

THESIS

**STUDI EKSPERIMENTAL KECEPATAN ALIRAN
SLURRY PADA SALURAN TERTUTUP**



**OLEH:
MUHAMMAD TAUFIQ AKBAR
D012171021**

**JURUSAN SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2021**

**STUDI EKSPERIMENTAL KECEPATAN ALIRAN SLURRY
PADA SALURAN TERTUTUP**

Thesis

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi

Teknik Sipil

Disusun dan Diajukan Oleh

**MUHAMMAD TAUFIQ AKBAR
D012171021**

Kepada

**JURUSAN SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2021**

TESIS

**STUDI EKSPERIMENTAL KECEPATAN SLURRY PADA
SALURAN TERTUTUP**

Disusun dan diajukan oleh :

MUHAMMAD TAUFIQ AKBAR

Nomor Pokok D012171021

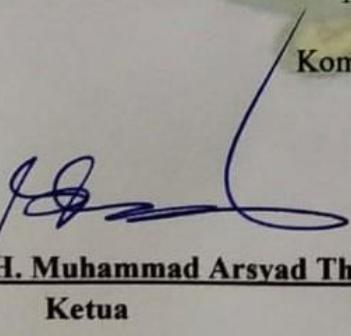
telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Tesis

pada tanggal 14 September 2021

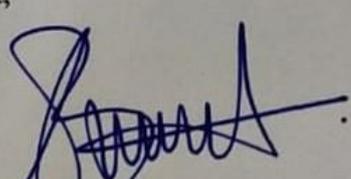
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui

Komisi Penasehat,


Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, M.T

Ketua


Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, S.T., M.T.

Sekretaris



Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil

Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, S.T., M.T.



Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, M.T

PERNYATAAN KEASLIAN THESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Muhammad Taufiq Akbar

Nomor Mahasiswa : D012171021

Program Studi : Teknik Sipil

Konsentrasi : Keairan

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa thesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan thesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 14 September 2021

Yang menyatakan,



Muhammad Taufiq Akbar

ABSTRAK

Muhammad Taufiq Akbar, Studi Eksperimental Kecepatan Aliran Slurry pada Saluran Tertutup (Dibimbing oleh Muhammad Arsad Thaha dan Bambang Bakri)

Dalam suatu aliran yang melewati sistem atau instalasi jaringan pipa air limbah akan terjadi hambatan aliran yang disebabkan oleh faktor-faktor instalasi jaringan pipa itu sendiri seperti perubahan kecepatan, perubahan penampang (dimensi pipa, belokan, sambungan) dan perubahan kekasaran permukaan. Hambatan aliran akan menyebabkan turunnya energi dan tekanan. Sape (2016) menguraikan sumber dari self head loss dan limit deposit velocity (DHLLDV) berdasarkan konsentrasi volume dan ukuran butiran partikel seragam yaitu (1) kehilangan energi pada regime fixed atau stationary flow yang di sebabkan oleh turbulensi aliran bed; (2) kehilangan energi pada regime slidding bed yang di sebabkan oleh slidding friction benda padat pada dinding pipa; (3) kehilangan energi pada regime heterogeneous akibat energi potensial (gravitasi) dan energi kinetik (tumbukan benda padat dengan dinding pipa); (4) kehilangan energi pada regime homogen disebabkan oleh turbulensi partikel besar; (5) kehilangan energi pada regime slidding yang disebabkan oleh slidding friction, energi potensial dan energi kinetik.. Tujuan penelitian ini yaitu untuk mendapatkan besaran pengaruh parameter aliran slurry terhadap regime aliran pada pipa lurus dan pipa belok. Pengambilan data primer secara analisis kuantitatif dengan pengumpulan data utama melalui pengukuran dengan menggunakan rangkaian pipa sebagai model pengujian, serta didahului dengan pengumpulan data pendukung yaitu analisis karakteristik sampel air. Karakteristik sampel air yang digunakan adalah density (ρ_w) 1.000 kg/m³, density padatan (ρ_s) 2.670 kg/m³ viskositas kinematik $0,804 \times 10^{-6}$ m²/det, viskositas dinamik (μ) $0,801 \times 10^{-3}$ Nd/m², nilai viskositas (kekentalan) $8,5 \times 10^{-7}$ m²/det, dan berat jenis (γ) 1,00355 gr/cm³, serta suhu 29,5 oC. Variasi debit yang digunakan ada 3 yaitu 0,004 m³/det, 0,003m³/det, dan 0,002 m³/det serta variasi tinggi jatuh (head) 0,5 meter. Air yang mengandung partikel padat atau sedimen (slurry) yang mengandung sedimen seragam berupa pasir dengan ukuran 0,15 mm, 0,25 mm dan 0.42 mm.

Kata Kunci: Aliran Slurry, diameter Sedimen, jaringan perpipaan, kehilangan energi

ABSTRACT

Muhammad Taufiq Akbar, Studi Eksperimental Kecepatan Aliran Slurry pada Saluran Tertutup (Dibimbing oleh Muhammad Arsad Thaha dan Bambang Bakri)

In a flow that passes through the system or installation of a wastewater pipeline network, there will be flow resistance caused by factors such as changes in velocity, changes in cross-section (pipe dimensions, bends, connections) and changes in surface roughness. The flow resistance will cause a decrease in energy and pressure. Sape (2016) describes the sources of self head loss and limit deposit velocity (DHLLDV) based on volume concentration and uniform particle size, namely (1) energy loss in fixed or stationary flow regimes caused by bed flow turbulence; (2) loss of energy in the sliding bed regime caused by sliding friction of solid objects on the pipe wall; (3) energy loss in heterogeneous regimes due to potential energy (gravity) and kinetic energy (collision of solid objects with pipe walls); (4) energy loss in the homogeneous regime is caused by large particle turbulence; (5) loss of energy in the sliding regime caused by sliding friction, potential energy and kinetic energy. The purpose of this study is to obtain the magnitude of the influence of slurry flow parameters on the flow regime in straight pipes and curved pipes. The primary data collection is quantitative analysis with the main data collection through measurements using a series of pipes as a test model, and is preceded by the collection of supporting data, namely the analysis of the characteristics of the water sample. The characteristics of the water samples used were density (ρ_w) 1,000 kg/m³, solids density (ρ_s) 2,670 kg/m³, kinematic viscosity 0.804×10^{-6} m²/s, dynamic viscosity (μ) 0.801×10^{-3} Nd/m², viscosity (thickness) 8.5×10^{-7} m²/sec, and specific gravity (γ) 1.00355 gr/cm³, and a temperature of 29.5 oC. There are 3 variations of discharge used, namely 0.004 m³/s, 0.003m³/s, and 0.002 m³/s and a 0.5 meter head fall Water containing solid particles or sediment (slurry) containing uniform sediment in the form of sand with sizes 0.15 mm, 0.25 mm and 0.42 mm

Keywords: Slurry flow, Sediment diameter, pipeline network, energy loss

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, karena dengan rahmat dan hidayah-Nya saya dapat menyelesaikan penelitian dengan judul “***Studi Eksperimental Kecepatan Aliran Slurry pada Saluran Tertutup***”.

Penelitian ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan program studi S2 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Gowa.

Saya menyadari sepenuhnya dalam penulisan penelitian ini tidak akan terlaksana sebagaimana yang diharapkan tanpa adanya bantuan, arahan, dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini perkenankan saya menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Pembimbing utama Bapak **Prof. Dr. Ir. H. Muh. Arsyad Thaha, MT** yang telah membimbing penulis dalam penulisan penelitian ini.
2. Pembimbing pendamping Bapak **Dr. Eng. Bambang Bakri, ST., MT.** yang telah banyak membimbing penulis dalam menyusun Hasil Penelitian ini.
3. Ibu **Dr. Eng. Rita Irmawaty, ST., MT.** (Ketua Program Studi Teknik Sipil Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin Gowa).
4. Para Dosen dan Staf Pascasarjana UNHAS dan Staf Prodi S2 Teknik Sipil yang telah membantu dan membimbing penulis selama mengikuti pendidikan pada Program Studi S2 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Gowa.

5. Ayahanda Ali Akbar Hasan tercinta (almarhum), Ibunda Nur Alam, dan istri tercinta Hasni serta ananda Maulana, Athifah dan Aisyah yang terus memberikan dukungan dan semangat dalam menyelesaikan tesis ini.
6. Rekan-rekan mahasiswa Program Studi S2 Universitas Hasanuddin khususnya Angkatan 2017 Jurusan Teknik Sipil Konsentrasi Keairan dan semua pihak yang telah membantu terkhusus.
7. Segenap Pimpinan dan Staf BP2JK Wilayah Sulawesi Selatan.

Penulis menyadari masih terdapat kekurangan dalam hasil penelitian ini, oleh karena itu penulis mengharapkan agar kiranya memberikan kritik dan saran yang membangun demi kesempurnaan hasil penelitian ini. Akhir kata, Penulis mengharapkan hasil penelitian ini dapat bermanfaat bagi kita semua, bangsa dan negara. Amin.

