

SKRIPSI

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH JARAK LUBANG
TERHADAP KEBUTUHAN DEBIT PADA FLUIDISASI
PENUH**

Disusun dan diajukan oleh:

**NADYA ZULFIA MUSLIMIN
D011 19 1042**



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH JARAK LUBANG TERHADAP KEBUTUHAN DEBIT PADA FLUIDISASI PENUH

Disusun dan diajukan oleh

Nadya Zulfia Muslimin
D011 19 1042

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 : Nadya Zulfia Muslimin
NIM : D011191042
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{ Studi Eksperimental Pengaruh Jarak Lubang Terhadap Kebutuhan Debit Pada Fluidisasi Penuh }

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, 16 Agustus 2024

Yang Menyatakan



METERAL TEMPEL
DPA77ALX324895653

Nadya Zulfia Muslimin



ABSTRAK

NADYA ZULFIA MUSLIMIN. *Studi Eksperimental Pengaruh Jarak Lubang Terhadap Kebutuhan Debit Pada Fluidisasi Penuh* (dibimbing oleh Dr. A. Ildha Dwipuspita, ST, MT)

Muara (estuary) adalah bagian sungai yang dipengaruhi oleh pasang surut air laut yang terletak di bagian hilir sungai. Muara sungai berfungsi sebagai pengeluaran debit sungai, terutama pada waktu banjir ke laut. Karena letaknya yang berada di ujung hilir, maka debit aliran di muara adalah lebih besar dibanding pada tampang sungai di bagian hulu. Permasalahan yang sering terjadi pada muara sungai yaitu adanya sedimentasi yang mengendap sehingga aliran dari badan sungai ke arah laut lepas menjadi kecil, sehingga dapat mengganggu pembuangan debit sungai ke laut dan akhirnya membanjiri daerah hulu muara. Beberapa cara untuk mengatasi permasalahan ini dengan cara membangun bangunan jetty atau breakwater, ataupun melakukan pengerukan. Namun cara-cara tersebut masih tergolong kurang ekonomis untuk mengatasi volume sedimentasi muara yang relatif kecil.

Berdasarkan hal tersebut maka dilakukan penelitian ini yakni dengan cara fluidisasi, dengan harapan penelitian ini mampu menganalisis bagaimana kebutuhan debit yang diperlukan sehingga menghasilkan tekanan yang baik dalam melakukan pembongkaran serta penghisapan sedimen yang mengendap. Kemudian juga dapat mengetahui pengaruh penggunaan jarak lubang perforasi terhadap kebutuhan debit yang digunakan. Fluidisasi ini dilakukan dengan cara meletakkan pipa di dasar sungai kemudian dilakukan pancaran fluida dari lubang perforasi yang nantinya dapat membongkar dan menghisap sedimen.

Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan model flume di Laboratorium Hidrolika. Eksperimen ini menggunakan beberapa variasi dalam melakukan pengambilan datanya. Adapun beberapa variasi yaitu menggunakan beberapa jenis sedimen berdasarkan gradasinya, kemudian ketebalan sedimen dalam flume diberi variasi 3 ketebalan. Selanjutnya variabel baru yang ditambahkan dalam penelitian yang berbeda dari sebelumnya yaitu variasi perbedaan jarak lubang perforasi, yakni jarak 4 cm, 5 cm, dan 6 cm.

Hasil dari penelitian ini yakni semakin besar jarak lubang maka semakin kecil kebutuhan debit untuk mencapai fluidisasi. Adapun semakin bertambahnya tebal sedimen, maka debit aliran yang dibutuhkan juga semakin kecil.

Kata Kunci: Fluidisasi, Debit, Perforasi



ABSTRACT

NAMA LENGKAP MAHASISWA. *Experimental Study of The Effect of Hole Spacing on Discharge Requirements in Full Fluidization* (supervised by Dr. A. Ildha Dwipuspita, ST, MT)

An estuary is a part of a river that is influenced by sea tides and is located downstream of the river. The river mouth functions as a discharge for river discharge, especially when it floods into the sea. Because it is located at the downstream end, the flow discharge at the estuary is greater than at the river's upstream side. The problem that often occurs at river estuaries is that sedimentation settles so that the flow from the river body towards the open sea becomes small, which can interfere with the discharge of river discharge into the sea and ultimately flood the area upstream of the estuary. Several ways to overcome this problem are by building a jetty or breakwater, or doing dredging. However, these methods are still considered less economical for dealing with the relatively small volume of estuary sedimentation.

Based on this, this research was carried out, namely by means of fluidization, with the hope that this research will be able to analyze the required discharge so as to produce good pressure in carrying out unloading and suction of settled sediment. Then you can also find out the effect of using perforation hole distance on the discharge requirements used. This fluidization is carried out by placing a pipe in the river bed and then emitting fluid from the perforation holes which can then unload and suck out the sediment.

The research was carried out experimentally using a flume model in the Hydraulics Laboratory. This experiment uses several variations in collecting data. There are several variations, namely using several types of sediment based on their gradation, then the thickness of the sediment in the flume is given a variation of 3 thicknesses. Furthermore, a new variable added in the research that is different from the previous one is the variation in the distance between the perforation holes, namely distances of 4 cm, 5 cm and 6 cm.

The result of this study is that the greater the distance of the hole, the smaller the need for discharge to achieve fluidization. As for the increasing thickness of the sediment, the required flow discharge is also smaller.

Keywords: Fluidization, Debit, Perforation



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	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Penelitian Terdahulu	4
2.2 Muara (Estuary)	4
2.3 Sedimentasi	9
2.4 Pemeliharaan Alur	16
2.5 Metode Fluidisasi	21
BAB 3 METODE PENELITIAN	39
3.1 Lokasi Penelitian	39
3.2 Jenis Penelitian dan Sumber Data	39
3.3 Benda Uji dan Alat	40
3.4 Prosedur Penelitian	43
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	50
4.1 Pemeriksaan Material Sedimen	50
4.2 Data Hasil Penelitian	56
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	79
5.1 Kesimpulan	79
5.2 Saran	79
DAFTAR PUSTAKA	80



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 Cara Transpor Sedimen (Priyantoro,1998).....	14
Gambar 5 Contoh sistem pengerukan dengan jenis Cutter Suction Dredger (Digambar Kembali sesuai Bray, 1797 dalam (Thaha, 2006)).....	17
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, Sistem Penggelontoran dengan Pipa Fluidisasi untuk Rekeyasa Pemeliharaan Alur, 2022)).....	19
Gambar 7 Skematik denah underwater sill pada kolam pelabuhan PT. Semen Gresik (Persero) Tbk., Tuban Jawa Timur (Yuwono, 2001) dalam (Thaha, 2006).....	20
Gambar 8 Pola erosi & sedimentasi dengan adanya jetty (Triatmodjo B. , Teknik Pantai, 1999) dalam (Thaha, 2006).....	21
Gambar 9 Karakteristik Fluidized Bed.....	23
Gambar 10 Sketsa yang diusulkan oleh Kelley (1997).....	27
Gambar 11 Sketsa fluidisasi diusulkan oleh Weismann dan Lennon (1995).....	27
Gambar 12 Tahapan-tahapan pembentukan alur dengan fluidisasi.....	29
Gambar 13 Empat tipe lubang (Thaha, 2006).....	31
Gambar 14 Perbandingan sedimen masuk ke dalam pipa pada 4 tipe lubang (Thaha, 2006).....	32
Gambar 15 Liku Gradien Hidraulik Fluidisasi (Thaha, 2006).....	32
Gambar 16 Lokasi Penelitian.....	39
Gambar 17 Flume Tampak Depan.....	40
Gambar 18 Flume Tampak Atas.....	41
Gambar 19 Bak Penampungan.....	41
Gambar 20 Mesin Pompa (Dynamo).....	41
Gambar 21 Flow Meter.....	42
Gambar 22 Manometer.....	43
Gambar 23 Katup.....	43
Gambar 24 Percobaan Fluidisasi 2 Dimensi.....	47
Gambar 25 Bagan Alur Penelitian.....	49
Gambar 26 Grafik distribusi ukuran butir sedimen halus.....	51
Gambar 27 Grafik distribusi ukuran butir sedimen sedang.....	51
Gambar 28 Grafik distribusi ukuran butir sedimen kasar.....	52
Gambar 29 Pelaksanaan Proses Fluidisasi.....	56
Gambar 30 Fluidisasi Sedimen Sedang db 20 cm.....	66
Gambar 31 Fluidisasi Sedimen Sedang db 30 cm.....	66
Gambar 32 Fluidisasi Sedimen Sedang db 40 cm.....	66
Gambar 33 Hubungan Q terhadap Jarak Lubang Perforasi db 20 pada Sedimen Halus.....	68
Gambar 34 Hubungan Q terhadap Jarak Lubang Perforasi db 30 pada Sedimen Halus.....	68



Gambar 35 Hubungan Q terhadap Jarak Lubang Perforasi d_b 40 pada Sedimen Halus	69
Gambar 36 Hubungan Q terhadap Jarak Lubang Perforasi d_b 20 pada Sedimen Sedang	69
Gambar 37 Hubungan Q terhadap Jarak Lubang Perforasi d_b 30 pada Sedimen Sedang	70
Gambar 38 Hubungan Q terhadap Jarak Lubang Perforasi d_b 40 pada Sedimen Sedang	70
Gambar 39 Hubungan Q terhadap Jarak Lubang Perforasi d_b 20 pada Sedimen Kasar	71
Gambar 40 Hubungan Q terhadap Jarak Lubang Perforasi d_b 30 pada Sedimen Kasar	71
Gambar 41 Hubungan Q terhadap Jarak Lubang Perforasi d_b 40 pada Sedimen Kasar	72
Gambar 42 Hubungan Q dan Jarak Lubang Sedimen Halus	73
Gambar 43 Hubungan Q dan Jarak Lubang Sedimen Sedang	73
Gambar 44 Hubungan Q dan Jarak Lubang Sedimen Kasar	74
Gambar 45 Hubungan Q dan Jarak Lubang Perforasi pada Ketiga Jenis Sedimen	74
Gambar 46 Hubungan antara Tekanan (h_c) dan Porositas (ϵ)	76
Gambar 47 Hubungan antara Debit (Q) dan Tebal Sedimen (d_b) pada Jarak Lubang Perforasi 4 cm	76
Gambar 48 Hubungan antara Debit (Q) dan Tebal Sedimen (d_b) pada Jarak Lubang Perforasi 5 cm	77
Gambar 49 Hubungan antara Debit (Q) dan Tebal Sedimen (d_b) pada Jarak Lubang Perforasi 6 cm	77



