

DISERTASI

**STUDI EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK *REGIME*
ALIRAN *SLURRY* PADA JARINGAN PIPA**

***EXPERIMENTAL STUDY ON CHARACTERISTIC
OF SLURRY FLOW REGIME IN PIPELINE***

RATNA BACHRUN

P0800316407



PROGRAM STUDI S3 TEKNIK SIPIL

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

**STUDI EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK *REGIME*
ALIRAN *SLURRY* PADA JARINGAN PIPA**

Disertasi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor

**Program Studi
Teknik Sipil**

Disusun dan diajukan oleh

RATNA BACHRUN

Kepada

**PROGRAM STUDI S3 TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2021

DISERTASI**STUDI EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK *REGIME*
ALIRAN *SLURRY* PADA JARINGAN PIPA*****EXPERIMENTAL STUDY ON CHARACTERISTIC
OF SLURRY FLOW REGIME IN PIPELINE***

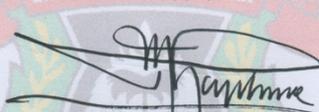
disusun dan diajukan oleh :

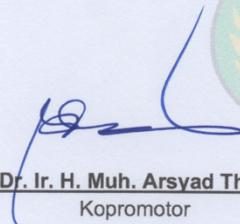
RATNA BACHRUN
P0800316407

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian Disertasi
Pada Tanggal 9 September 2021
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

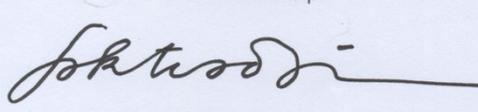
Komisi Penasehat 


Prof. Dr. Ir. H. Muh. Saleh Pallu, M. Eng
Promotor


Prof. Dr. Ir. H. Muh. Arsyad Thaha, MT
Kopromotor


Dr. Eng. Bambang Bakri, ST., MT
Kopromotor

Ketua Program Studi
S3 Teknik Sipil


Prof. Ir. Sakti Adji Adisasmata, Msi., M.Eng.Sc., Ph.D

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin




Prof. Dr. Ir. H. Muh. Arsyad Thaha, MT

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Ratna Bachrun

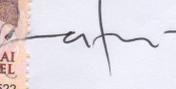
Nomor mahasiswa : P0800316407

Program studi : Teknik Sipil

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

Makassar, 9 September 2021

Yang menyatakan,


Ratna Bachrun



KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah *Subhanahu Wata'ala* karena atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi yang berjudul "Studi Eksperimental Karakteristik *Regime* Aliran *Slurry* Pada Jaringan Pipa".

Banyak kendala yang dihadapi oleh penulis dalam rangka penyusunan disertasi ini, berkat bantuan berbagai pihak maka disertasi ini dapat selesai. Dalam kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan terimakasih yang tak terhingga Prof. Dr. Ir. H. Muh. Saleh Pallu, M. Eng, sebagai Promotor, Prof. Dr. Ir. H. Muh. Arsyad Thaha MT sebagai Co-Promotor dan Dr.Eng. Bambang Bakri, ST., MT sebagai Co-Promotor atas bantuan dan bimbingan yang telah diberikan mulai dari pengembangan minat terhadap permasalahan penelitian, pelaksanaan penelitian sampai dengan penulisan disertasi ini. Juga ucapan teimah kasih kami sampaikan kepada bapak dan ibu penguji yang turut pula memberikan perhatian, petunjuk, dan saran saran atas disertasi ini. Rekan rekan mahasiswa Program Doktoral Teknik Sipil Konsentrasi Keairan 2016. Rekan rekan mahasiswa Program Doktoral Teknik Sipil Angkatan 2016 yang telah banyak membantu dalam proses penelitian. Penghargaan yang setinggi tingginya pula kepada seluruh keluarga yang tak henti hentinya memberikan kasih sayang, doa, motivasi, serta dukungan materil yang tak terhingga selama ini kepada semua yang terlibat membantu dalam

penyusunan disertasi ini. Hanya dengan doa semoga Allah Yang Maha Pengasih dapat membalasnya.

Penulis menyadari bahwa disertasi ini masih jauh dari dari kesempurnaan, oleh karena itu sangat diharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan disertasi ini. Semoga disertasi ini dapat bermanfaat dan digunakan untuk pengembangan wawasan serta peningkatan ilmu pengetahuan bagi kita semua termasuk penelitian lebih lanjut.

Makassar, Maret 2021

Penulis

Ratna Bachrun

ABSTRAK

RATNA BACHRUN. Studi Ekseprimental Karakteristik *Regime* Aliran *Slurry* Pada Jaringan Pipa. (Dibimbing oleh Muhammad Saleh Pallu, Muhammad Arsyad Thaha dan Bambang Bakri)

Aliran yang bercampur partikel padat merupakan permasalahan yang kerap terjadi pada saluran. Sifat dari aliran dan interaksi partikel padat yang terkandung didalamnya dapat mengurangi kinerja berupa berkurangnya kecepatan aliran dan pengendapan pada pipa. Kecepatan aliran sebagai parameter utama dalam penelitian ini, penting untuk diketahui kecepatan aliran untuk menjaga partikel yang diangkut melalui pipa tetap berada kondisi stabil. Tidak terpenuhinya kecepatan atau kecepatan aliran berada dibawah kecepatan minimum dapat mengakibatkan partikel berada didasar pipa. Model penelitian yang dilakukan adalah eksperimental dengan pengamatan visual langsung, mempelajari perilaku sedimen (jatuh dan bergerak) dalam pipa akibat perubahan kecepatan (kehilangan energi). Dalam penelitian ini, penulis menganalisis karakteristik dari regime aliran slurry pada jaringan pipa. Parameter yang digunakan adalah laju aliran masuk (Q), diameter pipa (D), kecepatan aliran(Q), panjang pipa (L), koefisien gesek (f), gravitasi (g), ukuran partikel (ds), dan kecepatan endap partikel (ω dan ω_0). Penelitian dilakukan dengan menggunakan jaringan pipa dengan empat variasi debit (0,005 m³/s, 0,004 m³/s, 0,003 m³/s, 0,002 m³/s, m dan tiga variasi ukuran sedimen (0,15 mm, 0,25 mm dan 0,42 mm). Pada ukuran sedimen 0,15 mm nilai kecepatan aliran berada pada 1,77 m/d – 0,89 m/d, ukuran 0,25 mm berada pada 1,74 m/d - 0,81 m/d , dan 0,42 mm berada pada 1,59 m/d - 0,59 m/d. Perubahan kecepatan menghasilkan tiga regime aliran sedimen yaitu regime *heterogeneous*, regime *moving bed flow* dan regime *stationary bed flow*. Hasil menunjukkan bahwa semakin besar ukuran sedimen (ds) kecepatan aliran (v) menjadi kecil, dan kecepatan pengendapannya menjadi besar (vL). Persamaan empiris kecepatan slurry yang dihasilkan

$$\text{adalah } V = \left\{ \left[0,0066e^{24,75 \left(\frac{\Delta h(s-1)}{L} \right) \left(\frac{\omega^2}{g d_s} \right)} \right] 2 g D \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

Kata Kunci : Kecepatan *slurry*, ukuran sedimen, kehilangan energi, gradien hidrolis, *regime* aliran

ABSTRACT

RATNA BACHRUN. *Experimental Study On Characteristic Of Slurry Flow Regime In Pipeline* (Promoted By Muhammad Saleh Pallu, Muhammad Arsyad Thaha dan Bambang Bakri)

Flow mixed with solid particles is a problem that often occurs in the channel. The nature of the flow and the interaction of solid particles contained can reduce performance in the form of reduced flow velocity and deposition in the pipeline. Flow velocity as the main parameter in this research, it is important to know the minimum flow velocity or value flow velocity requirement to keep the particles transported through the pipe in a stable condition. The research model is experimental with direct visual observation, studying the behavior of sediment (falling and moving) in the pipe along the flow due to changes in velocity (head loss). In this study, the authors analyzed the characteristics of the slurry flow regime in the pipeline. The characteristics used to describe the slurry flow regime are flow velocity, head loss in pipeline, hydraulic gradient, and sediment transport. The parameters used are the inflow rate (Q), pipe diameter (D), pipe length (L), coefficient friction (f), gravity (g), particle size (ds), and velocity, particle settling velocity (ω and ω_0). The research was conducted using a pipeline network with four flow variations (0,005 m³/s, 0,004 m³/s, 0,003 m³/s, 0,002 m³/s) and three variations sediment sizes (0,15 mm, 0,25 mm and 0,42 mm). In sediment size 0.15 mm, the flow velocity value is 1,77 m/s - 0,81 m/s, size 0.25 mm is 1.74 m/s - 0.81 m/s and 0,42 mm is 1,59 m/s - 0.59 m/s. Due to the velocity changes and flow at four flow variations and three sediment variations, three sediment flow regimes are produced: the heterogeneous regime, the moving bed flow regime, and the moving bed. Stationary flow regime. The result shows that the larger the sediment size (ds), the more the flow velocity (v) decreases, and the sedimentation velocity becomes greater (vL). The empirical equation for the resulting slurry

$$\text{velocity is } V = \left\{ \left[0,0066e^{24,75 \left(\frac{\Delta h(s-1)}{L} \right) \left(\frac{\omega^2}{g d_s} \right)} \right] 2 g D \right\}^{\frac{1}{2}} .$$

Keywords : Slurry velocity, sediment size, head Loss, hydraulic gradient, flow regime

DAFTAR ISI

	Halaman
SAMPUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR NOTASI	xiii
I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang Masalah	1
B. Rumusan Masalah	5
C. Tujuan Penelitian	5
D. Manfaat Penilitan	5
E. Batasan Masalah	6
F. Sistematika Penulisan	7
II. TINJAUAN PUSTAKA	
A. Saluran Tertutup	9
B. Transpor Sedimen	22
C. Analisa Dimensi	44
D. Penelitian sebelumnya	46
E. Kerangka Pikir Penelitian	54
F. Hipotesa	55
III. METODE PENELITIAN	
A. Bentuk dan Jenis Penelitian	56
B. Tempat dan Waktu Penelitian	56

C. Rancangan Penelitian	57
D. Bagan Alir Penelitian (Flowchart).	66
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
A. Data dan Analisis	68
B. Karakteristik Sampel Air Tanpa Sedimen	68
C. Karakteristik Sampel Sedimen	79
D. Transpor Sedimen	91
E. Analisa Dimensi Metode Buckingham	101
F. Temuan Empirik Penelitian	119
V. KESIMPULAN DAN SARAN	
A. Kesimpulan	120
B. Saran	121
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Nama Gambar	Hal
1	Perbesaran Pipa (Triatmodjo, 2015)	12
2	Perbesaran Penampang Berangsur angsur (Triatmodjo, 2015)	12
3	Pengecilan Pipa (Triatmodjo, 2015)	13
4	Pengecilan Penampang Berangsur-angsur (Triatmodjo, 2015)	14
5	Koefisien K'_c Sebagai Fungsi α (Triatmodjo, 2015)	14
6	Belokan Pipa (Triatmodjo, 2015)	15
7	Ilustrasi Persamaan Bernoulli (Triatmodjo, 2015)	16
8	Gaya-gaya yang bekerja pada butiran sedimen	24
9	Diagram Shields (Triatmodjo, 2015)	26
10	Grafik Kecepatan Sedimentasi (Setiyadi, 2013)	29
11	Hubungan antara Re dengan m beberapa peneliti (Chien & Wan, 1999 dalam Arsyad Thaha, 2009)	30
12	Distribusi sedimen dalam pipa (a) Homogen (b) heterogen (c) Saltation (Kuhail, 2001)	31
13	Regime aliran sedimen dalam pipa (Liu, 2003)	33
14	Variasi gradien tekanan terhadap rerata kecepatan aliran pada konsentrasi sedimen yang berbeda (Liu, 2003)	35
15	Diagram Moody (Triatmodjo, 2015)	36
16	Limit deposit velocity untuk partikel seragam (Liu, 2003)	39
17	Limit deposit velocity untuk partikel tidak seragam (Liu, 2003)	39
18	Kerangka Pikir Penelitian	54
19	Sampel Bahan Pengujian	57
20	Skema Media Pengujian Tampak Atas	58
21	Skema Media Pengujian Tampak samping	59
22	Model Pengujian Tampak Samping	59
23	Arah Aliran Lurus	61

