

TUGAS AKHIR

**PENGARUH KARAKTERISTIK SEDIMEN TERHADAP
UNJUK KERJA FLUIDISASI SEMPROTAN TUNGGAL
HORIZONTAL**

***EFFECT OF SEDIMENT CHARACTERISTICS ON A
HORIZONTAL SINGLE JET FLUIDIZATION PERFORMANCE***

**UMMUL KHAIRIYAH
D011 18 1015**



**PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2023**

TUGAS AKHIR

PENGARUH KARAKTERISTIK SEDIMEN TERHADAP UNJUK KERJA FLUIDISASI SEMPROTAN TUNGGAL HORIZONTAL

EFFECT OF SEDIMENT CHARACTERISTICS ON A HORIZONTAL SINGLE JET FLUIDIZATION PERFORMANCE

**UMMUL KHAIRIYAH
D011 18 1015**



**PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2023**

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

**PENGARUH KARAKTERISTIK SEDIMEN TERHADAP UNJUK KERJA
FLUIDISASI SEMPROTAN TUNGGAL HORIZONTAL**

Disusun dan diajukan oleh:

UMMUL KHAIRIYAH

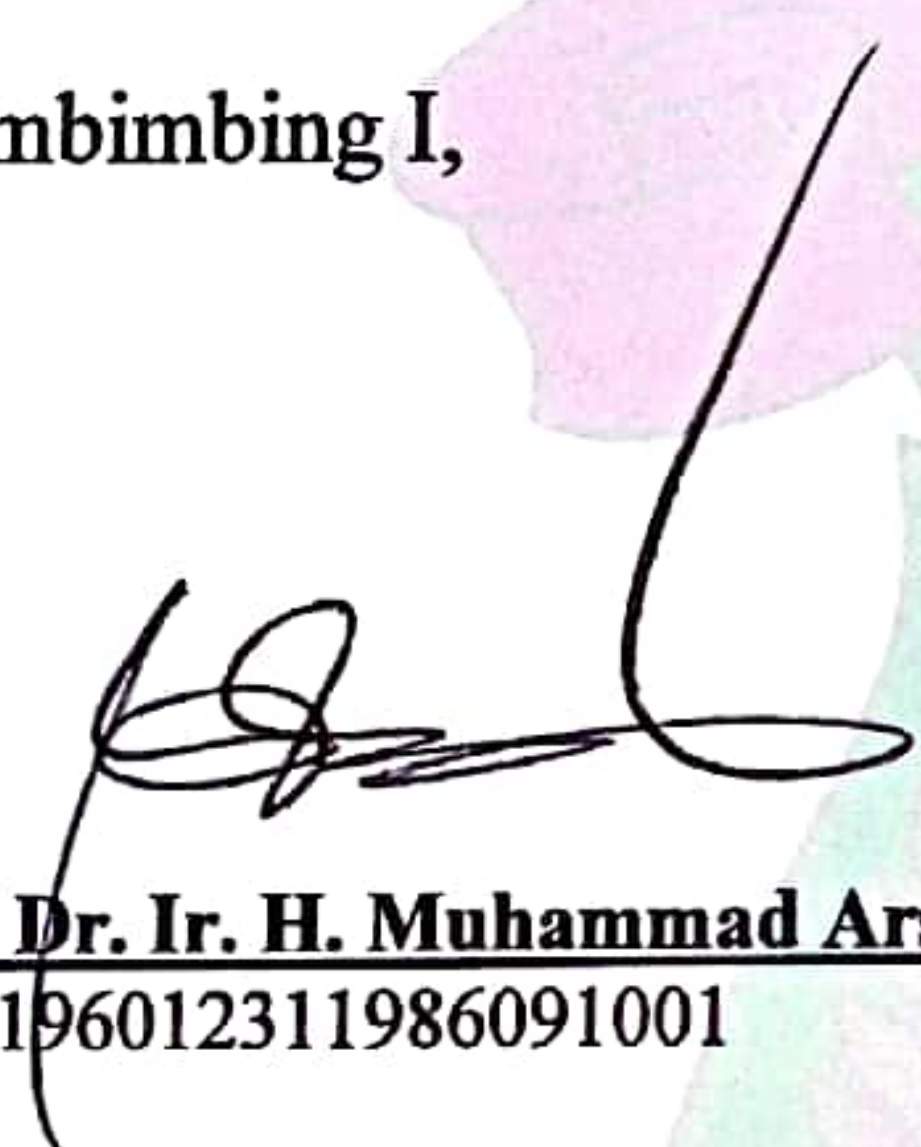
D011 18 1015

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 1 Februari 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

menyetujui,

Pembimbing I,

Pembimbing II,


Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT
NIP: 196012311986091001


Dr. A. Ildha Dwipuspita, ST, MT
NIP: 198907142020054001

Ketua Program Studi,


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

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini, nama Ummul Khairiyah, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "**Pengaruh Karakteristik Sedimen Terhadap Unjuk Kerja Fluidisasi Semprotan Tunggal Horizontal**", adalah karya ilmiah penulis sendiri, dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun.

Karya ilmiah ini sepenuhnya milik penulis dan 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.

Gowa, Februari 2023

Yang membuat pernyataan,



UMMUL KHAIRIYAH
D011181015

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“PENGARUH KARAKTERISTIK SEDIMEN TERHADAP UNJUK KERJA FLUIDISASI SEMPROTAN TUNGGAL HORIZONTAL”** 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. **Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, M.T.**, selaku dosen pembimbing I, yang telah meluangkan waktunya memberikan bimbingan dan pengarahan dari awal hingga selesainya tugas akhir ini.
4. **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.
5. **Ibu Dr.Eng. Ir. Hj. Rita Tahir Lopa, 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.

6. Seluruh Dosen, staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, yaitu Ayahanda **Syafaruddin** dan Ibunda **Hj. Suciati Kaimuddin**, atas segala doa dan kasih sayang yang tiada putus, serta dukungan baik moril dan materil hingga penulis mampu menyelesaikan studi.
2. Kedua kakak penulis, **Ahmad Mu'arif** dan **Nurul Husna Syarif**. Terima kasih atas doa dan semangat serta dukungan secara materil hingga penulis mampu menyelesaikan Tugas akhir ini.
3. Sahabat penulis; **Fara Madani Almizan, Miftahul Jannah Muhsin, Puspita Wahyu Lestari, Dian Rezky Ekawati, Fadila Khumaera Ridwan, Rizky Faradiba Achmad dan Dya Salsabila** yang telah menampung segala keluhan kesah penulis dan senantiasa memberikan dukungan serta doa bagi penulis. Terima kasih atas segala dukungan dan masukan yang diberikan.
4. **Melani Reskia Nurkhamiden, Nabilah Jailani, Yusriah Sahril, Samuel** sebagai rekan penelitian di Laboratorium Hidrolika. Terima kasih telah sama-sama berjuang dan memberikan bantuan hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

5. Rekan-rekan **Asisten Laboratorium Hidrolika Departemen Teknik Sipil** Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, terima kasih telah menjadi teman diskusi dan teman berbagi pengalaman.
6. Rekan Tim Riset Pantai, terkhusus **Bapak Rudi Aziz**. Terima kasih telah banyak memberikan bimbingan dan bantuan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
7. Saudara-saudari **TRANSISI 2019** yang senantiasa berproses bersama dan menjalani dinamika kehidupan kampus 4 tahun terakhir, terima kasih telah memberikan begitu banyak warna dan pengalaman yang tidak akan terlupakan.
8. **Muh. Agung Prajaya**, selaku partner dalam perjalanan hidup berbagi suka maupun duka. Terima kasih telah mendukung hingga sekarang.
9. Seluruh pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian tugas akhir ini yang tidak mampu disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kesalahan dan kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran yang membangun dari pembaca sangat penulis harapkan.

Akhirnya semoga Allah SWT melimpahkan kebaikan dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi dunia Teknik Sipil dan bagi kita semua.

Gowa, Desember 2022

Penulis

ABSTRAK

Muara (Estuari) adalah wilayah badan air tempat masuknya air sungai ke laut, atau bahkan sungai yang lebih besar. Muara terletak di bagian hilir sungai. Muara sungai berfungsi sebagai tempat keluarnya debit sungai yang berlebih terutama pada saat banjir terjadi menuju laut. Selain itu, muara berfungsi sebagai jalur transportasi laut yang sering digunakan oleh nelayan dalam melakukan pelayaran. Namun, sering dijumpai permasalahan yang ada di muara sungai yaitu banyaknya endapan sedimen yang terkumpul sehingga menyebabkan tertutupnya muara sungai. Penutupan tersebut menyebabkan aliran debit dari sungai ke laut menjadi terganggu. Dalam mengatasi masalah alur maupun penyempitan akibat sedimentasi telah dilakukan dengan berbagai cara dan teknologi, seperti pengerukan, namun dinilai belum efektif sehingga digunakan metode teknologi lain yaitu metode fluidisasi yang bekerja dengan cara memanfaatkan gaya pancaran air melalui lubang-lubang kecil pada sisi pipa yang tertanam dalam endapan.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini diharapkan mampu menganalisis besarnya tekanan dan bagaimana pengaruh debit terhadap tekanan pada fluidisasi serta hubungan karakteristik sedimen terhadap kinerja fluidisasi secara efektif.