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Klasifikasi ukuran butir dan sedimen menurut Wentworth	11
Tabel 2 Ukuran Butir Sedimen	44
Tabel 3 Variasi Tebal Sedimen dan Identifikasi Keruntuhan Sedimen	45
Tabel 4 Variasi Tipe, Diameter, Spasi Lubang untuk Uji Lubang Perforasi	46
Tabel 5 Gradasi Ukuran Butir	50
Tabel 6 Berat jenis sampel 1 (Sedimen gradasi Kasar)	52
Tabel 7 Berat jenis sampel 2 (Sedimen gradasi Sedang)	52
Tabel 8 Berat jenis sampel 3 (Sedimen gradasi Halus)	53
Tabel 9 Permeabilitas Sedimen	54
Tabel 10 Uji Kecepatan Endap Sedimen	55
Tabel 11 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 4 cm pada Sedimen Halus	57
Tabel 12 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 4 cm pada Sedimen Sedang	58
Tabel 13 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 4 cm pada Sedimen Kasar	59
Tabel 14 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 5 cm pada Sedimen Halus	60
Tabel 15 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 5 cm pada Sedimen Sedang	60
Tabel 16 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 5 cm pada Sedimen Kasar	61
Tabel 17 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 6 cm pada Sedimen Halus	62
Tabel 18 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 6 cm pada Sedimen Sedang	63
Tabel 19 Pembacaan Debit dan Tekanan spasi lubang 6 cm pada Sedimen Kasar	64
Tabel 20 Rekapitulasi Data Karakteristik Sedimen	75



DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
Δh	Kebutuhan tekanan
dh/dL	Gradien hidraulik
Δ	Rapat massa relative sedimen
ΔP_0	Selisih tekanan di dalam dan di luar pipa
α	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
	Tinggi kehilangan energi
	Koefisien
	Massa



Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
Q	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
ω	Densitas partikel
v	Kecepatan
$v. r$	<i>Void ratio</i>
γ	Berat jenis
γ_d	Berat isi kering
ε	Porositas sedimen
μ	Permeabilitas
ρ	Rapat massa
φ	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 TERHADAP KEBUTUHAN DEBIT PADA FLUIDISASI PENUH**” 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 II yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan penulisan tugas akhir ini hingga selesai.
4. **Bapak 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 teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, yaitu Ayahanda **Muslimin Munadir** dan Ibunda **Suhaeta**, atas doa yang tiada hentinya, memberi perhatian, dukungan, kasih sayang, serta menjadi motivasi terbesar penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.



2. Kedua adik penulis, **Muhammad Rafi Rizqullah** dan **Muhammad Rafardhan Athallah** 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. Saudara **Muhammad Naufal Fauzy**, selaku rekan penelitian dalam menyelesaikan Tugas Akhir mulai dari tahap awal hingga selesai. Terima kasih telah sama-sama berjuang dan memberikan bantuan.
5. Saudari **Juwita Apri Liasari** dan saudari **Miratul Hazanah**, sebagai sahabat yang telah menemani penulis selama di dunia perkuliahan. Terima kasih telah berbagi suka dan duka serta semua pengalaman bersama yang didapatkan.
6. 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.
7. Teman-teman pengurus **HMS FT-UH Periode 2021/2022** yang memberikan banyak pembelajaran serta proses pengembangan diri bagi penulis.
8. Teman-teman pengurus **OKFT-UH Periode 2023** yang mewarnai kehidupan akhir kampus penulis.

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 sungai adalah bagian hilir dari sungai yang berhubungan dengan laut (Triatmodjo B. , Teknik Pantai, 1999) . Mulut sungai adalah bagian paling hilir dari muara sungai yang langsung bertemu dengan laut, sehingga air laut dengan salinitas tinggi dapat bercampur dengan air tawar. Muara (Estuaria) dapat terjadi pada lembah-lembah sungai yang tergenang air laut, baik karena permukaan laut yang naik (misalnya pada zaman es mencair) atau pun karena turunnya sebagian daratan oleh sebab-sebab tektonis. Muara (*estuary*) adalah bagian dari sungai yang dipengaruhi oleh pasang surut air laut (Triatmodjo B. , Perencanaan Pelabuhan, 2009) . Estuaria juga dapat terbentuk pada muara-muara sungai yang sebagian terlindungi oleh beting pasir atau lumpur.

Muara sungai berfungsi sebagai pengeluaran atau pembuangan debit sungai, terutama pada waktu banjir ke laut. Karena letaknya yang berada di ujung hilir, maka debit aliran di muara adalah lebih besar dibanding pada tampang sungai di bagian hulu. Selain itu muara sungai juga harus melewati debit yang ditimbulkan oleh pasang surut air laut.

Permasalahan yang sering terjadi di muara sungai adalah adanya sedimentasi yang mengendap sehingga tampang aliran dari badan sungai ke arah laut lepas menjadi kecil, tidak hanya itu tetapi juga dapat mengganggu pembuangan debit sungai ke laut dan akhirnya membanjiri daerah hulu muara. Fenomena muara sungai pada umumnya terbentuk lapisan material sedimen sekitar mulut sungai akibat sedimentasi.

Terjadinya penumpukan sedimen di sekitar muara juga dipengaruhi oleh pasang surut dan gelombang laut. Pada waktu bersamaan faktor pasang surut, gelombang dan kecepatan aliran sungai bekerja dan membentuk formasi delta dengan variasi bentuk yang berbeda. Pada saat pasang, volume air di daerah

ngai bertambah dengan air yang berasal dari laut sehingga menyebabkan isi sedimen (suspended sediment load) berubah begitupun sebaliknya t. Tingginya suspensi pada dasar permukaan saat pasang menyebabkan



konsentrasi sedimen tersuspensi meningkat dan juga menyebabkan pelambatan pergerakan air menuju hulu sehingga memungkinkan terjadinya pengendapan yang lebih intensif ke arah dasar. Pada saat fase titik balik (fase slack) setelah air pasang menuju air surut menyebabkan konsentrasi sedimen tersuspensi meningkat (Satriadi & Widada, 2004).

Adapun alternatif untuk mengatasi permasalahan sedimentasi ini adalah dengan metode 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 yang keluar melalui lubang-lubang kecil (perforasi) mengakibatkan sedimen *bed load* berubah menjadi *suspended load*, sehingga sedimen yang tersuspensi dapat mengalir secara gravitasi ke area lain yang berelevasi rendah.

Untuk menerapkan metode tersebut, dibutuhkan debit yang cukup untuk melakukan fluidisasi secara penuh. Adapun yang perlu diperhatikan yakni pada lubang perforasi, bagaimana jarak lubang yang divariasikan memengaruhi kebutuhan debit fluidisasi sehingga mengatasi permasalahan sedimentasi di muara lebih efisien.

Demikian penulis ingin melakukan penelitian yang berjudul “**Studi Eksperimental Pengaruh Jarak Lubang Terhadap Kebutuhan Debit pada Fluidisasi Penuh**”.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana hubungan jarak lubang dengan kebutuhan debit pada fluidisasi penuh?
2. Bagaimana pengaruh jarak lubang terhadap kebutuhan debit pada setiap ketebalan sedimen?



1.3 Tujuan Penelitian

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

1. Menganalisis hubungan jarak lubang dengan kebutuhan debit pada fluidisasi penuh.
2. Menganalisis pengaruh jarak lubang terhadap kebutuhan debit pada setiap ketebalan sedimen.

1.4 Manfaat Penelitian

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

1. Diharapkan dapat menambah wawasan pemikiran terhadap pengembangan alternatif dari mengatasi masalah sedimentasi pada muara dengan biaya yang murah dan relatif mudah.
2. Hasil penelitian ini bisa dijadikan bahan referensi untuk penelitian selanjutnya yang berkembang mengenai metode fluidisasi dengan sistem hybrid (menggabungkan fluidisasi dan flushing).
3. Hasil penelitian dapat dijadikan pedoman dalam perencanaan model terkait pilihan penanggulangan di wilayah yang mengalami masalah pengendapan sedimentasi.

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 (ω).
2. Mengkaji besaran bukaan katup pada proses flushing dan fluidisasi terhadap volume (V), waktu (t), kebutuhan tekanan (Δh), kecepatan (v), ketebalan sedimen, dan jarak lubang perforasi.

Sedimen yang digunakan adalah jenis pasir muara (non-kohefif).

Penelitian ini bersifat eksperimental laboratorium dan tidak membutuhkan skala model di laboratorium.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Beberapa hasil riset dari luar negeri dapat ditemukan melalui artikel-artikel dalam jurnal internasional. Weisman dan Lennon secara intensif melakukan riset metode fluidisasi. Hasil-hasil riset mencakup berbagai hal yang cukup luas. Namun pada dasarnya riset ditekankan untuk mengetahui pemilihan yang tepat tentang: diameter pipa *fluidizer*; arah, ukuran dan jarak lubang; debit dan tekanan yang dibutuhkan untuk fluidisasi. Di samping itu beberapa aspek lain dalam sistem fluidisasi didiskusikan di antaranya meliputi material pipa, suplai air bersih, teknik instalasi, dan mekanisme penggelontoran *slurry*.

Di Indonesia, penelitian mengenai fluidisasi telah beberapa kali dilakukan. (Anjani, 2001) dan (Musriati, 2001) meneliti kebutuhan tekanan untuk fluidisasi. (Harnaeni, 2001) membuat model di dalam sebuah flume dengan material sedimen berupa pasir berlumpur. Kebutuhan debit ditinjau tetapi dengan hanya membuat 2 variasi debit dan 2 variasi tebal sedimen. (Ni'am, 2002) melakukan hal yang lebih terpadu dengan variasi yang lebih banyak. Tetapi kebutuhan debit belum dibahas secara jelas. (Yulius, 2003) dan (Dharma, 2004) menitikberatkan penelitiannya pada ukuran lubang, jarak antar lubang dan arah/posisi lubang fluidisasi. Sedangkan (Taufik & Darmawan, 2004) berusaha memperbaiki model lubang perforasi untuk meminimalisasi sedimen yang masuk pada pipa fluidisasi (dalam (Widiyanto, 2005)). Pengembangan penelitian fluidisasi terutama pada pemecahan masalah clogging (penyumbatan) dilakukan pada tahun 2006 (Thaha, 2006), dan juga perkembangan pada sistem pengurasan dan pengisapan *slurry* pada proses fluidisasi yang dilakukan oleh (Pristianto.H & dkk, 2019) dan (Anas & Latif, 2018) dalam (Azis, Maricar, Thaha, & Bakri, 2021)).

2.2 Muara (Estuary)



ra sungai adalah bagian hilir dari sungai yang berhubungan dengan laut erdapat organisme didalamnya (Afni, Mudin, & dan Rahman, 2019). n 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 paling hilir dari muara sungai dan mendominasi penumpukan sedimen. Pengaruh pasang surut pada sungai membentuk ekosistem tersendiri yang umumnya disebut sebagai estuari (Afni, Mudin, & dan Rahman, 2019).