24	Arah Aliran Belok	61
25	Bagan Alir Penelitian (Flowchart).	66
26	Hubungan kecepatan terhadap debit	71
27	Perubahan kecepatan pada beberapa persamaan empiris	72
28	Hubungan kecepatan terhadap kehilangan energi	73
29	Hubungan kecepatan terhadap gradien hidrolik	75
30	Hubungan kecepatan terhadap bilangan Reynold (a) lurus (b) belokan	76
31	Hubungan koefisien gesek terhadap bilangan Reynold (a) lurus (b) belokan	78
32	Hubungan kecepatan aliran <i>slurry</i> terhadap debit	80
33	Hubungan kecepatan aliran <i>slurry</i> terhadap bilangan Reynold (a) lurus (b) belokan	82
34	Hubungan koefisien gesek terhadap bilangan Reynold (a) lurus (b) belokan	84
35	Hubungan kecepatan aliran <i>slurry</i> terhadap kehilangan energi (a) lurus (b) belokan	86
36	Hubungan kecepatan aliran <i>slurry</i> terhadap gradien hidrolik (a) lurus (b) belokan	88
37	Hubungan kecepatan aliran <i>slurry</i> terhadap gradien hidrolik pada penelitian Pavel dan Ratna	89
38	Pengukuran kecepatan aliran <i>slurry</i> pada aliran belokan.	90
39	Hubungan ukuran sedimen terhadap batas kecepatan pengendapan pada persamaan Liu dan data pengukuran	94
40	Hubungan ukuran sedimen terhadap kecepatan <i>regime</i> aliran <i>slurry</i>	96
41	Ilustrasi <i>regime</i> <i>slurry</i> dengan kecepatan berbeda dalam pipa	98
42	Visualisasi pergerakan sedimen dalam pipa	98
43	Visualisasi pengendapan dalam pipa	101
44	Hubungan density ($\frac{\rho_s}{\rho_w}$) terhadap kecepatan aliran <i>slurry</i> ($\frac{v^2}{2gD}$)	105

45	Hubungan gradien hidrolis ($\frac{\Delta h}{l}$) terhadap kecepatan aliran <i>slurry</i> ($\frac{v^2}{2gD}$)	106
46	Hubungan kecepatan endap partikel ($\frac{\omega^2}{gd_s}$) terhadap kecepatan ($\frac{v^2}{2gD}$)	107
47	Hubungan ($\frac{\Delta h(s-1)}{L}$) ($\frac{\omega^2}{gd_s}$) terhadap $\frac{v^2}{2gD}$	108
48	Hubungan $(s-1) \frac{\omega}{\sqrt{dsg}}$ terhadap ($\frac{gD}{v^2}$) <i>regime moving bed</i>	112
49	Hubungan $(s-1) \frac{\omega}{\sqrt{dsg}}$ terhadap ($\frac{gD}{v^2}$) <i>regime stationary bed</i>	114
50	Hubungan $(s-1) \frac{\omega}{\sqrt{dsg}}$ terhadap ($\frac{gD}{v^2}$) <i>regime heterogeneous</i>	116
51	Perbandingan kecepatan <i>slurry</i> terhadap ukuran sedimen hasil pengukuran dan persamaan empiris	118

DAFTAR TABEL

Nomor	Nama Tabel	Hal
1	Nilai K sebagai fungsi dari α	13
2	Nilai Kb sebagai fungsi dari α	15
3	Nilai Kb sebagai fungsi dari R/D	15
4	Koefisien Hazen-William	20
5	Koefisien Manning n untuk aliran melalui pipa	21
6	Karakteristik Limbah Domestik	23
7	Dimensi dari berbagai besaran fisik	45
8	Matriks Penelitian Terdahulu	50
9	Variasi dan parameter penelitian	62
10	Data dan rangkian simulasi	63
11	Rekapitulasi hasil pemeriksaan karakteristik sampel air dan sedimen	69
12	Rekapitulasi karakteristik sampel sedimen	92
13	Karakteristik <i>regime</i> aliran <i>slurry</i> pada sampel ukuran 0,15 mm, 0,25 mm dan 0,42 mm	100
14	Matriks dimensional kecepatan aliran <i>slurry</i>	101
15	Matriks dimensional kecepatan <i>regime</i> aliran <i>slurry</i>	110

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
g	Percepatan gravitasi (m/s^2)
μ	Viskositas dinamik (Ns/m^2)
ν	Viskositas kinematic (m^2/s)
Re	Bilangan Reynold
R_e	Bilangan Reynold Butiran
C_v	Konsentrasi volume slurry (%)
F_L	Froude
V_L	Limit Deposit velocity (m/s)
v	kecepatan aliran (m/s)
v_r	kecepatan rata-rata aliran (m/s)
ρ_w	Kerapatan air atau densitas (kg/m^3)
ρ_s	Kerapatan air atau densitas (kg/m^3)
A	Luas penampang (m^2)
τ	Tegangan geser (N/m^2)
Q	Debit aliran (m^3/s)
Q_r	Debit rata-rata (m^3/s)
Q_s	debit sedimen (m^3/s)
f	koefisien kekasaran pipa
K	koefisien faktor sambungan, cabang dan belokan
K_b	koefisien kehilangan tenaga pada belokan
t	Waktu (s)
L	Panjang aliran dalam pipa (m)
P_a	Tekanan Atmosfer
P	Tekanan (N/m^2)
h	Ketinggian fluida (m)
H	Head (m)
D	Diameter pipa (mm)

d_s	ukuran butir sedimen (mm)
ν	viskositas kinematis (m^2/s)
γ_w	Berat jenis air (kg/m^3)
γ_s	Berat jenis sedimen (kg/m^3)
h_f	Kehilangan energi akibat gesekan
h_f/L	gradien hidrolik (m/m)
i_m	gradien tekanan slurry (m/m)
I	kemiringan garis tenaga (m)
n	koefisien manning
c	koefisien Chezy
R	Jari-jari hidrolis
k_s	koefisien kekasaran Strickler
h_c	tinggi hilang akibat sambungan (mayor)
F	Gaya (N)
Z	Beda ketinggian (m)
h_f	kehilangan longitudinal (m)
τ_0	Tegangan Geser (kg/m^2)
τ_{cr}	Tegangan Kritis (kg/m^2)
ψ	Intensitas geser pada butir sedimen
ϕ	Intensitas transport pada butir sedimen
ω_0	Kecepatan endap partikel tunggal (m/s)
ω	Kecepatan endap partikel gabungan (m/s)

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Perkembangan penduduk kota-kota besar semakin meningkat pesat, seiring dengan pesatnya laju pembangunan maka kebutuhan akan air semakin meningkat. Penggunaan air untuk berbagai kegiatan akan menghasilkan limbah cair karena tidak semua air yang digunakan menjadi bagian dari barang atau bahan yang diproduksi. Komposisi limbah cair rata-rata mengandung bahan organik dan senyawa mineral yang berasal dari sisa makanan, urin, dan sabun. Sebagian limbah rumah tangga berbentuk suspensi lainnya dalam bentuk bahan terlarut. Padatan terdiri dari bahan padat organik maupun anorganik yang dapat larut, mengendap atau tersuspensi. Bahan ini pada akhirnya akan mengendap di dasar air sehingga menimbulkan pendangkalan pada dasar badan air penerima. Kekentalan (viskositas) pada air limbah mempengaruhi aliran pada saluran (Kodoatie, 2002).

Aliran air yang bercampur dengan zat padat dan zat cair merupakan aliran *slurry* yang terkonsentrasi suatu jumlah material yang sangat halus yang memberikan viskositas 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 diinginkan, 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 (Pavel et.al, 2011). Dalam penelitian Pavel et.al (2011) 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 pipa loop 17,5 mm dan 26,8 mm, hasilnya menunjukkan bahwa untuk kecepatan *slurry* 4 m/s *slurry* pasir mencapai nilai gradien hidrolis yang lebih tinggi dari pada pasir halus atau campuran pasir dan

nilainya mendekati pasir kasar. Kecepatan slurry $4 \text{ m/s} < V < 7 \text{ m/s}$ gradien hidrolis pasir sedang lebih kecil dari pasir halus.

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. Miedema s, (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 dasar ; (2) kehilangan energi pada *regime sliding bed* yang di sebabkan 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 homogen* disebabkan oleh turbulensi partikel besar; (5) kehilangan energi pada *regime sliding* yang disebabkan oleh *sliding friction*, energi potensial dan energi kinetik.

Geometrik pipa saluran mempengaruhi gradien hidrolis dan kecepatan aliran *slurry*. Changhee et.al (2008) membandingkan transportasi campuran pasir air dalam pipa melingkar dan persegi pipa. Menggunakan diameter pasir 2,65 mm dan 0,54 mm, konsentrasi pasir 5%, 15% dan 22%. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa gradien hidrolis air di

pipa bundar lebih besar dari pada pipa persegi dan gradien hidrolis campuran pasir air di pipa persegi lebih besar dari pipa bundar. Ketika bilangan Reynold lebih kecil dari $0,8 \times 10^6$ efeknya lebih besar pada pipa bundar dari pada pipa persegi. *Limit deposit velocity* disaluran persegi lebih kecil dari pipa melingkar. Pipa persegi mengangkut pasir lebih efektif dari pada pipa bundar. Sarjito dkk (2016) menerangkan distribusi tekanan aliran pada penampang segi empat dengan belokan 90° dengan posisi horizontal pada pipa besar (inlet) dan vertikal pada pipa kecil (outlet) terjadi peningkatan tekanan ketika melewati belokan (elbow) karena adanya perlambatan aliran. Damawidjaya (2006) aliran dua fasa (air dan udara) pada pipa spiral faktor tekanan atau kerugian tekanan mempengaruhi kinerja dan efisiensi pipa dan hasil koefisien gesek campuran udara - air lebih besar di bandingkan dengan koefisien gesek pada air. Sedangkan teknologi yang bertujuan mengendalikan sedimen di saluran, telah dilakukan penelitian oleh Ferdian (2010) mengendalikan sedimen disaluran irigasi dengan membangkitkan arus turbulensi menggunakan Bandal.

Penelitian ini ditujukan untuk menemukan hubungan karakteristik sedimen atau partikel padat yang terdapat dalam aliran, kecepatan aliran dan geometrik pipa sebagai saluran tertutup. Mengetahui dan mengklasifikasikan batas batas *regime* dari aliran *slurry* agar diketahui kecepatan minimum (*limit deposit velocity*) sehingga tidak terjadi pengendapan pada saluran pipa. Untuk tujuan tersebut dilakukan penelitian model fisik dilaboratorium yang meliputi; (1) Melakukan analisis karakteristik

fisik sedimen dengan ukuran butir yang berbeda; (2) Melakukan analisis kinerja sistem jaringan pipa air limbah pada pengujian pipa lurus dan belokan; (3) Memperoleh persamaan hubungan analisa takberdimensi atas regime aliran yang terjadi (model empiris).

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, sehingga dirumuskan permasalahan penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh kecepatan aliran dan ukuran sedimen terhadap karakteristik *regime* aliran *slurry* pada jaringan pipa?
2. Bagaimana model empiris kecepatan aliran *slurry* dari parameter yang berpengaruh pada jaringan pipa?

C. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis pengaruh kecepatan aliran dan ukuran sedimen terhadap karakteristik *regime* aliran *slurry* pada jaringan pipa.
2. Mendapatkan bentuk model empiris kecepatan aliran *slurry* dari parameter yang berpengaruh pada jaringan pipa.

D. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memperoleh manfaat sebagai berikut;

1. Dapat dijadikan sebagai acuan dan informasi para peneliti dalam mengembangkan penelitian yang berhubungan dengan transport sedimen pada saluran pipa,

2. Sebagai referensi untuk pengembangan inovasi model jaringan pipa dalam meningkatkan kinerja jaringan pipa air limbah,
3. Memberikan gambaran secara nyata di lapangan terkait pengaruh aliran *slurry* terhadap kinerja saluran.

E. Batasan Masalah

Penelitian ini mencakup pengujian eksperimental laboratorium terhadap aliran *slurry* pada saluran pipa. Agar penelitian ini dapat berjalan efektif dan mencapai sasaran maka penelitian dibatasi pada;

1. Parameter yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik *regime* aliran *slurry* adalah kecepatan aliran *slurry*, kehilangan energi, gradien hidrolis, kecepatan endap partikel dan kecepatan *regime* aliran *slurry*.
2. Pengukuran kecepatan aliran secara horizontal di sepanjang pipa pengujian.
3. Tidak ada variasi terhadap kemiringan
4. Menggunakan empat variasi debit yang sama untuk sampel air tanpa sedimen dan sampel sedimen.
5. Penelitian dilakukan pada jaringan pipa lurus dan belokan
6. Jaringan pipa terdiri dari satu *inflow* dan satu *outflow*
7. Tidak menghitung besarnya pengendapan yang terjadi pada jaringan pipa

8. Tidak terjadi kebocoran pada rangkaian, sehingga volume dalam rangkaian dianggap konstan.

F. Sistematika Penulisan

Gambaran umum mengenai isi penelitian ini, dapat dituliskan secara singkat sebagai berikut:

1. **BAB I Pendahuluan**

Menjelaskan latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, sistematika penelitian tentang pengenalan isi per bab dalam penulisan ini,

2. **BAB II Tinjauan Pustaka**

Memaparkan teori dasar dari saluran pipa, karakteristik dan transport sedimentasi dalam perpipaan, penelitian sebelumnya yang terkait dengan penelitian ini, dan kerangka pikir penulisan,

3. **BAB III Metode Penelitian**

Memaparkan bentuk dan jenis penelitian, tempat dan waktu penelitian, rancangan penelitian, diagram alir penelitian dan ekspektasi hasil penelitian,

4. **Bab IV Hasil dan Pembahasan**

Menyajikan hasil analisis perhitungan data yang diperoleh dari hasil pengujian yang dilaksanakan sesuai dengan metodologi penelitian serta pembahasan dari hasil pengujian yang diperoleh.