Penelitian dilakukan di Laboratorium Hidraulika dengan metode eksperimental. Dalam penelitian ini melakukan pengambilan data debit dan tekanan menggunakan variasi 3 jenis sedimen yaitu sedimen pasir halus, sedang, dan kasar dan dengan variasi ketebalan 20, 30, dan 40 cm di masing-masing jenis sedimen. Pada tiap variable dilakukan tiga kali pengambilan data untuk mendapatkan hasil yang akurat.

Berdasarkan hasil penelitian didapatkan nilai tekanan meningkat seiring bertambahnya debit yang diberikan pada saat fluidisasi dilakukan. Besarnya debit dan tekanan juga berbanding lurus dengan ketebalan sedimen. Fluidisasi yang efektif terjadi pada variasi sedimen pasir halus dan pasir sedang, sedangkan pada sedimen pasir kasar proses fluidisasi tidak berjalan dengan efektif. Hal ini disebabkan oleh karakteristik sedimen kasar dengan diameter butir d_{50} yang cukup besar (0,939) sehingga tekanan yang dihasilkan pada lubang perforasi tidak mampu membongkar secara maksimal.

Kata kunci: Muara, Sedimen, Fluidisasi, Debit, Tekanan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian.....	3
D. Manfaat Penelitian.....	3
E. Batasan Masalah.....	4
F. Sistematika Penulisan	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
A. Hasil Penelitian Sebelumnya	6
B. Muara Sungai (Estuari).....	7
C. Sedimentasi	12
D. Pemeliharaan Alur	20
E. Teknologi Fluidisasi dalam Pemeliharaan Alur	23
F. Kerangka Pikir Penelitian	37
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	39
A. Lokasi Penelitian	39
B. Jenis Penelitian dan Sumber Data.....	39
C. Alat dan Bahan Penelitian.....	40
D. Prosedur Penelitian	43
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	51
A. Pemeriksaan Material Sedimen.....	51
B. Data Hasil Penelitian	58
C. Hubungan Debit dan Tekanan Fluidisasi terhadap Ketebalan Sedimen	64
D. Kehilangan Tinggi Tenaga Pada Pipa Fluidisasi (h_e)	72

E. Pengaruh Karakteristik Sedimen Terhadap Fluidisasi.....	78
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	83
A. Kesimpulan	83
B. Saran	84
Daftar pustaka	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Tipe Muara yang didominasi gelombang laut	9
Gambar 2. Tipe muara yang didominasi aliran sungai	11
Gambar 3. Tipe muara yang didominasi pasang surut	12
Gambar 4. Sedimentasi di Muara	19
Gambar 5. Sketsa Fluidisasi	24
Gambar 6. Prinsip Dasar Fluidisasi	26
Gambar 7. Pipa Fluidisasi	30
Gambar 8. Kerangka Pikir Penelitian	38
Gambar 9. Lokasi Penelitian	39
Gambar 10. Flume Percobaan	41
Gambar 11. Bak Penampungan Air	41
Gambar 12. <i>Flow Meter</i>	42
Gambar 13. Percobaan Fluidisasi 2 Dimensi	48
Gambar 14. Model Sirkulasi aliran pada Fluidisasi	48
Gambar 15. Bagan Alur Penelitian	50
Gambar 16. Grafik distribusi ukuran butir sedimen halus	51
Gambar 17. Grafik Distribusi ukuran butir sedimen sedang	52
Gambar 18. Grafik Distribusi ukuran butir sedimen Kasar	52
Gambar 19. Tahapan fluidisasi Sedimen Halus	59
Gambar 20. Tahapan fluidisasi Sedimen Sedang	60
Gambar 21. Tahapan fluidisasi Sedimen Kasar	60
Gambar 22. Hubungan Q dan Δh terhadap d_b pada sedimen Halus	64
Gambar 23. Validasi Eksperimen dan teori sedimen pasir halus (db 20 cm)	66
Gambar 24. Validasi Eksperimen dan teori sedimen pasir halus (db 30 cm)	66
Gambar 25. Validasi Eksperimen dan teori sedimen pasir halus (db 40 cm)	67
Gambar 26. Hubungan Q dan Δh terhadap d_b pada Sedimen Sedang	67
Gambar 27. Validasi Eksperimen dan teori sedimen pasir sedang (db 20 cm)	68
Gambar 28. Validasi Eksperimen dan teori sedimen pasir sedang (db 30 cm)	69
Gambar 29. Validasi Eksperimen dan teori sedimen pasir sedang (db 40 cm)	69

Gambar 30. Hubungan Q dan Δh terhadap d_b pada sedimen Kasar	70
Gambar 31. Validasi Eksperimen dan teori sedimen pasir kasar (d_b 20 cm)	71
Gambar 32. Validasi Eksperimen dan teori sedimen pasir kasar (d_b 30 cm)	71
Gambar 33. Validasi Eksperimen dan teori sedimen pasir kasar (d_b 40 cm)	72
Gambar 34. Grafik Hubungan kebutuhan tekanan (h_e) dan Porositas (ϵ)	80
Gambar 35. Grafik hubungan kebutuhan tekanan (h_e) dan tebal sedimen (d_b)	80

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Klasifikasi ukuran butir dan sedimen menurut Wentworth	16
Tabel 2. Ukuran Butir Sedimen.....	45
Tabel 3. Variasi Tebal Sedimen dan Identifikasi keruntuhan Sedimen.....	46
Tabel 4. Berat jenis sampel 1 (Sedimen Gradasi Halus).....	53
Tabel 5. Berat jenis sampel 2 (Sedimen Gradasi Sedang)	54
Tabel 6. Berat jenis sampel 3 (Sedimen Gradasi Kasar)	55
Tabel 7. Permeabilitas Sedimen.....	57
Tabel 8. Uji Kecepatan Endap Sedimen	58
Tabel 9. Penyajian Data Pembacaan debit & tekanan Sedimen Halus	61
Tabel 10. Penyajian Data Pembacaan debit & tekanan Sedimen Sedang	62
Tabel 11. Penyajian Data Pembacaan Debit & Tekanan Sedimen Kasar	63
Tabel 12. Hasil Perhitungan Kehilangan Tinggi Tenaga Pasir Halus (db 20 cm)	73
Tabel 13. Hasil Perhitungan Kehilangan Tinggi Tenaga Pasir Halus (db 30 cm)	73
Tabel 14. Hasil Perhitungan Kehilangan Tinggi Tenaga Pasir Halus (db 40 cm)	74
Tabel 15. Hasil Perhitungan Kehilangan Tinggi Tenaga Pasir Sedang (db 20 cm)	75
Tabel 16. Hasil Perhitungan Kehilangan Tinggi Tenaga Pasir Sedang (db 30 cm)	75
Tabel 17. Hasil Perhitungan Kehilangan Tinggi Tenaga Pasir Sedang (db 40 cm)	76
Tabel 18. Hasil Perhitungan Kehilangan Tinggi Tenaga Pasir Kasar (db 20 cm)	76
Tabel 19. Hasil Perhitungan Kehilangan Tinggi Tenaga Pasir Kasar (db 30 cm)	77
Tabel 20. Hasil Perhitungan Kehilangan Tinggi Tenaga Pasir Kasar (db 40 cm)	78
Tabel 21. Penyajian Data Hubungan Karakteristik Sedimen dan Fluidisasi	79

BAB 1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Muara (Estuari) adalah wilayah badan air tempat masuknya air sungai ke laut, samudera, danau, atau bahkan sungai yang lebih besar. Muara terletak di bagian hilir sungai. Muara sungai sangat dipengaruhi oleh pasang surut dimana memiliki dampak terhadap sirkulasi aliran seperti kecepatan/debit dan profil muka air yang mampu memengaruhi hingga ke hulu sungai.

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.

Sesuai dengan fungsinya tersebut, muara sungai harus cukup lebar dan dalam. Namun faktanya di lapangan sering dijumpai permasalahan yang ada di muara sungai yaitu banyaknya endapan sedimen yang terkumpul sehingga menyebabkan tertutupnya muara sungai. Penutupan tersebut menyebabkan aliran debit dari sungai ke laut menjadi terganggu. Hal tersebut dapat mengakibatkan banjir di daerah sebelah hulu muara. Di

samping itu, aktivitas masyarakat khususnya nelayan juga ikut terganggu karena jalur pelayaran yang terhambat.

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 tertentu juga telah dilakukan pengerukan (dredging) menggunakan kapal keruk guna memindahkan tumpukan sedimen tersebut. Namun, teknologi tersebut tidak efektif dan 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.