Pengaruh pasang surut terhadap sirkulasi aliran (kecepatan/debit, profil muka air, intrusi air asin) di estuary dapat sampai jauh ke hulu sungai, yang tergantung pada tinggi pasang surut, debit sungai dan karakteristik estuari (tampang aliran, kekasaran dinding, dan sebagainya) (Triatmodjo B. , Teknik Pantai, 1999).

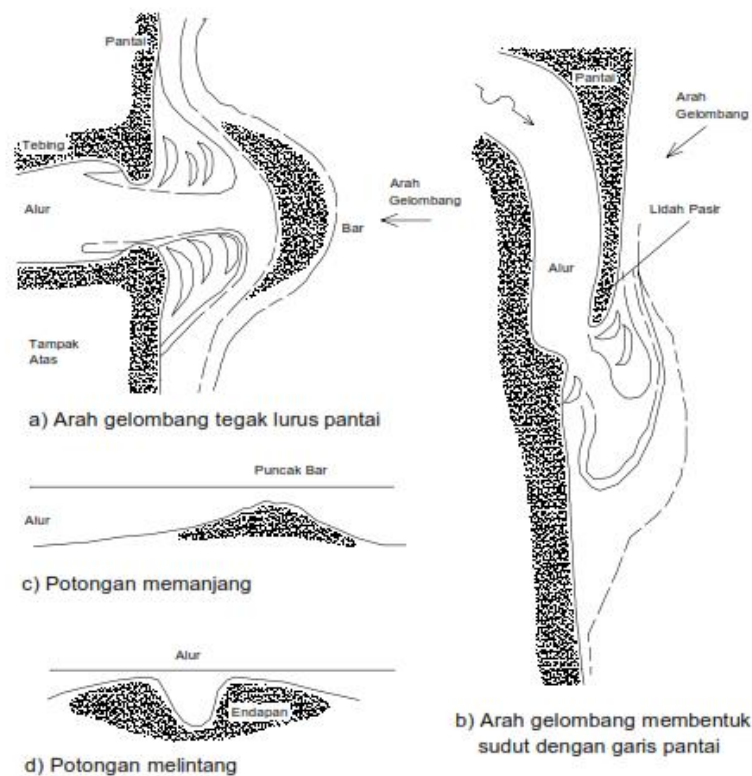
Muara (Estuari) akan sangat berpengaruh dengan laut seperti gelombang, pasang surut, masuknya air asin serta pengaruh sungai seperti sedimen dan juga air tawar. Menurut (Yuwono N. , 1994) muara sungai dapat dibedakan dalam tiga kelompok, yang tergantung pada faktor dominan yang memengaruhinya. Ketiga faktor tersebut adalah gelombang, debit sungai, dan pasang surut.

2.2.1 Muara yang didominasi gelombang laut

Gelombang besar yang terjadi pada pantai berpasir dapat menimbulkan angkutan (transpor) sedimen, baik dalam arah tegak lurus maupun sejajar atau sepanjang pantai. Angkutan sedimen tersebut dapat bergerak masuk ke muara sungai dan karena di daerah tersebut kondisi gelombang sudah tenang maka sedimen akan mengendap. Semakin besar gelombang semakin besar angkutan sedimen dan semakin banyak sedimen yang mengendap di muara (Pangestu & Haki, 2013).

Tipe muara ini ditandai dengan angkutan sedimen menyusur pantai setiap tahun cukup besar dan arus menyusur pantai cukup dominan dalam pembentukan muara sungai. Pada tipe ini biasanya muara tertutup oleh lidah pasir dengan pola sedimentasi. Permasalahan utama pada sungai ini ialah saat awal musim hujan, yaitu ketika endapan pasir di muara cukup tinggi dan biasanya muara cukup sempit. Muara tidak mampu menyalurkan air banjir diawal musim hujan. Jika sungai juga digunakan untuk keperluan nelayan, nelayan tidak dapat atau sulit di muara sungai pada kondisi seperti itu.





Gambar 1 Tipe muara yang didominasi gelombang laut (Azis, Sistem Penggelontoran dengan Pipa Fluidisasi untuk Rekayasa Pemeliharaan Alur, 2022)

2.2.2 Muara yang didominasi debit sungai

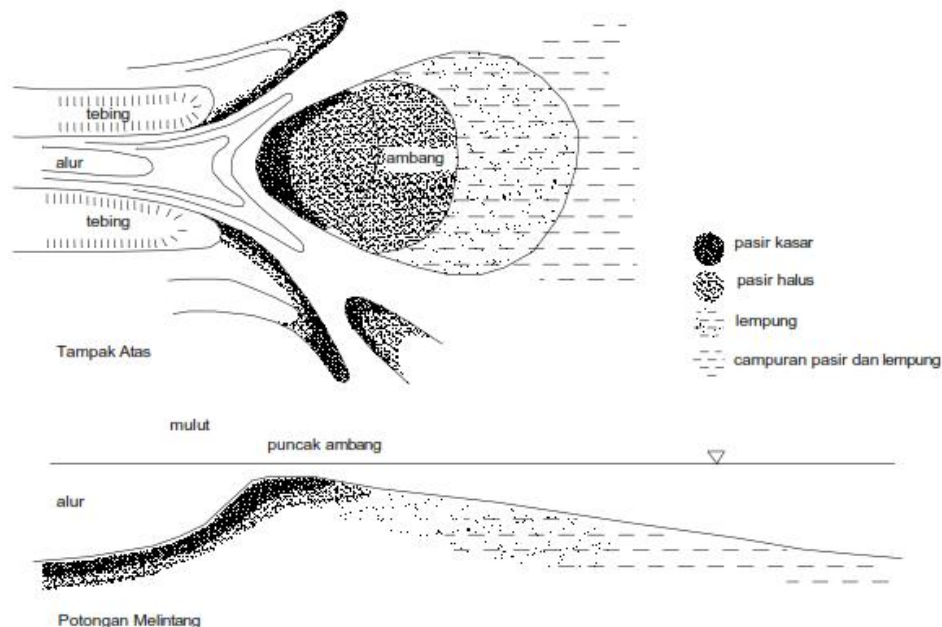
Muara ini terjadi pada sungai dengan debit sepanjang tahun cukup besar yang bermuara di laut dengan gelombang relatif kecil. Pada waktu air surut sedimen akan terdorong ke muara dan menyebar di laut. Selama periode sekitar titik balik di mana kecepatan aliran kecil, sebagian suspensi mengendap. Pada saat dimana air mulai pasang, kecepatan aliran bertambah besar dan sebagian suspensi dari laut masuk kembali ke sungai bertemu dengan sedimen yang berasal dari hulu. Selama periode dari titik balik ke air pasang maupun air surut kecepatan aliran bertambah sampai mencapai maksimum dan kemudian berkurang lagi. Dengan demikian dalam satu siklus pasang surut jumlah sedimen yang mengendap lebih banyak daripada yang tererosi, sehingga terjadi pengendapan di depan mulut



muara ini ditandai dengan debit sungai menyusur setiap tahunan cukup tinggi sehingga debit tersebut merupakan parameter utama pembentukan muara

sungai. Pendangkalan yang serius biasanya tidak terjadi pada tipe muara ini. Hal ini disebabkan aliran air sungai yang terjadi cukup besar sehingga mampu memelihara atau merawat kedalaman alur sungai. Jika aliran sungai cukup banyak membawa material sedimen, garis pantai akan cepat maju dan membentuk tanjung.

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 sesuai dengan arus laut dan angkutan pasir pada waktu itu. Hal ini sangat penting diperhatikan, terutama untuk keperluan navigasi.



Gambar 2 Tipe muara yang didominasi aliran sungai (Azis, Sistem Penggelontoran dengan Pipa Fluidisasi untuk Rekayasa Pemeliharaan Alur, 2022)

2.2.3 Muara yang didominasi pasang surut

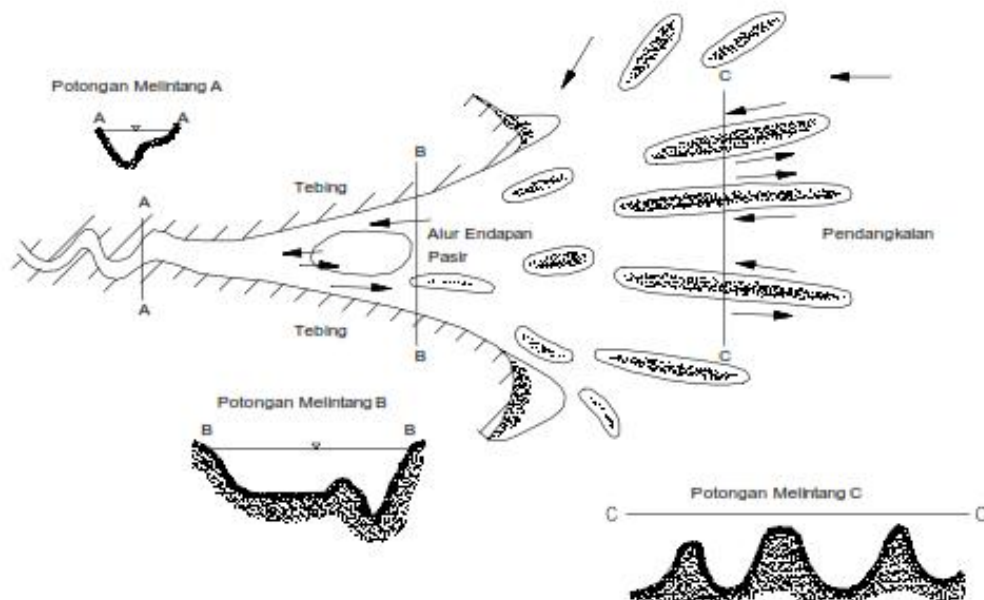
Apabila tinggi pasang surut cukup besar, volume air pasang yang masuk ke sungai sangat besar. Air tersebut akan berakumulasi dengan air dari hulu sungai.

tu air surut, volume air yang sangat besar tersebut mengalir keluar dalam waktu tertentu yang tergantung pada tipe pasang surut. Dengan demikian



kecepatan arus selama air surut tersebut besar, yang cukup potensial untuk membentuk muara sungai.

Tipe muara ini ditandai dengan fluktuasi 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 (*bell shape*) dengan beberapa alur dan pendangkalan. Permasalahan utama pada tipe muara ini bukan penutupan muarannya, tetapi pendangkalan yang terjadi di muara sungai dapat mengganggu pelayaran atau navigasi.