5. BAB V Kesimpulan dan Saran

Menerangkan tentang kesimpulan dari capaian yang dihasilkan dan memberikan saran dalam riset yang bersifat berkelanjutan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Saluran Tertutup

Pipa merupakan saluran tertutup yang umumnya berpenampang lingkaran dan digunakan untuk mengalirkan fluida dengan penampang aliran penuh. 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 didalam 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 (Triatmodjo, 2015).

Struktur hidrolika saluran pada dasarnya terdiri atas tiga komponen, yakni debit aliran, kecepatan aliran dan dimensi penampang saluran sedangkan saluran buatan, perencanaan kondisi aliran didasarkan pada struktur hidrolikanya. Menentukan kecepatan aliran rencana, maka debit rencana juga akan didapat. Beberapa faktor yang penting diketahui dalam aliran pipa adalah distribusi kecepatan aliran, tegangan geser dan kehilangan tenaga selama pengaliran.

1. Kehilangan Tenaga Aliran Melalui Pipa

Pada zat cair yang mengalir didalam bidang batas (pipa, saluran terbuka atau bidang datar) akan terjadi tegangan geser dan gradien kecepatan pada seluruh medan aliran karena adanya kekentalan.

Tegangan geser tersebut akan menyebabkan terjadinya kehilangan tenaga selama pengaliran. Menurut Triatmodjo (2015) aliran viskos merupakan aliran zat cair yang mempunyai kekentalan (viskositas). Kekentalan adalah sifat zat cair yang dapat menyebabkan terjadinya tegangan geser pada waktu bergerak. Tegangan geser ini akan mengubah sebagian energi aliran dalam bentuk energi lain seperti panas, suara dan sebagainya. Perubahan energi tersebut menyebabkan terjadinya kehilangan tenaga.

Aliran viskos dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu apabila pengaruh kekentalan (viskositas) adalah cukup dominan sehingga partikel zat cair bergerak secara teratur menurut lintasan lurus maka aliran disebut laminar. Aliran laminar terjadi apabila kekentalan besar dan kecepatan aliran kecil. Pengaruh kekentalan yang berkurang akan bertambahnya kecepatan maka aliran akan berubah dari laminar menjadi turbulen. Pada aliran turbulen partikel zat cair bergerak secara tidak teratur.

Pipa dari sistem jaringan terdapat hubungan antara kehilangan tenaga dan debit. Menurut Weisbach (Triatmodjo, 2015) kehilangan tinggi tekanan berbanding langsung dengan tinggi kecepatan yang dinyatakan dengan,

$$h_k = k \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

Dengan h_k adalah tinggi tenaga yang hilang (m), k adalah koefisien kehilangan tekanan Weisbach, V adalah kecepatan aliran (m/d), g adalah percepatan gravitasi bumi (m/d^2). Koefisien kehilangan energi (k), selain ditimbulkan oleh gesekan dinding pipa, juga oleh adanya percabangan atau

lubang pada pipa. Nilai k adalah fungsi dari koefisien kecepatan C_v atau ditulis $k=(1/C_v^2-1)$. Aliran dalam pipa bertekanan mengalami kehilangan tinggi tekanan akibat gesekan dinding pipa sesuai dengan persamaan Darcy-Weisbach (Triatmodjo, 2015), sebagai berikut;

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

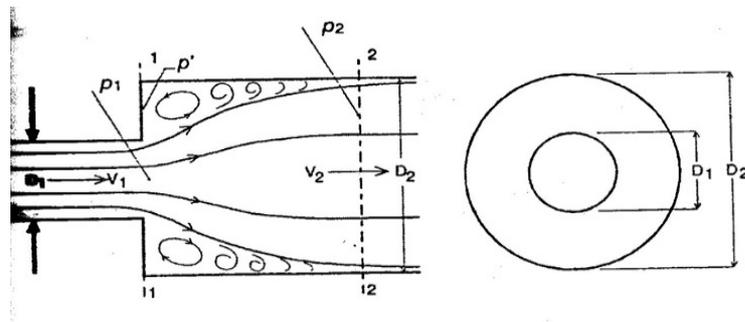
Dengan hf adalah kehilangan tinggi tekanan (m), f adalah koefisien kekasaran pipa, D adalah diameter pipa (m), L adalah panjang pipa (m), g adalah percepatan gravitasi (m/d^2), Q adalah debit yang masuk pada pipa (m^3/d).

2. Kehilangan Tenaga Sekunder Dalam Pipa

Kehilangan tenaga akibat gesekan (kehilangan tenaga primer), terjadi pula kehilangan tenaga yang disebabkan oleh perubahan penampang pipa, sambungan, belokan dan katub (kehilangan tenaga sekunder). Pipa panjang kehilangan tenaga primer biasanya jauh besar dari pada kehilangan tenaga sekunder, sehingga pada keadaan tersebut kehilangan tenaga sekunder dapat diabaikan sedangkan pada pipa pendek kehilangan tenaga sekunder harus diperhitungkan. Apabila kehilangan tenaga sekunder kurang dari 5 % dari kehilangan tenaga primer, maka kehilangan tenaga tersebut bisa diabaikan. Untuk memperkecil kehilangan tenaga sekunder, perubahan penampang atau belokan dapat dibuat secara berangsur angsur.

a. Pembesaran Penampang

Pembesaran penampang mendadak mengakibatkan kenaikan tekanan dari p_1 menjadi p_2 dan kecepatan turun dari V_1 menjadi V_2 (gambar 1) dapat digunakan persamaan Bernoulli $A_1V_1 = A_2V_2$

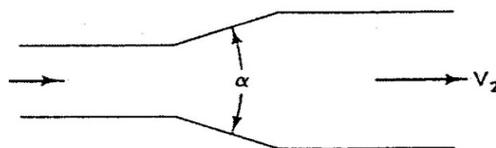


Gambar 1. Perbesaran Pipa (Triatmodjo, 2015)

Kehilangan tenaga pada perbesaran penampang akan berkurang apabila perbesaran dibuat secara berangsur-angsur (Gambar 1) kehilangan tenaga di berikan oleh persamaan:

$$h_e = K \frac{V_2^2}{2g} \quad (3)$$

dengan h_e adalah kehilangan tinggi tekanan minor (m), adalah faktor sambungan, cabang dan belokan, V adalah kecepatan aliran (m/d), g adalah percepatan gravitasi bumi (m/d²).



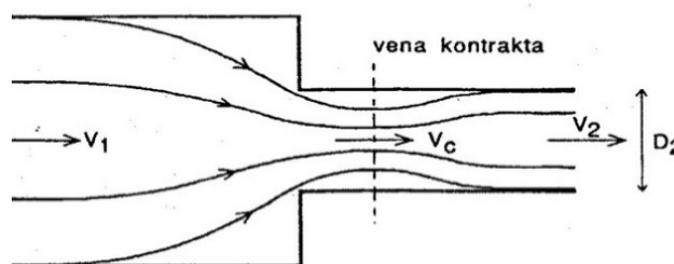
Gambar 2. Perbesaran Penampang Berangsur-angsur (Triatmodjo, 2015)

Tabel 1. Nilai K sebagai fungsi dari α

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

b. Pengecilan Penampang

Pengecilan penampang yang mendadak garis aliran pada bagian hulu dari sambungan akan menguncup dan akan mengecil pada vena kontraktan (Gambar 3).

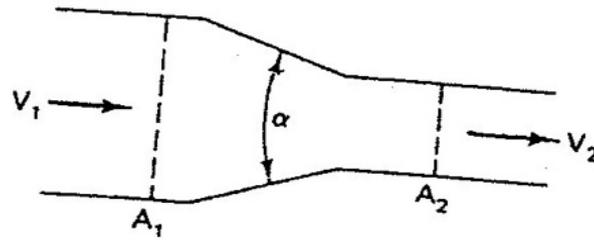


Gambar 3. Pengecilan Pipa (Triatmodjo, 2015)

Percobaan yang telah dilakukan menunjukkan bahwa luas penampang sekitar 0.6 A2. Berdasarkan persamaan kontinuitas di vena kontakta maka:

$$h_e = 0,44 \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

Dengan h_e adalah kehilangan tinggi tekanan minor (m), V adalah kecepatan aliran (m/d), g adalah percepatan gravitasi bumi (m/d²). Kehilangan tenaga pada pengecilan pipa dapat dikurangi dengan membuat pengecilan penampang yang berangsur-angsur (Gambar 4).

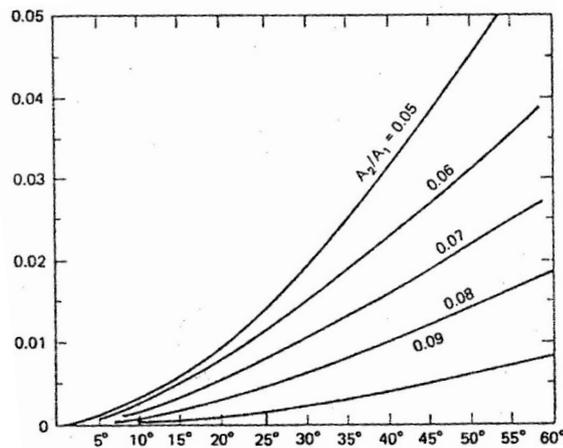


Gambar 4. Pengecilan Penampang Berangsur-angsur (Triatmodjo, 2015)

Maka kehilangan tenaga adalah

$$h_e = K'_c 0,44 \frac{V_2^2}{2g} \quad (5)$$

Nilai K'_c tergantung pada sudut transisi α dan perbandingan luas A_1/A_2 seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Koefisien K'_c Sebagai Fungsi α (Triatmodjo, 2015)

c. Belokan Pipa

Kehilangan tenaga yang terjadi pada belokan tergantung pada sudut belokan pipa. Rumus kehilangan tenaga pada belokan adalah serupa dengan rumus pada perubahan penampang, yaitu:

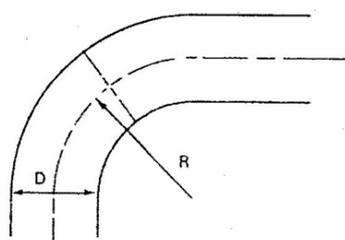
$$h_e = kb \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

Dengan kb adalah koefisien kehilangan tenaga pada belokan, yang diberikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai K_b sebagai fungsi dari α

α	20°	40°	60°	80°	90°
K_b	0,078	0,31	0,69	0,60	0,67

Sudut belokan 90° dan dengan belokan halus (berangsur-angsur), kehilangan tenaga tergantung pada perbandingan antara jari-jari belokan dan diameter pipa (Triatmodjo, 2015)



Gambar 6. Belokan Pipa (Triatmodjo, 2015)

Nilai K_b untuk berbagai nilai R/D di berikan dalam Tabel 3

Tabel 3. 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

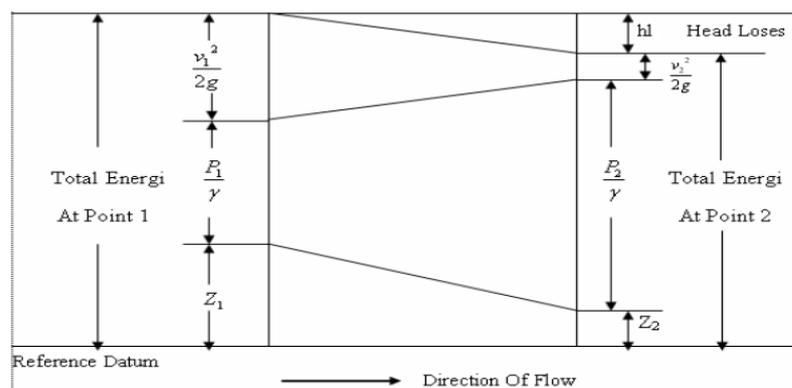
3. Persamaan Bernoulli

Hukum kekekalan energi menyatakan energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan namun dapat diubah dari suatu bentuk ke bentuk lain. Energi yang ditunjukkan dari persamaan energi total diatas,

atau dikenal sebagai *head* pada suatu titik dalam aliran *steady* adalah sama dengan total energi pada titik lain sepanjang aliran fluida tersebut. Hal ini berlaku selama tidak ada energi yang ditambahkan ke fluida atau yang diambil dari fluida. Konsep ini dinyatakan ke dalam bentuk persamaan yang disebut dengan persamaan Bernoulli (Triatmodjo, 2015) yaitu:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (7)$$

Dengan p_1 dan p_2 adalah tekanan pada titik 1 dan 2, V_1 dan V_2 adalah kecepatan aliran pada titik 1 dan 2, z_1 dan z_2 adalah perbedaan ketinggian antara titik 1 dan 2, γ adalah berat jenis fluida, g adalah percepatan gravitasi adalah $9,8 \text{ (m/d}^2\text{)}$



Gambar 7. Ilustrasi Persamaan Bernoulli (Triatmodjo, 2015)

Besarnya kecepatan akan mempengaruhi besarnya fluida yang mengalir dalam suatu pipa. Jumlah dari aliran fluida mungkin dinyatakan sebagai volume, berat atau massa fluida dengan masing-masing laju aliran ditunjukkan sebagai laju aliran volume (m^3/d), laju aliran berat (N/d) dan laju

aliran massa (kg/d). Kapasitas aliran (Q) untuk fluida yang incompressible yaitu:

$$Q = A.V \quad (8)$$

dengan Q adalah laju aliran volume (m^3/d), A adalah luas penampang aliran (m^2), V adalah kecepatan aliran fluida (m/d).