Dengan dasar ini peneliti berkeinginan untuk melakukan penelitian dengan judul: **“Pengaruh Karakteristik Sedimen Terhadap Unjuk Kerja Fluidisasi Semprotan Tunggal Horizontal”**

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh karakteristik sedimen pasir terhadap fluidisasi semprotan tunggal horizontal?
2. Bagaimana hubungan antara tekanan (Δh) dan debit (Q) pada fluidisasi semprotan tunggal horizontal?

C. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan, maka tujuan penelitian dalam tulisan ini adalah:

1. Mengetahui dan memahami pengaruh karakteristik sedimen pasir terhadap semprotan tunggal horizontal.
2. Mengetahui dan memahami hubungan antara tekanan (Δh) dan debit (Q) pada fluidisasi semprotan tunggal horizontal.

D. Manfaat Penelitian

1. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai referensi dalam mengembangkan metode fluidisasi menggunakan prinsip penggabungan metode flushing dan fluidisasi dalam satu media pipa.
2. 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.

3. Memberikan manfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan dalam studi terkait dan dapat dijadikan sebagai bahan referensi untuk kajian penelitian lebih lanjut.

E. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam melaksanakan penelitian ini adalah:

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 waktu (t), kebutuhan tekanan (Δh), dan kecepatan (v).
3. Sedimen yang digunakan adalah pasir muara.
4. Penelitian ini bersifat eksperimental laboratorium dan tidak membutuhkan skala model di laboratorium

F. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan tugas akhir ini untuk menghasilkan penulisan yang baik dan terarah serta memudahkan pembaca memahami uraian secara sistematis, maka tugas akhir ini terdiri dari beberapa bab sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang masalah, rumusan masalah, maksud dan tujuan penelitian, Batasan masalah, serta sistematika penulisan penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan tentang teori-teori dan tinjauan umum yang digunakan untuk membahas dan menganalisis tentang permasalahan dari penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang tahap demi tahap prosedur pelaksanaan penelitian serta cara pengolahan data hasil penelitian, termasuk juga kerangka alir penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil analisis perhitungan data-data yang diperoleh dari hasil pengujian serta pembahasan dari hasil pengujian yang diperoleh.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini akan menerangkan tentang kesimpulan beserta saran yang diperlukan untuk penelitian lebih lanjut dari tugas akhir ini

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Hasil 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:

- a) 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.
- b) Musriati N, (2001), menguji kebutuhan tekanan untuk fluidisasi pada sedimen *non kohesif* dan terendam air. Pengujian ini menggunakan model 3 dimensi dengan skala 1:15. Pengujian ini menggunakan saluran dengan ukuran 16,5 m x 1,5 m x 0,6 m, dua buah pipa fluidisasi dengan diameter 2 inci dengan diameter lubang perforasi 3 mm dan jarak antar lubang 5 cm. Pengujian ini

menghasilkan tekanan awal 3 kali ketebalan sedimen, dan 10 kali ketebalan sedimen untuk mencapai kondisi fluidisasi.

- c) 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.
- d) 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.

B. Muara Sungai (Estuari)

Menurut kamus besar Bahasa Indonesia, Muara (Estuari) 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 paling hilir dari muara sungai (Afni, Mudin dan Rahman, 2019).

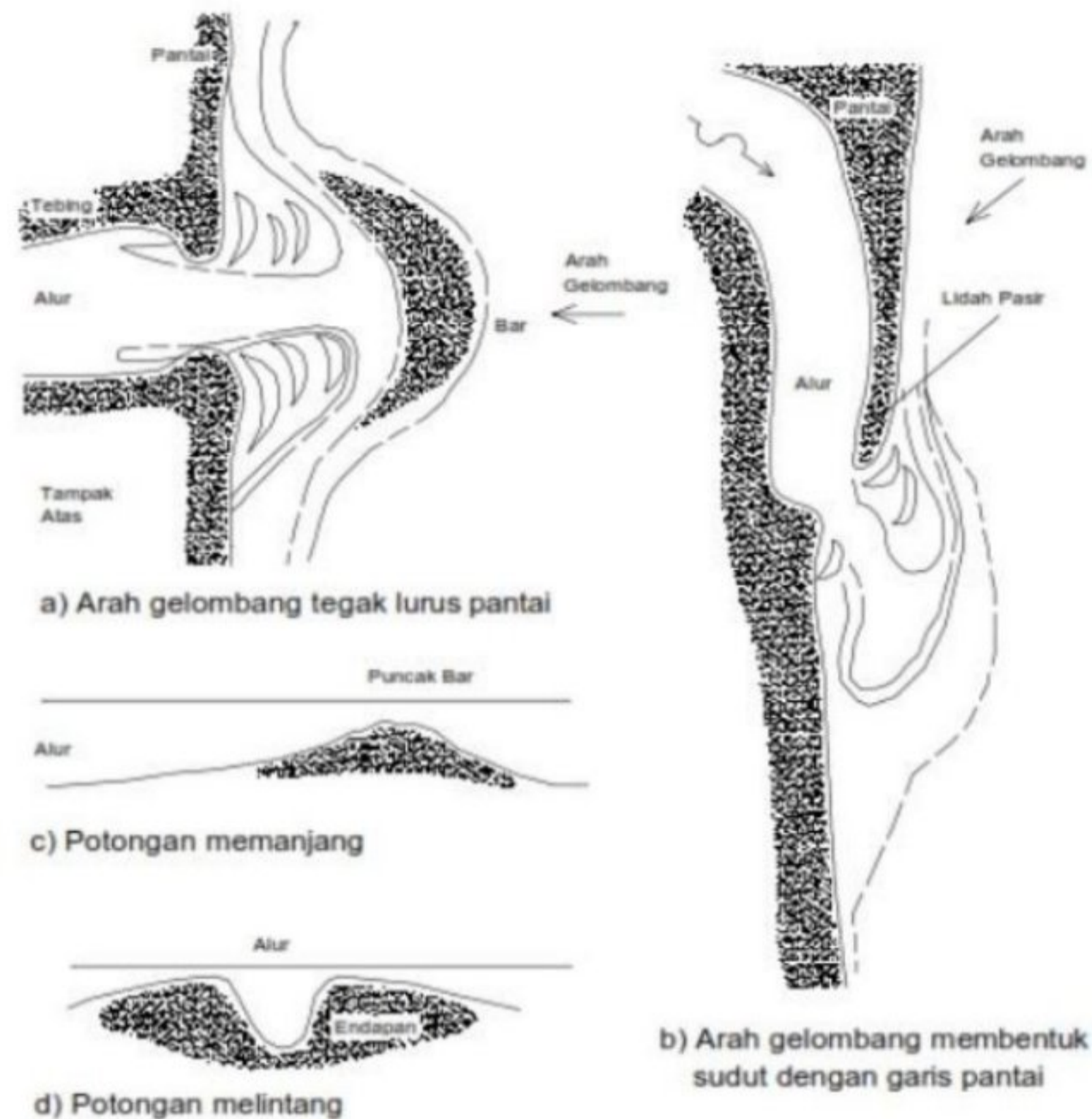
Muara sungai dapat dibedakan dalam tiga kelompok, yang tergantung pada faktor dominan yang memengaruhinya. Ketiga faktor tersebut adalah gelombang, debit sungai, dan pasang surut (Nur Yuwono, 1994).

B.1 Muara yang didominasi gelombang laut

Gelombang besar yang terjadi pada pantai berpasir dapat menyebabkan angkutan (transpor) sedimen (pasir). Transpor sedimen sepanjang pantai adalah yang paling dominan. Angkutan sedimen tersebut dapat bergerak masuk ke muara sungai dan karena di daerah tersebut kondisi gelombang sudah tenang maka sedimen akan mengendap. 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, 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, 1999).

Pada Gambar 1. Menunjukkan pola sedimentasi muara sungai yang didominasi oleh gelombang, yang tergantung pada arah gelombang.



Gambar 1. Tipe Muara yang didominasi gelombang laut

Apabila gelombang dominan relative tegak lurus terhadap muara pola sedimentasi seperti pada gambar 1. sedangkan apabila arah gelombang dominan membentuk sudut terhadap pantai maka akan terjadi penutupan muara yang arahnya sesuai arah gerakan pasir sepanjang pantai (Triatmodjo, 1999).