Gambar 3 Tipe muara yang didominasi pasang surut (Azis, Sistem Penggelontoran dengan Pipa Fluidisasi untuk Rekayasa Pemeliharaan Alur, 2022)

2.2.4 Penutupan Muara Sungai

Terbuka atau tertutupnya muara sungai tergantung pada hubungan antara kekuatan pembuka / penutupnya, dimana :

1. Yang termasuk komponen kekuatan pembuka adalah debit sungai (*river discharges*), kecepatan arus sungai, bentuk muara sungai, perbedaan tinggi air bagian sungai, dan fluktuasi pasang surut dari muara sungai. Yang termasuk komponen kekuatan penutup adalah pemindahan sedimen sungai dan pemindahan sedimen pantai.



Jika terdapat sebuah laguna, akan lebih baik bila menghubungkannya dengan aliran sungai utama menggunakan saluran penghubung. Aliran yang masuk dan keluar melalui laguna oleh pengaruh pasang surut akan meningkatkan debit yang melewati muara sungai utama dan mengurangi sedimentasi yang terjadi di muara sungai.

Proses penutupan muara sungai yang masih merupakan bagian dari daerah pantai sangat dipengaruhi oleh :

1. Pemindahan sedimen (*transport sediment*) pada daerah pantai.
2. Pemindahan sedimen (*transport sediment*) pada daerah sungai.

2.3 Sedimentasi

Sedimen adalah pecahan pecahan material umumnya terdiri atas uraian batubatuan secara fisis dan secara kimia. Partikel seperti ini mempunyai ukuran dari yang besar (*boulder*) sampai yang sangat halus (*koloid*), dan beragam bentuk dari bulat, lonjong sampai persegi. Hasil sedimen biasanya diperoleh dari pengukuran sedimen terlarut dalam sungai (*suspended load*), dengan kata lain bahwa sedimen merupakan pecahan, mineral, atau material organik yang ditransforkan dari berbagai sumber dan diendapkan oleh media udara, angin, es, atau oleh air dan juga termasuk didalamnya material yang diendapkan dari material yang melayang dalam air atau dalam bentuk larutan kimia ((Asdak, 2007) dalam (Usman, 2014)).

Sedimentasi adalah proses pengendapan material batuan secara gravitasi yang dapat terjadi di daratan, zona transisi (garis pantai) atau di dasar laut karena diangkut dengan media angin, air maupun es. Sedimentasi di daerah pantai menyebabkan majunya pantai sehingga dapat menyebabkan masalah pada drainase yang kemungkinan dapat menyebabkan di wilayah tersebut tergenang.

Proses sedimentasi itu sendiri dalam konteks hubungan dengan sungai meliputi, penyempitan palung, erosi, transportasi sedimentos (*transportsediment*), pengendapan (*deposition*), dan pemadatan (*compaction*) dari sedimen itu sendiri.

Prosesnya merupakan gejala sangat kompleks, dimulai dengan jatuhnya energi yang menghasilkan energi kinetik yang merupakan permulaan proses erosi tanah menjadi partikel halus, lalu menggelinding bersama aliran,



sebagian akan tertinggal di atas tanah, sedangkan bagian lainnya masuk kedalam sungai terbawa aliran menjadi sedimen. Besarnya volume sedimen terutama tergantung pada perubahan kecepatan aliran, karena perubahan pada musim penghujan dan kemarau, serta perubahan kecepatan yang dipengaruhi oleh aktivitas manusia.

2.3.1 Faktor-Faktor Pengaruh Sedimentasi

Proses terjadinya sedimentasi merupakan bagian dari proses erosi tanah. Timbulnya bahan sedimen adalah sebagai akibat terjadinya erosi tanah. Kegiatan ini berlangsung baik oleh air maupun angin. Proses erosi dan sedimentasi di Indonesia yang lebih berperan adalah faktor air, sedangkan faktor angin relatif kecil.

2.3.2 Gerakan Sedimen

Terdapat dua macam gerakan sedimen, yaitu gerakan fluvial (*fluvial movement*) dan gerakan massa (*mass movement*) (Dexy Wahyudi dalam (Pangestu & Haki, 2013)).

1. Gerakan Fluvial

Gerakan fluvial adalah Gaya-gaya yang menyebabkan bergeraknya butiran-butiran kerikil yang terdapat di atas permukaan dasar sungai terdiri dari komponen gaya-gaya gravitasi yang sejajar dengan dasar sungai. Dan gaya geser serta gaya angkat yang dihasilkan oleh kekuatan aliran air sungai menjadi faktor dari penggerak sedimen.

2. Gerakan Massa

Gerakan massa sedimen adalah gerakan air bercampur massa sedimen dengan konsentrasi yang sangat tinggi, di hulu sungai-sungai arus deras di daerah lerenglereng pegunungan atau gunung berapi. Faktor yang menggerakkannya yakni dari gravitasi. Gerakan massa sedimen ini disebut sedimen luruh yang biasanya dapat terjadi di dalam alur sungai arus deras (torrent) yang kemiringannya lebih besar dari 15°.



2.3.3 Ukuran dan Bentuk Sedimen

Bentuk sedimen beraneka ragam dan tidak terbatas. Bentuk yang pipih mempunyai kecepatan endap yang lebih kecil dan akan lebih sulit untuk diangkut dibandingkan dengan suatu partikel yang bulat. Kebulatan dinyatakan sebagai perbandingan diameter suatu lingkaran dengan daerah yang sama terhadap proyeksi butiran dalam keadaan diam pada ruangan terhadap bidang yang paling besar terhadap diameter yang paling kecil atau dengan kata lain kebulatan digambarkan sebagai perbandingan radius rata-rata kelengkungan ujung setiap butiran terhadap radius lingkaran yang paling besar.

Ukuran partikel secara geometris dengan bentuk yang umum dapat dengan mudah diketahui dan diukur misalnya diameter dari bentuk bulat atau panjang sisi dari bentuk segiempat, Namun untuk partikel yang tidak beraturan akan sulit jika menentukan ukuran partikel sebenarnya. Untuk memudahkan dalam aplikasi, maka ukuran partikel ditetapkan dengan parameter diameter (d) (Chien & Wan, 1999). 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)
	Sangat besar	4096-2048
Berangkal	Besar	2048-1024
	Sedang	1024-512
	Kecil	512-256
Kerakal	Besar	256-128
	Kecil	128-64
Kerikil Besar)	Sangat kasar	64-32



	Klasifikasi	Diameter Partikel (mm)
Kerikil	Kasar	32-16
	Sedang	16-8
	Halus	8-4
		4-2
	Sangat kasar	2-1
Pasir	Kasar	1-0.5
	Sedang	0.5-0.125
	Halus	0.125-0.062
	Sangat halus	
Lumpur	Kasar	0.062-0.031
	Sedang	0.031-0.016
	Halus	0.016-0.008
	Sangat halus	0.008-0.004
Lempung	Kasar	0.004-0.002
	Sedang	0.002-0.001
	Halus	0.001-0.0005
	Sangat halus	0.0005-0.00024

2.3.4 Angkutan Sedimen (*Sediment Transport*)

Transport sedimen adalah perpindahan tempat bahan sedimen granuler (non kohesif) oleh air yang sedang mengalir, dan gerak umum sedimen adalah searah aliran air. Banyaknya sedimen yang ditranspor dapat ditentukan dari perpindahan tempat neto sedimen yang melalui suatu tampang lintang selama periode waktu yang cukup. Dengan pengetahuan ini kita dapat mengetahui apakah pada keadaan tertentu akan terjadi keadaan seimbang (*equilibrium*), erosi (*erosion*) ataukah pengendapan (*deposition*), dan juga kita dapat mengetahui kuantitas sedimen yang terangkut dalam proses ini (Mardjikoen, 1988). Faktor-faktor yang menentukan

sedimen adalah sebagai berikut:

at-sifat aliran air (*flow characteristics*)

at-sifat sedimen (*sediment characteristics*)



3. Pengaruh timbal balik antara sifat aliran air dan sedimen (*interaction*)

Masalah-masalah yang berkaitan dengan transpor sedimen adalah sebagai berikut :

- a. Kondisi alamiah, seperti erosi, perkiraan transpor sedimen di sungai, gerak sedimen di estuari, dan transpor sedimen sepanjang pantai.
- b. Gangguan alam oleh bangunan artifisial, seperti agradasi-degradasi pada bangunan air, pengendapan sedimen dalam waduk, dan lain-lain.
- c. Transpor air, hal ini kaitannya dengan perencanaan saluran stabil terhadap proses erosi dan sedimentasi.
- d. Transpor benda padat dalam pipa.

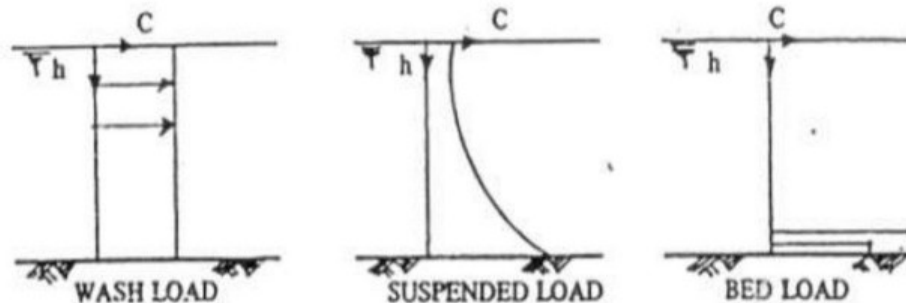
Ada tiga macam angkutan sedimen yang terjadi di dalam alur sungai (Mulyanto, 2007) yaitu:

- a. *Wash load* atau sedimen cuci terdiri dari partikel lanau dan debu yang terbawa masuk ke dalam sungai dan tetap tinggal melayang sampai mencapai laut, atau genangan air lainnya. Sedimen jenis ini hampir tidak mempengaruhi sifat-sifat sungai meskipun jumlahnya yang terbanyak dibanding jenis-jenis lainnya terutama pada saat-saat permulaan musim hujan datang. Sedimen ini berasal dari proses pelapukan Daerah Aliran Sungai yang terutama terjadi pada musim kemarau sebelumnya.
- b. *Suspended load* atau sedimen layang terutama terdiri dari pasir halus yang melayang di dalam aliran karena tersangga oleh turbulensi aliran air. Pengaruh sedimen ini terhadap sifat-sifat sungai tidak begitu besar. Tetapi bila terjadi perubahan kecepatan aliran, jenis ini dapat berubah menjadi angkutan jenis ketiga. Gaya gerak bagi angkutan jenis ini adalah turbulensi aliran dan kecepatan aliran itu sendiri. Dalam hal ini dikenal kecepatan pungut atau *pick up velocity*. Untuk besar butiran tertentu bila kecepatan pungutnya dilampaui, material akan melayang. Sebaliknya, bila kecepatan aliran yang mengangkutnya mengecil di bawah kecepatan pungutnya, material akan tenggelam ke dasar aliran.



ed load tipe ketiga dari angkutan sedimen adalah angkutan dasar di mana material dengan besar butiran yang lebih besar akan bergerak menggelincir atau translate, menggelinding atau rotate satu di atas lainnya pada dasar

sungai; gerakannya mencapai kedalaman tertentu dari lapisan sungai. Tenaga penggerakannya adalah gaya seret *drag force* dari lapisan dasar sungai.