Makassar, 14 September 2021

Penulis



M. Taufiq Akbar

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN SAMPUL	i
LEMBAR PENGESAHAN THESIS.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN THESIS.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Tujuan Penelitian	4
D. Manfaat Penelitian	5
E. Batasan Masalah	5
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
A. Aliran Pada Saluran Tertutup	7
B. Bilangan Reynolds	7
C. Rapat Jenis (<i>Density</i>).....	8
D. Debit Aliran Fluida	9
E. Persamaan Kontinuitas	10
F. Tekanan	10
G. Kehilangan Energi	12

I. Distribusi Sedimen dalam Pipa	31
--	----

BAB III. METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian	37
B. Jenis Penelitian dan Sumber Data	37
C. Rancangan Penelitian	38
D. Diagram Proses Penelitian.....	50

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Fisik Sampel Air dalam Sedimen.....	52
B. Data dan Hasil	53
1. Kecepatan	55
2. Bilangan Reynolds.....	56
3. <i>Head Loss</i>	57
4. Tekanan	58
C. Pembahasan	59
1. Pengaruh Parameter Aliran Slurry.....	59
2. Kecepatan Pengendapan pada Pipa Lurus dan Belok	72
3. Perubahan Regime Aliran pada Pipa Lurus.....	73
4. Pengaruh Regime Aliran pada Pipa Belokan.....	79
D. Validasi Data	85

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan	88
B. Saran	89

DAFTAR PUSTAKA	90
----------------------	----

DAFTAR TABEL

nomor		halaman
2.1.	Koefisien Kb sebagai fungsi sudut belokan α	15
2.2	Nilai Kb sebagai fungsi dari R/D	15
2.3.	Nilai K sebagai fungsi dari α	17
3.1	Variasi dan Parameter Penelitian	45
3.2	Data Rangkaian Simulasi pada Tiap Sampel	46
4.1	Rekapitulasi Hasil Pemeriksaan Sampel Sideimen	53
4.2	Hasil Percobaan	54
4.3	Kecepatan	55
4.4	Bilangan Reynolds	56
4.5	<i>Headloss</i>	57
4.6	Tekanan	58
4.7	Kecepatan Pengendapan (persamaan Liu)	73

DAFTAR GAMBAR

		Halaman
5	Gambar 2.1 Belokan pipa	15
6	Gambar 2.2 Perbesaran pipa	16
	Gambar 2.3 Perbesaran penampang berangsur-angsur	16
	Gambar 2.4 Pengecilan pipa	17
	Gambar 2.5 Pengecilan penampang berangsur-angsur	18
	Gambar 2.6 Koefisien K_c Sebagai fungsi α	18
	Gambar 2.7 <i>Regime</i> Aliran Sedimen Dalam Pipa	19
	Gambar 2.8 Variasi gradien tekanan terhadap rerata kecepatan aliran pada konsentrasi sedimen yang berbeda	21
	Gambar 2.9 Diagram Moody (Triatmodjo, 2015)	23
	Gambar 2.10 Limit deposit velocity untuk partikel seragam	26
	Gambar 2.11 Limit deposit velocity untuk partikel tidak seragam	26
	Gambar 2.12 <i>Regime</i> Aliran Sedimen Dalam Pipa, (a) Homogen, (b) Heterogen, (c) Saltation	34
	Gambar 2.13 Skema konsentrasi sedimen dan distribusi kecepatan dalam pipa untuk berbagai <i>regime</i> aliran	36
	Gambar 2.14 <i>Regime</i> Aliran dan Distribusi Sedimen Dalam Pipa	36

Gambar 3.1	Sampel Bahan Pengujian	39
Gambar 3.2	Tampak Atas Rangkaian Pipa	39
Gambar 3.3	Tampak Samping Rangkaian Pipa	40
Gambar 3.4	Rangkaian Pipa	40
Gambar 3.5	Reservoir atas dan Reservoir Bawah	41
Gambar 3.6	Katub dan Busur derajat	41
Gambar 3.7	Tabung pitot dan manometer digital	42
Gambar 3.8	Tabung pitot dan manometer	42
Gambar 3.9	Buret (a) dan mikrometer (b)	43
Gambar 3.10	Pompa Air	43
Gambar 3.11	Arah Aliran Pipa Lurus	44
Gambar 3.12	Arah Aliran pada Belokan	44
Gambar 3.13	Bagan Alir Proses Penelitian	50
Gambar 4.1	Hubungan Debit dan Kecepatan pada Pipa Lurus	59
Gambar 4.2	Hubungan Debit dan Kecepatan pada Pipa Belok	61
Gambar 4.3	Hubungan Debit dan Bilangan Reynolds pada Pipa Lurus	62
Gambar 4.4	Hubungan Debit dan Bilangan Reynolds pada Pipa Belok	64
Gambar 4.5	Hubungan Debit dan Kehilangan Energi pada Pipa Lurus	66
Gambar 4.6	Hubungan Debit dan Kehilangan Energi pada Pipa Belokan	68

Gambar 4.7	Hubungan Debit dan Tekanan pada Pipa Lurus	69
Gambar 4.8	Hubungan Debit dan Tekanan pada Pipa Belok	71
Gambar 4.9	Distribusi Vs dan VL (a) d0,15, (b) d 0,25 dan (c) d0,42 Pipa Lurus	75
Gambar 4.10	Kondisi Pengaliran Pipa Lurus	79
Gambar 4.11	Distribusi Vs dan VL (a) d0,15, (b) d 0,25 dan (c) d0,42 pada Pipa Belok	81
Gambar 4.12	Kondisi Pengaliran Pipa Lurus	84
Gambar 4.13	VisualisQeruisi Regime Aliran pada Pipa	85
Gambar 4.14	Hubungan Kecepatan Pengendapan terhadap Ukuran Sedimen	86
Gambar 4.15	Perbandingan Grafik Hasil Penelitian dengan Grafik Liu	87

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pipa adalah saluran tertutup yang biasanya berpenampang lingkaran yang digunakan untuk mengalirkan fluida dengan tampang aliran penuh (Triatmojo 1996: 25). Fluida yang dialirkan melalui pipa bisa berupa zat cair atau gas dan tekanan bisa lebih besar atau lebih kecil dari tekanan atmosfer. Apabila zat cair di dalam pipa tidak penuh maka aliran termasuk dalam aliran saluran terbuka atau karena tekanan di dalam pipa sama dengan tekanan atmosfer (zat cair di dalam pipa tidak penuh), aliran termasuk dalam pengaliran terbuka. Karena mempunyai permukaan bebas, maka fluida yang dialirkan adalah zat cair. .

Perbedaan mendasar antara aliran pada saluran terbuka dan aliran pada pipa adalah adanya permukaan yang bebas yang (hampir selalu) berupa udara pada saluran terbuka. Jadi seandainya pada pipa alirannya tidak penuh sehingga masih ada rongga yang berisi udara maka sifat dan karakteristik alirannya sama dengan aliran pada saluran terbuka (Kodoatie, 2002: 215). Misalnya aliran air pada gorong-gorong. Pada kondisi saluran penuh air, desainnya harus mengikuti kaidah aliran pada pipa, namun bila mana aliran air pada gorong-gorong didesain tidak penuh maka sifat alirannya adalah sama dengan aliran pada saluran terbuka. Perbedaan

yang lainnya adalah saluran terbuka mempunyai kedalaman air (y), sedangkan pada pipa kedalaman air tersebut ditransformasikan berupa (P/y). Oleh karena itu konsep analisis aliran pada pipa harus dalam kondisi pipa terisi penuh dengan air.

Aliran air yang bercampur dengan zat padat dan zat cair merupakan aliran slurry yang terkonsentrasi suatu jumlah material yang sangat halus yang memberikan viscositas yang tinggi (Nahyar, 2000). Kemampuan fluida dalam gerakan horizontal untuk mensuspensi partikel sedimen tergantung pada pengaruh gaya gravitasi dan konsentrasi partikel (Liu, 2003).

Pengangkutan dan pengendapan sedimen, baik yang tidak diinginkan atau diizinkan, merupakan bagian integral dari sistem saluran pembuangan. Pengaruh endapan sedimen pada kinerja hidrolis mungkin signifikan, dan oleh karena itu, penilaiannya sangat penting. Namun, evaluasi semacam itu harus didasarkan pada pengetahuan menyeluruh tentang sifat dan perilaku sedimen yang muncul di pipa saluran pembuangan. Transpor sedimen dalam pipa penting dan diperlukan dalam bidang pemindahan endapan lumpur dan pengerukan (*dredging*). Manfaat sistem ini dalam kedua bidang tersebut adalah untuk memindahkan sedimen atau endapan pada minimum *head loss* tanpa pengendapan. Aspek penting dari sistem ini adalah bagaimana memprediksi *head loss* dan kecepatan minimum atau kecepatan kritis agar supaya pipa terhindar dari pengendapan (Breusers, 1979).

Perilaku aliran *slurry* sangat tergantung pada distribusi ukuran partikel, bentuk, kepadatan dan konsentrasi partikel.