Pada muara sungai yang membelok, mulut sungai selalu bergerak (berpindah-pindah). Perpindahan tersebut dipengaruhi oleh angkutan

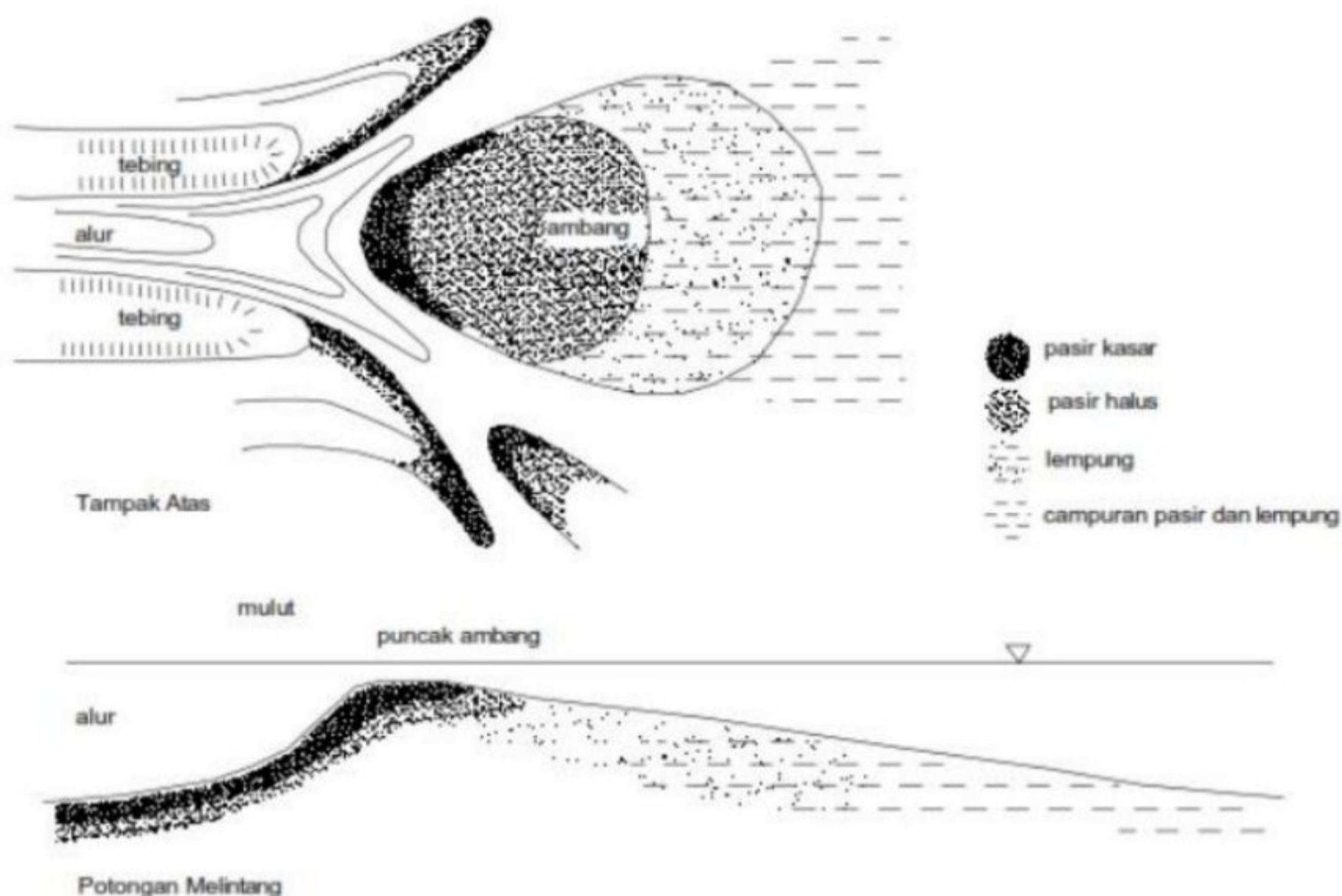
sedimen sepanjang pantai dan debit. Gelombang pecah yang membentuk sudut terhadap garis pantai menimbulkan limpasan energi yang dapat diuraikan dalam komponen tegak lurus dan sepanjang pantai.

B.2 Muara yang didominasi aliran 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 yang kemungkinan terjadi pada pantai di depan muara yang akan berpengaruh pada perubahan beberapa alur sungai dengan arus laut dan angkutan pasir pada waktu tersebut. Hal ini akan sangat berpengaruh pada keperluan navigasi.

Gambar 2. Menunjukkan pola sedimentasi di muara sungai yang didominasi oleh debit sungai. Dari tampang memanjang terlihat bahwa endapan banyak terjadi di pantai di depan muara.

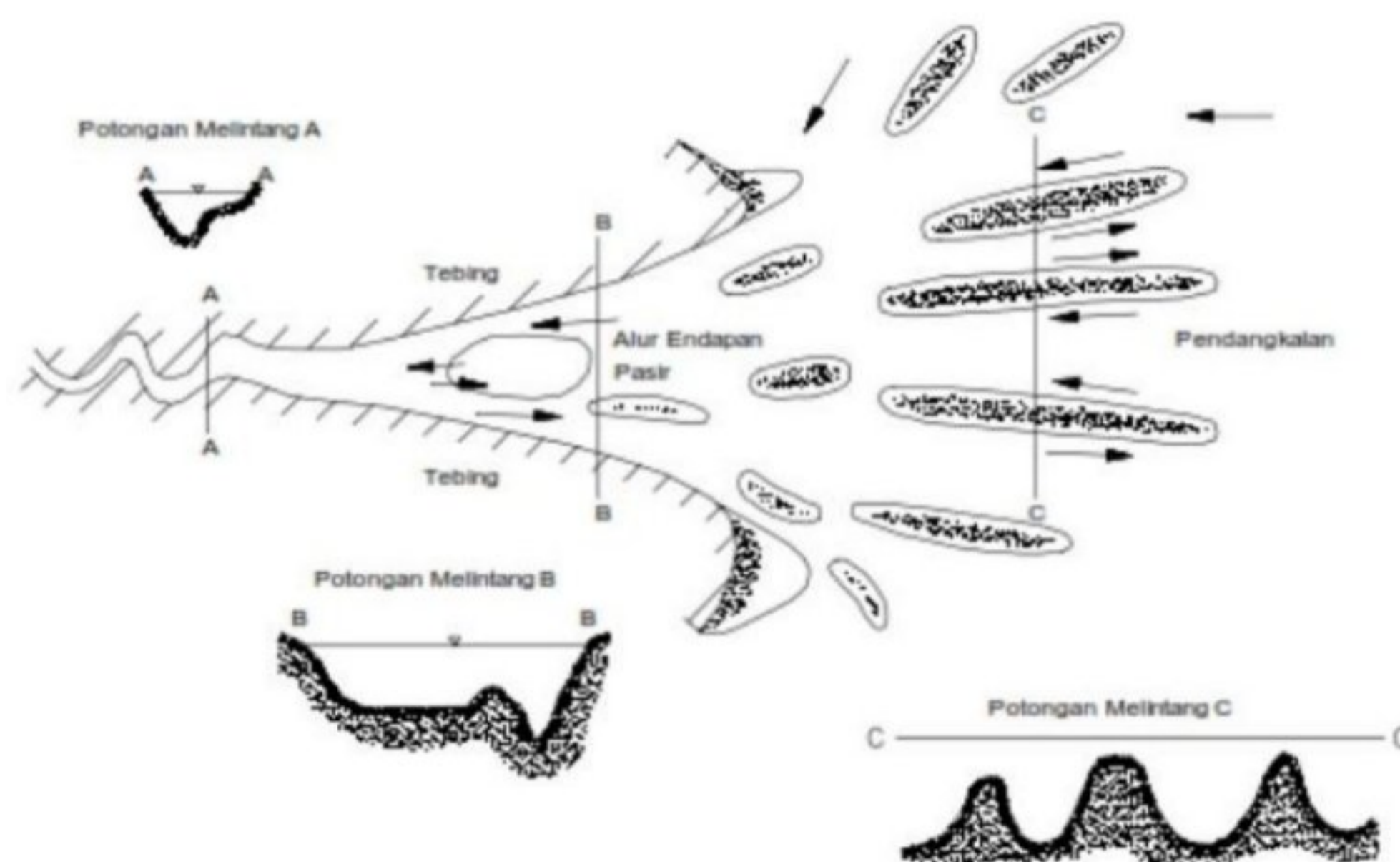


Gambar 2. Tipe muara yang didominasi aliran sungai

B.3 Muara yang didominasi pasang surut

Tipe muara ini ditandai dengan fluktuasi pasang surut muka air laut yang sangat besar. Apabila tinggi fluktuasi cukup besar, volume air pasang yang masuk ke sungai akan sangat besar dan akan berakumulasi dengan air dari hulu sungai. Pada saat air surut, volume air yang sangat besar tersebut mengalir keluar dalam periode waktu tertentu. Dengan

demikian kecepatan arus selama air surut juga besar, dan cukup potensial membentuk muara sungai. Pada tipe ini terjadi angkutan sedimen dua arah (arah laut dan arah darat). 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

C. Sedimentasi

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 di wilayah tersebut tergenang.

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.