Gambar 4 Cara Transpor Sedimen (Priyantoro,1998)

2.3.5 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 (ρ) adalah massa tiap satuan volume (Triatmodjo B. , Teknik Pantai, 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 :

ρ = rapat massa (kg/m³)

M = Massa (kg)

V = Volume (m³)

Rapat massa air pada suhu 4°C dan tekanan atmosfer standard adalah 1000 kg/m³. Sedimen umumnya berasal dari *desintegrasi* atau *dekomposisi* batuan (Mardjikoeno P. , 1987) , seperti lempung (pecahan *eldspar* dan *mica*), lumpur (silikat), dan pasir (kuarts).

Berat jenis (γ) 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 :

γ = berat jenis (kgf/m³ , atau N/m³)

ρ = rapat massa (kg/m³ , atau kgm/m³)

g = percepatan gravitasi (m/dt²)

M = Massa (kg)

Berat jenis air pada suhu 4°C dan tekanan atmosfer adalah 1000 kgf/m³ atau 1 ton/m³.

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:

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

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



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° atau 20°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

2.4 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.

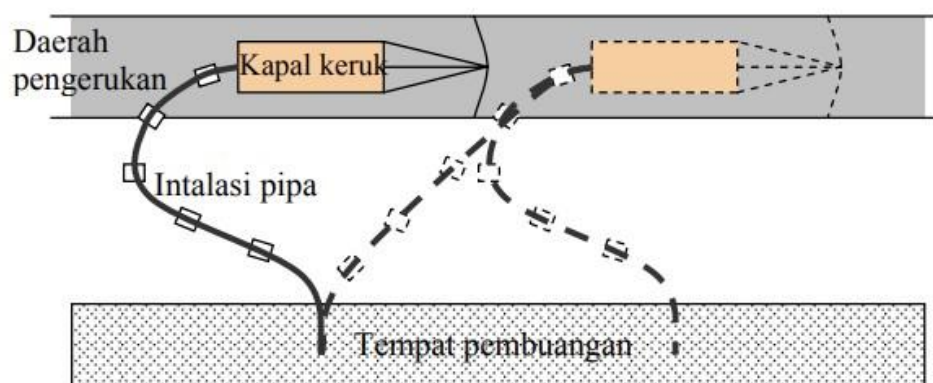
Menurut (Andriawati & dkk, 2015) pengerukan adalah pekerjaan pembersihan sungai terutama dalam masalah penggalian sedimen dibawah permukaan air dan dapat dilaksanakan baik dengan tenaga manusia maupun dengan alat berat, kecuali pada hal-hal khusus pengerukan menggunakan



kapal keruk. Tujuan pekerjaan pengerukan adalah untuk berbagai macam keperluan, diantaranya (Rochmanhadi, 1992) yaitu Memperdalam dasar sungai / laut; Memperbesar penampang sungai; Mengambil material pasir laut untuk keperluan urugan untuk keperluan bangunan ataupun reklamasi tanah; Mengambil material di dasar sungai untuk keperluan penambangan; Keperluan navigasi; Pengendalian banjir; Rekayasa konstruksi dan reklamasi; Pemeliharaan pesisir; Instalasi dan perawatan pipa bawah laut.

Sedangkan 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.

Pemeliharaan alur dengan pengerukan rutin (*maintenance dredging works*) selain biayanya relatif mahal kegiatan tersebut akan mengganggu kegiatan pelayaran/pelabuhan (Yuwono, 2001).



Jambar 5 Contoh sistem pengerukan dengan jenis Cutter Suction edger (Digambar Kembali sesuai Bray, 1797 dalam (Thaha, 2006))

ind 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, Sistem Penggelontoran dengan Pipa Fluidisasi untuk Rekayasa Pemeliharaan Alur, 2022).

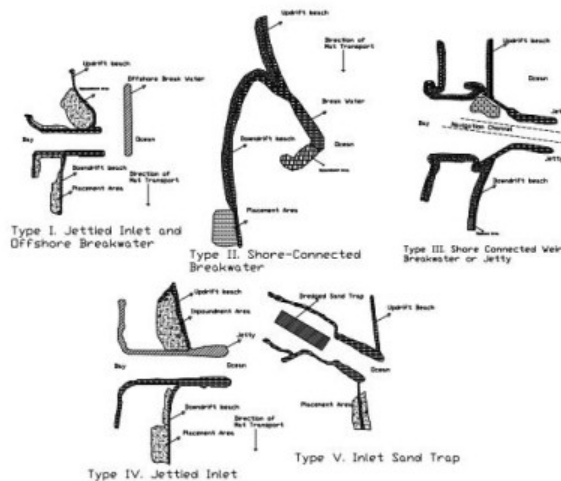
Inlet alamiah mempunyai bentuk yang telah terdefiniskan dengan baik pada bagian yang menuju ke laut (*seaward*). *Supply* sedimen yang mencapai bagian hilir (*downdrift*) biasanya tak tertentu dibandingkan kondisi pantai tanpa adanya *inlet* dan bagian hilir biasanya menjadi tidak stabil dalam jarak yang besar. Jika *tidal flow* melintasi *inlet* dan masuk ke dalam maka badan air akan menguat dan bagian material yang sedang bergerak sepanjang pantai terbawa masuk ke dalam badan air dan mengumpul secara permanen sebagai *middle – ground shoal*, pengurangan *supply* ini dapat dilakukan dengan pengisian material pada bagian hilir pantai. *Outer bar* biasanya berpindah saat *inlet* berpindah namun *middle –ground shoal* tidak . *middle – ground shoal* bertambah panjang seperti *inlet*. Yang berpindah tempat dan volume material yang tertimbun dalam *inlet* tersebut bertambah banyak.

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*. Jika arah *longshore transport* tidak ada yang dominan maka *jetties* dapat menstabilkan sepanjang pantai, namun pasir yang tertahan pada *jetties* hanya sedikit. Stabilisasi bagian pantai sepanjang *inlet* dengan ataupun tanpa

s bisa diperbaiki dengan *artificial nourishment* untuk menambah rangan *supply* sedimen yang diambil dari bagian hulu dari *inlet* (*updrift*), s ini dikenal dengan *sand by passing*. Jenis-jenis penghalang sedimen



(*Jetties* dan *Breakwater*) jika transportasi sedimen sejajar pantai dominan dalam satu arah, dengan adanya penghalang ini dapat menyebabkan akresi pada *updrift* dan erosi pada *downdrift* dan hal ini dapat dilakukan tindakan pencegahan berupa *sand by passing*, yaitu dengan cara memindahkan sedimen yang ada di *updrift* ke daerah *downdrift* yang tererosi.

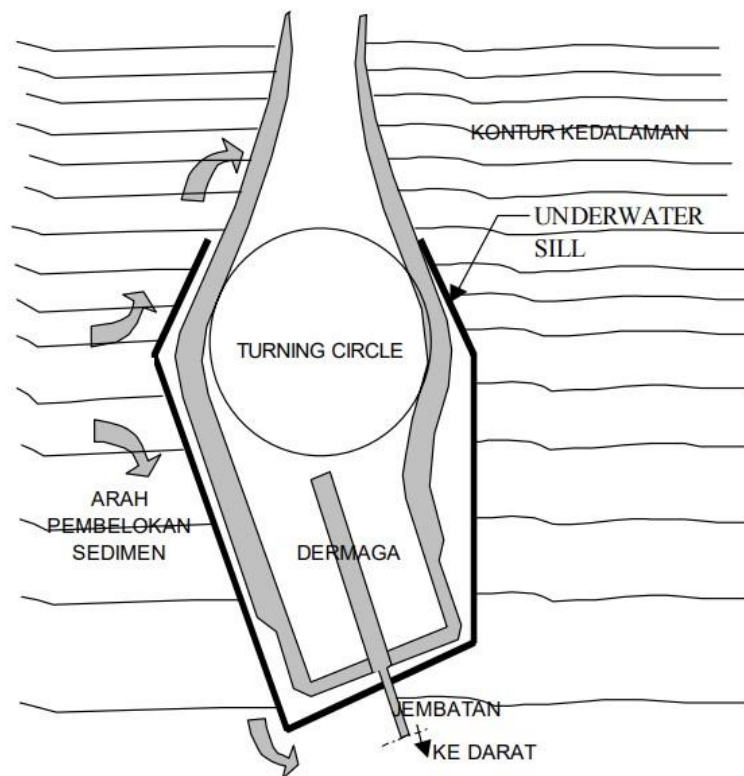


Gambar 6 Penggunaan sistem *sand by passing* untuk berbagai jenis *littoral barrier* (US Army CERC, 1984 dalam (pratikno et.all 2014) dalam (Azis, Sistem Penggelontoran dengan Pipa Fluidisasi untuk Rekayasa Pemeliharaan Alur, 2022))

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

Underwater sill adalah bangunan bawah air yang berfungsi membelokkan aliran transpor sedimen agar tidak memasuki alur pelayaran yang dirawat (Thaha, 2006). Pembuatan bangunan *underwater sill* dapat digunakan untuk menghindari dan mengurangi pendangkalan di pelabuhan. Konsep pengendalian sedimen dengan bangunan *underwater sill* dengan melindungi kolam kolam labuh dengan bangunan *underwater sill* sehingga sebagian arus yang membawa sedimen setinggi *underwater sill* akan terdefleksi sehingga tidak masuk ke area kolam labuh. Bangunan ini ditujukan khusus untuk membelokkan sedimen yang diangkut dalam suspense dan sangat terbatas pada kondisi geometrik lingkungan yang sesuai.