Dalam penelitian pada aliran *slurry* menggunakan ukuran partikel pasir 0,20 mm sampai dengan 1,40 mm, debu batu 8 μm sampai dengan 33 μm , konsentrasi *slurry* pasir 6% hingga 40%, *slurry* debu berbatu 26% hingga 48% dan konsentrasi pasir-debu bebatu 45% hingga 51% menggunakan pipalooop 17,5 mm dan 26,8 mm, hasilnya menunjukkan bahwa kecepatan *slurry* untuk *coarse sand* berada pada 1 m/s sampai dengan 6 m/s dengan gradien hidrolik (im) 0,25 m/m sampai 1,175 m/m, *medium sand* berada pada 7,1 m/s-2,2 m/s dengan gradien hidrolik 1,625 m/m – 0,45 m/m, *fine sand* berada pada 7,2 m/s - 2,2 m/s dengan gradien hidrolik 1,75 m/m – 0,22 m/m.

Dalam suatu aliran yang melewati sistem atau instalasi jaringan pipa akan terjadi hambatan aliran yang disebabkan oleh faktor-faktor instalasi jaringan pipa itu sendiri seperti perubahan kecepatan, perubahan penampang (dimensi pipa, belokan, sambungan) dan perubahan kekasaran permukaan. Hambatan aliran akan menyebabkan turunnya energi dan tekanan. Sape (2016) menguraikan sumber dari *self head loss* dan *limit deposit velocity* (DHLLDV) berdasarkan konsentrasi volume dan ukuran butiran partikel seragam yaitu (1) kehilangan energi pada regime *fixed* atau *stationary flow* yang disebabkan oleh turbulensi aliran bed; (2) kehilangan energi pada regime *sliding bed* yang disebabkan oleh *sliding friction* benda padat pada dinding pipa; (3) kehilangan energi pada regime

heterogeneous akibat energi potensial (gravitasi) dan energi kinetik (tumbukan benda padat dengan dinding pipa); (4) kehilangan energi pada regime homegen disebabkan oleh turbulensi partikel besar; (5) kehilangan energi pada regime slidding yang disebabkan oleh slidding friction, energi potensial dan energi kinetik.

Berdasarkan latar belakang di atas, maka penelitian ini mengkaji sebuah tesis dengan judul ***“Studi Eksperimental Kecepatan Aliran Slurry pada Saluran Tertutup”***

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, dirumuskan permasalahan penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh parameter aliran slurry terhadap aliran pada pipa lurus dan belok?
2. Bagaimana batas kecepatan pengendapan (*limit deposite velocity*) berdasarkan diameter sedimen pada pipa lurus dan pipa belokan.?
3. Bagaimana perubahan regime aliran pada pipa lurus dan pipa belokan?

C. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis pengaruh parameter aliran slurry terhadap aliran pada pipa lurus dan belok.

2. Menentukan batas kecepatan pengendapan (*limit deposite velocity*) berdasarkan diameter sedimen pada pipa lurus pada pipa belokan.
3. Mendapatkan perubahan regime aliran pada pipa lurus dan pipa belokan.

D. Manfaat Penelitian

Dengan berjalannya penelitian ini, maka diharapkan dapat memperoleh manfaat sebagai berikut :

1. Secara akademis manfaat kajian ini untuk memperkaya pengembangan ilmu dalam mengaplikasikan teori kebijakan, kelembagaan, dan manajemen sosial ekonomi khususnya yang berhubungan dengan pipa (saluran tertutup).
2. Selanjutnya secara praktis penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dan referensi dalam perencanaan dengan sistem saluran tertutup.
3. Sebagai referensi untuk pengembangan inovasi model jaringan pipa dalam meningkatkan kinerja jaringan pipa.

E. Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat berjalan efektif dan mencapai sasaran maka penelitian dibatasi pada :

1. Slurry yang dimaksud adalah aliran air yang mengandung slurry

2. Parameter yang sangat penting dari aliran *slurry* adalah kecepatan pengendapan atau *limit deposit velocity* (kecepatan minimum yang dibutuhkan untuk mensuspensi suatu partikel sedimen dalam suatu pipa).
3. Jaringan pipa air terdiri dari satu *inflow* dan *outflow*.
4. Tinggi jatuh (*head*) adalah 0,5 meter
5. Variasi debit yang digunakan 3 (tiga) yaitu $Q_1 = 0,004 \text{ m}^3/\text{det}$, $Q_2 = 0,003 \text{ m}^3/\text{det}$, dan $Q_3 = 0,002 \text{ m}^3/\text{det}$.
6. Air yang mengandung partikel padat atau sedimen (*slurry*) yang mengandung sedimen seragam berupa pasir dengan ukuran 0,15 mm, 0,25 mm dan 0.42 mm.
7. Karakterik sampel air yang digunakan dalam penelitian ini adalah density (ρ_L) air $0,998 \text{ kg/m}^3$, density padatan (ρ_s) 0,15 = 2.670 kg/m^3 , density padatan (ρ_s) 0,25 = 2.660 kg/m^3 density padatan (ρ_s) 0,42 = 2.510 kg/m^3
8. Batas Kecepatan pengendapan (*limit deposite velocity*) dihitung dengan persamaan Liu
9. Penelitian dilakukan pada jaringan pipa lurus dan belokan.
10. Tidak terjadi kebocoran pada rangkaian, sehingga volume dalam rangkaian dianggap konstan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Aliran Pada Saluran Tertutup

Saluran tertutup yang biasanya berpenampang lingkaran digunakan untuk mengalirkan fluida dengan tampang aliran penuh (Triatmojo 1996: 25). Fluida yang dialirkan melalui pipa bisa berupa zat cair atau gas dan tekanan bisa lebih besar atau lebih kecil dari tekanan atmosfer. Apabila zat cair di dalam pipa tidak penuh maka aliran termasuk dalam aliran saluran terbuka atau karena tekanan di dalam pipa sama dengan tekanan atmosfer (zat cair di dalam pipa tidak penuh), aliran termasuk dalam pengaliran terbuka. Karena mempunyai permukaan bebas, maka fluida yang dialirkan adalah zat cair.

Perbedaan mendasar antara aliran pada saluran terbuka dan aliran pada saluran tertutup adalah adanya permukaan yang bebas yang (hampir selalu) berupa udara pada saluran terbuka. Jadi jika pada pipa alirannya tidak penuh sehingga masih ada rongga yang berisi udara maka sifat dan karakteristik alirannya sama dengan aliran pada saluran terbuka (Kodoatie, 2002: 215)

B. Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds aliran digunakan untuk menunjukkan sifat utama aliran, yaitu apakah aliran adalah laminar, turbulen, atau transisi serta

letaknya pada skala yang menunjukkan pentingnya secara relatif kecenderungan turbulen berbanding dengan laminar.

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana :

V = Kecepatan aliran fluida (m/s)

D = Diameter dalam pipa (m)

ρ = Massa jenis fluida (kg/m³)

μ = Viskositas dinamik fluida (kg/m.s)

Pada fluida air, suatu aliran diklasifikasikan laminar apabila aliran tersebut mempunyai bilangan Reynolds (Re) kurang dari 2300. Untuk aliran transisi berada pada bilangan $2300 < Re < 4000$, disebut juga sebagai bilangan Reynolds kritis. Sedangkan untuk aliran turbulen mempunyai bilangan Reynolds lebih dari 4000.

C. Rapat Jenis (*Density*)

Rapat jenis atau *density* adalah ukuran konsentrasi suatu zat dan dinyatakan dalam satuan massa per satuan volume. Sifat ini ditentukan dengan cara menghitung ratio massa zat yang terkandung dalam suatu bagian tertentu terhadap volume bagian tersebut. Hubungannya dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\rho = \frac{dm}{dv} \text{ (kg/m}^3\text{)} \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana :

m = Massa fluida (kg)

V = Volume fluida (m^3)

Besar nilai rapat jenis dipengaruhi oleh temperatur, semakin tinggi temperatur maka kerapatan fluida akan berkurang dikarenakan gaya kohesi dari molekul-molekul fluida menjadi berkurang.

D. Debit Aliran Fluida

Debit aliran fluida merupakan rumus yang digunakan untuk menghitung kecepatan aliran fluida, yaitu sebagai berikut :

$$Q = \frac{V}{t} \dots\dots\dots (2.3)$$

Kemudian dari persamaan kontinuitas akan didapat :

$$Q = A \cdot V, \text{ dimana } A = \frac{1}{4} \pi D^2$$

maka kecepatan aliran dalam suatu penampang adalah :

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{Q}{\frac{1}{4} \pi D^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana :

Q = Debit aliran (m^3/s)

A = Luas penampang (m^2)

v = Kecepatan aliran fluida (m/s)

V = Volume fluida (m^3)

E. Persamaan Kontinuitas

Prinsip dasar persamaan kontinuitas adalah massa tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan, dimana massa dalam suatu sistem yang konstan dapat dinyatakan dengan rumus :

$$\rho Av = m = \text{konstan} \dots\dots\dots (2.5)$$

Jika aliran fluida bersifat incompressible dan steady flow, maka persamaan menjadi :

$$Q = A_1V_1 = A_2V_2 \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana :

Q = Debit aliran (m^3/s)

R = Luas penampang (m^2)

v = Kecepatan aliran (m/s)

r = Massa jenis fluida (kg/m^3)

1 = Masuk dalam sistem

2 = Keluar batas sistem

F. Tekanan

Tinjauan fluida statis dan fluida dinamis mutlak diperlukan untuk mencari berbagai solusi yang diperlukan. Salah satu hal yang diperhatikan dalam fluida statis adalah tekanan (*pressure*).