4. Aliran Laminar dan Turbulen

Aliran fluida yang mengalir di dalam pipa dapat diklasifikasikan kedalam dua tipe aliran yaitu laminar dan turbulen. Aliran dikatakan laminar jika partikel-partikel fluida yang bergerak mengikuti garis lurus yang sejajar pipa dan bergerak dengan kecepatan sama. Aliran disebut turbulen jika tiap partikel fluida bergerak mengikuti lintasan sembarang disepanjang pipa dan hanya gerakan rata-ratanya saja yang mengikuti sumbu pipa. Dari hasil eksperimen diperoleh bahwa koefisien gesekan untuk pipa silindris merupakan fungsi dari bilangan Reynold (Re). Dalam menganalisa aliran didalam saluran tertutup, sangatlah penting untuk mengetahui tipe aliran yang mengalir dalam pipa tersebut. Untuk itu harus dihitung besarnya bilangan Reynold dengan mengetahui parameter-parameter yang diketahui besarnya. Besarnya Reynold (Re) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} \quad (9)$$

Dengan μ adalah viskositas dinamik (Pa.s), D adalah diameter dalam pipa (m), v adalah kecepatan aliran fluida (m/d), ρ adalah rapat

massa (Kg/m^3) Re adalah Reynold number aliran akan laminar jika bilangan Reynold kurang dari 2000 dan akan turbulen jika bilangan Reynold lebih besar dari 4000.

5. Aliran Subkritis, Kritis dan Superkritis

Akibat dari gaya tarik bumi terhadap aliran dinyatakan dengan rasio gaya inersia dengan gaya tarik bumi. Rasio ini diterapkan sebagai bilangan *Froude* (Fr) yang didefinisikan dengan rumus:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \times h}} \quad (10)$$

Dengan Fr adalah angka Froud; V adalah kecepatan aliran (m/d), g adalah percepatan gravitasi (m^2/d), h adalah kedalaman aliran (m). Aliran dikatakan kritis ($Fr = 1$) apabila kecepatan aliran sama dengan kecepatan gelombang gravitasi dengan amplitudo kecil. Gelombang gravitasi dapat dibangkitkan dengan merubah kedalaman. Jika kecepatan aliran lebih kecil daripada kecepatan kritis, maka alirannya disebut subkritis ($F < 1$), sedangkan jika kecepatan alirannya lebih besar daripada kecepatan kritis, maka alirannya disebut superkritis ($Fr > 1$).

6. Persamaan Persamaan Empiris

Faktor yang penting dalam studi hidroulika adalah kecepatan (V) atau debit aliran (Q). Dalam hitungan praktis rumus yang banyak digunakan persamaan kuantitas, $Q = AV$, dengan A adalah tampang aliran. Untuk

kecepatan aliran zat cair dalam pipa dengan menggunakan tabung pitot (Triatmodjo, 2015), persamaan kecepatannya adalah

$$V = \sqrt{2gh} \quad (11)$$

Untuk memudahkan hitungan maka dikembangkan rumus-rumus empiris kecepatan aliran (V), yang meskipun hanya berlaku untuk zat cair tertentu dan dalam keadaan tertentu tetapi cukup memudahkan pemakaiannya. Untuk pipa yang mengalirkan air, rumus kecepatan mempunyai bentuk umum berikut:

$$V = aD^x \rho \quad (12)$$

Dengan I adalah kemiringan garis tenaga (hf/L) dan koefisien a dan pangkat x dan y adalah empiris. Kemiringan garis tenaga dapat dihitung dari persamaan Darcy-Weisbach (Triatmodjo, 2015) yang mempunyai bentuk berikut:

$$I \frac{hf}{L} = f \frac{V^2}{2gD} \quad (13)$$

Substitusi persamaan tersebut ke persamaan (14) didapat:

$$V = a D^x \left(\frac{fV^2}{2gD} \right)^y \quad (14)$$

dengan a adalah koefisien yang tergantung pada kekerasan bidang batas dan kekentalan zat cair. Untuk pipa halus rumus Blasius dapat digunakan untuk nilai angka Reynolds $4000 < Re < 10^5$, yang dapat ditunjukkan dalam bentuk:

$$I \frac{0,316}{Re^{0,25}} \frac{V^2}{2gD} = 0,316 \left(\frac{v}{VD} \right)^{0,25} \frac{V^2}{2gD} \quad (15)$$

Untuk nilai $v = 0,984 \times 10^{-6} m^2/d$ yaitu untuk air pada $21,1^\circ C$ didapat:

$$V = 76D^{3/7}I^{4/7} \quad (16)$$

Di daerah transisi berlaku rumus Hazen-William yang berbentuk:

$$V = 0,354CH I^{0,54} D^{0,63} \quad (17)$$

Rumus manning yang banyak digunakan pada pengaliran disaluran terbuka, juga berlaku untuk pengaliran di pipa. Rumus tersebut mempunyai bentuk:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (18)$$

Nilai CH tergantung pada kekasaran , dan diberikan oleh Tabel 4

Tabel 4. Koefisien Hazen-William

Nilai CH	Jenis Pipa
140	Pipa sangat halus
130	Pipa halus, semen, besi tuang baru
120	Pipa baja dilas baru
110	Pipa baja dikeling baru
100	Pipa besi tuang tua
95	Pipa baja dikeling tua
60-80	Pipa tua

Dengan n adalah koefisien Manning dan R adalah jari-jari hidroulik, yaitu perbandingan antara luas tampang aliran A dan keliling basah P .

$$R = \frac{A}{P} \quad (19)$$

Untuk pipa lingkaran, $A = \pi D^2/4$ dan $P = \pi D$, sehingga:

$$R = \frac{\pi D^2/4}{\pi D} \frac{D}{4} \quad (20)$$

atau

$$D = 4R \quad (21)$$

Untuk aliran pipa persamaan (18) menjadi:

$$V = \frac{0,397}{\pi} D^{2/3} I^{1/2} \quad (22)$$

Selain rumus Manning, di Indonesia juga sering digunakan rumus Chezy dan Stickler, Rumus Chezy mempunyai bentuk:

$$V = C\sqrt{RI} \quad (23)$$

Tabel 5. Koefisien Manning n untuk aliran melalui pipa

Tipe pipa	Koefisien Manning <i>n</i>	
	Minimal	Maximal
Kaca, kuningan atau tembaga	0,009	0,013
Permukaan semen halus	0,010	0,013
Kayu	0,010	0,013
Besi tuang	0,011	0,015
Beton precast	0,011	0,015
Permukaan mortar semen	0,011	0,015
Pipa tanah dibakar	0,011	0,015
Besi	0,012	0,017
Batu dengan mortar semen	0,012	0,017
Baja dikeling	0,017	0,020
Permukaan batu dengan semen	0,020	0,024

Dengan *V* adalah Kecepatan rerata, *C* adalah Koefisien Chezy yang tergantung pada kekerasan dinding, *R* adalah Jari-jari Hidroulis, *I* adalah Kemiringan garis tenaga Koefisien *C* dapat dihubungkan dengan koefisien *f* dari Darcy-Weisbach (Triatmodjo, 2015):

$$hf = \frac{f}{4} \frac{L}{R} \frac{V^2}{2g} \quad (24)$$

atau

$$V^2 = \frac{8g}{f} R \frac{hf}{L}$$

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}} R^{1/2} I^{1/2} \quad (25)$$

Dengan membandingkan persamaan diatas dengan persamaan (25) didapat hubungan berikut (Triatmodjo, 2015):

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \text{ atau } f = \frac{8g}{C^2} \quad (26)$$

Rumus Strickler mempunyai bentuk:

$$V = k_s R^{2/3} I^{1/2} \quad (27)$$

Dengan k_s adalah koefisien kekasaran Strickler yang mempunyai hubungan dengan koefisien Manning dalam bentuk:

$$k_s = \frac{1}{n} \quad (28)$$

B. Transpor Sedimen

Air limbah dapat berasal dari rumah tangga (*domestic*) maupun industry (*industry*). Air limbah domestik dan perkotaan adalah seluruh buangan cair yang berasal dari hasil proses seluruh kegiatan yang meliputi limbah domestik cair, yaitu buangan kamar mandi, dapur, bekas pencuci pakaian limbah perkantoran, dan limbah dari daerah komersil serta limbah industry.

Sedimen adalah satu zat padat yang terkandung dalam air limbah dapat berupa padatan terlarut maupun yang mengendap. Sedimen transpor secara umum diartikan sebagai proses perpindahan horizontal dari satu tempat ke tempat lainnya baik dalam bentuk campuran sedimen dengan fluida pengangkutnya (*river and coastal transport*) maupun aliran massa

oleh fluida yang mengangkutnya (*mass flows*). Laju transpor sedimen adalah ukuran volume sedimen yang melintasi suatu penampang dalam satuan waktu.

Faktor faktor yang berkaitan dengan awal gerak butiran sedimen yang menyebabkan terjadinya angkutan sedimen adalah kecepatan aliran, diameter ukuran butiran, gaya angkat yang lebih besar dari gaya angkat butiran dan gaya geser kritis.

Tabel 6. Karakteristik Limbah Domestik

No	Parameter	Minimum	Maksimum	Rata-rata
1	BOD - mg/l	31,52	675,33	353,43
2	COD - mg/l	46,62	1184,4	615,01
3	Angka Permanganat	69,84	739,65	404,7
4	($Kmna_4$) - mg/l			
5	Amoniak (NH_3) – mg/l	10,79	158,73	84,76
6	Nitrit (NO_2) – mg/l	0,013	0,274	0,1435
7	Nitrat (NO_3) – mg/l	2,25	8,91	5,58
8	Klorida (Cl) – mg/l	29,74	103,73	66,735
9	Sulfat (SO_4) – mg/l	81,3	120,6	100,96
10	PH	4,92	8,99	6,96
11	Zat padat tersuspensi (SS) – mg/l	27,5	211	119,25
12	Detrejen (MBAS) – mg/l	1,66	9,79	5,725
13	Minyak/ lemak – mg/l	1	125	63
14	Cadnium (Cd) – mg/l	Ttd	0,016	0,008
15	Timbal (Pb)	0,002	0,04	0,021
16	Tembaga (Cu) – mg/l	Ttd	0,049	0,245
17	Besi (Fe) – mg/l	0,19	70	35,1
18	Warna – (Skala Pt-Co)	31	150	76
19	Phenol – mg/l	0,04	0,63	0,335

Transpor sedimen merupakan fungsi dari karakteristik sedimen, fluida dan aliran. Laju transpor sedimen merupakan hasil kali kecepatan

aliran sedimen rata-rata (U_G) dengan massa sedimen suspensi yang mengalir. Jika total massa sedimen tersuspensi (Priyantoro, 1987) adalah:

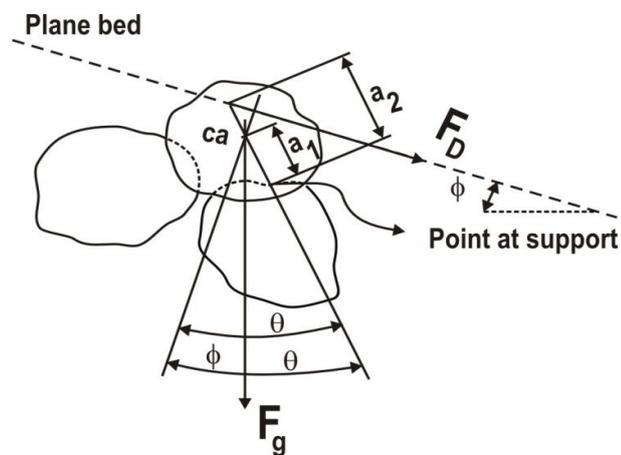
$$m = \rho_s \int_0^h C_{(z)} dz \quad (29)$$

Maka total laju transpor sedimen adalah:

$$q = m \cdot U_G \quad (30)$$

dengan ρ_s adalah rapat massa sedimen (kg/m^3), $C_{(z)}$ adalah konsentrasi sedimen pada tinggi z dari dasar (m^3), h adalah ketebalan lapisan transpor (m), q adalah laju transpor sedimen (kgm^3/d), U_G adalah kecepatan rata-rata sedimen suspensi (m/d).