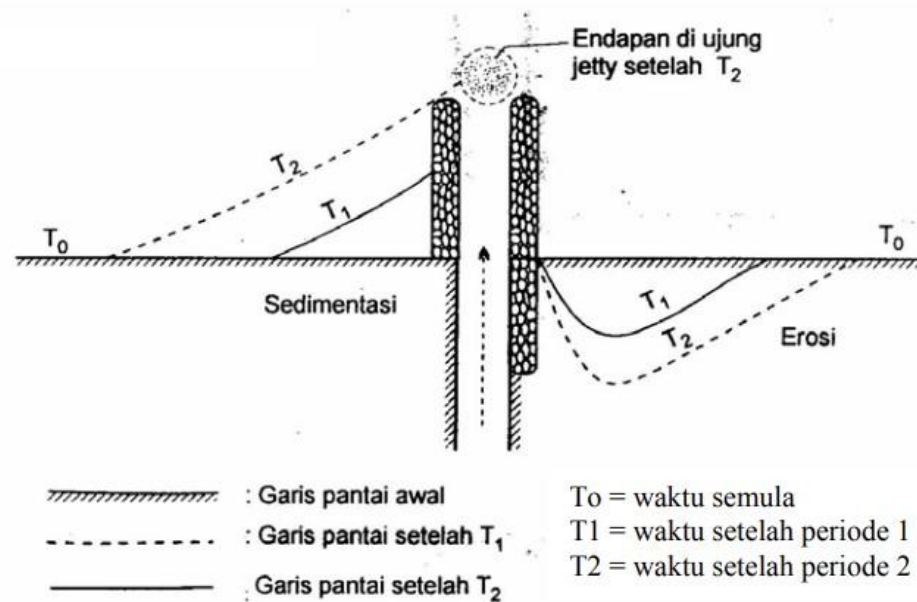


Gambar 7 Skematik denah underwater sill pada kolam pelabuhan PT. Semen Gresik (Persero) Tbk., Tuban Jawa Timur (Yuwono, 2001) dalam (Thaha, 2006)

4. Bangunan *Jetty*

Jetty adalah bangunan yang menjorok ke laut yang terletak di sisi mulut sungai yang dimaksudkan secara bersama-sama mengarahkan aliran debit sungai menggelontor sedimen dan memotong transpor sedimen menyusur pantai yang berpotensi mengendap di mulut alur (Thaha, 2006) . Dengan demikian kedalaman 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. Di Indonesia juga sudah digunakan untuk stabilisasi muara dan alur Pelabuhan meskipun dalam jumlah terbatas. Kelemahan bangunan ini adalah pada satu sisi bangunan terjadi pengendapan dari transport menyusur pantai dan sisi lain terjadi erosi.





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

2.5 Metode Fluidisasi

Fluidisasi adalah metode pengontakan butiran-butiran padat dengan fluida baik cair maupun gas. Dengan metode ini diharapkan butiran-butiran padat memiliki sifat seperti fluida dengan viskositas tinggi. Fluidisasi didefinisikan sebagai suatu operasi dimana hamparan zat padat diperlakukan seperti fluida yang ada dalam keadaan berhubungan dengan gas atau cairan. Dalam kondisi terfluidisasi, gaya gravitasi pada butiran – butiran zat padat diimbangi oleh gaya seret dari fluida yang bekerja padanya.

Sejak tahun 1940, teknik fluidisasi sudah dikenal dan telah menjadi bagian terintegral dalam bidang teknik kimia dan industri. Teknik fluidisasi digunakan dalam proses penyulingan minyak, pembakaran batubara, industri plastik, proses pemindahan panas dan massa seperti pengeringan makanan, dll (Balcony, 2002).

Penggunaan fluidisasi sebagai metode pembersihan saringan pasir dimulai sejak tahun 1960an. Amirtharajah (1970), Amirtharajah dan Cleasby (1972), Cleasby dan Fan (1981) dalam Weisman, Lennon dan Robert (1988) melakukan studi fluidisasi 1 dimensi untuk pembersihan filter secara efektif tanpa mengkan partikel pasir saringan itu sendiri. Kajian lanjutan metode untuk pembersihan filter (*filter backwashing*) telah dilakukan oleh



Amburgey dan Amirtharajah (2005). Metode fluidisasi untuk aplikasi pengolahan limbah juga telah dikaji oleh Chen, Li dan Shieh (1997) (dalam (Thaha, 2006)). Teknik pembuangan limbah ke laut dengan metode jet horisontal dari Rosette type riser telah dikaji secara eksperimen oleh Kwon dan Seo (2005) (dalam (Thaha, 2006)).

Metode fluidisasi telah menunjukkan kinerja yang memuaskan dan dianggap layak menjadi metode alternatif pengerukan untuk pemeliharaan alur. Studi dan penelitian tentang metode ini telah dilakukan baik melalui eksperimen, analitis maupun model numerik berturut-turut oleh Kelly (1977); Weisman dkk. (1980, 1982, 1988, 1990, 1991); Lennon dkk. (1990); Ledwith dkk. (1990); Lennon dan MacNair (1991); Weisman dan Lennon (1988) dalam Weisman dan Lennon (1994).

Rangkuman hasil penelitian ini telah diaplikasikan oleh perusahaan konsultan setempat sebagai metode pemeliharaan alur pelabuhan di Ana Maria Florida (1986) dan oleh US Army Corps of Engineer untuk system tambahan pada proyek sand by passing di Oceanside California (1991) sebagaimana disampaikan oleh Collins dkk. (1987) serta Bisher dan West (1993) dalam Weisman dan Lennon (1994). Law (1995) mengkaji secara analitis dengan menggunakan hukum Darcy untuk menentukan tekanan pori yang dibutuhkan pada sedimen dasar pada kedalaman air yang besar. Mekanisme fluidisasi sedimen dasar dengan teknik lain dengan menggunakan variasi kecepatan dan frekwensi gesekan oleh gelombang telah dikaji oleh Mehta, Williams dan Feng (1995). Kajian model numerik 3D oleh Lennon dan Weisman (1995) telah melengkapi kajian sebelumnya untuk mengukur kehilangan tinggi tekanan oleh lapisan poros sedimen. Respon fluidisasi sedimen dasar oleh air terjun telah dikaji oleh Foda, DeNeale dan Huang (1997) (dalam (Thaha, 2006)).

Dalam beberapa hasil penelitian dan hasil percobaan dilapangan, metode fluidisasi telah berkembang pesat terutama pada bidang rekayasa pantai dan Teknik keairan. Di Indonesia metode fluidisasi telah dikembangkan pada proses

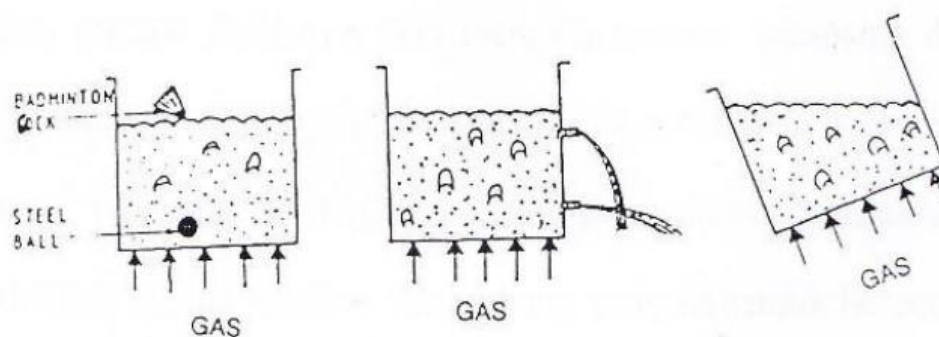
lian waduk yang mengkombinasikan sistem penggelontoran (flushing) (Suroso & Widiyanto, 2009). Beberapa penelitian terkait pengembangan alur terutama pada muara sungai seperti pada penanganan pendangkalan



sungai (Ni'am, 2002), fluidisasi untuk pemeliharaan akur pelayaran (Widiyanto, Soedirman, 2018). Beberapa pengembangan penelitian fluidisasi terutama pada pemecahan masalah clogging (penyumbatan) dilakukan pada tahun 2006 (Thaha, 2006), dan perkembangannya hingga pada sistem pengurasan dan pengisapan slurry pada proses fluidisasi yang dilakukan oleh (Pristianto.H & dkk, 2019) dan (Anas & Latif, 2018) (dalam (Azis, Sistem Penggelontoran dengan Pipa Fluidisasi untuk Rekayasa Pemeliharaan Alur, 2022)).

2.5.1 Jenis-Jenis Fluidisasi

Bila zat cair atau gas dilewatkan melalui lapisan hamparan partikel pada kecepatan rendah, partikel-partikel itu tidak bergerak (diam). Jika kecepatan fluida berangsur-angsur dinaikkan, partikel-partikel itu akhirnya akan mulai bergerak dan melayang di dalam fluida, serta berperilaku seakan-akan seperti fluida rapat. Jika hamparan itu dimiringkan, permukaan atasnya akan tetap horizontal, dan benda-benda besar akan mengapung atau tenggelam di dalam hamparan itu tergantung pada perbandingan densitas dari partikel tersebut.



Gambar 9 Karakteristik Fluidized Bed

Berdasarkan jenis – jenis fluida yang digunakan, fluidisasi dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu: fluidisasi partikulat, fluidisasi gelembung (Bubbling Fluidization), dan fluidisasi kontinu (McCabe & Smith, 1985).

1. Fluidisasi Partikulat

Dalam fluidisasi pasir dengan air, partikel-partikel bergerak menjauh satu sama lain dan gerakannya bertambah hebat dengan meningkatnya kecepatan, tetapi densitas unggun rata-rata pada suatu kecepatan tertentu



sama di semua bagian unggun. Proses ini disebut fluidisasi partikulat dan bercirikan ekspansi hamparan yang cukup besar tetapi seragam pada kecepatan tinggi. (McCabe & Smith, 1985).

Akan tetapi, tidak semua fluida liquid pasti menghasilkan fluidisasi partikulat, hal ini dipengaruhi oleh perbedaan densitas. Dalam kasus dimana densitas fluida dan solid tidak terlalu berbeda, ukuran partikel kecil, dan kecepatan aliran fluida rendah, unggun akan terfluidisasi merata dengan tiap partikel bergerak sendiri-sendiri melewati jalur bebas rata-rata (mean free path) yang relatif sama. Fase padat ini memiliki banyak karakteristik liquid dan disebut fluidisasi partikulat (Foust, 1959).

Pada fluidisasi partikulat, ekspansi yang terjadi adalah seragam dan persamaan Ergun, yang berlaku untuk unggun diam, dapat dikatakan masih berlaku untuk unggun yang agak mengembang. Andaikan aliran di antara partikel-partikel itu adalah laminar, persamaan yang berlaku untuk hamparan yang mengalami ekspansi adalah (McCabe & Smith, 1985):

$$\frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} = \frac{150\bar{V}_s\mu}{g(\rho_p-\rho)\phi_s^2 D_p^2} \quad (6)$$

2. Fluidisasi Gelembung/Fluidisasi Agregat

Unggun yang difluidisasikan dengan udara biasanya menunjukkan fluidisasi agregat. Pada kecepatan superfisial yang jauh melebihi U_{mf} , kebanyakan gas akan melewati unggun sebagai gelembung atau rongga-rongga kosong yang tidak berisikan zat padat dan hanya sebagian kecil gas yang mengalir dalam saluran-saluran yang terbentuk di antara partikel. Gelembung yang terbentuk berperilaku hampir sama dengan gelembung udara di dalam air atau gelembung uap di dalam zat cair yang mendidih, dan karena itu fluidisasi jenis ini sering disebut fluidisasi didih (boiling bed). (McCabe & Smith, 1985).