Fluida didefinisikan Chorlton sebagai zat yang diperlukan. Salah satu hal yang diperhatikan dalam fluida statis adalah tekanan (*pressure*).

Fluida didefinisikan Chorrton sebagai zat yang mengalami perubahan bentuk bila mendapat tekanan, meskipun tekanan tersebut sangat kecil.

Tekanan merupakan perkalian antara gaya kompresif yang bekerja pada satuan luas. Satuan-satuan tekanan dihasilkan dibagi satuan luas atau N/m^2 adalah pascal, Pa. Namun satuan pascal sangatlah kecil, sehingga lebih sering diekspresikan dalam kilo Pascal (kPa).

$$\rho = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} \dots\dots\dots (2.7)$$

Tekanan pada fluida dipancarkan dengan kekuatan sama besar ke semua arah dan bekerja tegak lurus pada suatu bidang. Pada bidang datar yang sama kekukatan tekanan dalam suatu cairan sama. Pengukuran-pengukuran satuan tekanan yaitu menggunakan berbagai bentuk meteran. Secara umum ada dua jenis tekanan:

1. Tekanan Udara

Tekanan udara adalah tekanan yang menggerakkan massa udara dalam setiap satuan luas tertentu. Alat untuk mengukur tekanan udara adalah barometer dan satuan tekanan adalah milibar (mb). Besarnya tekanan udara akan berbanding berbalik dengan ketinggian suatu tempat, semakin rendah tempat tersebut, maka semakin tinggi tekanannya, demikian juga sebaliknya.

2. Tekanan Hidrostastika

Pada tekanan hidrostatika tidak terjadi tegangan geser (gaya geser disebabkan oleh gradient kecepatan) hal ini diakibatkan karena tidak

terjadinya pergerakan relatif diantara partikel-partikel fluida. Ini bukan berarti partikel-partikel fluida tidak bergerak, melainkan hanya tidak bergerak relatif satu sama lainnya.

Tekanan hidrostatis didapat dari menurunkan persamaan umum tekanan dengan menurunkannya menjadi

$$P_h = \frac{F}{A} = \frac{\rho \times p \times l \times h \times g}{p \times l} = \rho \times g \times h \dots \dots \dots (2.8)$$

Dengan F adalah massa dikali percepatan gravitasi, dimana massa merupakan hasil kali massa jenis (ρ) dengan volume (V) adalah luas permukaan (A) dikali tinggi (h). Sehingga kita dapat menyederhanakan menjadi persamaan tekanan hidrostatis yang umum kita ketahui sekarang ini.

G. Kehilangan Energi

Headloss adalah kehilangan energi per satuan berat fluida dalam pengaliran cairan dalam sistem perpipaan. *Headloss* terdiri dari :

a. **Major Headloss**

Major Losses adalah kehilangan pada aliran dalam pipa yang disebabkan oleh friksi yang terjadi disepanjang aliran fluida yang mengalir terhadap dinding pipa. Besarnya *major losses* ditentukan oleh fungsi f (*Friction factor*), V (rata-rata kecepatan fluida), L (panjang pipa), D (diameter pipa), e (nilai kekasaran pipa), μ (viskositas fluida), ρ (densitas fluida).

$$hf = f \cdot L/D \cdot V^2/2g \dots \dots \dots (2.9)$$

h_f = head loss mayor / tinggi hilang akibat gesekan (m)

f = koefisien gesekan

L = panjang pipa (m)

D = diameter dalam pipa (m)

v = kecepatan aliran dalam pipa (m/s)

g = gaya gravitasi (m/s²)

Koefisien kehilangan energi (k) selain disebabkan oleh gesekan pada dinding pipa, juga karena adanya percabangan pipa atau lubang pipa. Nilai k merupakan koefisien kecepatan C_v atau ditulis

$$k = (1/C_v^2 - 1).$$

Aliran pada saluran tertutup akan mengalami kehilangan tinggi tekanan akibat adanya gesekan dinding pipa sesuai dengan Persamaan Darcy-Weisbach (Bambang Triatmodjo: 2003)

$$h_f = (8fLQ^2)/(g\pi^2D^5) \dots\dots\dots (2.10)$$

dimana :

h_f = kehilangan tinggi tekanan (m)

f = koefisien kekasaran pipa

D = diameter pipa (m)

L = panjang pipa (m)

g = gaya gravitasi (m/s²)

Q = debit yang masuk pada pipa (m³/s)

b. **Minor Headloss**

Minor Loses Merupakan kehilangan energi yang disebabkan oleh perubahan penampang pipa, sambungan, belokan dan katub atau disebut kehilangan tenaga sekunder.

- Kehilangan Energi pada Tikungan (Belokan)

Kehilangan energi pada belokan pipa yang lebih besar dari kehilangan energi pada jaringan pipa lurus. Hal ini disebabkan daerah-daerah aliran yang terpisah di dekat sisi dalam belokan (khususnya jika belokan tajam) dan aliran sekunder yang berpusar karena ketidakseimbangan gaya-gaya sentripugal akibat kelengkungan sumbu pipa. Ada dua macam belokan pipa, yaitu belokan lengkung atau belokan patah (*mitter atau multipiece bend*).

Kehilangan energi yang terjadi pada belokan tergantung pada sudut belokan pipa. Rumus kehilangan energi pada belokan :

$$h_B = k_B \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana

h_b = kehilangan tinggi tekanan minor (m)

k_b = koefisien kehilangan energi pada belokan (Tabel 2.1)

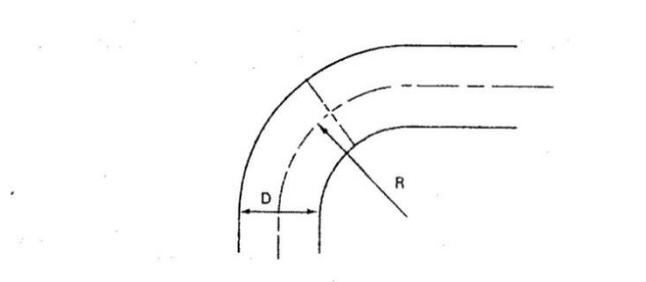
v = kecepatan aliran (m/dtk)

g = percepatan gravitasi bumi (m/dtk²)

Tabel 2.1 Koefisien K_b sebagai fungsi sudut belokan α

A	20°	40°	60°	80°	90°
K_b	0,05	0,14	0,36	0,74	0,98

Pada sudut belokan 90° dan dengan belokan berangsur-angsur, kehilangan energi tergantung perbandingan antara jari-jari belokan dan diameter pipa.

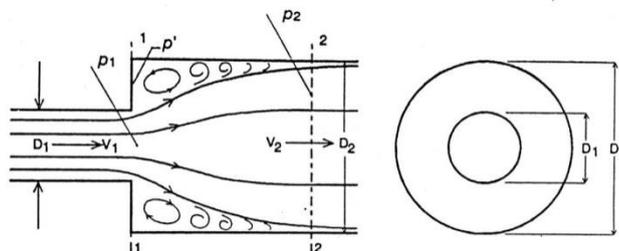
**Gambar 2.1** Belokan pipa**Tabel 2.2** Nilai K_b sebagai fungsi dari R/D

R/D	1	2	4	6	10	16	20
K_b	0,35	0,19	0,17	0,22	0,32	0,38	0,42

- Pembesaran Penampang

Perbesaran penampang mendadak dari aliran (Gambar 2.2) mengakibatkan kenaikan tekanan dari p_1 menjadi p_2 dan kecepatan turun dari V_1 menjadi V_2 . Pada tempat di sekitar perbesaran penampang (1) akan terjadi olakan dan aliran akan normal kembali mulai dari tampang (2). Di daerah antara

tampang 1 dan 2 terjadi pemisahan aliran (Bambang Triatmojo :1996).



Gambar 2.2 Perbesaran pipa

Kehilangan energi pada perbesaran penampang akan berkurang jika pebesaran dibuat secara berangsur-angsur seperti pada gambar 2.3. dan menggunakan persamaan di bawah ini:

$$h_e = K' \frac{v_1^2 v_2^2}{2g} \dots\dots\dots (2.12)$$

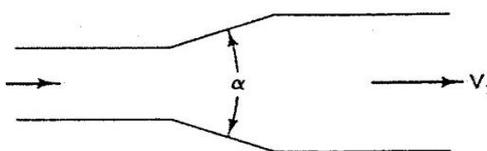
dimana :

h_e = kehilangan tinggi tekanan minor (m)

k = faktor cabanhan, belokan dan sambungan dll

v = kecepatan aliran (m/s)

g = gaya gravitasi bumi (m/dtk²).