Gaya-gaya yang bekerja pada suatu butiran sedimen dalam aliran (gambar 8) yaitu gaya berat (*gravity force*), gaya apung (*buoyancy force*), gaya angkat (*hydrodynamic lift force*) dan gaya seret (*hydrodynamic drag force*).



Gambar 8. Gaya-gaya yang bekerja pada butiran sedimen

Keterangan gambar: F_D adalah gaya seret; F_g adalah gaya berat di dalam air, Φ adalah sudut kemiringan dasar, θ adalah sudut gesek (longsor) alam (*the angle of repose*), a_1 adalah jarak antara pusat berat (CG) sampai titik guling (*point of support*), a_2 adalah jarak antara pusat gaya seret (*drag*) sampai titik guling.

Analisis secara teoritis, gaya angkat (*lift force*) biasanya tidak muncul secara eksplisit, karena gaya angkat sebenarnya tergantung pada variabel yang sama dengan gaya seret (*drag force*). Gaya fluida yang bekerja searah dengan pergerakan butiran disebut gaya seret (*drag force*), sedangkan gaya fluida yang bekerja dengan arah normal atau tegak lurus arah pergerakan butiran disebut gaya angkat (*lift force*). Konstanta dalam persamaan yang akan diperoleh ditentukan dari data eksperimental sehingga gaya angkat secara tidak langsung telah diperhitungkan.

Awal gerak butiran sedimen tergantung besarnya tegangan geser yang terjadi apabila : $\tau_0 > \tau_c$ maka butiran bergerak, $\tau_0 = \tau_c$ maka butiran mulai bergerak (kondisi kritis), $\tau_0 < \tau_c$ maka butiran diam. Salah satu yang mampu menggerakkan butir sedimen pada awal geraknya adalah kecepatan. Kecepatan efektif untuk menggerakkan butiran dapat ditulis dalam rumus (Priyantoro, 1987):

$$u_x = \sqrt{g.R.I} \quad (31)$$

Dimana u^* adalah kecepatan geser (m/d), g adalah gravitasi (m/d²), R adalah jari-jari hidraulik (m), I adalah kemiringan dasar saluran.

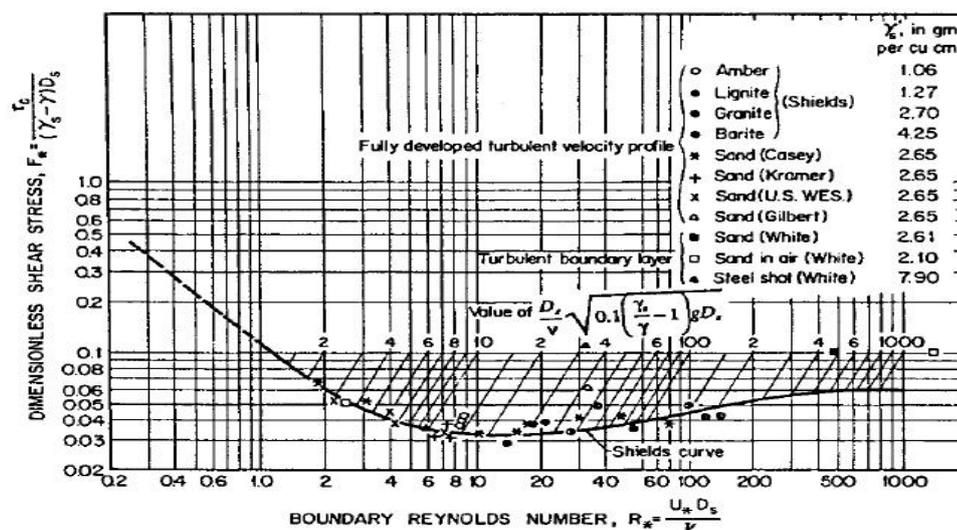
Kecepatan geser tersebut digunakan untuk menentukan bilangan *Reynolds* yang terjadi. Rumus bilangan *Reynolds* adalah sebagai berikut:

$$R_e = \frac{v \cdot D}{\mu} \quad (32)$$

Dengan R_e adalah bilangan Reynolds, u_* adalah kecepatan geser (m/d), d_s adalah diameter butiran sedimen (m), ν adalah viskositas (m^2/d). Bilangan Reynolds digunakan untuk menentukan dimensi tegangan geser (F_*) dengan menggunakan diagram *Shields* pada Gambar 9. Rumus dimensi tegangan geser adalah sebagai berikut:

$$F_* = t_c (\gamma_s - \gamma) \cdot D_s \quad (33)$$

Dengan F_* adalah dimensi tegangan geser; t_c adalah tegangan geser kritis (kg/m^2), γ_s adalah berat jenis butiran sedimen (kg/m^3), γ adalah berat jenis air (kg/m^3), d_s adalah diameter butiran sedimen (m).



Gambar 9. Diagram Shields

Tegangan geser dirumuskan sebagai berikut:

$$\tau_0 = \rho_w \cdot g \cdot R \cdot I \quad (34)$$

Dengan τ_0 adalah dimensi tegangan geser (kg/m^2), g adalah gravitasi (m/d^2), ρ_w adalah berat jenis air (kg/m^3), R adalah jari-jari hidraulik (m), I adalah kemiringan dasar saluran.

Kecepatan sedimentasi adalah laju pengurangan atau penurunan ketinggian daerah batas antara *slurry* (endapan) dan *supernatant (liquit jernih)* pada suhu seragam untuk mencegah pergeseran fluida karena konveksi. Kecepatan pengendapan untuk partikel tunggal dapat dihitung dengan cara :

- Persamaan *Stokes -Newton Low*

Jika sebuah partikel turun didalam fluida karena gaya gravitasi, maka kecepatan pengendapan akan tercapai bila jumlah dari gaya friksi (*drag force*) dan gaya apung sebanging dengan gaya gravitasi benda. Pada sebuah partikel yang mulai tenggelam, kecepatan turunnya partikel dinyatakan dalam (Setiyadi, 2013):

$$v_s = \sqrt{\frac{4gDs(P_s - P)}{3CdP}}$$

atau kecepatan endap partikel tunggal (Arsyad Thaha, 2009)

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{4gDs(P_s - P)}{3CdP}} \quad (35)$$

Koefisien drag (C_d) merupakan fungsi dari *Reynold number* nilai C_d ditentukan melalui persamaan (Setiyadi, 2013):

$$C_d = \frac{24}{Re} \quad (36)$$

Persamaan *Reynold number* disajikan pada persamaan (Setiyadi, 2013):

$$R_e = \frac{PDs(Ps - P)}{\mu}$$

atau bilangan Reynold (R_e) butiran (Arsyad Thaha, 2009)

$$R_e = \frac{\omega_o D}{\nu} \quad (37)$$

Dengan mendistribusikan persamaan (36) dan (37) ke persamaan (38), maka diperoleh persamaan :

$$\omega_o = \frac{gDs^2(\rho_s - \rho)}{18\mu} \quad (38)$$

dimana ω_o adalah kecepatan pengendapan, g adalah percepatan gravitasi (kg/m^3), ds adalah diameter partikel (m), ρ adalah densitas air, dan μ adalah viscositas kinematik (m^2/d).

- Persamaan Farag

Farag merumuskan suatu persamaan yang merupakan penyempurnaan dari persamaan *Stokes - Newton Low*.

Persamaan Farag disajikan pada persamaan :

$$V = \frac{gDp^2(\rho_s - \rho_f)\epsilon_f^2}{18\mu_f b} \quad (39)$$

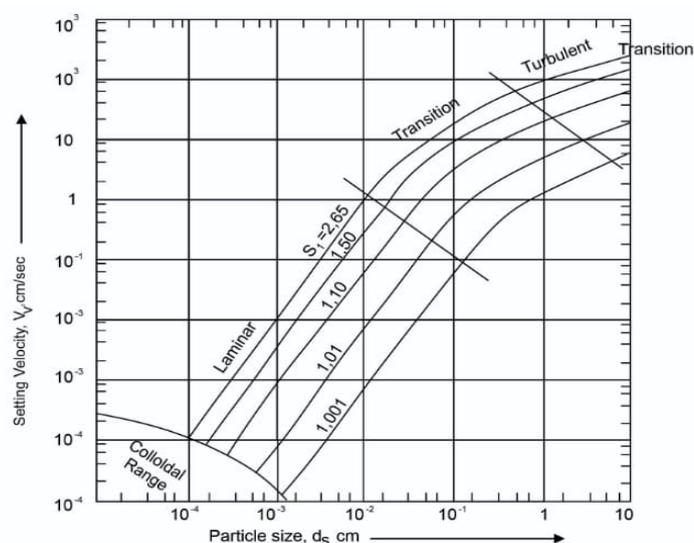
dimana b adalah konstanta yang diperoleh dari persamaan :

$$b = 10^{1,82(1-\varepsilon_f)} \quad (40)$$

Dimana V adalah kecepatan pengendapan, g adalah percepatan gravitasi, d_p adalah diameter partikel, ρ_s adalah densitas partikel, ρ_f adalah densitas cairan, μ_f adalah viscositas cairan, ε_f adalah fraksi volume cairan.

- Metode Grafik

Pada proses sedimentasi, salah satu faktor yang dapat mempengaruhi kecepatan sedimentasi adalah *specific gravity* dan diameter partikel dapat digambarkan dalam sebuah grafik. Grafik kecepatan sedimentasi ditunjukkan pada Gambar 10 dimana adalah diameter partikel (cm), V_S adalah kecepatan pengendapan, dan S adalah *specific gravity*. Bila ukuran partikel dan *specific gravity* maka grafik pada gambar 10 dapat dipakai untuk menentukan kecepatan sedimentasi.

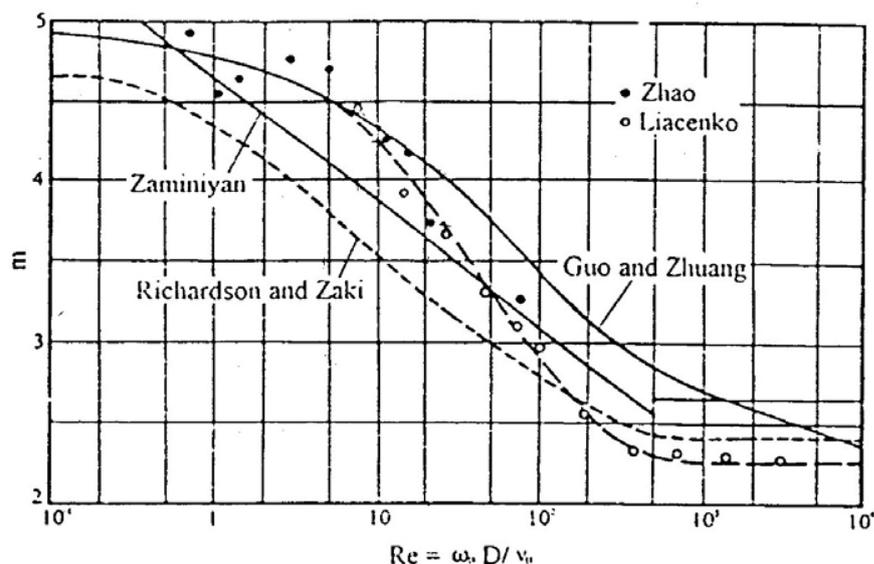


Gambar 10. Grafik Kecepatan Sedimentasi (Setiyadi, 2013)

Partikel dalam suspensi pada jarak antara yang berbeda-beda, dalam pengaruh ekivalen dengan kecepatan jatuh partikel pada konsentrasi yang berbeda. Dari analisis dimensi, Richardson dan Zaki (Arsyad Thaha, 2009) memberikan hubungan eksponensial antara kecepatan terbatas dengan jarak pemisahan:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = (1 - C)^m \quad (41)$$

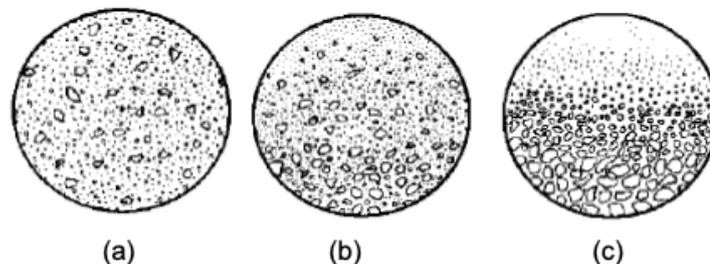
dengan m adalah eksponen, ω adalah kecepatan endap partikel gabungan (m/det), ω_0 adalah kecepatan endap partikel tunggal yang diuraikan dari Gambar 11. Secara umum, nilai m kecil pada partikel kasar dan besar pada partikel halus; m adalah selalu > 2 . Gambar 11 memperlihatkan beberapa kurve nilai m dari peneliti terdahulu.