Gelembung-gelembung yang terbentuk cenderung bersatu dan menjadi besar pada waktu naik melalui hamparan fluidisasi itu. Jika kolom yang unakan berdiameter kecil dengan hamparan zat padat yang tebal, gelembung itu mungkin berkembang hingga memenuhi seluruh penampang. Gelembung-gelembung yang beriringan lalu bergerak ke puncak kolom



terpisah dari zat padat yang seakan-akan tersumbat. Peristiwa ini disebut penyumbatan (*slugging*) (McCabe & Smith, 1985).

Penyamarataan bahwa fluida gas pasti menghasilkan fluidisasi gelembung tidak sepenuhnya benar. Perbedaan densitas merupakan parameter yang penting. Pada kasus dimana densitas fluida dan solid berbeda jauh atau ukuran partikel besar, kecepatan aliran fluida yang dibutuhkan lebih besar dan fluidisasi yang terjadi tidak merata. Sebagian besar fluida melewati unggun dalam bentuk gelembung (*bubbles*). Di sini, unggun memiliki banyak karakteristik liquid dengan fasa fluida terjadi pada saat gas menggelembung melewati unggun. Fluidisasi jenis ini disebut fluidisasi agregat (Foust, 1959).

Partikel unggun yang lebih ringan, lebih halus, dan bersifat kohesif sangat sukar terfluidisasi karena gaya tarik antarpartikel lebih besar daripada gaya seretnya. Partikel cenderung melekat satu sama lain dan gas menembus unggun dengan membentuk channel. Pengembangan volume unggun dalam fluidisasi gelembung terutama disebabkan oleh volume yang dipakai oleh gelembung uap, karena fase rapat pada umumnya tidak berekspansi dengan peningkatan aliran. Dalam penurunan berikut ini, aliran gas melalui fase rapat diandaikan sama dengan U_{mf} dikalikan dengan fraksi unggun yang diisi oleh fase rapat, ditambah sisa aliran gas yang dibawa oleh gelembung (McCabe & Smith, 1985), sehingga:

$$\bar{V}_s = f_b u_b + (1 - f_b) U_{nf} \quad (7)$$

dimana: f_b = fraksi unggun yang diisi gelembung

u_b = kecepatan rata-rata gelembung

Dalam fluidisasi agregat, fluida akan membuat gelembung pada padatan unggun dalam tingkah laku yang khusus. Gelembung fluida meningkat melalui unggun dan pecah pada permukaan unggun dan akan terjadi “splashing” dimana partikel unggun akan bergerak ke atas. Seiring dengan meningkatnya kecepatan fluida, perilaku gelembung akan bertambah besar.

Keberadaan fluidisasi partikulat atau agregatif merupakan hasil dari garuh gaya gravitasi pada fasa-fasa yang ada dalam unggun terfluidisasi



dan juga karena mekanika fluida ruah dari sistem. Angka Froude, $\frac{v^2}{D_p g}$, yaitu rasio antara kinetik dengan energi gravitasi merupakan salah satu kriteria penentu jenis fluidisasi apa yang terjadi (Foust, 1959).

3. Fluidisasi Kontinu

Bila kecepatan fluida melalui hamparan zat padat cukup besar, maka semua partikel dalam hamparan itu akan terbawa ikut oleh fluida hingga memberikan suatu fluidisasi kontinu. Prinsip fluidisasi ini terutama diterapkan dalam pengangkutan zat padat dari suatu titik ke titik lain dalam suatu pabrik pengolahan di samping ada beberapa reaktor gas zat padat lama yang bekerja dengan prinsip ini. Contohnya adalah dalam transportasi lumpur dan transportasi pneumatic (McCabe & Smith, 1985).

Ketika laju alir fasa fluida melewati kecepatan terminal partikel, unggun terfluidisasi akan kehilangan identitasnya karena partikel solid terbawa dalam aliran fluida. Metoda pengangkutan ini sering digunakan dalam industri, biasanya dengan udara sebagai fasa fluida, antara lain untuk mengangkut produk dari pengering semprot (spray dryers). Keuntungan metoda ini adalah kehilangan yang terjadi sedikit, prosesnya bersih, dan kemampuannya untuk memindahkan sejumlah besar solid dalam waktu singkat. Tetapi kerugiannya antara lain ada kemungkinan terjadi kerusakan partikel solid serta korosi pada pipa mungkin besar (Foust, 1959).

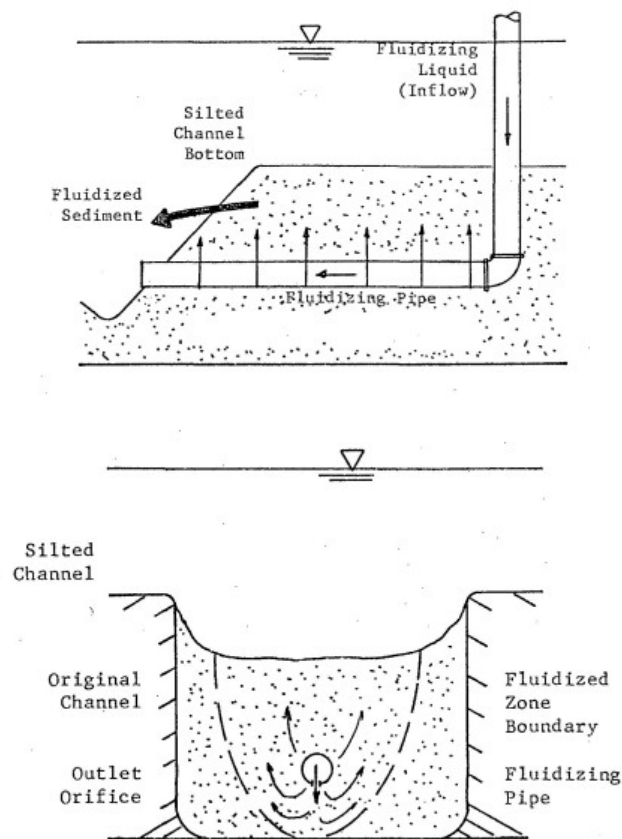
Dalam fluidisasi, karena sifat-sifat partikel padat yang menyerupai sifat fluida cair dengan viskositas tinggi, metode pengontakan fluidisasi memiliki beberapa keuntungan dan kerugian.

2.5.2 Fluidisasi dalam Pemeliharaan Alur

Perkembangan metode fluidisasi telah digunakan pada bidang teknik sipil terutama pada pekerjaan sand by passing yang mula-mula dikembangkan pada penelitian yang dikembangkan pada aplikasi transportasi sedimen menggunakan

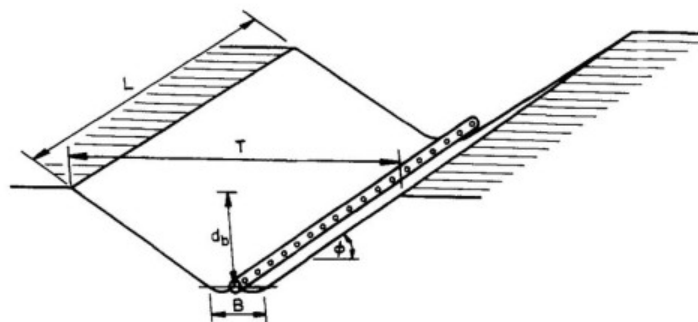


fluidisasi (John T Kelley, 1977). Di samping itu Kelley juga melakukan penelitian pada struktur butiran sedimen yang tererosi oleh semburan air pada awal fluidisasi hingga tercapai fluidisasi penuh.



Gambar 10 Sketsa yang diusulkan oleh Kelley (1997)

Selanjutnya perkembangan metode fluidisasi telah mencapai pada tahap penerapan pemeliharaan alur yang dilakukan pertama kali pada proyek perairan Anna Maria, California untuk pengoperasian pekerjaan sand by passing pada tahun 1994 (Richard N. Weismann, 1995). Bentuk fluidisasi yang diusulkan baik oleh Wisman dan Kelley adalah bentuk fluidisasi dengan pipa tertanam dibawah lapisan sedimen (material non kohesif).



Gambar 11 Sketsa fluidisasi diusulkan oleh Weismann dan Lennon (1995)



Baik Kelley maupun Weisman dan Lennon memiliki persamaan dalam penelitian fluidisasi yakni penekanannya pada aspek hidraulik untuk memperoleh fluidisasi maksimum dan elemen geometris alur yang terbentuk. Disamping itu Kelley juga melakukan penelitian pada struktur butiran sedimen yang tererosi oleh semburan air pada kondisi awal fluidisasi hingga tercapai fluidisasi penuh.

Dijelaskan oleh Weisman dan Lennon bahwa fenomena fluidisasi secara umum menjelaskan hukum Darcy yang berlaku pada awal fluidisasi dikarenakan oleh hambatan kecepatan aliran oleh butiran sedimen (Richard N. Weismann, 1995). Kecepatan aliran melalui media pada fase fluidisasi awal selanjutnya disebut kecepatan fluidisasi minimum (V_{mf}) (John T Kelley, 1977).

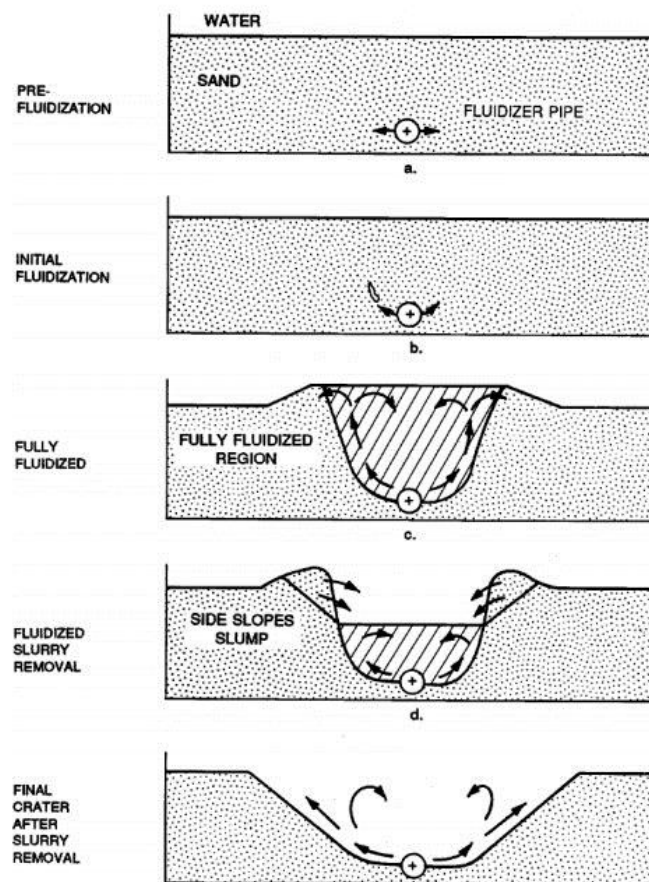
2.5.3 Tahapan-Tahapan Fluidisasi

Tahapan-tahapan fluidisasi menurut Weisman 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 12 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*) di permukaan 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 punyai permukaan yang lebih tinggi daripada zona di luarnya.

uangan *Slurry (Fluidized slurry removal)*



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

5. Erosi Pancaran Aliran

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

$$T = \frac{2d_b}{\tan\phi} + B \quad (8)$$

dengan d_b = ketebalan sedimen (m), ϕ = 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_c).

