepatan.

### 2. Aliran Turbulen

Aliran turbulen adalah aliran yang mempunyai bilangan Reynold lebih dari 4000. Aliran turbulen ini dapat diklasifikasikan menjadi aliran dalam pipa halus, aliran dalam pipa relative kasar pada kecepatan tinggi, dan aliran di antara keduanya.

## 2.4.10 Kehilangan Tinggi Tenaga

Salah satu faktor yang dominan untuk diperhatikan pada aliran di dalam pipa adalah kehilangan tinggi tenaga. Secara umum, kehilangan tinggi tenaga di dapat dikelompokkan kehilangan energi utama akibat gesekan dengan dinding pipa dan kehilangan energi sekunder akibat sambungan-sambungan, belokan, valve, dan lainnya (Kodoatie, 2002).

Kehilangan energi akibat gesekan dengan dinding pipa di aliran seragam dapat dihitung dengan persamaan Darcy-Weisbach sebagai berikut:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (15)$$

Dimana:

$h_f$  = kehilangan tinggi tenaga akibat gesekan (m)

f = factor gesek (*friction factor*)

L = panjang pipa (m)

D = diameter pipa (mm)

v = kecepatan aliran (m/s)

g = percepatan gravitasi ( $\text{m}/\text{s}^2$ )



#### 2.4.11 Kehilangan Tinggi Tenaga melalui lubang perforasi

Kehilangan tinggi tenaga pada lubang (hoc) untuk mencapai fluidisasi awal adalah merupakan fungsi dari kecepatan jet kritis ( $v$ ). Adapun rumus yang digunakan untuk menghitung kehilangan tinggi tenaga melalui lubang perforasi adalah sebagai berikut (dalam Thaha, 2006).

$$h_{oc} = (1 + K) \frac{v^2}{2g} \quad (16)$$

Dimana:

- $h_{oc}$  = tinggi kehilangan energi akibat gesekan (m)  
 $v$  = kecepatan aliran (m<sup>2</sup>)  
 $g$  = percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)  
 $K$  = koefisien kehilangan energi

#### 2.4.12 Kehilangan Tenaga akibat Sedimen

Kehilangan tinggi tenaga oleh lapisan sedimen dapat ditentukan dengan meninjau keseimbangan gaya ke atas ( $\rho ghA$ ) dengan berat sedimen dalam air ( $\frac{d_b(1-\varepsilon)A(\rho_s-\rho)}{\rho}$ ).

Menghitung kebutuhan tinggi tenaga pada lapisan sedimen dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$h_e = db(1 - \varepsilon) \quad (17)$$

Dimana:

- $h_e$  = kehilangan energi sekunder (m)  
 $db$  = ketebalan sedimen (m)  
 $\Delta$  = rapat massa *relative* sedimen  
 $\varepsilon$  = porositas (%)

#### 2.4.13 Kecepatan Aliran dalam Pipa

Dalam bidang hidraulika kecepatan ( $U$ ) dan debit ( $Q$ ) aliran merupakan faktor yang sangat penting. Dalam hitungan praktis, rumus yang banyak digunakan persamaan kontinuitas, yaitu:

$$Q = A \cdot v \quad (18)$$



Dimana:

$Q$  = debit aliran ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$A$  = luas penampang ( $\text{m}^2$ )

$V$  = kecepatan aliran ( $\text{m/s}$ )

## 2.5 Penelitian Sebelumnya

Di Indonesia penelitian mengenai fluidisasi telah beberapa kali dilakukan terutama di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta. Di antara penelitian mengenai sistem fluidisasi secara umum antara lain sebagai berikut:

1. Harnaeni N, (2010), meneliti metode fluidisasi dengan menggunakan sedimen semi kohesif (pasir berlumpur). Model fluidisasi ini dibuat di dalam flume dengan Panjang pipa 200 cm, dengan diameter pipa fluidisasi 7,6 cm (3 inci), dengan diameter lubang 3 mm dan jarak antar lubang 5 cm. debit yang digunakan untuk simulasi sebesar 1,4 l/dtk dan 2,1 l/dtk dengan variasi ketebalan 10 dan 12 cm. hasil dari pengujian ini adalah semakin besar debit yang digunakan akan menghasilkan alur yang lebih besar.
2. Arsyad T, (2002), melakukan eksperimen 1D, 2D, dan 3D dengan jet horizontal seri. Eksperimen 1D pada pasir kasar, sedang, dan halus. Tipe lubang berbentuk curat dengan pelindung karet untuk mencegah masuknya sedimen dan mengurangi potensi penyumbatan. Dimensi alur optimal tercapai dalam kisaran waktu 10-20 menit.
3. Faisal, (2010), melakukan eksperimen dimensi lubang perforasi terhadap fluidisasi sedimen butir kasar. Menggunakan pipa dengan jarak lubang perforasi 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 cm. Pada pengujian ini menghasilkan tekanan untuk awal fluidisasi maksimal adalah 10 kali tebal sedimen.

