

UJIAN TUTUP DISERTASI

**SISTEM FLUIDISASI HYBRID
UNTUK REKAYASA PEMELIHARAAN ALUR**

*The Hybrid Fluidization System
for Channel Maintenance Engineering*

RUDI AZIS

D013191009



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

PENGAJUAN DISERTASI

**SISTEM FLUIDISASI HYBRID
UNTUK REKAYASA PEMELIHARAAN ALUR**

Disertasi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor
Program Studi Ilmu Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh



**RUDI AZIS
D013191009**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

DISERTASI
SISTEM FLUIDISASI HYBRID UNTUK REKAYASA
PEMELIHARAAN ALUR

RUDI AZIS
D013191009

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk
dalam rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Ilmu Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
pada tanggal 04 September 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Promotor



Prof. Dr. Eng. Ir. Farouk Maricar, MT., PU-SDA
NIP. 196410201991031002

Co-Promotor



Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT., IPM
NIP. 19601231986091001

Co-Promotor



Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, ST., MT., IPU
NIP. 198104252008121001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



**Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT.,
IPM, ASEAN.Eng**
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
S3 Ilmu Teknik Sipil



Prof. Dr. Eng. Ir. Rita Irmawaty, ST., MT
NIP. 197206192000122001

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Rudi Azis
Nomor Mahasiswa : D013191009
Program Studi : S3 Ilmu Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul **“Sistem Fluidisasi Hybrid Untuk Reayasa Pemeliharaan Alur”** adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr.Eng. Ir. Farouk Maricar, MT., PU.SDA sebagai Promotor, Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT., IPM dan Dr.Eng. Ir. Bambang Bakri, ST., MT., IPU sebagai co-promotor-1 dan co-promotor-2). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini.

Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Prosiding (Rudi Azis, Farouk maricar, Muhammad Arsyad Thaha, Bambang Bakri, Lecturer Notes in Civil Engineering 371, Halaman 97-106, dan DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4045-5_8) sebagai artikel dengan judul **“Overview of Critical Vortex on Horizontal Jet Fluidization for Sediment Flushing Systems”** dan di Jurnal (Rudi Azis, Farouk maricar, Muhammad Arsyad Thaha, Bambang Bakri, Volume 10 No 07, Halaman 2275 - 2292, dan DOI : <http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-07-013>) sebagai artikel dengan judul **“The Hybrid System of Fluidization and Sediment Flushing for Maintenance Dredging Technique”**.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 28 Agustus 2024

Yang menyatakan



Rudi Azis

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas rahmatnya sehingga disertasi ini dapat diselesaikan.

Gagasan utama Sistem Hybrid Fluidisasi Untuk Rekayasa Pemeliharaan Alur adalah pengembangan system fluidisasi yang telah diteliti dan diaplikasikan sebelumnya sebagai metode pengerukan (dredging) sederhana dalam menjaga alur agar tidak terjadi penyumbatan akibat sedimentasi. Selain itu system fluidisasi hybrid merupakan penelitian yang menggabungkan dua fungsi (fluidisasi dan flushing) sekaligus pada pipa fluidisasi sebagai kelanjutan dari system fluidisasi yang kurang efektif pada alur yang memiliki aliran permukaan yang kecil sehingga sulit untuk menggelontorkan sedimen pasca terfluidisasi.

Bukan hal yang mudah untuk mewujudkan gagasan-gagasan tersebut dalam sebuah susunan disertasi, berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka disertasi ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terimakasih kepada :

1. Prof. Dr. Eng. Ir. Farouk Maricar, MT., PU.SDA sebagai promotor, Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT., IPM sebagai co-promotor-1, dan Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, ST., MT., IPU sebagai co-promotor-2.
2. Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Saleh Pallu, M.Eng., Prof. Dr. Ir. Mary Selintung, M.Sc., Dr.Eng. Ir. Hj. Rita Tahir Lopa, M.T., Dr. Ir. Riswal Karamma, ST., MT., IPM., ASEAN. Eng., selaku tim penguji internal.
3. Prof. Ir. Radiana Triadmadja, Ph.D., selaku penguji eksternal.
4. Rektor Universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program doktor serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.
5. Bapak/ibu Kepala Laboratorium Hidrolika Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas kesempatan untuk menggunakan fasilitas dan peralatan di Laboratorium Hidrolika.
6. Kepada Kementerian Keuangan Republik Indonesia dan Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, saya mengucapkan terima kasih atas

beasiswa LPDP yang diberikan selama menempuh program pendidikan Doktor.

Akhirnya, kepada kedua orang tua tercinta saya mengucapkan terima kasih banyak dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan memotivasi saya selama menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada Istri, anak-anak ku, Adik/saudara, dan teman-teman atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.

Penulis

Rudi Azis

ABSTRAK

RUDI AZIS. Sistem Fluidisasi Hybrid untuk Rekayasa Pemeliharaan Alur (dibimbing oleh **Farouk Maricar, Muhammad Arsyad Thaha, Bambang Bakri**)

Penelitian penggabungan fungsi pada satu pipa fluidisasi dapat menjadi solusi bagi proses fluidisasi yang kurang efektif pada alur yang tidak memiliki aliran permukaan terutama pada alur yang mengalami sedimentasi akibat pengaruh berkurangnya debit aliran permukaan. Tujuan penelitian ini secara umum yaitu menemukan metode penggelontoran sedimen melalui sistem fluidisasi hybrid yang menggabungkan metode fluidisasi dan flushing sedimen pada satu pipa perforasi. Penelitian ini dilakukan dengan pengujian model fisik di laboratorium berupa eksperimen fluidisasi dan flushing dengan skala 1:1 pada flume yang dioperasikan dengan pompa fluidisasi berkapasitas 14 liter/detik. Dengan menggunakan analisis tak berdimensi dihasilkan parameter pipa fluidisasi ($a-Df/a$), parameter sedimen ($(1-n)db/da+db$) dan parameter aliran ($V-Vt$) sebagai parameter yang menghasilkan volume konsentrasi sedimen (Vs/Vw). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggelontoran sedimen dengan pipa fluidisasi menghasilkan persamaan hubungan volume sedimen tak berdimensi (Vs/Vw) dan waktu penggelontoran (t) yang efektif. Temuan empirik penelitian ini adalah dihasilkannya persamaan untuk mengkuantifikasi volume sedimen tergelontor dengan persamaan $Vs = 4.05Vw \left(e^{-38.403 \left(\frac{a-df}{a} \right)} \right) \left(\frac{(1-n)db}{da+db} \right)^{11.071} \left(\frac{V-Vt}{V} \right)^{3.345}$. Hubungan persamaan (Vs) dan (t) menghasilkan persamaan empirik $Vs = \frac{0.0092}{(t)^{0.098}}$ yang memberikan suatu batasan bahwa durasi penggelontoran terbaik yakni awal flushing dimulai setelah fluidisasi antara detik ke 55 – 72 (kisaran 15 – 20 detik). Semakin lama durasi penggelontoran volume sedimen berkurang karena saat durasi ke 89 hingga 97 detik partikel sedimen yang teragitasi sebelumnya telah mengendap.