2.5.4 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).

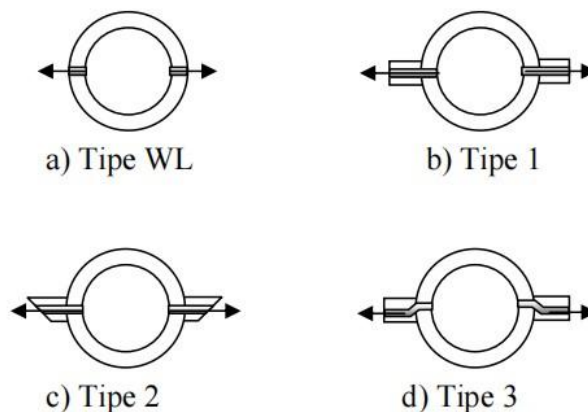
Analisis parameter diameter, spasi dan orientasi lubang perforasi, telah dilakukan pada material berukuran material (diameter tengah 0.15 mm dan 0.45 mm), dua macam



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 akhirnya direkomendasikan ukuran lubang yang baik berada pada kisaran 3.175-4.763 mm dengan kisaran jarak 2.54-5.08 cm (Weisman dkk., 1988; 1990; 1991; Ledwith dkk., 1990 dalam Weisman dan Lennon, 1994).

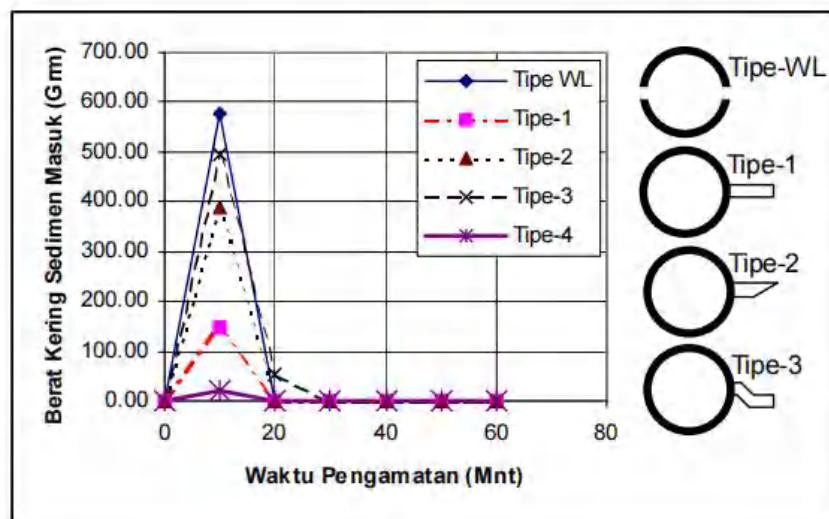
Taufik (2004), Darmawan (2004) dan Triyanto (2005) mengkaji 4 model lubang perforasi untuk mendapatkan model lubang yang mampu meminimalisasi masuknya sedimen ke dalam pipa. Ke empat tipe lubang tersebut adalah tipe WL (Weisman dan Lennon).

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 13 Empat tipe lubang (Thaha, 2006)

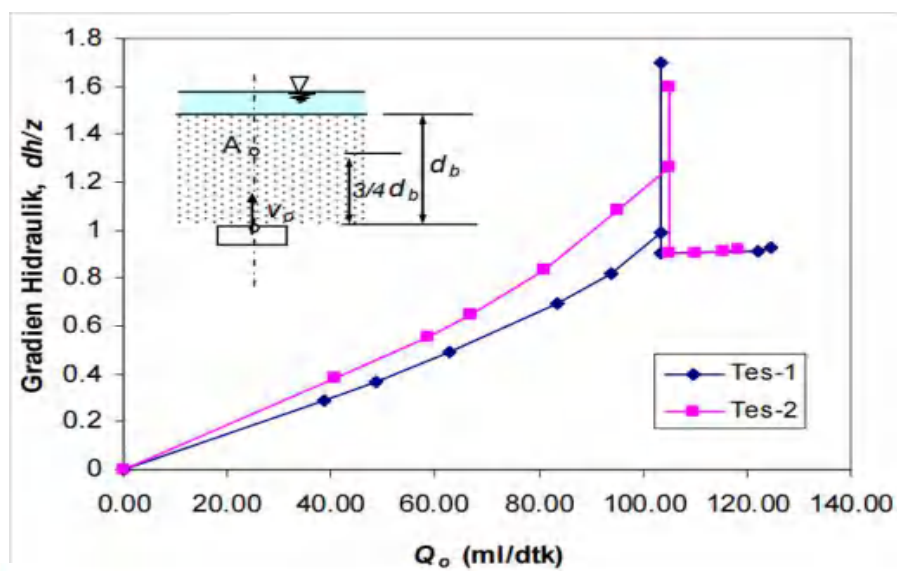




Gambar 14 Perbandingan sedimen masuk ke dalam pipa pada 4 tipe lubang (Thaha, 2006)

2.5.5 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 15 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_0 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 penuh, dan tipe aliran Darcy berubah menjadi aliran Non Darcy.

2.5.6 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* tertentu.

Bagian mendasar yang dipakai untuk menentukan ukuran dan kemampuan pompa, dapat dilihat dari:

- Debit (Q) yang dihasilkan,
- Total head (H) yang dibutuhkan,
- Daya (D_p) 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.

$$Q = v \cdot A \quad (9)$$

Dengan:

Q = debit aliran ($m^3/detik$)

V = kecepatan aliran ($m/detik$)

A = luas penampang (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 .



2.5.7 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):

$$h_e = [1 + k] \frac{v^2}{2g} + d_b \Delta (1 - \varepsilon) \quad (10)$$

Dimana:

h_e = kebutuhan tinggi tenaga fluidisasi (m)

h_f = kebutuhan tinggi tenaga full fluidisasi (m)

d_b = ketebalan sedimen (m)

v = kecepatan fluidisasi (m/s)

k = koefisien kehilangan energi di lubang

g = gaya gravitasi (m/s²)

ε = porositas sedimen

Δ = rapat 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 (Thaha, 2006):

$$Q_h = C_d A_h \sqrt{\frac{2g \times \Delta p_0}{\gamma}} \quad (11)$$

Dimana:

Q_h = debit tiap lubang (liter/detik)

C_d = koefisien debit

A_h = luas tiap lubang (m²)

ΔP_0 = selisih tekanan di dalam dan di luar pipa (kg/cm²)

γ = berat jenis air (kg/cm³)



ngan demikian tinggi tekanan yang diperlukan dihitung dengan n (11) 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.

2.5.8 Kebutuhan Debit Fluidisasi

Persamaan yang dihasilkan dari hukum kontinuitas dimana debit yang keluar melalui lubang (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 ψQ_0 . Persamaan dapat ditunjukkan sebagai berikut (dalam (Thaha, 2006)):

$$Q = C_D A_h \sqrt{2gh_e} \quad (12)$$

Dimana:

- Q = debit (m³/s)
 C_D = koefisien debit
 A_h = luas tiap lubang (m²)
 g = gaya gravitasi (m/s²)
 h_e = kebutuhan tinggi tenaga fluidisasi (m)

2.5.9 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:

$$Re = \frac{vD}{\mu} \quad (13)$$

Dimana:

- Re = bilangan *Reynold*
 v = kecepatan aliran (m/s)
 D = diameter pipa (m)
 μ = ketebalan kinematik zat cair (m²/s)



Aliran Laminar

Aliran laminar 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 relatif kasar pada kecepatan tinggi, dan aliran di antara keduanya.

2.5.10 Kehilangan Tinggi Tenaga

Kehilangan tinggi tenaga adalah kehilangan energi mekanik per satuan massa fluida Ketika dilairkan pada pipa. Aliran melalui lubang jika permukaan zat cair di sebelah hilir lubang keluar 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 B. , 2014):

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad (14)$$

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:

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (15)$$

Debit yang melalui lubang terendam dapat dihitung dengan rumus:

$$Q = C_D A_h \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (16)$$

Dimana:

Q = debit lubang terendam (liter/detik)

C_D = koefisien debit

A_h = luas penampang (m²)

g = gaya gravitasi (m²/s)



$$h_1 - h_2 = \text{selisih elevasi muka air di hulu dan hilir lubang} \quad (\text{m})$$

Salah satu faktor yang dominan untuk diperhatikan pada aliran di dalam pipa adalah kehilangan tinggi tenaga. Secara umum, kehilangan tinggi tenaga dapat dikelompokkan menjadi 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:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (17)$$

Dimana:

h_f	= kehilangan tinggi tenaga akibat gesekan	(m)
f	= factor gesek (<i>friction factor</i>)	
L	= panjang pipa	(m)
D	= diameter pipa	(mm)
V	= kecepatan aliran	(m/s)
g	= percepatan gravitasi	(m/s ²)

2.5.11 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 (Thaha, 2006).

$$h_{oc} = (1 + K) \frac{v^2}{2g} \quad (18)$$

Dimana:

h_{oc}	= tinggi kehilangan energi akibat gesekan	(m)
v	= kecepatan aliran	(m ²)
g	= percepatan gravitasi	(m/s ²)

efisien kehilangan energi



2.5.12 Kehilangan Tenaga akibat Sedimen

Kehilangan tinggi tenaga oleh lapisan sedimen dapat ditentukan dengan meninjau keseimbangan gaya ke atas (ρghA) 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:

$$h_e = db(1 - \varepsilon) \quad (19)$$

Dimana:

h_e = kehilangan energi sekunder (m)

db = ketebalan sedimen (m)

Δ = rapat massa *relative* sedimen

ε = porositas (%)

2.5.13 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 adalah persamaan kontinuitas, yaitu:

$$Q = A \cdot v \quad (20)$$

Dimana:

Q = debit aliran (m³/s)

A = luas penampang (m²)

V = kecepatan aliran (m/s)