Penyebab sedimentasi pantai antara lain:

- a. Terjadinya pengangkutan sumber material (*transport*) oleh angin, es maupun air
- b. Berlangsungnya pengendapan karena perbedaan arus dan gaya
- c. Adanya 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

C.1 Transpor Sedimen

Transpor sedimen secara umum diartikan sebagai proses perpindahan sedimen secara 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 adalah gerak sedimen di daerah pantai yang disebabkan oleh gelombang dan arus. Daerah transport sedimen pantai ini terbentang dari garis pantai sampai tepat di luar daerah gelombang pecah (Pakpahan, 2016).

Transpor sedimen pantai dibedakan menjadi dua macam (Triatmodjo, 1999), yaitu transport menuju dan meninggalkan pantai (*onshore-offshore transport*) yang mempunyai arah rata-rata tegak lurus garis pantai, sedangkan transport sepanjang pantai (*longshore transport*) mempunyai arah rata-rata sejajar pantai.

Di laut dalam, gerak partikel air karena gelombang jarang mencapai dasar laut. Sedang di laut dangkal, partikel air di dekat dasar bergerak maju dan mundur secara periodik. Kecepatan partikel air di dekat dasar naik dengan bertambahnya tinggi gelombang dan berkurang dengan kedalaman (Triatmodjo, 1999).

C.2 Karakteristik Sedimen

a. Ukuran Butiran Sedimen

Sedimen pantai bisa berasal dari erosi garis pantai itu sendiri, dari daratan yang dibawa oleh sungai, dan dari laut dalam yang terbawa arus ke daerah pantai (Triatmodjo, 1999). Sifat-sifat sedimen adalah sangat penting di dalam mempelajari proses erosi dan sedimentasi.

Sifat-sifat tersebut adalah ukuran butiran sedimen, rapat massa, porositas, berat jenis, permeabilitas, dan kecepatan endap sedimen.

Sedimen pantai diklasifikasikan berdasarkan ukuran butir menjadi lempung, lumpur, pasir, kerikil, koral (*pebble*), *cobble*, dan batu (*boulder*). Tabel 1 menunjukkan klasifikasi menurut Wentworth, yang banyak digunakan dalam bidang teknik pantai (CERC, 1984). Berdasarkan klasifikasi tersebut pasir mempunyai diameter antara 0,063 dan 2,0 mm yang selanjutnya dibedakan menjadi lima kelas.

Distribusi ukuran butir biasanya dianalisis dengan saringan dan dipresentasikan dalam bentuk kurva persentase berat kumulatif. Pada umumnya distribusi ukuran butiran pasir mendekati distribusi log normal, sehingga sering digunakan pula skala satuan phi.

b. Rapat Massa, Berat Jenis dan Rapat Relatif

Rapat massa (ρ) 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 : ρ = rapat massa (kg/m^3)

M = Massa (kg)

V = Volume (m^3)

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	512-250
Kerakal	
Besar	256-128
Kecil	128-64
Koral (kerikil besar)	
Sangat kasar	64-32
Kasar	32-16
Sedang	16-8
Halus	9-4
Kerikil	4-2
Pasir	
Sangat kasar	2-1
Kasar	1-0.5
Sedang	0.5-0.25
Halus	0.25-0.125
Sangat halus	0.125-0.062
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

Rapat massa air pada suhu 4°C dan tekanan atmosfer standard adalah 1000 kg/m³. sedimen umumnya berasal dari *desintegrasi* atau *dekomposisi* batuan (Mardjikoen P, 1987), seperti lempung (pecahan *feldspar* 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/m ³ , atau N/m ³)
ρ = rapat massa	(kg/m ³ , atau kgm/m ³)
g = percepatan gravitasi	(m/dt ²)
M = Massa	(kg)

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

c. 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).

d. 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 (Mardjikoen P, 1987) yang masing-masing dinyatakan sebagai berikut :

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

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

e. 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

C.3 Sedimentasi di Muara

Menurut Triatmodjo (1999), permasalahan yang biasa terjadi di muara sungai ialah timbulnya endapan yang menyebabkan terganggunya aliran air di hulu dan dapat mengakibatkan banjir. Proses sedimentasi yang terjadi terus menerus akan menimbulkan pendangkalan di daerah muara sungai.



Gambar 4. Sedimentasi di Muara

Pada sub bab bahasan sebelumnya telah dijelaskan tentang dinamika yang terjadi pada muara (estuary). Dinamika muara yang diakibatkan oleh gelombang laut dapat menyebabkan tertutupnya mulut muara oleh sedimen yang berbentuk lidah pasir bergantung dari arah gelombang datang.

Sedimentasi pada muara/mulut muara umumnya berasal dari pelapukan material yang berasal dari hulu sungai (upstream) yang bergerak hingga ke hilir sungai (Muara). Namun muara yang dipengaruhi oleh gelombang laut maka sedimentasi juga diproduksi oleh gelombang.

D. 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 *underwater sill*, *jetty* dan *breakwater*.

1. Pengerukan (*Dredging*)

Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 5 Tahun 2010 pekerjaan pengerukan atau biasa disebut *dredging* adalah pekerjaan mengubah dasar perairan untuk mencapai kedalaman dan lebar yang dikehendaki atau dalam defenisi lain yaitu kegiatan mengambil material dasar laut/perairan yang dipergunakan untuk berbagai keperluan tertentu.

Menurut Andriawati (2015) pengerukan adalah pekerjaan perbaikan daerah perairan terutama dalam masalah penggalian sedimen di bawah permukaan air dan dapat dilaksanakan baik dengan tenaga manusia maupun dengan alat berat, kecuali pada hal-hal khusus pengerukan menggunakan kapal keruk. Tujuan dari pengerukan adalah untuk memperdalam dasar sungai/laut, memperbesar penampang sungai, hingga mengambil material pasir laut untuk keperluan urugan/fill untuk keperluan bangunan ataupun reklamasi tanah.

Pemeliharaan alur dengan pengerukan rutin ini (*maintenance dredging works*) selain memerlukan biaya yang cukup mahal, kegiatan tersebut juga dapat mengganggu aktivitas pelayaran/Pelabuhan.

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 di dalamnya. Inlet dapat berupa inlet alamiah (teluk) dan ada pula yang sengaja dibuat untuk keperluan navigasi (Pelabuhan) dengan jalan menahan laju transportasi sedimen sejajar pantai (Aziz R, 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.

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.

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 sungai menggelontor sedimen dan memotong transport sedimen menyusur pantai yang berpotensi mengendap di mulut alur. Dengan demikian kedalaman dan lebar mulut sungai atau alur pelayaran dapat terpelihara sesuai kebutuhan. Bangunan ini banyak dipakai untuk

menstabilkan alur pelayaran dan muara sungai. Bangunan jetty ini telah digunakan juga di Indonesia untuk stabilisasi muara dan alur Pelabuhan namun masih dalam jumlah terbatas.