Gambar 2.3 Perbesaran penampang berangsur-angsur

Tabel 2.3 Nilai K sebagai fungsi dari α

A	10°	20°	30°	40°	50°	60°	75°
K	0,078	0,31	0,49	0,60	0,67	0,72	0,72

- Pengecilan Penampang

Pada pengecilan penampang yang tidak berangsur-angsur garis aliran daerah hulu dari sambungan akan menguncup dan akan mengecil pada vena kontraktan. Percobaan-percobaan yang telah dilakukan menunjukkan bahwa luas penampang sekitar 0.6 A2. Berdasarkan nilai ini maka kehilangan energi dapat dihitung dengan persamaan di bawah (dari vena kontrakta ke pipa kecil)

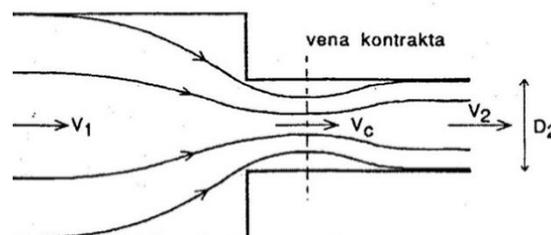
$$h_e = 0,44 V^2/2g \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

dengan :

h_e = kehilangan tinggi tekanan minor (m)

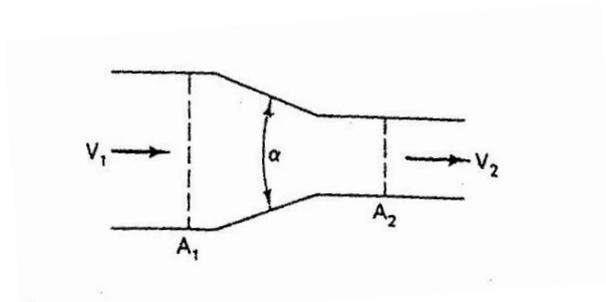
v = kecepatan aliran (m/s)

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



Gambar 2.4 Pengecilan pipa

Kehilangan energi pada pengecilan diameter pipa dapat dikurangi dengan memperkecil diameter pipa secara perlahan-lahan (Gambar 2.5).

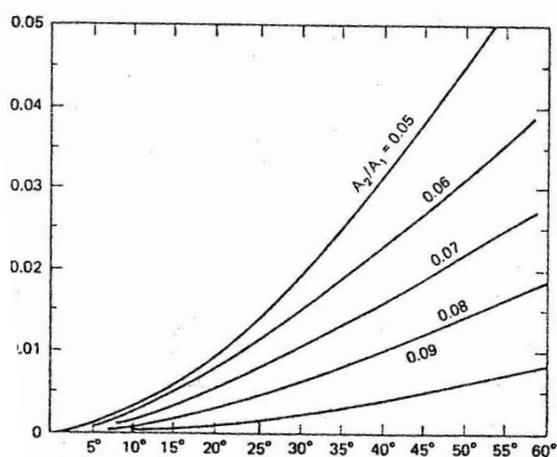


Gambar 2.5 Pengecilan penampang berangsur-angsur

maka kehilangan tenaga adalah

$$h_e = K_c 0,44 \frac{V_2^2}{2g} \dots\dots\dots (2.14)$$

Nilai K_c tergantung pada sudut transisi α dan perbandingan luas A_2/A_1 seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6.

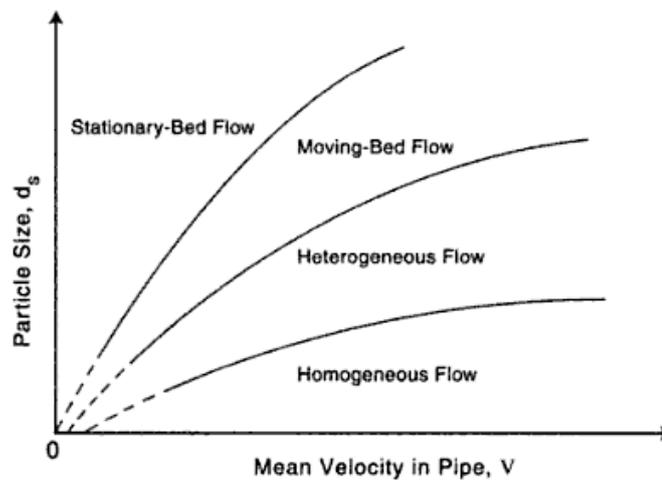


Gambar 2.6 Koefisien K_c Sebagai fungsi α

H. Regime Aliran Sedimen Dalam Pipa

Beberapa pembagian regime aliran sedimen dalam pipa atau juga dikenal sebagai perilaku aliran *slurry*, antara lain adalah;

- a. Regime aliran sedimen dalam pipa menurut Liu, 2003:
 - i. *Pseudohomogeneous* terjadi ketika ukuran partikel cukup kecil (relative halus) dan kecepatan aliran dalam pipa cukup tinggi (sangat turbulen).
 - ii. *Heterogeneous* terjadi ketika partikel tersuspensi secara penuh tetapi tidak terdistribusi secara seragam *nonhomogeneous* (kecepatan agak sedikit kecil atau ukuran partikelnya cukup besar dari pada *pseudohomogeneous*).
 - iii. Aliran dasar bergerak (*moving bed flow*) merupakan partikel diendapkan oleh aliran dan membentuk suatu dasar. Partikel di dasar pipa bergerak searah aliran dengan sliding, rolling, dan saltasi (ketika kecepatan aliran kurang atau ukuran partikel lebih besar daripada regim *heterogen*). Saltasi berhubungan dengan fenomena bahwa beberapa partikel pada permukaan lapisan dasar bergerak dengan perlahan, seperti lompatan katak.
 - iv. Aliran dasar tetap (*stationary bed flow*) merupakan partikel mengendap pada dasar dan tidak bergerak pada dasar. Ini terjadi pada partikel yang sangat kasar atau sangat kecil kecepatan dalam pipa.



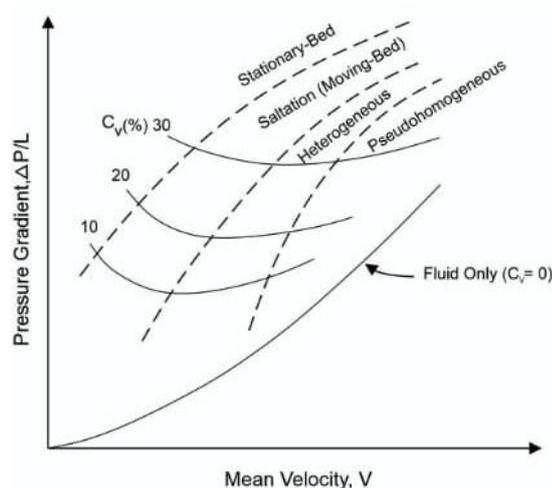
Gambar 2.7 Regime aliran sedimen dalam pipa (Liu, 2003)

Berat jenis fluida juga mempengaruhi suspensi sedimen. Kerapatan zat cair memperbesar daya apung, yang mana mempunyai efek yang sama sebagaimana berat jenis yang kecil dari partikel tersuspensi. Dalam desain transpor sedimen dalam pipa, dua jenis regime aliran yang dihindari, yaitu *stationary bed* regime karena ini tidak akan menghasilkan transpor zat padat apapun dan, *moving bed regime* sebab jika dibawah kondisinormal, regime ini menghasilkan resiko hambatan / penyumbatan pada saluran pipa.

Studi transpor sedimen oleh aliran zat cair, baik di sungai atau dalam pipa, kunci dari sifat sedimen disini adalah berkaitan dengan *settling velocity*, V_s , yaitu; (1) ketika fluida diam atau kecepatan aliran dalam pipa nol, maka terminal *velocity* pada saat suatu partikel jatuh berada dibawah pengaruh gaya gravitasi pada fluida dan, (2) ketika fluida tersebut bergerak di dalam pipa sebagai aliran turbulen, komponen vertikal kecepatan turbulen, v'

selama upward movement lebih besar daripada *settling velocity* ($v' > V_s$), sebelum aliran turbulen mampu mensuspensi sedimen.

Sedimen tersuspensi dalam suatu aliran turbulen horizontal dibawah keseimbangan dua gaya, yaitu; (1) Gaya gravitasi yang menyebabkan sedimen jatuh pada V_s , (2) Gaya difusi turbulen untuk turbulensi dan eksistensi gradient konsentrasi vertikal dari partikel sedimen dalam aliran.



Gambar 2.8 Variasi gradien tekanan terhadap rerata kecepatan aliran pada konsentrasi sedimen yang berbeda (Liu, 2003)

Keseimbangan ini menyebabkan partikel sedimen menjadi tersuspensi dalam aliran, dari konsentrasi tertinggi partikel ke arah bagian terendah dalam potongan melintang pipa. Pada tahun 1971, Wasp dkk (Liu, 2003) mengajukan persamaan dibawah ini untuk mengklasifikasikan aliran *slurry*.