Kata Kunci : Fluidisasi Hibrid, Flushing Sedimen, Volume Sedimen, Waktu Penggelontoran.

ABSTRACT

RUDI AZIS. The Hybrid Fluidization System For Channel Maintenance Engineering (supervised by **Farouk Maricar, Muhammad Arsyad Thaha, Bambang Bakri**)

The combination of functions in one fluidization pipeline may provide a solution to the less effective fluidization process in grooves without surface flow, especially in grooves where sedimentation occurs because of the influence of decreasing flow velocity. This study aims to develop a model for a sediment pouring system using a hybrid fluidization system that combines fluidization and flushing methods for sediment on one perforation pipe. The research was conducted by testing physical models in the laboratory with hybrid fluidization testing on a 1:1 scale on a flume operated by a fluidization pump with a capacity of 14 liters/second. Dimensionless analysis was used to generate fluidization pipe parameters ($a-Df/a$), sediment parameters ($((1-n)db/da db)$) and flow parameters ($(V-Vt)$) were produced as parameters that produced sediment concentration volume (Vs/Vw). According to the results, fluidization pipes used for sediment pouring create an efficient relationship model between dimensionless sediment volume (Vs/Vw) and pouring time (t). The empirical finding of this study is that an equation can be used to quantify the volume of sediment deposited through the equation. $Vs = 4.05Vw \left(e^{-38.403 \left(\frac{a-df}{a} \right)} \right) \left(\frac{(1-n)db}{da+db} \right)^{11.071} \left(\frac{V-Vt}{V} \right)^{3.345}$ The relationship between equations (Vs) and (t) creates an empirical equation $Vs = \frac{0.0092}{(t)^{0.098}}$ That establishes a constraint on the optimal flushing duration, specifically the beginning of flushing begins after fluidization, which ranges from 55 to 72 seconds (ranges from 15 to 20 seconds). If the sediment pouring is longer, the sediment volume will decrease less because the previously agitated particles settle during 89 to 97 seconds.

Keywords : The Hybrid fluidization , Sediment Flushing, Sediment Volume, Flushing Time

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN JUDUL	ii
PERSETUJUAN DISERTASI	iii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian.....	7
1.4 Batasan Masalah.....	7
1.5 Manfaat Penelitian.....	7
1.6 Ruang Lingkup Penelitian	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Pemeliharaan Alur	9
2.2 Teknologi Fluidisasi	12
2.3 Metode Fluidisasi Dengan Pipa Hisap	13
2.4 Fluidisasi Dengan Pipa Hisap Untuk Pemeliharaan Alur.....	14
2.5 Aliran Sedimen (Slurry) Melalui Pipa Perforasi	16
2.6 Aliran Pada Media Berpori.....	19
2.7 Aliran Sedimen Pada Pipa	21
2.8 Head loss dalam Pengaliran Slurry Melalui Pipa.....	22
2.9 Gaya-gaya Pada Aliran Sedimen Melalui Pipa	25
2.9.1 Gaya pada partikel untuk aliran dua phase dalam pipa.....	27
2.10 Analisis Dimensi	28
BAB III KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS PENELITIAN	30

3.1 Kerangka Konseptual	30
3.2 Hipotesis Penelitian.....	32
3.3 Metodologi Penelitian	33
BAB IV PARAMETER BERPENGARUH PADA ALIRAN HISAP MELALUI LUBANG PERFORASI PADA SISTEM FLUIDISASI HYBRID	38
4.1 Abstrak	38
4.2 Pendahuluan	38
4.3 Metodologi	41
4.3.1 Persiapan Simulasi Fisik	41
4.3.2 Desain Pengujian Fisik 2 Dimensi	41
4.4 Hasil dan Pembahasan.....	42
4.4.1 Hubungan bentuk partikel sedimen (<i>particle shape</i>) dan kecepatan aliran slurry dalam pipa fluidisasi	42
4.4.2 Mekanisme Hisap sedimen melalui Lubang Perforasi.....	43
4.5 Bentuk zona keruntuhan sedimen Pasca terfluidisasi.....	45
4.6 Koefisien Sharing (Cs) Pada Lubang Perforasi.....	47
4.7 Penggelontoran Sedimen.....	48
4.8 Kesimpulan.....	49
4.9 Daftar Pustaka	50
BAB V KAJIAN PERKEMBANGAN DIMENSI PUSARAN KRITIS PADA METODE FLUIDISASI	53
5.1 Abstrak	53
5.2 Pendahuluan	53
5.3 Kebutuhan tekanan dan Kecepatan fluidisasi.....	54
5.4 Metode Suction Pipe pada sistem bypassing sedimen	56
5.5 Hasil dan Pembahasan.....	56
5.6 Perkembangan pusaran awal sebagai mekanisme darcy	57
5.7 Perkembangan pusaran kritis sebagai Awal penerapan metode hisap.....	59
5.8 Distribusi Tekanan.....	60
5.9 Gradien Hidraulik (dh/z) untuk fase penggelontoran.....	63
5.10 Kesimpulan.....	70
5.11 Daftar Pustaka	70
BAB VI PENGGELONTORAN SEDIMEN MELALUI SISTEM HYBRID FLUIDISASI DAN PEMBILASAN SEDIMEN	72
6.1 Abstrak	72
6.2 Pendahuluan	72