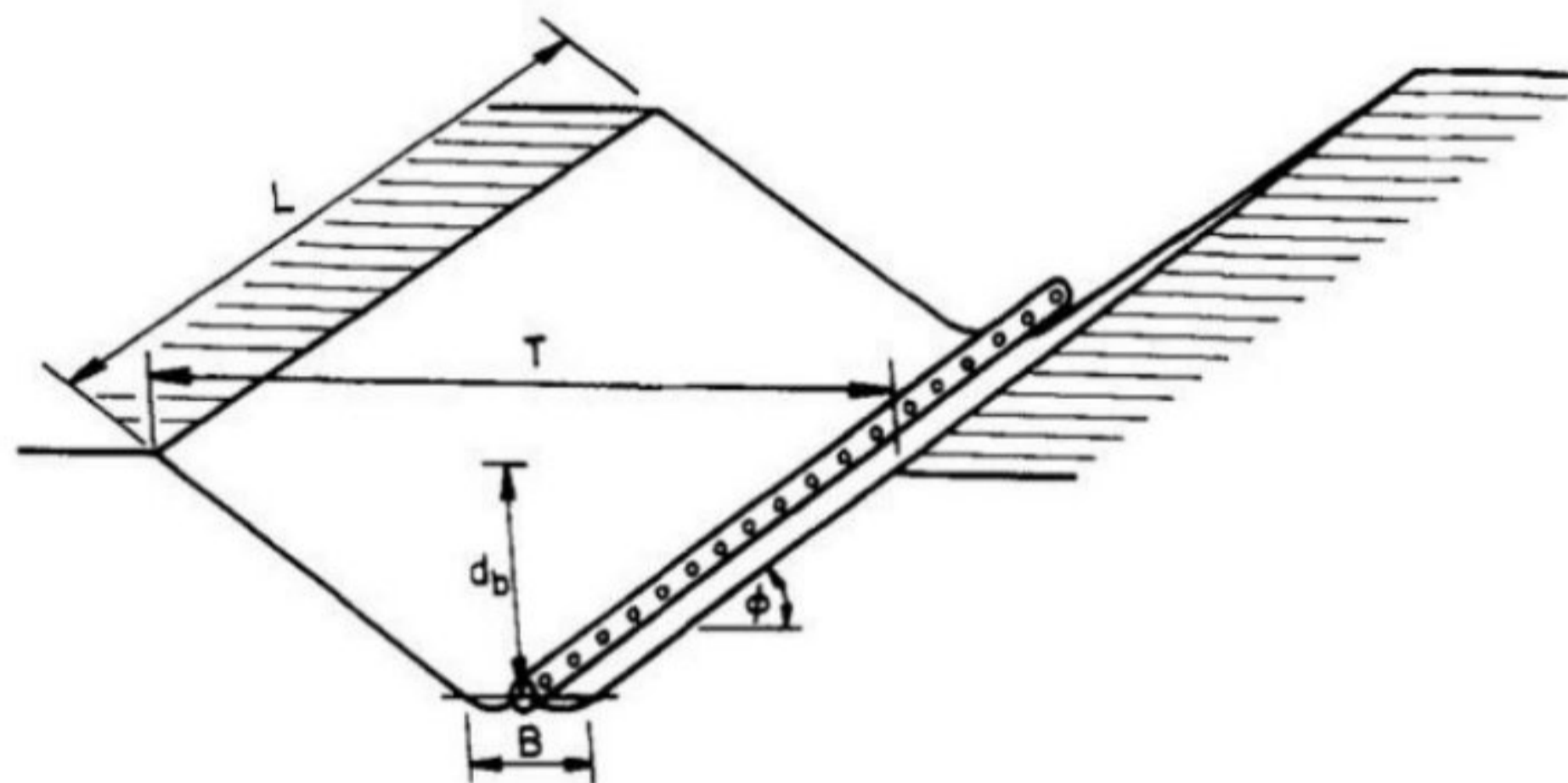
Jetty ini dalam penggunaannya masih memiliki kekurangan yaitu dapat terjadi pengendapan di salah satu sisinya dan terjadi erosi di sisi lainnya. Dengan demikian, sistem ini masih memerlukan *sand by passing* untuk mengalirkan sedimen yang terendap ke wilayah terjadinya erosi. Sehingga jika menggunakan cara ini memerlukan biaya yang sangat besar untuk membangun konstruksi tersebut ditambah dengan menggunakan teknologi *sand by passing* sebagai pendukung.

E. Teknologi Fluidisasi dalam Pemeliharaan Alur

Fluidisasi adalah suatu proses dimana fluida (gas atau zat cair) disemprotkan ke dalam media butiran yang menyebabkan partikel atau butiran tersebut terangkat dan terpisah (Anonim, 1992). Metode fluidisasi biasa dimanfaatkan dalam bidang rekayasa kimia dan rekayasa penyehatan untuk proses pembakaran, perpindahan panas dan massa, serta proses *backwashing* media filter. Metode fluidisasi dalam bidang Teknik sipil khususnya bidang rekayasa pantai dipakai untuk penggelontoran sedimen pasir di muara sungai, *inlet* pasang surut, dan pemeliharaan alur pelayaran di mulut Pelabuhan.

Pemeliharaan alur dengan metode fluidisasi telah dilakukan pertama kali pada proyek pemeliharaan alur di perairan Anna Maria,

California untuk pengoperasian pekerjaan sand by passing pada tahun 1994 (Richard N. Weismann, 1995). Akan tetapi penelitian aplikasi fluidisasi untuk transport sedimen pertama kali dilakukan pada tahun 1977 oleh John T. Kelley Sr. di Lehigh University (John T. Kelley, 1977). Bentuk fluidisasi yang diusulkan baik oleh Weismann dan Kelley adalah bentuk fluidisasi dengan pipa tertanam di bawah lapisan sedimen (material non kohesif).



Gambar 5. Sketsa Fluidisasi diusulkan oleh Weisman dan Lennon (1995)

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).

E.1 Prinsip Kerja Fluidisasi

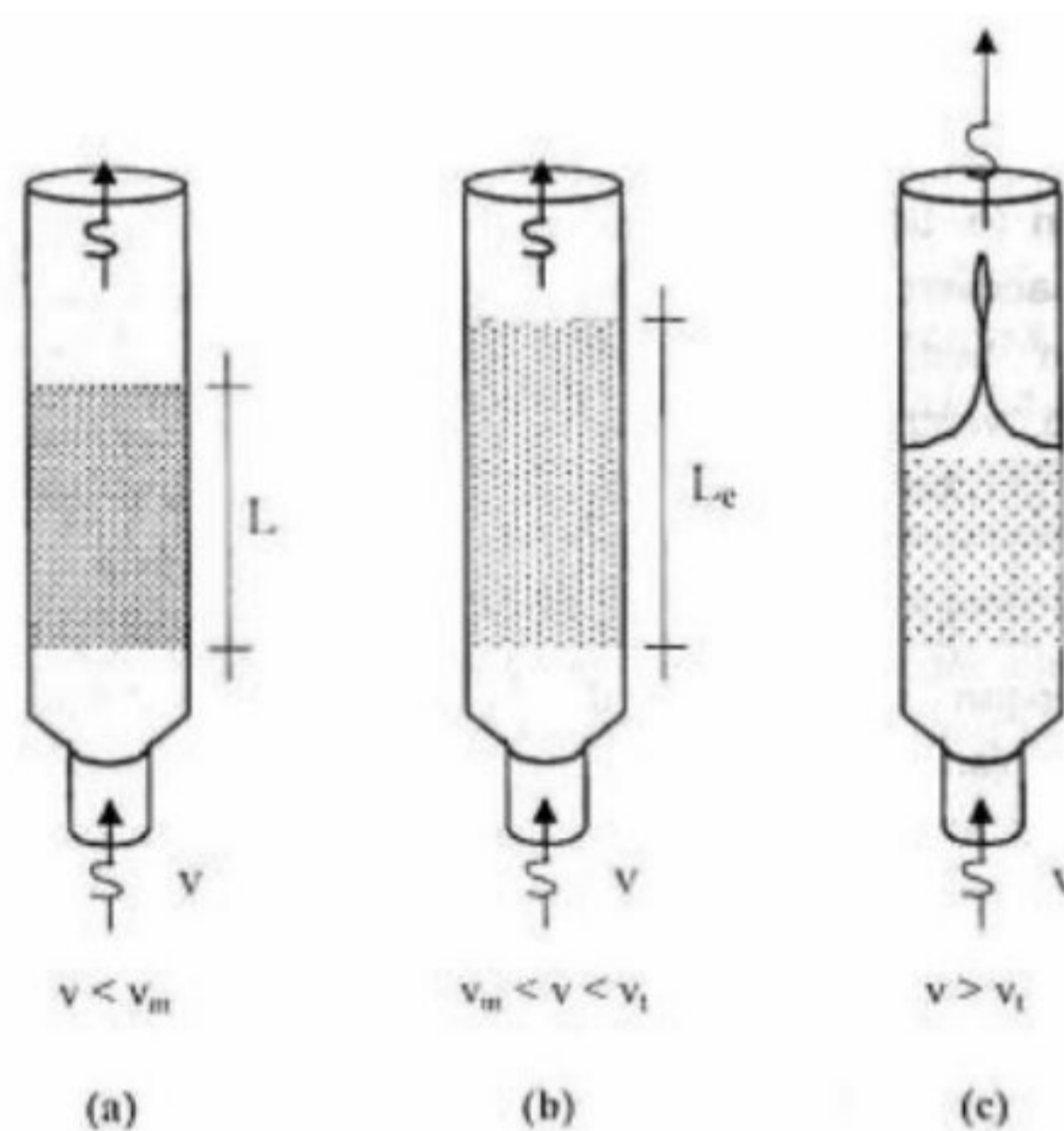
Metode fluidisasi adalah metode yang menggunakan prinsip mengagitasi (mengusik) sedimen dari pipa fluidizer yang ditanam di dasar saluran (di bawah sedimen), dengan memanfaatkan pancaran air bertekanan mengakibatkan sedimen *bed load* berubah menjadi *suspended load*, yang pada akhirnya dapat mengalir 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 R, 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 dibanding energi di atas atau gaya apung yang mengangkat sedimen lebih besar dibanding dengan berat sedimen.

Proses fluidisasi seperti yang dijelaskan pada Gambar 6 adalah dimana material pasir setebal 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 6. 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 6. B). Dan pasir akan mengikuti kecepatan aliran, jika $V > V_1$ (Gambar 6. C).