$$\text{Log } e \frac{RT}{RA} = 1,8 \frac{dSsy}{mU} \quad (2.15)$$

Dimana \log = logaritma biasa (berbasis - 10); C_A dan C_T = konsentrasi volume dari sedimen pada titik axis pipa (garis tengah), dan titik atas pipa pada lokasi $0,92 D$ dari dasar pipa (atau $0,08 D$ dari sisi atas pipa); V_s = *settling velocity*, yang merupakan terminal *velocity* dari sedimen yang jatuh di air (jika air adalah fluida dalam pipa) ; κ = konstanta von Karman, yang berlaku untuk aliran slurry yang sedikit lebih kecil daripada nilai $0,4$; U^* = *shear velocity* yang sesuai dengan persamaan yaitu :

$$U^* = e \frac{\tau_0}{\rho} = ve \frac{5}{M} \quad (2.16)$$

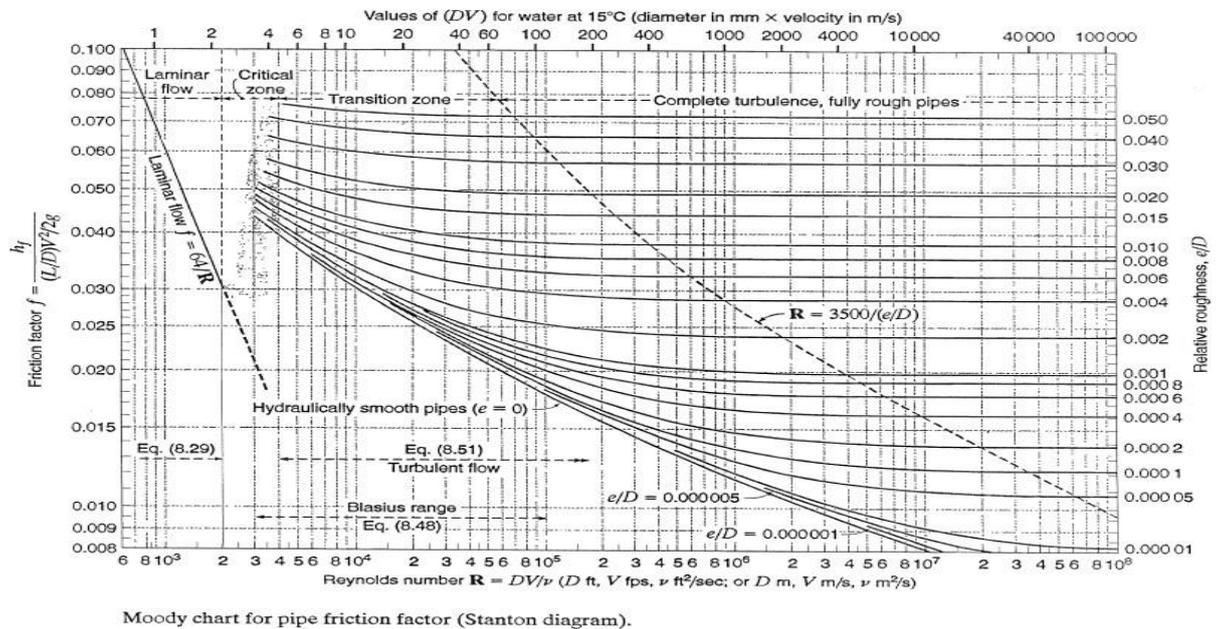
a. Aliran *pseudohomogeneous*

Suatu slurry *pseudohomogeneous* dapat diperlakukan dalam cara yang sama dengan aliran homogen kecuali bahwa regime laminar dan selama pompa dimatikan, sedimen dalam aliran *pseudohomogeneous* akan mengendap. Untuk aliran *pseudohomogeneous* bahwa mempunyai rasio konstan antara shear, τ dan gradient kecepatan, du/dy . Gradient tekanan digambarkan dalam persamaan:

$$I_m = E \frac{VP_m}{1} = Tm \frac{0}{D} \frac{\rho v^2}{\&} \quad (2.17)$$

Persamaan (2.17) di atas adalah identik bagi formula Darcy Weisbach, kecuali bahwa notasi m adalah mixture. Jadi ΔP_m , f_m , dan ρ_m adalah perbedaan tekanan, faktor gesekan Darcy-Weisbach, dan berat jenis dari aliran *pseudohomogeneous*. Faktor resistensi f_m dapat

diperoleh dari diagram Moody (Gambar 2.9).



Gambar 2.9 Diagram Moody (Triatmodjo, 2015)

Akan tetapi, kita dapat menggunakan viskositas dan berat jenis aliran campuran, lebih baik daripada viskositas air bersih, dalam menghitung bilangan Reynold untuk menentukan f_m . Viskositas campuran (slurry) dapat ditentukan dari persamaan Thomas (Liu, 2003):

$$\mu_m = \mu [1 + 2.5Cv + 10.05Cv^2 + 0.00273EXP(16.6Cv)] \quad (2.18)$$

Dimana μ_m = viskositas campuran ; μ = viskositas dinamik dari zat cair (air); Cv = konsentrasi volume dari sedimen dalam slurry, didefinisikan sebagai volume partikel dalam campuran dibagi dengan volume campuran (slurry)

$$\rho_m = \frac{\rho_s}{dSYRZ=RZ} \quad (2.19)$$

b. Aliran *heterogeneous*

Aliran *heterogeneous* terdiri dari 2 kategori yaitu *symmetric* dan *asymmetric*. *Symmetric* terjadi ketika profil konsentrasi sedimen dalam aliran adalah simetris terhadap garis tengah pipa, meskipun konsentrasinya mungkin tidak menjadi seragam atau homogen dalam arah jari-jari melintang pipa. Ini terjadi dalam pipa vertikal ketika gaya gravitasi tidak mempengaruhi profil konsentrasi sedimen, tetapi shear stress tertinggi di dekat dinding pipa menyebabkan sedimen semakin berputar dan berpindah menjauh dari garis tengah pipa sedangkan *asymmetric* - Aliran sedimen yang terjadi ketika posisi pipa itu horisontal, ketika partikel sedimen secara relatif membesar dan atau berat, dan ketika kecepatan utama di dalam pipa relatif kecil, sehingga gaya gravitasi menyebabkan sebagian sedimen terkonsentrasi di dekat bagian dasar pipa daripada di bagian atas pipa.

Limit deposit velocity (V_L) adalah kecepatan minimum yang di butuhkan untuk mensuspensi suatu partikel sedimen dalam suatu pipa (Liu, 2013). Ini hubungannya dengan kecepatan untuk mentransisi dari regime dasar bergerak (*moving-bed regime*) menjadi regime heterogen (*heterogeneous regime*). Ini juga diistilahkan sebagai *deposition velocity* (kecepatan pengendapan) atau mudahnya diistilahkan sebagai *deposit velocity*. Berdasarkan penelitian Durand (Liu, 2013), dihasilkan suatu

grafik (Gambar 14) untuk partikel sedimen yang berukuran seragam atau mendekati ukuran seragam, dan Gambar 15 untuk partikel dengan distribusi ukuran tidakseragam. Gambar tersebut dapat digunakan untuk menentukan v_L dari partikel yang berdiameter (d), diameter pipa (D), specific gravity sedimen (S), konsentrasi volume sedimen (C_v), dan percepatan gravitasi (g), nilai d_s didasarkan pada ukuran lubang ayakan yang terlewati adalah 85 % partikel. C_v adalah konsentrasi volume dari sedimen dalam slurry, didefinisikan sebagai volume partikel dalam campuran dibagi dengan volume campuran (slurry). F_L ditentukan dari Gambar 15 dan 16 ini selanjutnya dapat dipakai untuk menghitung nilai V_L .

$$V_L = F_L \sqrt{2gD \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}} \quad (2.21)$$