6.3 Karakteristik Sedimen	73
6.4 Kecepatan Endap Partikel Sedimen	76
6.5 Rekapitulasi Hasil Eksperimen	81
6.5.1 Parameter Pipa Perforasi terhadap Debit sedimen tergelontor.....	81
6.5.2 Pembahasan Hubungan Tinggi Pompa Hisap (HS) terhadap volume sedimen tergelontor	88
6.6 Kondisi Aliran Pada Sistem Hybrid Fluidisasi dan Flushing Sedimen	94
6.7 Aliran dan Tekanan melalui lubang Perforasi	95
6.8 Tekanan Fluidisasi hybrid.....	97
6.9 Parameter Lubang Perforasi (D_f , a) dan debit penggelontoran sedimen (Q)	99
6.10 Kinerja Parameter Fisik Lubang (ζ)	101
6.11 Kecepatan Optimum pada Sistem Hybrid Fluidisasi dan Flushing Sedimen	103
6.12 Parameter Aliran pada Transport sedimen melalui Pipa Perforasi	108
6.13 Model Penggelontoran Sedimen dengan Parameter (a - D_f/a), $((1-n)db/da+db)$ dan $(V-V_t/V)$	114
6.14 Parameter bebas.....	115
6.15 Parameter model yang dihasilkan.....	116
6.16 Persamaan Sistem Hybrid Fluidisasi dan Flushing sedimen.....	116
6.17 Persamaan Volume Sedimen tergelontor (V_s).....	117
6.17.1 Hubungan Parameter fisik Lubang perforasi terhadap aliran sedimen	124
6.18 Efektifitas Penggelontoran	126
6.19 Kesimpulan.....	128
6.20 Daftar Pustaka	128
BAB VII PEMBAHASAN UMUM.....	131
7.1 Ringkasan topik penelitian	131
7.2 Temuan Empirik	136
7.3 Profil alur terbentuk berdasarkan observasi	138
7.4 Pengembangan Model Hybrid Fluidisasi dan Flushing Sedimen untuk Penggunaan Lapangan.....	141
7.5 Kebaruan (Novelty).....	143

BAB VIII KESIMPULAN DAN SARAN.....	144
8.1 Kesimpulan.....	144
8.2 Saran.....	144
DAFTAR PUSTAKA	146

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Penggunaan sistem sand bypassing untuk berbagai jenis littoral barrier (US Army CERC, 1984 dalam (pratikno et.all 2014)	11
Gambar 2. Sketsa fluidisasi diusulkan oleh Weisman dan Lennon (1995)	14
Gambar 3. Sketsa fluidisasi yang diusulkan oleh Kelley (1977).....	15
Gambar 4. Pipa Fluidisasi dengan penambahan Pipa Hisap Slurry (Anas, Andi Bunga Tongeng;Latif, 2018).....	15
Gambar 5. skema pipa dengan banyak outlet (Liu et al., 2017).....	16
Gambar 6. Variabel yang berlaku pada variasi massa aliran (Liu et al., 2017)..	17
Gambar 7. Aliran melalui pipa melalui perubahan dimensi (<i>K.C. Wilson, G.R. Addie, A.Sellgren, 2006</i>)	19
Gambar 8. Proses endap partikel pada kecepatan terminal (Wilson et al., 1992)23	
Gambar 9. Efek angka Reynold pada aliran yang melewati partikel (<i>F. White, 2006</i>)	26
Gambar 10. Bentuk gerakan partikel fluida dalam pipa (<i>Zandi, 1971</i>).....	27
Gambar 11. Kerangka konseptual Penelitian.....	30
Gambar 12. Skema Peralatan Pengujian di Laboratorium	33
Gambar 13. Gambar alur penelitian	36
Gambar 14. Variasi ukuran pasir sedimen pada uji sieve analisis	43
Gambar 15. Profil kecepatan aliran dengan dan tanpa lubang hisap (sumber : Noguchi dan Fujita, 2006)	43
Gambar 16. Gerakan partikel sedimen disekitar lubang hisap (sumber : Noguci dan Fujita, 2006).....	44
Gambar 17. Kehilangan Energi pada lubang perforasi (Sumber : Azis 2021) ...	44
Gambar 18. Geometrik permukaan terfluidisasi.....	46
Gambar 19. Skema Garis energi pada pipa lubang Perforasi (sumber : Thaha 2006)	47
Gambar 20. Layout sistem fluidisasi dua arah (hybrid fluidization) pada Muara dan titik pembuangan sedimen (sumber : Azis 2021	49
Gambar 21. Variasi Tekanan dan Panjang dasar alur terfluidisasi (Kelley, 1977)	54

Gambar 22. Profil hubungan kecepatan terhadap Pressure drop untuk fase pra fluidisasi, awal fluidisasi dan full fluidisasi.....	55
Gambar 23. Self-Sinking sedimen with holes (Noguchi H. dkk).....	56
Gambar 24. Pipa Perforasi dengan lubang horizontal tunggal	57
Gambar 25. Pembentukan zona pusaran dari pra – pasca fluidisasi (pada db 20 cm)	58
Gambar 26. Zona fluidisasi pada db 20 cm	58
Gambar 27. Titik pengukuran distribusi tekanan fluidisasi pada lapisan sedimen	59
Gambar 28. Perkembangan zona pusaran dan zona keruntuhan sedimen pada tahap fluidisasi untuk db 45 cm pipa perforasi jet horisontal tunggal	60
Gambar 29. Titik pengukuran distribusi tekanan fluidisasi pada lapisan sedimen	61
Gambar 30. Distribusi tekanan pada pasir halus untuk jet tunggal	62
Gambar 31. Distribusi tekanan sedimen pada 3 fase fluidisasi	63
Gambar 32. Distribusi Tekanan Tahap Pra fluidisasi pada db 40 cm (lubang tunggal)	64
Gambar 33. Distribusi Tekanan tahap Fluidisasi awal pada db 40 cm (lubang tunggal)	65
Gambar 34. Distribusi Tekanan tahap Fluidisasi Lanjutan pada db 40 cm (lubang tunggal)	66
Gambar 35. Skematik zona fluidisasi dan keruntuhan sedimen terhadap sebaran distribusi tekanan	67
Gambar 36. Grafik pusaran kritis (z_c) pra-pasca fluidisasi pada jet horizontal tunggal	68
Gambar 37. Perkembangan dimensi pusaran arah horizontal (x_p) pada fluidisasi jet horizontal tunggal (a) dan jet horizontal seri (b)	68
Gambar 38. Perbandingan Tinggi pusaran Jet Vertikal tunggal dan Jet Horisontal Tunggal pada db 45 cm	69
Gambar 39. Diagram Sampel 1 (Pasir Kasar)	74
Gambar 40. Diagram Sampel 2 (Pasir sedang)	74