Gambar 6. Prinsip Dasar Fluidisasi (Sumber: Triatmadja R, 2001)

Proses fluidisasi untuk pembentukan alur menurut Weisman dan Lennon (1994) dibagi dalam lima tahapan dan dapat diuraikan sebagai berikut.

a) *Pra-Fluidisasi*

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

b) *Awal Fluidisasi*

Fluidisasi awal terjadi Ketika aliran air dipercepat, maka akan mulai terlihat pasir terusik di sekitar lubang perforasi dan selanjutnya bergerak ke atas hingga menyembur ke permukaan sedimen. Keadaan ini disebut Fluidisasi awal.

c) *Fluidisasi Penuh*

Jika kecepatan air ditingkatkan lagi, maka akan terjadi fase fluidisasi penuh dan akan Nampak seluruh sedimen di atas pipa telah terfluidisasi dan membentuk *slurry*. Sedimen yang telah terfluidisasi terlihat mempunyai permukaan yang lebih tinggi daripada wilayah di sekitarnya.

d) *Pembuangan Slurry*

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

e) *Erosi Pancaran Aliran*

Jika *slurry* terbang semua, maka akan terbentuk alur yang diperlebar oleh gerusan di sekitar pipa dimana terdapat lubang perforasi.

1. 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.

$$Q = v \cdot A \quad (6)$$

Dengan :

$$Q = \text{Debit aliran} \quad (\text{m}^3/\text{dtk})$$

$$v = \text{kecepatan aliran} \quad (\text{m}/\text{dtk})$$

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

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. Diameter dan Panjang Pipa Fluidisasi

Pipa fluidisasi adalah sebuah pipa yang bermulut banyak yang berfungsi menciptakan aliran keluar yang seragam melalui lubang-lubang dengan diameter yang diperlukan, ditentukan untuk memberikan ujung hidrolis (*hydraulic head*) yang cukup konstan sepanjang pipa fluidizer (Weisman dan Lennon, 1994).

Pipa fluidisasi berfungsi mengalirkan aliran air yang seragam keluar dari lubang perforasi. Untuk itu diperlukan diameter pipa yang memberikan tekanan sepanjang pipa yang relative konstan. Semakin panjang pipa fluidisasi, maka akan menyebabkan kehilangan tekanan semakin besar karena lubang fluidisasi yang juga banyak. Dengan demikian pada kehilangan tekanan yang sama, pipa yang lebih panjang membutuhkan diameter yang lebih besar pula.

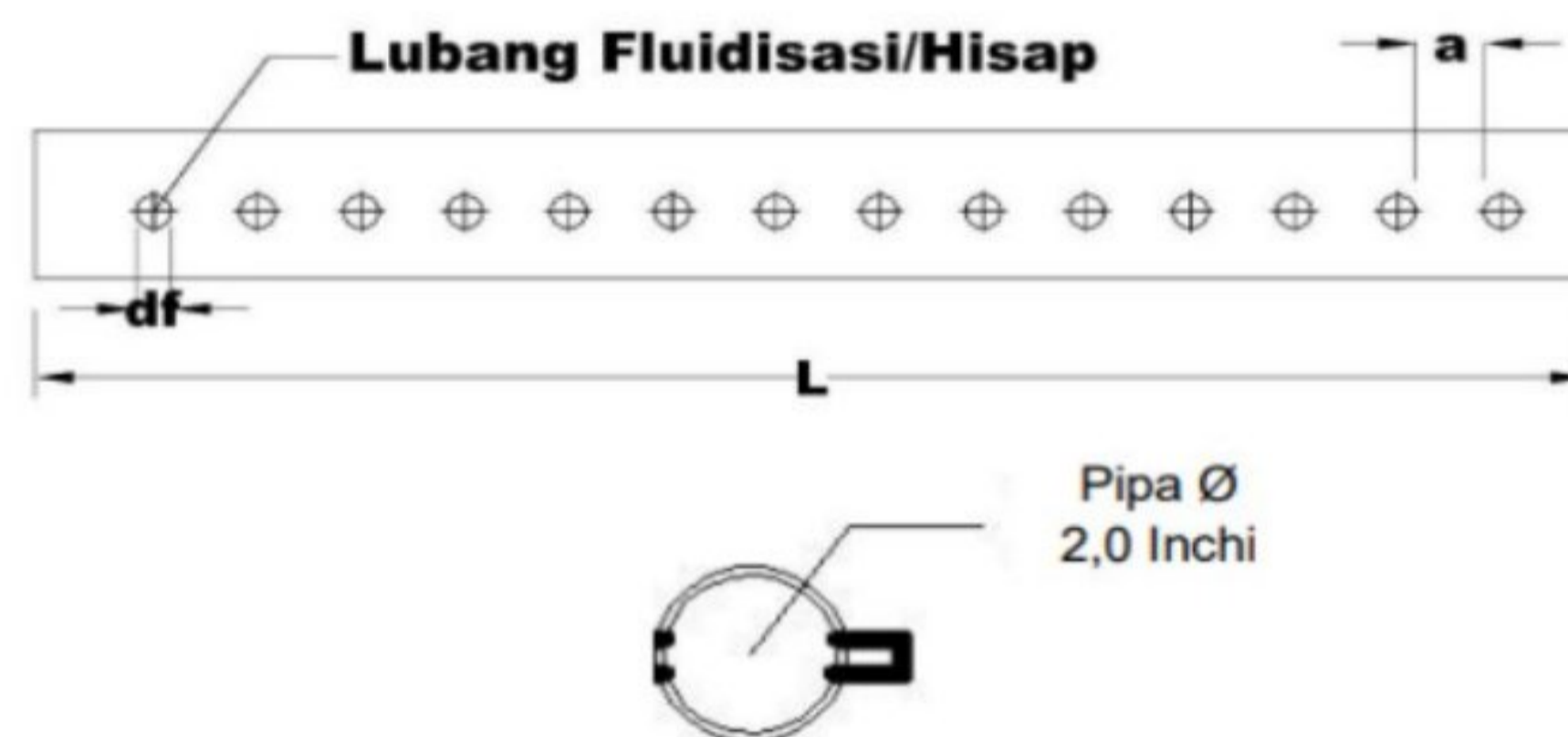
3. Orientasi semprotan, Diameter dan Jarak Antar Lubang

Menurut Weisman dan Lennon, 1994, posisi lubang yang direkomendasikan adalah yang berlawanan secara horizontal, hal ini disebabkan oleh dua hal yaitu:

- a. Daerah fluidisasi terlebar dicapai dengan lubang yang berlawanan secara horizontal
- b. Pipa yang lubangnya mengarah horizontal akan menghindari adanya lubang yang tersumbat dan juga dinilai lebih efektif dibandingkan lubang yang mengarah ke bawah

Kajian ukuran dan jarak lubang perforasi dengan orientasi lubang perforasi dilakukan pada dua macam ukuran material (diameter tengah 0,15 mm dan 0,45 mm), dua macam kedalaman (25,4 cm dan 42 cm), empat diameter lubang perforasi (1,59; 3,175; 4,76; dan 6,35 mm), empat macam jarak lubang (2,54; 5,03; 7,62; 10,16 cm). Evaluasi didasarkan pada besarnya debit yang dibutuhkan untuk mencapai full fluidisasi pada masing-masing variasi tersebut.

Penelitian yang dilakukan oleh Weisman dan Lennon, untuk lubang-lubang yang berlawanan secara horizontal menghasilkan ukuran lubang optimum antara 3,175 mm – 4,763 mm, dengan jarak antar lubang 2,54 cm – 5,08 cm.



Gambar 7. Pipa Fluidisasi

4. 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 (Thaha, 2006):

$$h_e = [1 + k] \frac{v^2}{2g} + d_b \Delta(1 - \varepsilon) \quad (7)$$

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/s ²)
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):

$$Q_h = C_D A_h \sqrt{\frac{2g \times \Delta P_0}{\gamma}} \quad (8)$$

Dimana:

Q_h	= debit tiap lubang	(ltr/detik)
C_D	= koefisien debit	
A_h	= luas tiap lubang	(m ²)
ΔP_0	= selisih tekanan di dalam dan di luar pipa	(kg/cm ²)
γ	= 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.

5. 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 ΨQ_0 . Persamaan dapat ditunjukkan sebagai berikut (Thaha, 2006):

$$Q = C_D A_h \sqrt{2gh_e} \quad (9)$$

Dimana:

$$Q = \text{Debit} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

$$C_D = \text{Koefisien debit}$$

$$A_h = \text{Luas tiap lubang} \quad (\text{m}^2)$$

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

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

6. 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):

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad (10)$$

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:

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (11)$$

Debit yang melalui lubang terendam dapat dihitung dengan rumus:

$$Q = C_D A_h \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (12)$$

Dimana:

Q = debit lubang terendam (ltr/dtk)

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)

7. 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:

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

Dimana:

Re = Bilangan Reynold

v = Kecepatan Aliran (m/s)

D = Diameter pipa (m)

μ = Kekentalan kinematik zat cair (m^2/s)

7.1 Aliran Laminer

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.

7.2 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.

8. 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, *va/ve*, dan lainnya (Kodoatie, 2002).