Gambar 11. Hubungan antara Re dengan m beberapa peneliti (Chien & Wan, 1999 dalam Arsyad Thaha, 2009)

1. Transpor Sedimen dalam Pipa

Transpor sedimen adalah perpindahan tempat bahan sedimen granuler (non kohesif) oleh air yang sedang mengalir dan gerak umum sedimen adalah searah aliran air. Faktor yang menentukan transpor sedimen adalah searah aliran air. Faktor yang menentukan transpor sedimen adalah sifat-sifat aliran air (*flow characteristic*), sifat-sifat sedimen (*sedimen characteristic*), dan pengaruh timbal balik antara sifat aliran air dan sedimen (*interaction*).



Gambar 12. Distribusi sedimen dalam pipa (a) Homogen (b) heterogen (c) Saltation (Kuhail, 2001)

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/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).

2. 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 ditranspor 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 didalam fluida,
- b. Upward diffusion dari partikel, yang disebabkan oleh suatu gradient konsentrasi partikel (banyak partikel pada elevasi terendah), yang berubah disebabkan oleh gaya gravitasi.

3. **Regime Aliran Slurry Dalam Pipa**

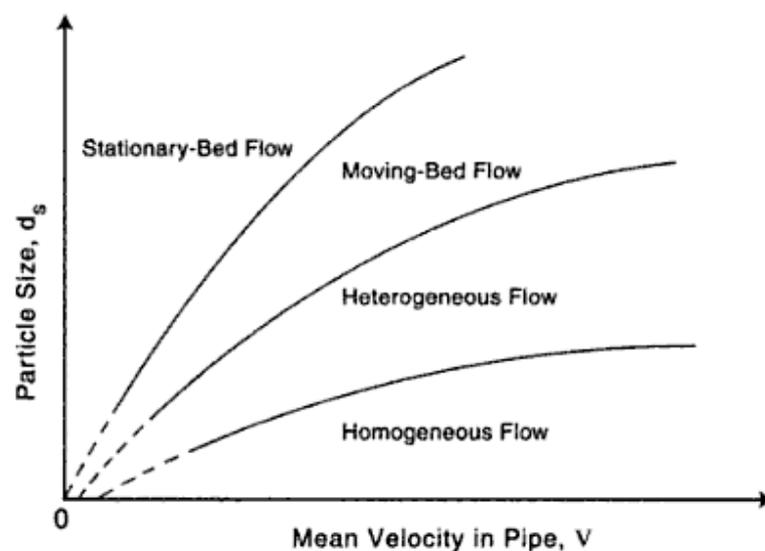
Beberapa pembagian regime aliran sedimen dalam pipa atau juga dikenal sebagai perilaku aliran *slurry*, antara lain adalah;

a. **Regime aliran slurry dalam pipa menurut Liu, 2003:**

- *Pseudohomogeneous* terjadi ketika ukuran partikel cukup kecil (relative halus) dan kecepatan aliran dalam pipa cukup tinggi (sangat turbulen).
- *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*).

- 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 *regime heterogen*). Saltasi berhubungan dengan fenomena bahwa beberapa partikel pada permukaan lapisan dasar bergerak dengan perlahan, seperti lompatan katak.
- 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.

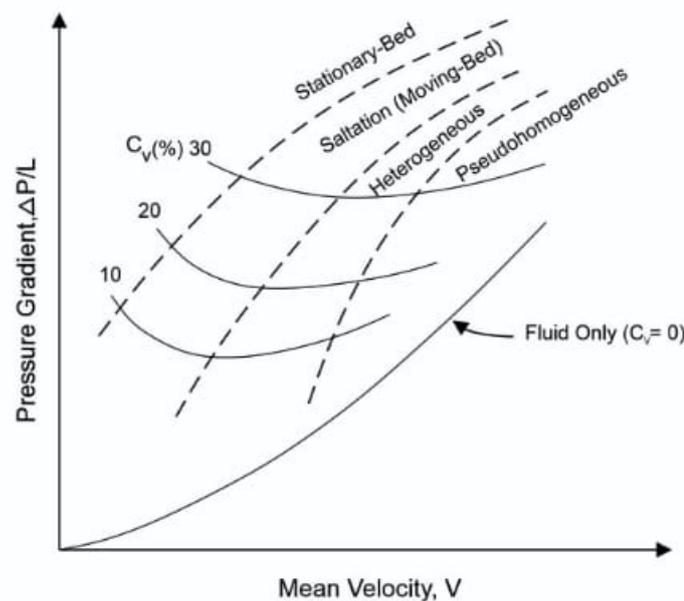


Gambar 13. *Regime* aliran *slurry* dalam pipa (Liu, 2003)

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 kondisi normal, *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 didalam 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 14. 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. Wasp dkk 1971 (Liu, 2003) mengajukan persamaan dibawah ini untuk mengklasifikasikan aliran *slurry*.

$$\log \sqrt{\frac{C_T}{C_A}} = 1,8 \frac{V_s}{K U_*} \quad (42)$$

Dimana \log adalah logaritma biasa (berbasis - 10); C_A dan C_T adalah 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 adalah *settling velocity*, yang merupakan terminal *velocity* dari sedimen yang jatuh di air (jika air adalah fluida dalam pipa), K adalah konstanta von Karman, yang berlaku untuk aliran *slurry* yang sedikit lebih kecil daripada nilai $0,4$, U_* adalah *shear velocity* yang sesuai dengan persamaan yaitu :

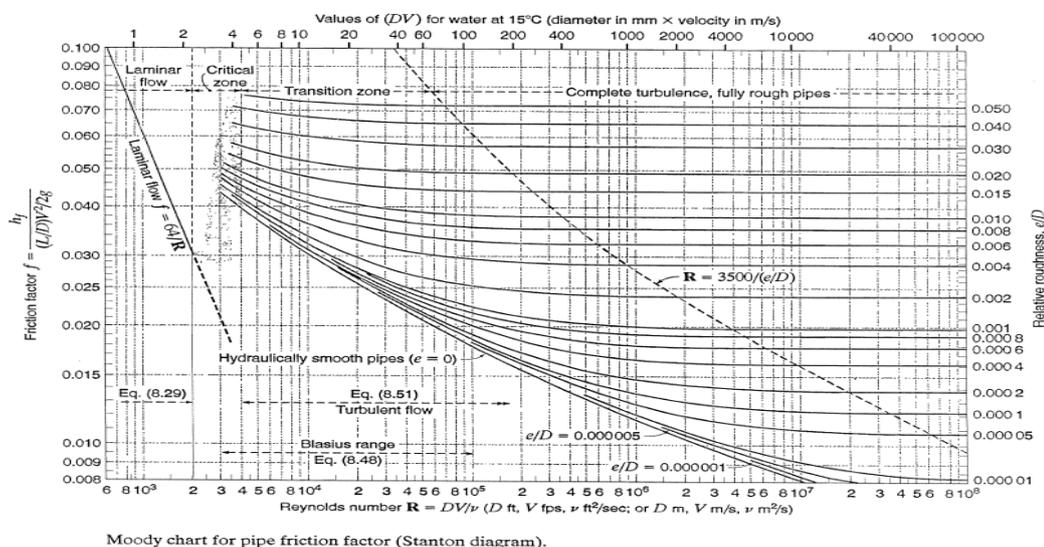
$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = v \sqrt{\frac{f}{8}} \tag{43}$$

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:

$$i_m = \sqrt{\frac{\Delta P_m}{L}} = f_m \frac{1}{D} \frac{\rho v^2}{2} \tag{44}$$

Persamaan (44) diatas 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 15).



Gambar 15. Diagram Moody (Triatmodjo, 2015)

Akan tetapi, 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):

$$\mu_m = \mu [1 + 2.5Cv + 10.05Cv^2 + 0.00273EXP(16.6Cv)] \quad (45)$$

Dengan dimana μ_m adalah viskositas campuran, μ adalah viskositas dinamik dari zat cair (air), Cv adalah konsentrasi volume dari sedimen dalam *slurry*, didefinisikan sebagai volume partikel dalam campuran dibagi dengan volume campuran (*slurry*).

$$\rho_m = \frac{\rho_s}{S + Cw - SCw} \quad (46)$$

Dengan Cw adalah konsentrasi berat dari sedimen dalam *slurry*, yang dapat dihitung dengan persamaan (47) di bawah ini:

$$Cw = \frac{S}{S + (\frac{1}{Cv}) - 1} \quad (47)$$

b. Aliran *heterogeneous*

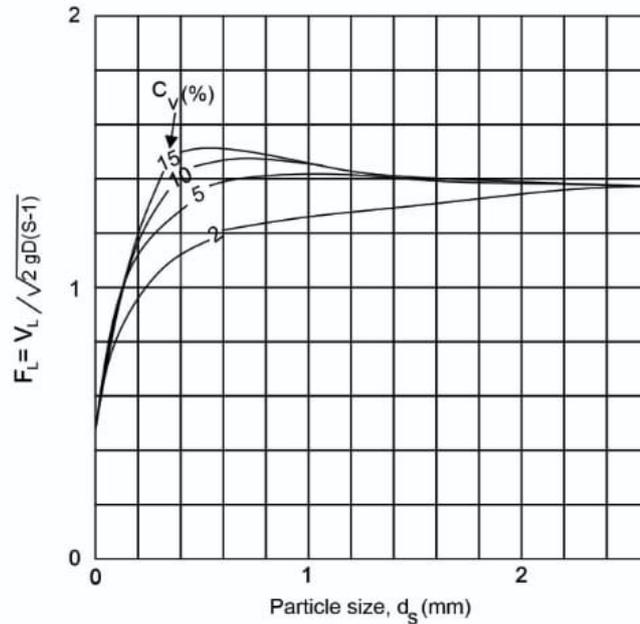
Aliran *heterogeneous* terdiri dari dua kategori yaitu *symmetric* dan *asymmetric*. *Symmetric* terjadi ketika profil konsentrasi sedimen dalam aliran adalah simetris terhadap garis tengah pipa, meskipun konsentrasinya mungkin tidak menjadi seragam atau homogen dalam arah jari-jari melintang pipa. Ini 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* adalah 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.

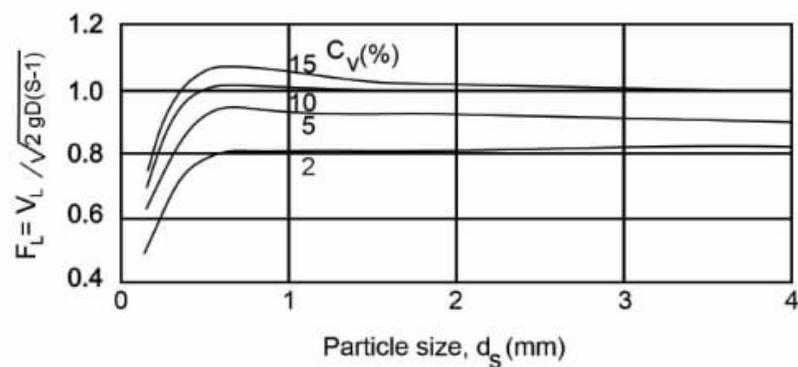
Limit deposit velocity (V_L) adalah kecepatan minimum yang dibutuhkan untuk mensuspensi suatu partikel sedimen dalam suatu pipa (Liu, 2003). Ini hubungannya dengan kecepatan untuk mentransisi dari regime dasar bergerak (*moving bed regime*) menjadi *regime* heterogen (*heterogeneous regime*). Ini juga diistilahkan sebagai *deposition velocity* (kecepatan pengendapan) atau *deposit velocity*.