Gambar 41. Diagram Sample 3 (Pasir Halus).....	75
Gambar 42. Perbandingan Distribusi Ukuran Butiran sampel sedimen pasir Sungai jeneberang.....	75
Gambar 43. Grafik hubungan kadar air dan Berat isi sedimen Sampel 1 (pasir Kasar).....	75
Gambar 44. Grafik hubungan kadar air dan Berat isi sedimen Sampel 2 (pasir sedang).....	76
Gambar 45. Grafik hubungan kadar air dan Berat isi sedimen Sampel 3 (pasir halus).....	76
Gambar 46. Percobaan Kecepatan Endap partikel	77
Gambar 47. Skema kecepatan endap partikel dalam lintasan vertical.....	78
Gambar 48. Gaya-gaya yang bekerja pada partikel dalam air.....	79
Gambar 49. Perubahan arah zona pusaran oleh domain tak terbatas	80
Gambar 50. Grafik hubungan Spasi lubang perforasi/fluidisasi terhadap volume sedimen tergelontor pada pasir halus db 20 cm	84
Gambar 51. Perbedaan tren volume sedimen pada pasir halus dan sedang.....	85
Gambar 52. Grafik percobaan hybrid fluidisasi pada pasir sedang db 30 cm	85
Gambar 53. Grafik percobaan hybrid fluidisasi pasir kasar db 30 cm	86
Gambar 54. Grafik Percobaan Hybrid Fluidisasi pada pasir sedang.....	87
Gambar 55. Grafik Percobaan hybrid Fluidisasi pada Pasir Kasar	87
Gambar 56. Posisi Pompa Hisap pada Peralatan Percobaan	88
Gambar 57. Grafik hubungan Tinggi Pompa Hisap (HS) terhadap volume sedimen tergelontor pada percobaan sedimen halus.....	91
Gambar 58. Grafik hubungan Tinggi Pompa Hisap (HS) terhadap volume sedimen tergelontor pada percobaan sedimen sedang	92
Gambar 59. Grafik hubungan Tinggi Pompa Hisap (HS) terhadap volume sedimen tergelontor pada percobaan sedimen kasar.....	93
Gambar 60. Perbandingan Hubungan tinggi pompa terhadap debit antara penelitian Rasyid et.all 2023 terhadap percobaan peneliti	93
Gambar 61. Skematik aliran sedimen melalui lubang fluidisasi	95
Gambar 62. Tekanan hisap (hs) dengan kecepatan aliran pada pipa fluidisasi...	96

Gambar 63. Hubungan kecepatan (V) dengan tekanan pada pipa fluidisasi selama tahap flushing (Persamaan 36).....	97
Gambar 64. Hubungan tekanan pada pipa fluidisasi dengan debit hybrid	97
Gambar 65. Hubungan tekanan pada pipa fluidisasi dengan debit hybrid fluidisasi dan hisap pada pipa fluidisasi (Percobaan pada pasir halus db 20 cm, $\alpha = 6$ cm).....	99
Gambar 66. Hubungan Df/a dan $Q/K.db$	100
Gambar 67. Hubungan ζ dengan v_s	102
Gambar 68. Hubungan v_t/v dengan Df/a	103
Gambar 69. Hubungan fD (Darcy Friction Factor) Persamaan 21 dengan fD persamaan 39	105
Gambar 70. Skema aliran pada pipa fluidisasi di laboratorium.....	106
Gambar 71. Hubungan k/d dengan koefisien gesek Darcy (fD).....	106
Gambar 72. Hubungan k/D dengan Re	107
Gambar 73. Hubungan nilai Froude pada berbagai parameter, (a) terhadap parameter volume sedimen relatif (V_s/V_w), (b) terhadap jarak lubang (a), (c) dan (d) terhadap head pompa (HS) pada sedimen halus d50 (0.211).....	109
Gambar 74. Hubungan Froud Partikel terhadap Volume sedimen relatif (V_s/V_w)	111
Gambar 75. Hubungan Df/a dengan F_{rp}	112
Gambar 76. Hubungan $(1-n)db/da+db$ dan F_{rp}	114
Gambar 77. Perbandingan V_s/V_w eksperimen dan V_s/V_w persamaan 52.....	118
Gambar 78. Hubungan $(a-Df/a)$ dengan (V_s/V_w)	119
Gambar 79. Hubungan parameter tak berdimensi (V_s/V_w) dengan $e^{k_1(a-Df/a)}$. 120	
Gambar 80. Hubungan $((1-n)db/da+db)$ dengan (V_s/V_w)	121
Gambar 81. Hubungan $((1-n)db/da+db)^{k_2}$ dengan V_s/V_w	121
Gambar 82. Volume sedimen tergelontor pada hasil simulasi dengan variasi head pompa hisap	122
Gambar 83. Hubungan $(V-V_t/V)$ dengan V_s/V_w	123
Gambar 84. Hubungan $(V-V_t/V)^{k_3}$ dengan V_s/V_w	124
Gambar 85. Hubungan $(e^{k_1(a-Df/a)})$ dengan $(V-V_t/V)$	125

Gambar 86. Hubungan invers ($e^{k_1(a-Df/a)}$) dengan $(V-V_t/V)$	125
Gambar 87. Hubungan Debit (Q) dengan waktu penggelontoran (t)	127
Gambar 88. Hubungan volume sedimen (m ³) dengan waktu penggelontoran (detik).....	127
Gambar 89. Hubungan waktu penggelontoran (t) dengan volume sedimen (Vs)	137
Gambar 90. Zona terfluidisasi (zona potensi sedimen terhisap melalui lubang perforasi).....	138
Gambar 91. (a) Geometri lapisan percobaan MHSP, (b) dan (c) Geometri lapisan percobaan Fluidisasi Hibrida	139
Gambar 92. Perbandingan hasil eksperimen tekanan (m) terhadap waktu pembilasan (t(s)) dan teknik MHSP.....	140
Gambar 93. Sketsa sistem hybrid fluidisasi dan flushing sedimen	141

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Sistem Dimensi.....	28
Tabel 2. Distribusi Tekanan pada tahap Pra Fluidisasi untuk sedimen db 40 cm	64
Tabel 3. Distribusi Tekanan pada tahap Fluidisasi awal untuk sedimen db 40 cm	65
Tabel 4. Distribusi Tekanan pada tahap Fluidisasi Lanjutan untuk sedimen db 40 cm.....	65
Tabel 5. Karakteristik Sedimen	73
Tabel 6. Rerata waktu pengendapan partikel sedimen (Pasir Jeneberang).....	77
Tabel 7. Debit Sedimen dan volume Sedimen tergelontor melalui pipa fluidisasi	81
Tabel 8. Tinggi Pompa Hisap dan volume Sedimen tergelontor melalui pipa fluidisasi.....	89

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabel Kecepatan Aliran dan faktor koefisien gesek.....	152
Lampiran 2. Data Validasi untuk Debit (Q).....	154
Lampiran 3. Tabel Parameter Tak Berdimensi	156

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang / Singkatan	Arti dan Keterangan
α	Jarak lubang perforasi
B	Lebar dasar alur
C	Konsentrasi
CF	Fluidisasi Penuh
C_D	Koefisien Seret (<i>drag coefficient</i>)
C_d	Koefisien debit
C_f	Koefisien terfluidisasi
C_{mf}	Konsentrasi maksimum fluidisasi
C_s	Koefisien sharing
C_v	Koefisien Kecepatan
D	Diameter Pipa
D_f	Diameter lubang perforasi
d	Diameter butiran sedimen
d_{50}	Diameter butiran tengah sedimen
d_b	Ketebalan Sedimen
d_a	Tinggi air diatas permukaan sedimen
d_h	Beda/selisih tinggi tenaga
$dh/dL = dh/L = dh/z$	Gradien hidraulik
e	Eksponen (bil. Euler)
F_D	Gaya seret
F_B	Gaya apung
F_u	Gaya angkat
F_G	Gaya berat
Fr	Bilangan Froude
F_X	Gaya horisontal
f	Koefisien kekasaran pipa
h	Tinggi tenaga hidraulik (head)
h_s	Tinggi tenaga fluidisasi awal