dimana: F_L = Faktor Durand

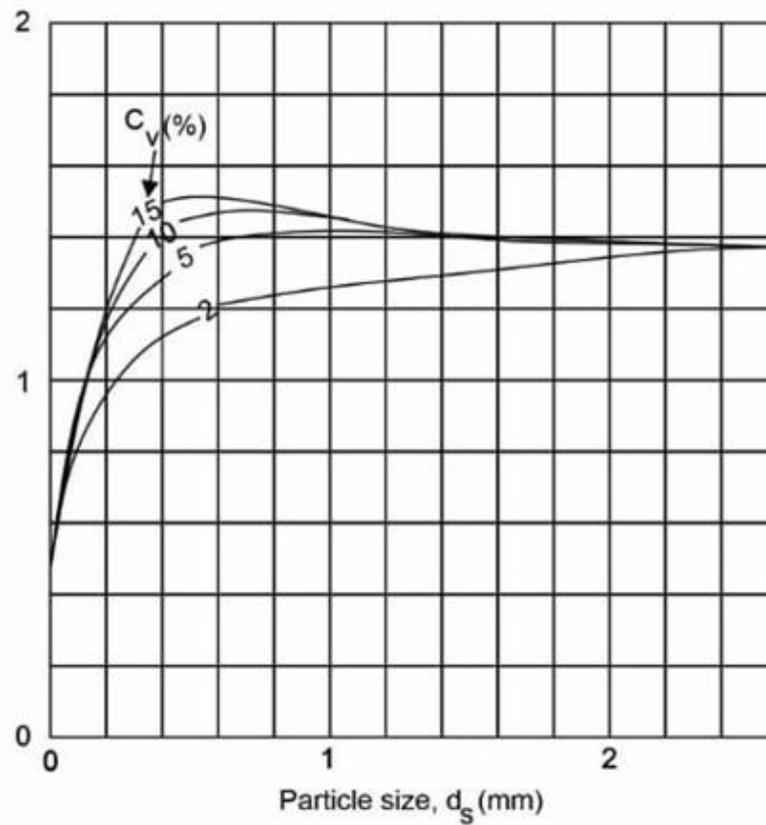
V_D = Kecepatan pengendapan

g = Percepatan gravitasi

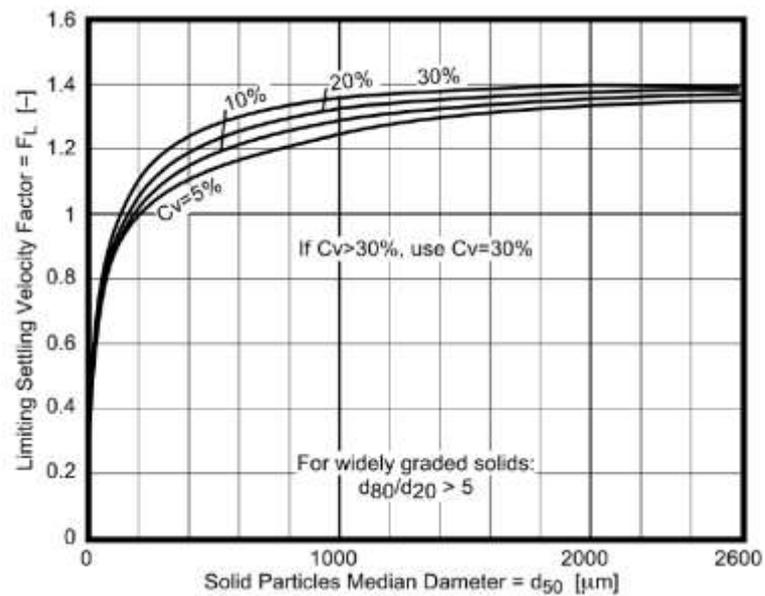
D = Diameter pipa

ρ_s = Densitas padatan

ρ_L = Densitas cairan



Gambar 2.10 Limit deposit velocity untuk partikel seragam (Liu, 2003)



Gambar 2.11. Limit deposit velocity untuk partikel tidak seragam (Liu, 2003)

Ketika sedimen dalam pipa secara total tersuspensi oleh mengalirnya air (dengan kata lain yaitu ketika alirannya heterogen), kehilangan tenaga akibat gesekan dari aliran sepanjang pipa dapat dihitung dari modifikasi persamaan Durand (Liu, 2003):

$$\Phi = \frac{i_m - i}{iC_v} = 67 \left(\frac{\sqrt{gD(S-1)}}{V} \right)^3 \left(\frac{V_s}{\sqrt{g(S-1)d_s}} \right)^{3/2} \quad (2.22)$$

Dimana Φ adalah fungsi dimensi; i_m adalah gradien tekanan dari aliran campuran (slurry), yakni, $i_m = \Delta p_m / L$; i adalah gradien tekanan aliran zat cair (air) dalam pipa yang sama pada kecepatan yang sama v yakni $i = \Delta p / L$. Konstanta 67 pada persamaan (40) didasarkan pada bentuk partikel bulat. Persamaan ini dapat dipakai bagi partikel sedimen bentuk yang lain termasuk bentuk-bentuk tidak teratur. Worster (Liu, 2013) memasukkan istilah $(S - 1)$ dalam persamaan tersebut, menyebabkan persamaan dapat digunakan untuk material lain dan cairan yang sama.

Formula untuk menghitung besarnya friction loss untuk regime aliran heterogen dalam pipa (Nayyar, 2000). Formula ini diajukan oleh Durand dan secara luas telah digunakan untuk menilai zat padat. Formula ini didasarkan pada slurry pasir dan kerikil dengan ukuran partikel berkisar dari 0,2 – 25 mm, diameter pipa antara 38 sampai 580 mm, dan konsentrasi zat padat di atas 60 % volume.

$$\frac{i_m - i}{C_v i} = 81 \left(\frac{V^2 \sqrt{x R_D}}{(S-1)gD} \right)^{0,7} \quad (2.23)$$

Dengan: i = friction loss untuk slurry; f_t (m) air per ft (m) i_w = friction loss untuk air; f_t (m) air per ft (m) pada kecepatan yang sama C_D = drag coefficient dari partikel zat padat yang tersuspensi mengendap dalam fluida yang luasnya tidak terbatas; s = specific gravity dari partikel zat padat.

c. Aliran Intermediate

Ketika $0.8 > CT/CA > 0.1$, aliran slurry dikatakan sebagai intermediate. Pada regime ini, terdapat suatu alternatif pendekatan untuk memprediksi gradien kecepatan dari regime aliran intermediate, yaitu yang telah dikembangkan oleh Fei di Cina (Liu, 2013) yaitu:

$$mh = \frac{i_m}{\rho g} = f \frac{\Delta P m}{\rho g L} = \alpha \frac{f v^2 s_m}{2gD} + 11 \eta_s C_v (S - S_m) \frac{V_s \alpha}{V} \quad (2.4)$$

Dimana mh adalah gradien headloss dalam m/m, ρ adalah berat jenis air, f adalah factor gesekan Darcy-Weisbach dari aliran zat cair (air); V adalah kecepatan rerata dalam pipa; S_m adalah berat jenis campuran dibagi dengan berat jenis zat cair (air); S adalah berat jenis sedimen (partikel) dibagi dengan berat jenis zat cair; g adalah percepatan gravitasi; C_v adalah konsentrasi volume sedimen dalam slurry; dan V_s adalah kecepatan rerata pengendapan sedimen. Konstanta α adalah faktor koreksi yang diberikan rumusnya sebagai berikut:

$$\alpha = 1 - 0,4 (\log \mu_r) + 0,2 (\log \mu_r)^2 \quad (2.25)$$

Dimana \log adalah bentuk logaritma biasa yang berbasis 10, μ_r adalah

viskositas relatif slurry, yang dihasilkan dari viskositas slurry, μ m dibagi dengan viskositas zat cair (air), μ .

b. Regime aliran dalam pipa menurut Breusers, 1983 yaitu:

- Pseudohogeneous suspension terjadi pada sedimen halus dan kecepatan aliran tinggi. Kriteria untuk pembentukan suspensi secara penuh adalah kecepatan rerata alirannya 200 kali kecepatan jatuhnya partikel dan diameter butiran sedimen $< 150 \mu\text{m}$.
- Heterogeneous suspension merupakan kecepatan lebih kecil dan material lebih kasar dari kriteria sebelumnya, dan terbentuk dengan distribusi konsentrasi aliran sedimen yang sangat tidak seragam. (diameter butiran sedimen lebih besar dari $150 \mu\text{m}$ dan kurang dari 1 mm).
- Sliding Bed Regime merupakan material yang sangat kasar dan seluruh material sedimen akan ditranspor meluncur sepanjang dinding pipa. Untuk memulai suspensi, tipe ini membutuhkan kecepatan rerata aliran sebesar 30 kali kecepatan jatuh partikel, atau kecepatan jatuh partikelnya sebesar 10 cm/dt dan diameter butiran sedimen lebih besar dari 1 mm .

c. Regime aliran dalam pipa menurut Nayyar yaitu;

- Homogeneous Flow merupakan dalam aliran homogen, partikel zat padat tidaklah terdistribusi secara seragam melintasi cross section saluran pipa, tetapi ditemukan dalam aliran slurry yang konsentrasinya tinggi dan pada ukuran partikel halus. Aliran Slurry yang memperlihatkan sifat aliran homogen tidak cenderung untuk diam, tapi membentuk suatu endapan dalam kondisi mengalir. Contoh tipe homogeneous slurries adalah lumpur buangan, lumpur pengeboran, bubuk kertas, batu gamping halus dan lain-lain.
- Heterogeneous flow atau aliran heterogen merupakan dalam kondisi aliran heterogen, terdapat suatu penyebutan gradien konsentrasi yang melewati cross section saluran pipa. Aliran slurry pada konsentrasi yang rendah dengan secara cepat mengendapkan partikel kasar adalah memperlihatkan sifat aliran heterogen. Contoh khususnya adalah slurry pasir dan kerikil, slurry batu bara kasar, dan slurry buangan tambang yang kasar,
- Intermediate regime atau regime pertengahan terjadi ketika bagian dari suatu partikel secara homogen terdistribusi pada saat yang lain juga terdistribusi secara heterogen. Aliran intermediate regime diharapkan pada pengangkutan slurry buangan tambang dari proses pabrik mineral dan pengangkutan slurry batu bara air,

- Saltation regime merupakan aliran turbulen tidak mungkin cukup untuk menjaga pengendapan partikel dengan cepat pada suspension. Perjalanan partikel dengan lompatan atau mengguling yang terputus-putus sepanjang dasar yang meluncur atau dasar tetap pada bagian bawah pipa. Tipe aliran ini akan terjadi pada slurry kasar dan kerikil.

I. Distribusi Sedimen dalam Pipa

Distribusi sedimen dalam pipa penting dan diperlukan dalam bidang pemidahan endapan lumpur dan pengerukan (*dredging*). Manfaat sistem ini dalam kedua bidang tersebut adalah untuk memindahkan sedimen/endapan pada minimum *head loss* tanpa pengendapan. Aspek penting dari sistem ini adalah bagaimana memprediksi *head loss* dan kecepatan minimum atau kecepatan kritis agar supaya pipa terhindar dari pengendapan. (Breusers, 1979)

1. Aliran Slurry

Slurry adalah suatu campuran dari zat padat dan zat cair. Suatu endapan kotoran/lumpur merupakan suatu lumpur atau suatu *slurry* terkonsentrasi yang mempunyai suatu jumlah material sangat halus yang memberikan viskositas yang tinggi. Contoh khas dari *slurry* adalah campuran zat padat - cair yang ditemukan dalam proses mineral tanaman dan dikeruknya material dari sungai dan bendung (Nayyar, 2000).