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

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

Dimana:

h_f = Kehilangan tinggi tenaga akibat gesekan (m)

f = faktor gesek (*friction factor*)

L = Panjang pipa (m)

D = Diameter Pipa (mm)

v = kecepatan aliran (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

8.1 Kehilangan Tinggi Tenaga melalui lubang perforasi

Kehilangan tinggi tenaga pada lubang (h_{oc}) 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)

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

Dimana:

h_{oc} = Tinggi kehilangan energi akibat gesekan (m)

v = kecepatan aliran (m²)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

K = Koefisien Kehilangan energi

8.2 Kehilangan Tenaga akibat Sedimen

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

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

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

Dimana:

$$h_e = \text{Kehilangan energi sekunder} \quad (\text{m})$$

$$db = \text{Ketebalan sedimen} \quad (\text{m})$$

$$\Delta = \text{Rapat Massa relative sedimen}$$

$$\varepsilon = \text{Porositas} \quad (\%)$$

8.3 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:

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

Dimana:

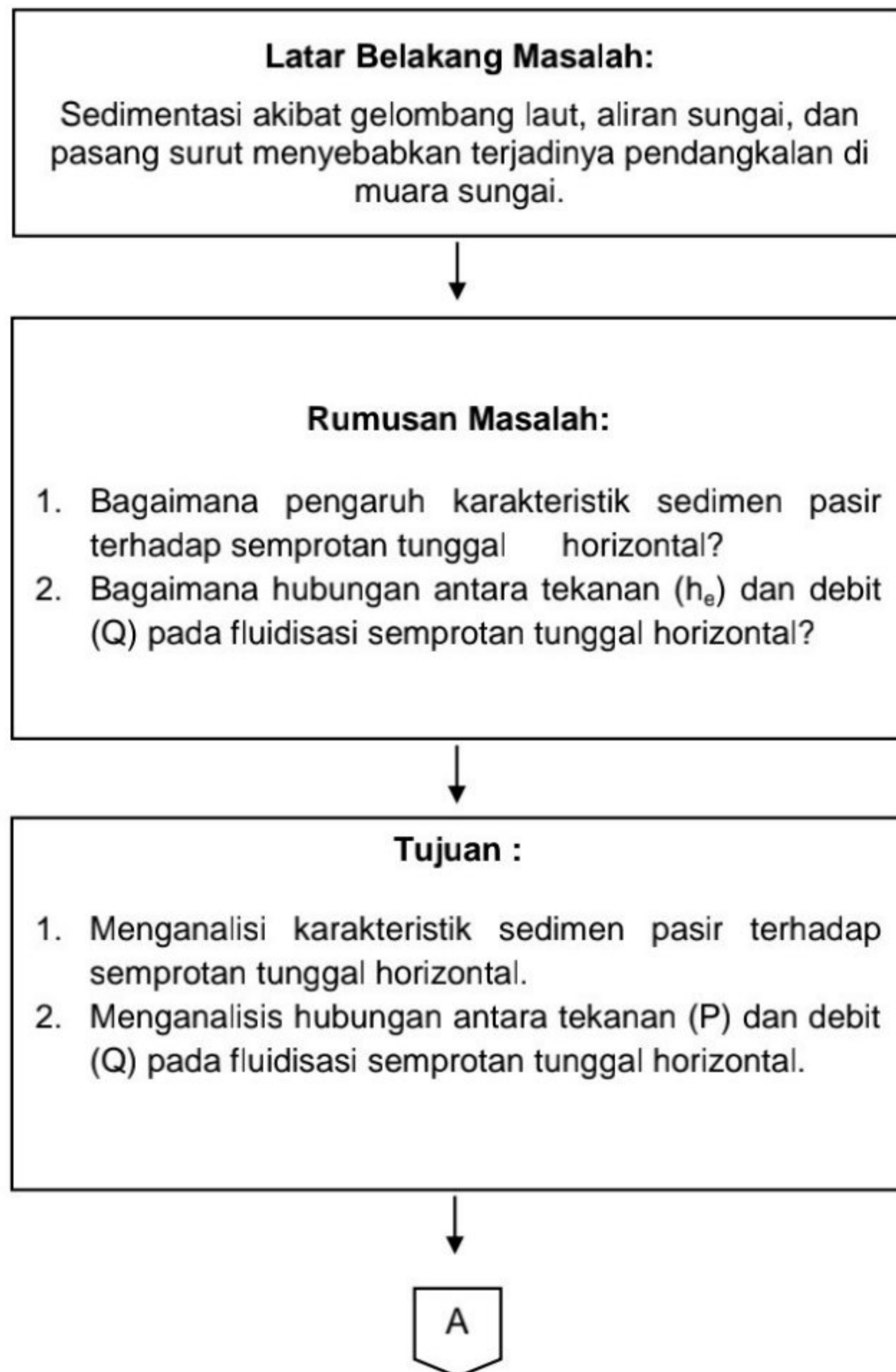
$$Q = \text{Debit aliran} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

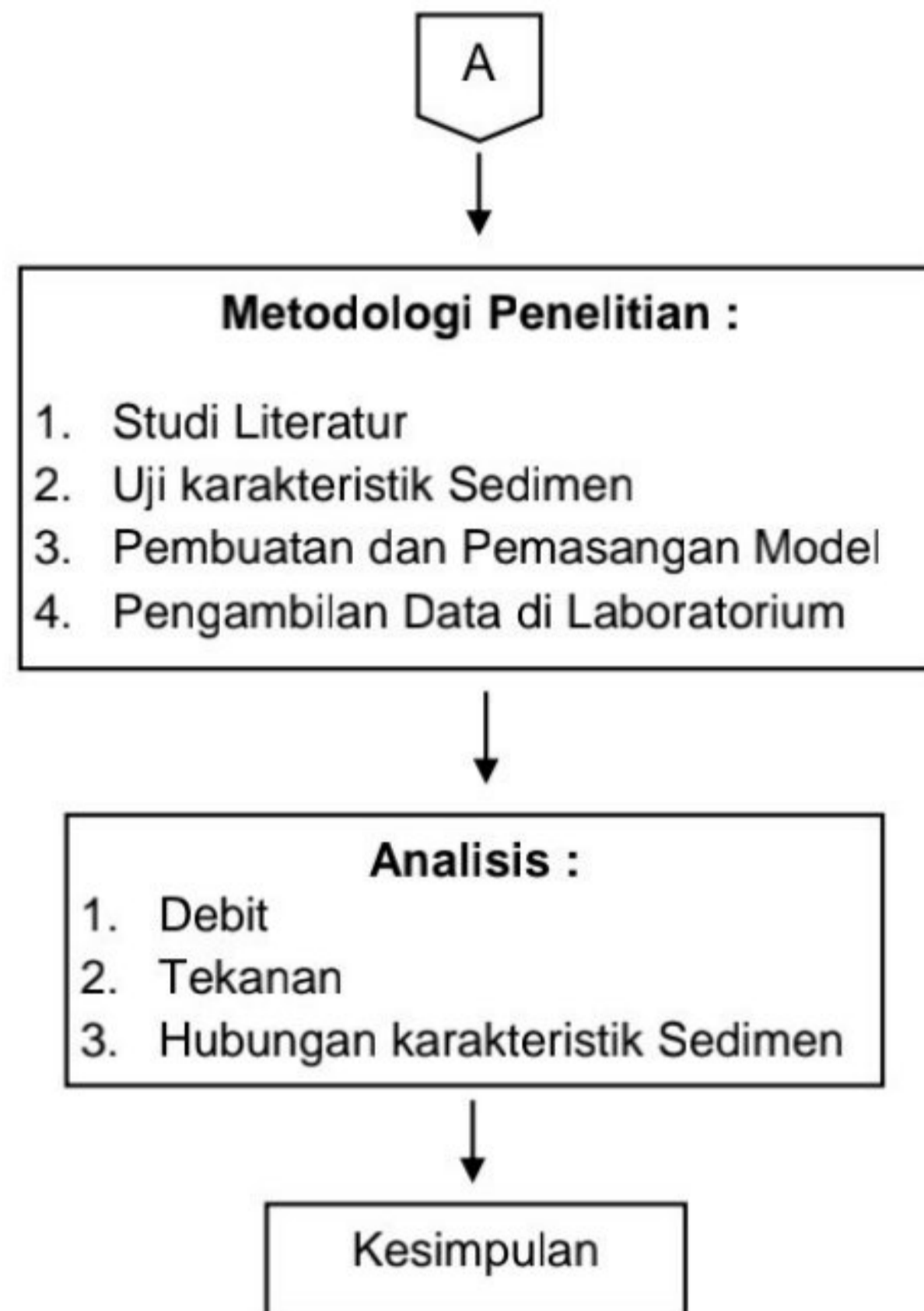
$$A = \text{Luas penampang aliran} \quad (\text{m}^2)$$

$$v = \text{Kecepatan aliran} \quad (\text{m/s})$$

F. Kerangka Pikir Penelitian

Kerangka pikir pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 8.





Gambar 8. Kerangka Pikir Penelitian