HS	Tinggi Pompa Hisap
G_s	Spesifik gravity
g	Percepatan gravitasi, 9,81 m/dtk
h_b	Kehilangan tenaga oleh sedimen
h_s	Tinggi tenaga isap lubang perforasi
h_f	Tinggi tenaga fluidisasi penuh
h_k	Kehilangan energi di lubang
h_o	Kehilangan tenaga hidraulik di lubang
h_{bc}	Kehilangan tinggi tenaga kritis pada lapisan sedimen
h_{oc}	Tinggi tenaga kritis pada lubang
IF	Pra – Awal Fluidisasi
Δh	Beda tekanan di dua titik
K	Konduktifitas hidraulik
k	Koefisien kehilangan energi
L_e	Panjang sedimen terfluidisasi
L_p	Panjang pipa fluidisasi
m	massa
P	Tekanan
P_s	Tekanan hisap
Q	Debit aliran
Q	Debit percobaan fluidisasi/hisap
R	Jari-jari pipa fluidisasi
Re	Bilangan Reynolds
R_{hb}	Rasio kehilangan tinggi tenaga pada sedimen
S_v	Koefisien sharing kecepatan
S_h	Koefisien sharing tekanan
t	Waktu penggelontoran
V	Kecepatan aliran arah x
V_s	Volume sedimen tergelontor

V_t	Kecepatan endap partikel sedimen
ΔP_0	Selisih tekanan luar dan dalam pipa
ε atau n	Porositas
ε_f	Porositas kritis
γ	Berat isi air
γ_s	Berat isi butiran tanah
γ_d	Berat isi kering
φ	Konstanta eksperimen
μ	Viskositas dinamik
ν	Viskositas kinematik
ρ_f	Rapat massa air
ρ_s	Berat jenis sedimen
Δ	Kerapatan relatif
τ_o	Tegangan geser dasar
τ_c	Tegangan geser kritis
Ψ	Koefisien kehilangan debit
ζ	Parameter fisik lubang

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Muara (estuary) merupakan daerah yang menjadi tempat pertemuan aliran sungai dan arus laut. Dinamika antara arus laut baik itu pasang surut, gelombang dan aliran sungai telah membentuk daerah tersebut dengan berbagai bentuk fisik seperti delta, sand bar, lagoon yang secara langsung dapat mempengaruhi kecepatan aliran sungai secara normal. Bahkan pada kondisi dimana arus laut lebih dominan terhadap debit aliran. Muara (estuary) adalah bagian dari sungai yang dipengaruhi oleh pasang surut air laut (Triadmodjo, 2009).

Diberbagai negara muara telah digunakan sebagai wilayah yang mampu mendatangkan keuntungan bagi penduduk sekitar. Dalam sejarahnya muara telah berperan sebagai pintu gerbang aktifitas ekonomi dimana kapal-kapal dengan kapasitas besar telah beroperasi menjadikan muara sebagai jalur transportasi perairan. Pelabuhan-pelabuhan besar pada umumnya terletak di muara sungai selain karena fungsi jalur tersebut baik, faktor keterlindungan Pelabuhan dari gelombang laut. Pelabuhan yang terletak pada Muara ada yang bersifat alami dan adapula yang menggunakan bangunan pelindung dari gelombang selain untuk melindungi Pelabuhan juga untuk memelihara alur kapal dari erosi pantai (Triadmodjo, 2009).

Fenomena yang terjadi di muara pada umumnya disebabkan oleh muara yang merupakan daerah pertemuan aliran sungai dengan pasang surut serta gelombang laut. Berbagai fenomena seperti mundurnya garis pantai, timbulnya endapan pada sekitar pantai yang dapat menimbulkan majunya garis pantai, penyumbatan muara dan berbeloknya aliran air di muara akibat endapan yang menghalangi muara, pencemaran dan intrusi air laut. Fenomena Muara sungai pada umumnya terbentuk lapisan material sedimen sekitar mulut sungai akibat sedimentasi (Vironita, 2012). Lapisan material dapat membentuk delta karena adanya transport sedimen oleh aliran sungai (Cahyono. H, 2017).

Penumpukan sedimen di sekitar muara juga dipengaruhi oleh pasang surut dan gelombang laut. Pada waktu bersamaan faktor pasang surut, gelombang dan

kecepatan aliran sungai bekerja dan membentuk formasi delta dengan variasi bentuk yang berbeda. Pada saat pasang, volume air di daerah muara sungai bertambah dengan air yang berasal dari laut sehingga menyebabkan konsentrasi sedimen (suspended sediment load) berubah begitupun sebaliknya saat surut. Tingginya suspensi pada dasar permukaan saat pasang menyebabkan konsentrasi sedimen tersuspensi meningkat dan juga menyebabkan pelambatan pergerakan air menuju hulu sehingga memungkinkan terjadinya pengendapan yang lebih intensif ke arah dasar. Pada saat fase titik balik (fase slack) setelah air pasang menuju air surut menyebabkan konsentrasi sedimen tersuspensi meningkat (Satriadi, Alfi dan Widada, 2004).

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

Berbagai penanganan masalah pendangkalan alur maupun penyempitan akibat sedimentasi telah dilakukan dengan berbagai cara dan teknologi. Pada muara dengan debit aliran sungai yang tinggi namun dipengaruhi oleh pasang surut dan gelombang yang besar maka umumnya dibangun jety maupun underwater sill dengan maksud mengurangi pengaruh gelombang. Pada kondisi tertentu teknologi pengerukan (dredging) juga digunakan pada muara yang sudah tertutupi oleh lapisan sedimen. Namun, semua teknologi tersebut membutuhkan biaya yang besar untuk penanganannya seperti pada erosi/abrasi dan akresi yang terjadi disisi luar jety, umumnya membutuhkan pengerukan untuk memindahkan lapisan sedimen yang menumpuk (Thaha, 2006).