Berdasarkan penelitian Durand (Liu, 2003), dihasilkan suatu grafik (Gambar 16) untuk partikel sedimen yang berukuran seragam atau mendekati ukuran seragam, dan Gambar 17 untuk partikel dengan distribusi ukuran tidak seragam. Gambar tersebut dapat digunakan untuk menentukan (V_L) dari partikel yang berdiameter (d_s), 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*). *Froude number* (F_L) ditentukan dari Gambar 16 dan 17 ini selanjutnya dapat dipakai untuk menghitung nilai V_L .

$$F_L = V_L / \sqrt{2gD(S-1)} \quad (48)$$



Gambar 16. *Limit deposit velocity* untuk partikel seragam (Liu, 2003)



Gambar 17. *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):

$$\Phi = \frac{i_m - i}{i_c v} = 67 \left(\sqrt{\frac{gD(s-1)}{v}} \right)^3 \left(\frac{V_s}{\sqrt{g(s-1)ds}} \right) \quad (49)$$

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 (49) 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.

Sebagai pembandingan dari persamaan (49), maka ditemukan suatu 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 diatas 60 % volume.

$$\frac{i_m - i_w}{C_{viw}} = 81 \left(\frac{v^2 \sqrt{C_D}}{(s-1)gD} \right)^{-1,5} \quad (50)$$

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

partikel zat padat. Pada persamaan (42), selisih $(i - iw)$ merepresentasikan suatu peningkatan dalam turunnya tekanan terhadap keberadaan zat padat dalam slurry tersebut. Efek ukuran partikel terhadap penurunan tekanan slurry adalah dihitung dengan memasukkan nilai CD.

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:

$$mh = \frac{i_m}{\rho g} = f \frac{\Delta P_m}{\rho g L} = \alpha \frac{f v^2 S_m}{2gD} + 11 \eta_s C_v (S - S_m) \frac{V_s \alpha}{V} \quad (51)$$

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:

$$\alpha = 1 - 0,4 (\log \mu_r) + 0,2 (\log \mu_r)^2 \quad (52)$$

Dimana log adalah bentuk logaritma biasa yang berbasis 10, μ_r adalah viskositas relatif *slurry*, yang dihasilkan dari viskositas *slurry*, μ dibagi dengan viskositas zat cair (air), μ .

b. Regime aliran dalam pipa menurut Breusers 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/d 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, bubur 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.

C. Analisis Dimensi

Permasalahan yang ada dalam mekanika fluida dan hidrolika dapat didekati dengan analisa dimensi, yaitu teknik matematik yang berhubungan dengan dimensi dari suatu besaran fisik yang berpengaruh pada permasalahan yang dihadapi. Apabila faktor faktor yang berpengaruh pada kondisi fisik dapat diidentifikasi, maka dengan analisis dimensi ini akan dapat ditentukan bentuk hubungannya. Pertama kali diperkirakan parameter-parameter fisik yang mempengaruhi aliran, dan kemudian parameter-parameter tersebut dikelompokkan dalam suatu bentuk tak berdimensi sehingga akhirnya dapat ditetapkan fenomena aliran yang lebih baik. Pada dasarnya analisa dimensi adalah suatu metode untuk mengurangi jumlah kerumitan variabel eksperimental yang mempengaruhi gejala fisika tertentu, dengan menggunakan semacam teknik peringkasan.

Ada dua metode pendekatan yang biasa digunakan dalam analisa dimensi, yaitu metode Rayleigh dan metode Buckingham (Triatmodjo, 2015)

1. Metode Rayleigh

Dalam metode ini suatu fungsi dari beberapa variabel diberikan dalam bentuk persamaan berpangkat yang harus mempunyai kesamaan dimensi.

2. Metode Buckingham

Bunyi teorema Buckingham adalah apabila terdapat n variable didalam persamaan kesamaan dimensi, dan jika variabel tersebut dapat dikelompokkan ke dalam dasar seperti (M-LT) maka variable tersebut dapat dikelompokkan kedalam $(n-m)$ suku bebas tak berdimensi.

Tabel 7. Dimensi dari berbagai besaran fisik

Besaran	Simbol	Dimensi	
		M-L-T	F-L-T
Besaran dasar			
Panjang	L	L	L
Massa	M	M	FL ⁻¹ T ²
Waktu	T	T	T
Gaya	F	MLT ⁻²	F
Besaran Geometri			
Luas	A	L ²	L ²
Volume	V	L ³	L ³
Besaran Kinematik			
Kecepatan	V	LT ⁻¹	LT ⁻¹
Percepatan	a	LT ⁻²	LT ⁻²
Debit	Q	L ³ T ⁻¹	L ³ T ⁻¹
Kecepatan Sudut	ω	T ⁻¹	T ⁻¹
Frekuensi	f	T ⁻¹	T ⁻¹
Sirkulasi	Γ	L ² T ⁻¹	L ² T ⁻¹
Gravitasi	g	LT ⁻²	LT ⁻²
Kekentalan Kinetik	ν	L ² T ⁻¹	L ² T ⁻¹
Besaran Dinamis			
Rapat Massa	ρ	ML ⁻³	FL ⁻⁴ T ²
Berat Jenis	γ	ML ⁻² T ⁻²	FL ⁻³
Kekentalan Dinamis	μ	ML ⁻¹ T ⁻¹	FL ⁻² T

Besaran	Simbol	Dimensi	
		M-L-T	F-L-T
Tekanan	p	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
Tegangan Permukaan	σ	MT^{-2}	FL^{-1}
Modulus Elastis	E	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
Daya	P	ML^2T^{-3}	FLT^{-1}
Kerja, Energi	w	ML^2T^{-2}	FL

D. Penelitian sebelumnya

Penelitian mengenai aliran slurry banyak dilakukan dengan metode dan parameter penelitian yang berbeda. Metode pelaksanaan dan parameter yang berbeda akan menghasilkan karakteristik aliran yang berbeda pula. Berikut beberapa penelitian terkait aliran *slurry*.

1. Miedema Sape A.

Penelitian dari Sape menggunakan model ELM dan persamaan empiris yang hasil penelitiannya kemudian dibandingkan dengan beberapa hasil eksperimen dari whitlock, Blythe dan Clift. Menggunakan pasir dengan ukuran 0,085 mm, 280 mm dan 420 mm. Dari hasil penelitiannya tidak ada perbedaan signifikan antara kecepatan pada aliran heterogen dan homogen. Gradien hidrolis antara model ELM dan Darcy-weisbach pada kecepatan tinggi menghasilkan gradien hidrolis yang sama pada air murni. Gradien hidrolis heterogen berubah karena turbulen di dekat dinding. Untuk partikel berukuran sedang dan pipa berdiameter besar terdapat celah

antar momen gradien hidrolis heterogen dan menghasilkan gradien hidrolis yang mendekati gradien hidrolis RELM.

2. Umesh Kumar a, R. Mishrab, S.N. Singha, V. Seshadri

Hasil penelitiannya menunjukkan distribusi ukuran partikel dalam aliran *slurry* mempengaruhi tekanan, semakin besar konsentrasi *slurry* maka semakin besar penurunan tekanan yang terjadi. Transportasi *slurry* dengan campuran partikel halus dan kasar membutuhkan lebih sedikit energi. Penurunan tekanan maksimum terjadi pada *fly ash*, penurunan tekanan minimum terjadi pada *bottom ash*.

3. Pavel Vlasak & Zdenek Chara (2011)

Distribusi ukuran dan konsentrasi dan ukuran partikel sedimen pasir memberikan pengaruh pada penurunan tekanan dan kecepatan aliran. Pada aliran pasir kasar membutuhkan gradien hidrolis lebih tinggi dari pada *slurry* pasir halus dan berkurang pada saat peningkatan kecepatan. Polidispersi *slurry* pasir akan mencapai gradien yang hampir sama dengan *slurry* pasir halus. Parameter penelitian yang digunakan adalah pasir dengan ukuran 0,20 mm - 1,40 mm dan debu batu 8 μm - 33 μm . Jaringan pipa loop dengan ukuran 17,5 mm dan 26,8 mm.

4. Manoj Kumar Gopaliya, D.R. Kaushal

Menganalisis permodelan aliran *slurry* pasir – air dengan metode CFD. Gradien tekanan memiliki ketergantungan yang sangat besar pada konsentrasi alir limbah. Transfer momentum antar partikel dan

dinding, tekanan granular sangat dipengaruhi oleh konsentrasi dan ukuran partikel dari *slurry*. Viskositas turbulen dari aliran *slurry* menunjukkan penurunan dengan meningkatnya konsentrasi dari semua ukuran partikel. Parameter penelitian adalah diameter pipa 263 mm, kecepatan kisaran 3,5-4,7 m/s, kisaran konsentrasi 9,95-34% dan ukuran partikel 0,165 mm, 0,29 mm dan 0,55 mm.

5. Changhee Kim, Mansoo Lee and Cheolheui Han,

Parameter penelitian yang di gunakan oleh Chanhee kim adalah membandingkan transportasi *slurry* pada pipa bundar dan persegi dengan diameter 200 mm, ukuran pasir 2,65 mm, konsentrasi pasir 5 %,15% dan 22%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gradien hidrolis air di pipa bundar lebih besar dari pada pipa persegi dan gradien hidrolis campuran pasir dan air di pipa persegi lebih besar dari pipa bundar. Ketika bilangan Reynold lebih kecil dari $0,8 \times 10^6$ efeknya lebih besar pada pipa bundar dari pada pipa persegi. *Limit deposit velocity* di saluran persegi lebih kecil dari pipa melingkar. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa pipa persegi mengangkut pasir lebih efektif dari pada pipa bundar pada kecepatan operasi yang rendah.

6. D.R. Kaushal, Kimihiko Sato, Takeshi Toyota, Katsuya Funatsu, Yuji Tomita

Parameter penelitian campuran *slurry* berupa manik kaca diameter 125 ml dan 440 ml dengan konsentrasi 50/50. Pipa Horizontal

diameter 54,9 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa profil konsentrasi partikel diukur pada konsentrasi tertinggi pada *slurry* dimana konsentrasi rata rata maksimum adalah 50% (volume) pada partikel kasar dan kecepatan aliran yang tertinggi hingga 5 m/s. Partikel gradasi kecil memiliki kehilangan gesekan yang tinggi, sedangkan partikel besar memiliki kehilangan gesekan kecil pada konsentrasi tinggi. Perubahan terlihat pada bentuk profil konsentrasi yang menunjukkan *regime* untuk partikel besar dengan kecepatan aliran yang rendah.