Aliran partikel sedimen yang didistribusi oleh suatu zat cair dalam pipa, yang disebut *slurry pipeline*. Kemampuan fluida dalam gerakan horizontal untuk mensuspensi partikel sedimen tergantung pada pengaruh imbalan dari dua gaya, yaitu (Liu, 2003):

- a. Gravitasi (*gravity*), gaya yang menyebabkan partikel menjadi jatuh atau mengendap di dalam fluida.
- b. *Upward diffusion* dari partikel, disebabkan oleh suatu gradien konsentrasi partikel (banyak partikel pada elevasi terendah) yang berubah disebabkan oleh gaya gravitasi.
- c. *Regime* aliran sedimen dalam pipa. Ada beberapa pembagian *regime* aliran sedimen dalam pipa atau juga dikenal sebagai perilaku aliran *slurry*, antara lain adalah:
 - 1) Terdapat 3 model distribusi sedimen dalam pipa (Breusers, 1979), yaitu:
 - a) *Pesudohogeneous suspension*: terjadi pada sedimen halus dan kecepatan aliran tinggi. Kriteria untuk pembentukan suspensi secara penuh adalah kecepatan rerata alirannya 200 kali kecepatan jatuhnya partikel dan diameter butiran sedimen $< 150 \mu\text{m}$.
 - b) *Heterogeneous suspension*: untuk kecepatan lebih kecil dan material lebih kasar dari kriteria sebelumnya dan terbentuk dengan distribusi konsentrasi aliran sedimen yang sangat tidak

seragam. (diameter butiran sedimen lebih besar dari 150 μm dan kurang dari 1 mm).

c) *Sliding Bed Regime*: untuk material yang sangat kasar dan seluruh material sedimen akan didistribusi meluncur sepanjang dinding pipa. Untuk memulai suspensi, tipe ini membutuhkan kecepatan rerata aliran sebesar 30 kali kecepatan jatuh partikel, atau kecepatan jatuh partikelnya sebesar 10 cm/dt dan diameter butiran sedimen lebih besar dari 1 mm.

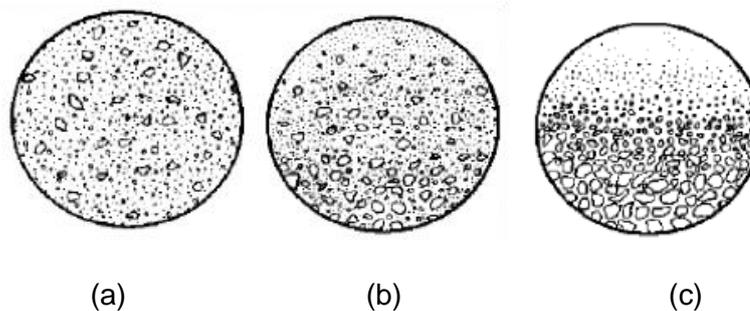
2) Terdapat empat regime aliran sedimen dalam pipa (Nayyar, 2000), yaitu:

a) *Homogeneous Flow*: Dalam aliran homogen, partikel zat padat tidak terdistribusi secara seragam melintasi *cross section* saluran pipa, tetapi ditemukan dalam aliran *slurry* yang konsentrasinya tinggi dan pada ukuran partikel halus. Aliran *Slurry* yang memperlihatkan sifat aliran homogen tidak cenderung untuk diam tapi membentuk suatu endapan dalam kondisi mengalir. Contoh tipe *homogeneous slurries* adalah lumpur buangan, lumpur pengeboran, bubur kertas, batu gamping halus dan lain-lain.

b) Aliran Heterogen (*Heterogeneous Flow*): Dalam kondisi aliran heterogen, terdapat suatu penyebutan gradien konsentrasi yang melewati *cross section* saluran pipa. Aliran *slurry* pada konsentrasi yang rendah dengan secara cepat mengendapkan partikel kasar adalah memperlihatkan sifat aliran heterogen.

Contoh khususnya adalah *slurry* pasir dan kerikil, *slurry* batubara kasar, dan *slurry* buangan tambang yang kasar.

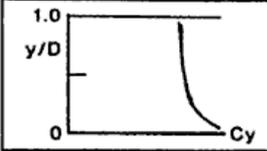
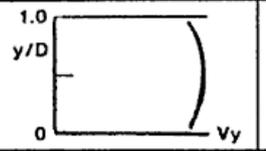
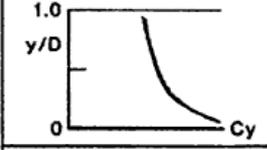
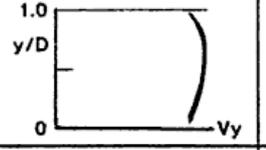
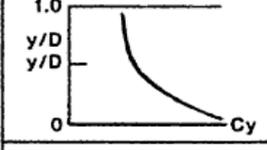
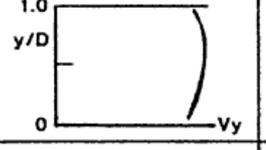
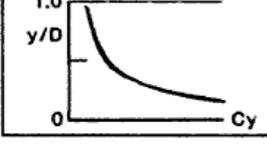
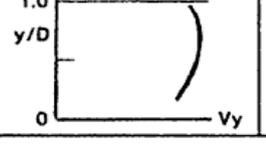
- c) *Regime* Pertengahan (*Intermediate Regime*): Tipe ini terjadi ketika bagian dari suatu partikel secara homogen terdistribusi pada saat yang lain juga terdistribusi secara heterogen. Aliran *intermediate regime* diharapkan pada pengangkutan *slurry* buangan tambang dari proses pabrik mineral dan pengangkutan *slurry* batubara-air.
- d) *Saltation Regime*: Aliran turbulen tidak mungkin cukup untuk menjaga pengendapan partikel dengan cepat pada *suspension*. Perjalanan partikel dengan lompatan atau mengguling yang terputus-putus sepanjang dasar yang meluncur atau dasar tetap pada bagian bawah pipa. Tipe aliran ini akan terjadi pada *slurry* kasar dan kerikil.



Gambar 2.12 *Regime* Aliran Sedimen Dalam Pipa , (a) Homogen, (b) Heterogen, (c) Saltation (Kuhail, 2001)

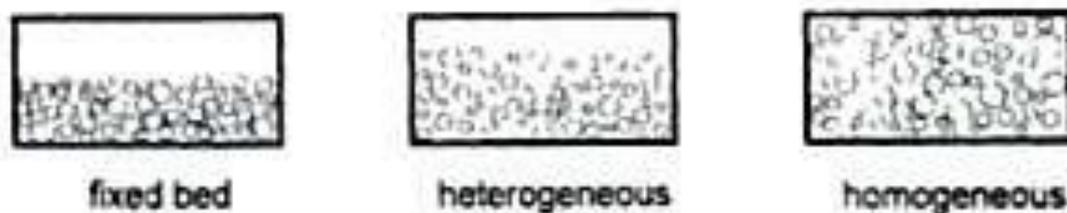
- 3) Terdapat 3 *regime* aliran dalam distribusi sedimen pada pipa (Herbich, 2000), yaitu :

- a) Aliran *Pseudohomogeneous* : aliran dimana V lebih besar daripada V_H (kecepatan transisi antara aliran *heterogeneous* dan aliran *pseudohomogeneous*) dan konsentrasi sedimen berubah-ubah hanya dalam jumlah kecil dari atas ke bawah pipa.
- b) Aliran *Heterogeneous* : aliran dimana V lebih besar daripada V_c (kecepatan transisi antara aliran dengan dasar bergerak dan lebih kecil dari pada V_H dan konsentrasi sedimen berubah-ubah dari atas ke bawah pipa).
- c) Aliran distribusi material dasar dengan pengendapan di dasar pipa : aliran dengan partikel sedimen mengendap pada dasar pipa akan tetapi lainnya mengendap atau berlanjut untuk bergerak sepanjang dasar pipa. Jadi, V lebih kecil daripada V_c .

Concentration Distribution	Velocity Distribution	Kind of Flow
		Pseudohomogeneous Flow $V > V_H$
		Heterogeneous Flow $V < V_H$ $V > V_c$
		Heterogeneous Flow $V \text{ About } = \text{ to } V_c$
		Flow With Bed Material Transport $V < V_c$

Gambar 2.13 Skema konsentrasi sedimen dan distribusi kecepatan dalam pipa untuk berbagai *regime* aliran (Herbich, 2000)

Dalam aliran *heterogeneous*, partikel-partikel semuanya dalam *suspension* tetapi distribusi vertikalnya tidak seragam dengan konsentrasi partikel-partikelnya lebih besar pada dasarnya. Ini adalah *regime* paling ekonomis untuk distribusi zat padat dalam pipa. Gambar 4 memberi ilustrasi tentang distribusi partikel untuk dasar tetap, *heterogeneous* dan *homogeneous* (kadang-kadang disebut *pseudohomogeneous*).



Gambar 2.14 *Regime* Aliran dan Distribusi Sedimen Dalam Pipa
(Herbich, 2000)