Penanganan masalah sedimentasi di sekitar alur umumnya dilakukan dengan teknologi pengerukan (dredging). Berbagai literatur menyebutkan bahwa metode ini termasuk kedalam metode yang mahal karena membutuhkan biaya dan peralatan yang mahal. Oleh karena itu sekitar tahun 70-an metode fluidisasi di rancang untuk memenuhi kebutuhan pemeliharaan alur sebagai alternatif dari metode pengerukan. Metode fluidisasi untuk pengerukan merupakan metode yang belum banyak diterapkan di Indonesia karena belum banyak yang mengenal metode tersebut (Thaha, 2006). Metode fluidisasi adalah metode yang menggunakan prinsip mengagitasi (mengusik) sedimen dari pipa fluidizer yang ditanam di dasar saluran (di bawah sedimen), dengan memanfaatkan pancaran air bertekanan mengakibatkan sedimen bed load berubah menjadi suspended load, yang pada akhirnya dapat mengalir secara gravitasi ke area lain yang berelevasi rendah (Moh Faiqun Ni'am; Radiana Triatmadja; Nizam, n.d.).

Dalam (Thaha, 2006) menyebutkan bahwa kelebihan dan kekurangan metode fluidisasi menjadi faktor hingga saat ini masih terus dilakukan penelitian mendalam untuk optimalisasi dalam penerapannya. Kelebihan metode fluidisasi relatif lebih murah dibandingkan dengan metode lainnya serta mudah dalam pengoperasiannya sedangkan kekurangannya terletak pada efisiensi dan efektifitasnya yang masih rendah jika digunakan pada area sedimentasi yang luas (Thaha, 2006). Fluidisasi di Indonesia salah satunya dilakukan di Muara Sambong dengan hanya memerlukan pompa daya 26,58 KW yang lebih efektif dan lebih ekonomis dibandingkan dengan pengerukan atau membuat ambang batas bawah (underwater sill) dikarenakan oleh fluidisasi lebih mudah dalam perawatan, mudah dan murah dalam mobilisasi dan membutuhkan tenaga operator yang lebih sedikit (Budi Dharma; Nur Yuwono; Nizam, 2005).

Penelitian awal mengenai metode fluidisasi dilakukan di Amerika Serikat oleh Weismann dan Lennon pada tahun 1994. Kegiatan penelitian ini merupakan rangkaian dari penelitian yang dilakukan sejak tahun 1977 oleh Kelly (1977) yang selanjutnya di ikuti oleh weismann dkk berturut-turut tahun 1982, 1988, 1990, 1991 dan 1994, pada tahun 1990 Lennon dkk melakukan penelitian yang sama dengan Ledwith (1990), selanjutnya Lennon dan McNair tahun 1991 dan pada tahun 1995 Law melakukan penelitian yang sama dimana Weismann dan Lennon

(1995) melanjutkan penelitian tersebut (Thaha, 2006). Hasil penelitian Weismann dan Lennon telah diterapkan pada proyek pemeliharaan alur pelayaran di Pelabuhan Anna Maria (1986) dan proyek pemompaan pasir di Oceanside, California (1991). Akan tetapi proyek ini telah mengalami kendala sejak tahun 2003 dimana terjadi penyumbatan pada lubang dan pipa fluidisasi (Weismann, 2003 dalam (Thaha, 2006)).

Berdasarkan kondisi tersebut sejak tahun 2003 telah banyak penelitian yang dicurahkan untuk menemukan solusi dari permasalahan penyumbatan lubang perforasi dan pipa fluidisasi baik yang sifatnya melanjutkan metode yang telah dibangun oleh Weismann dan Lennon maupun membangun metode baru. Muh. Arsyad Thaha (2006) telah mengembangkan metode fluidisasi dengan melakukan eksperimen 1D, 2D dan 3D dengan fokus penelitian pada model lubang perforasi yang sebelumnya tidak di analisis dalam penelitian Weismann dan Lennon. Untuk diameter semburan atau zona fluidisasi (D_s) penelitian ini menemukan hubungan yang tidak linear dengan ketebalan sedimen di atas pipa fluidisasi (db) bahwa semakin tebal sedimen maka semakin berkurang Panjang zona fluidisasi (D_s), tipe lubang curat dengan pelindung karet menunjukkan kinerja yang baik dalam mencegah penyumbatan (Thaha, 2006).

Metode fluidisasi yang telah diteliti memiliki variasi bentuk lubang dan jarak antar lubang yang dapat menentukan geometrik zona fluidisasi. Sejak Weismann dan Lennon (Roberts et al., 1986) lubang pipa fluidisasi dirancang dengan sistem model seri dimana pipa fluidisasi tenggelam di dalam lapisan sedimen (submerged orifice). (Thaha, 2006) dan (Thaha et al., 2017) merancang lubang perforasi dengan sistem seri di atas lapisan sedimen (submerged orifice). Zhu, D.Z. dkk (2017) melakukan penelitian eksperimental dan numerik tentang perilaku kelongsoran lapisan sedimen yang disebabkan oleh semburan jet air keatas (upward water jet), hasil penelitiannya menyebutkan bahwa ukuran butiran sedimen cukup mempengaruhi efektifitas proses fluidisasi (Tang et al., 2017).

Orientasi lubang fluidisasi dimaksudkan agar tidak terjadi penyumbatan (clogging) yang berakibat pada tidak optimalnya proses fluidisasi. Empat tipe lubang fluidisasi telah dikaji oleh beberapa penelitian yakni Weismann dan Lennon (1986), Darmawan (2004), Triyanto dan Muh. Arsyad Thaha (2006) (Hendrik

Pristianto; Muh. Arsyad Thaha; Mukhsan P. Hatta; Mery Selintung, 2019). Orientasi lubang direkomendasikan oleh Weismann dan Lennon (1994) berlawanan secara horizontal karena dua alasan mendasar yakni untuk mencapai daerah fluidisasi terlebar dan lubang yang menghadap keatas cenderung tersumbat, lubang menghadap kebawah cenderung memendam diri (Moh Faiqun Ni'am, 2003).

Fluidisasi juga diterapkan pada pengendalian sedimentasi waduk, seperti yang dilakukan pada Waduk Mrica yang berada di Kabupaten Banjarnegara dengan menghasilkan penelitian meliputi kombinasi sistem penggelontoran (flushing) dengan fluidisasi pada berbagai variasi ketebalan sedimen (60, 80 dan 100 cm), variasi debit aliran fluidisasi untuk melihat volume sedimen terbang (mm^3). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi flushing dan fluidisasi mampu meningkatkan volume sedimen terbang (Suroso & Widiyanto, 2009). Bahkan untuk memperbesar geometrik zona fluidisasi Anas, dkk (2018) melakukan penelitian dengan menambahkan pipa flushing untuk menggelontorkan sedimen setelah tahap fluidisasi. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa dengan penambahan pipa flushing dapat menambah efektifitas fluidisasi dan dapat menambah ukuran zona fluidisasi (Anas, Andi Bunga Tongeng;Latif, 2018). Penggunaan pipa hisap (suction pipe) juga telah diterapkan pada pembersihan sedimen di waduk dengan menggunakan teknologi suction method dengan menggunakan 4 (empat) variasi tipe model pipa hisap (Mawardi & Wibawa, 2010). Metode suction pipe ini memanfaatkan perbedaan tinggi energi potensial air yang berada di sekitar lubang pipa hisap dengan dibagian hilirnya.