Tabel 8. Matriks Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti / Judul	Hasil	Parameter peneliti	Parameter penulis
1	<p>Miedema Sape A.</p> <p>The Heterogeneous to Homogeneous Transition for Slurry Flow in Pipes</p>	<p>Membandingkan hasil eksperimen dari whitlock, Blythe, Clift peneliti-peneliti lainnya dengan persamaan empiris. Tidak ada perbedaan signifikan antara kecepatan pada aliran heterogen dan homogen. Gradien hidrolis antara model ELM dan Darcy-weisbach pada kecepatan tinggi menghasilkan gradien hidrolis yang sama pada air murni.</p>	<p>Persamaan empiris, ds pasir 0,085 mm, 280 mm dan 420 mm. D pipa 0,44 m, 0,203 m.</p> <p>Parameter : gradien hidrolis (i_i dan E_{rhg}), Regime aliran <i>slurry transisi heterogeneous ke homogeneous</i></p>	<p>Eksperimental, ds pasir 0,15 mm, 0,25 mm dan 0,42 mm. D pipa 64 mm (pipa lurus dan belok).</p> <p>Parameter aliran h_f, h_f/L, Re, f, v, regime dan pers. empiris regime sedimen</p>
2.	<p>Umesh Kumar a, R. Mishrab, S.N. Singha, V. Seshadri</p> <p>Effect of particle gradation on flow characteristics of ash disposal pipelines</p>	<p>Transportasi slurry dengan campuran partikel halus dan kasar membutuhkan lebih banyak energi/ kecepatan tinggi. Penurunan tekanan maksimum terjadi pada fly ash, penurunan tekanan minimum pada bottom ash. Penurunan tekanan terbesar terjadi karena peningkatan konsentrasi.</p>	<p>Eksperimental, slurry flay ash, flay ash-bottom dan bottom ash, D pipa 150 mm panjang 160 cm. Konsentrasi 4: 1 atau kisaran 10-50% (berat), model jaringan pipa loop (pompa)</p> <p>Parameter aliran : v, h_f, C_w,</p>	<p>Eksperimental, ds 0,15 mm, 0, 25 mm dan 0,42 mm. D pipa 64 mm. konsentrasi 10 % (volume) pipa lurus dan pipa belokan.</p> <p>Parameter aliran h_f, h_f/L, Re, f, v, regime dan pers. empiris regime slurry</p>

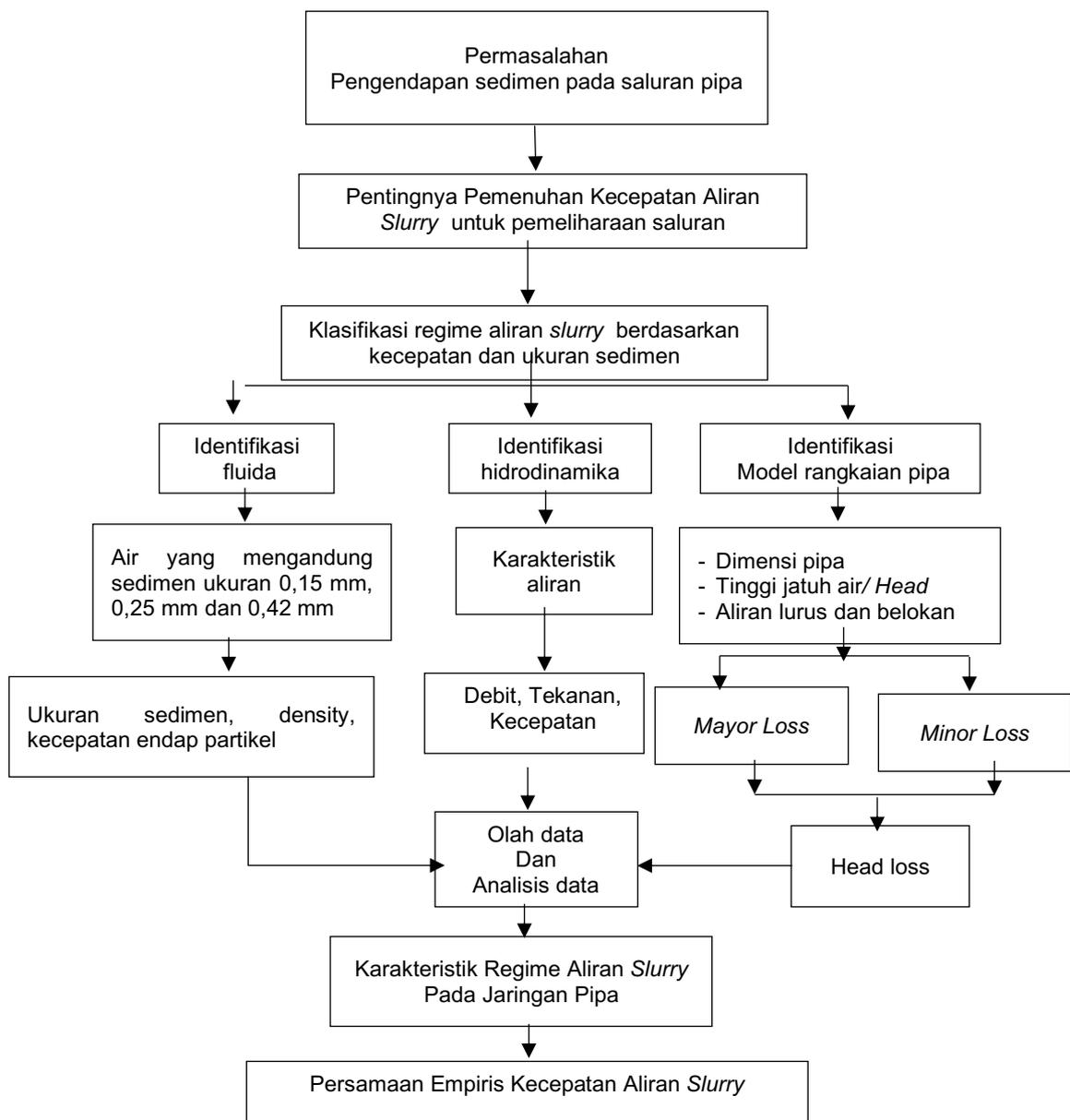
3	<p>Pavel Vlasak & Zdenek Chara (2011)</p> <p>Effect of Particle Size Distribution and Concentration on Flow Behavior of Dense Slurries,</p>	<p><i>Slurry</i> pasir kasar membutuhkan gradien hidrolis lebih tinggi dari pada slurry pasir halus dan berkurang pada saat peningkatan kecepatan. Ukuran partikel pasir berpengaruh pada kecepatan aliran.</p>	<p>Eksperimental ukuran pasir 0,20 mm - 1,40 mm (cv 6-40%), debu batu 8μm - 33 μm (26-48%) dan 17,5-26,8 mm (45%-51%). Pipa loop 17,5 mm dan 26,8 mm.</p> <p>Parameter : v_s, i_s, dan Fr,</p>	<p>Eksperimental. D pipa 64 mm. Ds 0,15 mm, 0,25 mm dan 0,42 mm.</p> <p>Parameter aliran hf, hf/L, Re, f, v, regime slurry dan pers. empiris</p>
4	<p>Changhee Kim, Mansoo Lee and Cheolheui Han,</p> <p>Hydraulic transport of sand-water mixtures in pipelines Part I. Experiment.</p>	<p>Ketika kecepatan rata-rata lebih besar dari kecepatan kritis, gradien hidrolis campuran pasir-air pada pipa persegi lebih kecil dari pipa lingkaran. Kecepatan batas deposit saluran persegi lebih kecil dari pipa lingkaran. Saluran persegi mengangkut pasir lebih efektif dari pada pipa bundar pada kecepatan aliran kecil (kec. operasi)</p>	<p>Eksperimental pipa bundar dan persegi. Diameter pasir 2,65 dan 0,54 mm. D pipa 200 mm. Konsentrasi pasir 5 %, 15% dan 22%.</p> <p>Parameter : Re, i_m, Cv, Vdl (deposit limit velocity)</p>	<p>Eksperimental, pipa lurus dan belokan. D pipa 64 mm, ds pasir 0,15 mm, d 0,25 mm dan 0,42 mm, Cv 10 %.</p> <p>Parameter : hf, hf/L, Re, f, v, e, regime slurry dan pers. empiris</p>
5	<p>Manoj Kumar Gopaliya, D.R. Kaushal</p> <p>Modeling of sand-water slurry flow through horizontal pipe using CFD</p>	<p>Transfer momentum antara partikel dan dinding akibat tekanan di pengaruhi oleh konsentrasi, ukuran partikel dan viskositas.</p>	<p>Metode CFD/ model mathematical. D pipa 263 mm, ds 0,165 mm, 0,29 mm dan 0, 55 mm. kecepatan 3,5 - 4,7 m/s,</p>	<p>Eksperimental. D pipa 64 mm, ds 0,15 mm, 0,25 mm dan 0,42 mm. konsentrasi 10 %.</p>

			kisaran konsentrasi 9,95-34%, Parameter ; Cv, v, f, p,	Parameter : hf, hf/L, Re, f, v, regime slurry dan pers empiris
6	D.R. Kaushal, Kimihiko Sato, Takeshi Toyota, Katsuya Funatsu, Yuji Tomita Effect of particle size distribution on pressure drop and concentration profile in pipeline flow of highly concentrated slurry	Partikel gradasi kecil memiliki kehilangan gesekan yang tinggi, sedangkan partikel besar memiliki kehilangan gesekan kecil pada konsentrasi tinggi. Terjadi perubahan regime sliding bed untuk partikel yang besar dengan kecepatan aliran yang rendah.	Eksperimental. Pipa Pipa loop, D pipa 54,9 mm. Campuran slurry berupa manik kaca diameter 125 μ m dan 440 μ m dengan konsentrasi 50/50. Parameter ; v, P, cv, ,y,	Eksperimental. D pipa 64 mm. ds pasir 0,15 mm, 0,25 mm dan 0,42 mm. Cv 10 %. Parameter : hf, hf/L, Re, f, v, regime slurry dan pers. empiris
7	Xiong Ting, Zhang Xinzhuo, Sape A. Miedema, Chen Xiuhan (2019) Study of the characteristics of the flow regimes and dynamics of coarse particles in pipeline transportation.	Proses transisi regime fixed bed flow, sliding bed dan heterogeneous flow pada variasi kecepatan 2 m/s, 5 m/s, 8 m/s dan 10 m/s.	Model Mathematical (CFD-DEM). D pipa 0,152 m. cv 10% Parameter ; v, cv, gradien hidrolik , waktu (t) force	Eksperimental. D pipa 64 mm. ds pasir 0,15 mm, 0,25 mm dan 0,42 mm. Cv 10 %. Parameter : hf, hf/L, Re, f, v, regime slurry dan pers. empiris
8	Carlos, Jessica, Juan, 2017 Criteria of minimum shear stress vs. minimum	Mengevaluasi metodologi untuk mencegah sedimentasi di pipa Tiga metodologi telah dibandingkan: kriteria tradisional, persamaan Macke (1982) dan metodologi tensile strength (ASCE).	Studi literatur, Parameter ; kemiringan/Gradien hidrolik, Q, D elevasi	Eksperimental. D pipa 64 mm. ds pasir 0,15 mm, 0,25 mm dan 0,42 mm. Cv 10 %.

	velocity for self- cleaning sewer pipes design			Parameter : hf, hf/L, Re, f, v, regime slurry dan pers. empiris
9	Robert Banasiak (2008) Hydraulic performance of sewer pipes with deposited sediments	Bentuk endapan sedimen harus dianalisis untuk mengetahui sifat dan perilaku sedimen yang muncul di pipa pembuangan. Analisis non dimensi dari pengaruh endapan sedimen pada kapasitas saluran. Peningkatan kedalaman sedimen (2 sampai 10%) menghasilkan pengurangan kapasitas saluran sebesar 10-20%.	Saluran semi circular flume D=0,4 m). Partikel cohesive $d_{50} = 0,19$ mm dan campuran pasir dengan tanah liat (3-10% berat tanah liat) Parameter; Q, U, D,	Eksperimental. Dpipa 64 mm. ds pasir 0,15 mm, 0,25 mm dan 0,42 mm. Cv 10 %. Parameter : hf, hf/L, Re, f, v, regime slurry dan pers. empiris
10	Ravelet, F., Bakir, F., Khelladi, S., & Rey, R. (2013). Experimental study of hydraulic transport of large particles in horizontal pipes.	Ukuran butir dan massa jenis berpengaruh pada transisi regime stationary bed dan dispersed flow. Regime didasarkan atas pengukuran tekanan differensial dan visualisasi.	Eksperimental Loop pipa. Dpipa 100 mm, diameter manik manik kaca 5,10,16 mm, Parameter ; I, P, Φ , λ	Eksperimental. Dpipa 64 mm. ds pasir 0,15 mm, 0,25 mm dan 0,42 mm. Cv 10 %. Parameter : hf, hf/L, Re, f, v, regime slurry dan pers. empiris

E. Kerangka Pikir Penelitian

Pelaksanaan penelitian dengan model jaringan pipa memiliki tahapan mekanisme penelitian, sebagai berikut;



Gambar 18. Kerangka Pikir Penelitian

F. Hipotesis

Dalam desain aliran yang mengandung sedimen atau *slurry* pada pipa, aspek yang paling penting adalah bagaimana memprediksi batas kecepatan minimum pengendapan dan kehilangan energi (*head loss*) terhadap kecepatan operasi agar pipa terhindar dari pengendapan.

Berdasarkan landasan teori dan penelitian terdahulu yang telah disusun pada bab ini, maka hipotesa sebagai suatu teori yang akan dibuktikan bahwa parameter yang berpengaruh terhadap *regime* aliran *slurry* adalah kecepatan dan ukuran butiran sedimen. Kecepatan aliran *slurry* dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$V = f (\rho_s, \rho_w, ds, D, g, \Delta h, L, \omega)$$

Sedangkan kecepatan endap partikel dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\omega = f (\rho_s, \rho_w, ds, g, \omega_0)$$

Dimana V adalah kecepatan *slurry*, ρ_s adalah density sedimen, ρ_w adalah density water, D adalah diameter pipa, Δh adalah gradien hidrolis , L adalah panjang pipa, ds adalah ukuran sedimen, ω adalah kecepatan endap partikel gabungan, ω_0 adalah kecepatan endap partikel tunggal, g adalah gravitasi.