Penggabungan fungsi pada satu pipa kemungkinan besar akan dapat menjadi solusi bagi proses fluidisasi yang tidak efektif pada alur yang tidak memiliki aliran permukaan terutama pada alur yang mengalami sedimentasi akibat pengaruh menurunnya kecepatan aliran (Thaha, 2006). Penelitian penambahan pipa flushing dengan prinsip hisap (suction) dimana arah tekanan aliran berkebalikan dengan metode fluidisasi dapat menambah efektifitas fluidisasi yang dilakukan dengan menambahkan pipa flushing secara paralel diatas pipa fluidisasi. Akan tetapi percobaan penggabungan fungsi fluidisasi dan

hisap (suction) pada satu pipa yang dioperasikan secara bergantian melalui katup otomatis belum di uji secara eksperimental. Oleh karena itu diperlukan uji eksperimental untuk melihat sejauh mana efektifitas fluidisasi dengan hisap (suction) yang dioperasikan secara bergantian melalui satu pipa.

Berdasarkan maksud tersebut maka penulis bermaksud untuk meneliti suatu metode penggelontoran sedimen dengan menggabungkan prinsip fluidisasi dan hisap (suction) sedimen pada pipa fluidisasi yang sama dengan sistem otomatisasi katup. Konsep pemikiran tersebut diharapkan dapat menghasilkan suatu pengembangan metode dalam proses pelaksanaan fluidisasi alur serta diharapkan dapat mereduksi hambatan proses fluidisasi yang kurang efisien pada area yang lebih luas. Selain itu penambahan fungsi pipa hisap (flushing) pada pipa fluidisasi diharapkan dapat menjadi alternatif metode fluidisasi yang sudah di teliti sebelumnya. Untuk itu dalam penelitian ini dilakukan pendekatan dengan melakukan pengujian model fisik di laboratorium berupa pengujian dua dimensi (2D) berupa pipa fluidisasi dibawah lapisan sedimen.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang masalah, dalam tulisan ini akan dipelajari model penggelontoran sedimen dengan metode fluidisasi dan hisap (suction) sebagai pengembangan metode fluidisasi, dengan rumusan masalah yang akan dikaji adalah :

1. Bagaimana hubungan parameter lubang perforasi yaitu diameter lubang (D_f) dan jarak atau spasi lubang (a) perforasi terhadap volume konsentrasi sedimen tergelontor (V_s) dan waktu penggelontoran (t) yang dioperasikan dengan pompa hisap dengan pipa fluidisasi ?
2. Bagaimana hubungan parameter tak berdimensi dalam menghasilkan persamaan yang dapat menghitung besarnya volume konsentrasi sedimen (V_s) pada sistem fluidisasi hybrid ?
3. Bagaimana hubungan waktu penggelontoran (t) dan volume sedimen tergelontor (V_s) pada sistem Fluidisasi hybrid ?

1.3 Tujuan Penelitian

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

1. Menganalisis pengaruh hubungan parameter lubang perforasi yaitu diameter lubang (D_f) dan jarak atau spasi lubang (a) perforasi terhadap volume konsentrasi sedimen tergelontor (V_s) dan waktu penggelontoran (t) yang dioperasikan dengan pompa hisap dengan pipa fluidisasi.
2. Menganalisis hubungan parameter tak berdimensi dalam menghasilkan persamaan yang dapat menghitung besarnya volume konsentrasi sedimen (V_s) pada sistem fluidisasi hybrid.
3. Menganalisis hubungan waktu penggelontoran (t) dan volume sedimen tergelontor (V_s) pada sistem Fluidisasi hybrid.

1.4 Batasan Masalah

Batasan penelitian dalam tulisan ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian dilakukan dengan model fisik 2 (dua) dimensi dilaboratorium hidraulika.
2. Eksperimen dilakukan dengan berdasarkan pada kapasitas peralatan yang tersedia di laboratorium diantaranya pompa fluidisasi kapasitas 14 ltr/detik, pompa hisap (belum dapat diukur kapasitasnya), bak pengujian, selang hisap dan bak penampungan sedimen.
3. Waktu yang dibutuhkan untuk setiap running adalah waktu tahap fluidisasi ± 5 menit dan waktu untuk penggelontoran melalui pompa hisap ± 1 menit.
4. Analisis yang digunakan berupa analisis Dimensi untuk menggambarkan hubungan antar parameter tak berdimensi atas variabel-variabel yang di peroleh.
5. Sedimen yang digunakan adalah sedimen muara (non kohesif).

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian dalam tulisan ini adalah :

1. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai referensi dalam mengembangkan metode fluidisasi menggunakan prinsip penggabungan metode flusing

dan fluidisasi dalam satu media pipa yang sejauh ini belum pernah dikembangkan di Indonesia.

2. Hasil penelitian menjadi tambahan alternatif metode pemeliharaan alur maupun pelaksanaan pekerjaan pengerukan di sekitar bangunan pengendali sedimen.
3. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai pedoman dan pendekatan teknis perencanaan bilamana model ini menjadi pilihan aplikatif di suatu lokasi yang mengalami masalah sedimentasi atau pendangkalan alur.
4. Hasil kajian menjadi tambahan referensi untuk penelitian metode flushing dan fluidisasi khususnya untuk rekayasa pemeliharaan alur.

1.6 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini mencakup hal-hal yang berkaitan dengan sejauh mana penelitian ini dapat dikaji. Maka dari itu penelitian ini memberikan batasan terhadap lingkup penelitian yang nantinya menjadi domain baik dari segi metodologi maupun dari segi parameter penelitian. Adapun ruang lingkup penelitian ini adalah :

1. Penelitian ini merupakan pengembangan dari teknik fluidisasi untuk pemeliharaan alur yang telah diteliti sejak 1970 an hingga 2006 oleh beberapa peneliti. Pengembangan penelitian didasarkan oleh penerapan hasil penelitian terdahulu tentang kurang maksimalnya teknik fluidisasi pada alur atau muara yang memiliki kecepatan aliran permukaan kurang dari kecepatan endap partikel sedimen pasca terfluidisasi.
2. Variabel penelitian yang berpengaruh berdasarkan hasil penarikan kesimpulan dari literatur dan hasil percobaan awal adalah diameter pipa fluidisasi (D), diameter lubang perforasi (D_f), spasi lubang (a), rapat massa sedimen (ρ_s), rapat massa air (ρ_f), tebal sedimen diatas pipa fluidisasi (db), tinggi air permukaan (da), porositas (n), konduktifitas hidraulik (K), diameter butiran sedimen (d), kecepatan aliran (v), kekentalan dinamik (μ),.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pemeliharaan Alur

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

1. Pengerukan (*Dredging*)

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

Menurut Andriawati, et, al (2015) pengerukan adalah pekerjaan perbaikan daerah perairan terutama dalam masalah penggalian sedimen dibawah permukaan air dan dapat dilaksanakan baik dengan tenaga manusia maupun dengan alat berat, kecuali pada hal-hal khusus pengerukan menggunakan kapal keruk. Tujuan pekerjaan pengerukan adalah untuk berbagai macam keperluan, diantaranya (Rochmanhadi, 1992) yaitu Memperdalam dasar sungai / laut; Memperbesar penampang sungai; Mengambil material pasir laut untuk keperluan urugan / *fill* untuk keperluan bangunan ataupun reklamasi tanah; Mengambil material / tanah / lumpur di dasar sungai untuk keperluan penambangan; Keperluan navigasi; Pengendalian banjir / pengambilan material di muara sungai (*delta*); Rekayasa konstruksi dan reklamasi; Pemeliharaan pesisir / pantai; Instalasi dan perawatan pipa bawah laut (*pipeline*).

Sedangkan menurut Eisma (2006) pekerjaan pengerukan dapat dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu Pengerukan awal (*capital dredging*) yang dilakukan pada tipe tanah yang telah lama mengendap. Pengerukan jenis ini biasanya digunakan dalam pengerjaan pelabuhan, alur pelayaran, waduk, atau area yang akan digunakan sebagai industri; Pengerukan perawatan (*maintenance*

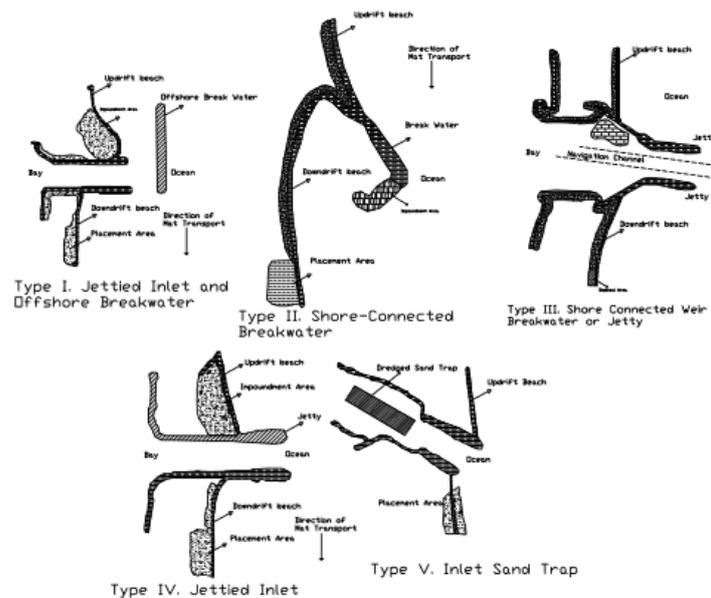
dredging) yang dilakukan pada tipe tanah yang belum lama mengendap. Pengerukan ini dilakukan untuk membersihkan *siltation* yang terjadi secara alami. Pengerukan ini biasanya diterapkan pada perawatan alur pelayaran dan pelabuhan; Pengerukan ulang (*remedial dredging*) yang dilakukan pada wilayah yang telah dikeruk namun mengalami kesalahan, biasanya berupa kesalahan kedalaman

2. Sand by passing

Sand by passing merupakan proses pemindahan pasir yang berada di sepanjang pantai yang dipindahkan secara sengaja melewati inlet. Inlet merupakan jalan air yang pendek dan sempit yang berhubungan dengan laut atau dapat juga berupa danau besar dengan air didalamnya, inlet itu ada yang alamiah (teluk) dan ada pula yang sengaja di buat untuk keperluan navigasi (Pelabuhan) dengan jalan menahan laju transportasi sedimen sejajar pantai. Inlet alamiah mempunyai bentuk yang telah terdefiniskan dengan baik pada bagian yang menuju ke laut (seaward). supply sedimen yang mencapai bagian hilir (downdrift) biasanya tak tertentu dibandingkan kondisi pantai tanpa adanya inlet dan bagian hilir biasanya menjadi tidak stabil dalam jarak yang besar. Jika tidal flow melintasi inlet dan masuk ke dalam maka badan air akan menguat dan bagian material yang sedang bergerak sepanjang pantai terbawa masuk ke dalam badan air dan mengumpul secara permanen sebagai middle – ground shoal, pengurangan supply ini dapat dilakukan dengan pengisian material pada bagian hilir pantai. Outer bar biasanya berpindah saat inlet berpindah namun middle –ground shoal tidak . middle – ground shoal bertambah panjang seperti inlet. Yang berpindah tempat dan volume material yang tertimbun dalam inlet tersebut bertambah banyak

Cara yang biasa dilakukan untuk memperbaiki kondisi inlet dilakukan dengan memasang jetties atau break water pada kedua sisi saluran inlet, bangunan ini digunakan untuk menghalangi transportasi sedimen sepanjang pantai. Jetties mempunyai lebih dari satu fungsi antara lain untuk menahan masuknya littoral drift ke dalam channel, berfungsi sebagai training wall selama terjadi tidal current pada inlet, untuk stabilitas posisi dari navigation channel. Jika arah longshore transport tidak ada yang dominan maka jetties dapat menstabilkan sepanjang pantai, namun pasir yang tertahan pada jetties hanya sedikit. Stabilisasi bagian pantai sepanjang inlet dengan ataupun tanpa jetties bisa diperbaiki dengan

artificial nourishment untuk menambah kekurangan supply sedimen yang diambil dari bagian hulu dari inlet (updrift) , proses ini dikenal dengan sand by passing. Jenis-jenis penghalang sedimen (Jetties dan Breakwater) yang secara umum digunakan berkaitan dengan perbaikan alur pelabuhan dan inlet ditujukan dalam gambar 8.4. jika transportasi sedimen sejajar pantai dominan dalam satu arah, dengan adanya penghalang ini dapat menyebabkan akresi pada updrift dan erosi pada downdrift dan hal ini dapat dilakukan tindakan pencegahan berupa sand bypassing, yaitu dengan cara memindahkan sedimen yang ada di updrift ke daerah downdrift yang tererosi.



Gambar 1. Penggunaan sistem sand bypassing untuk berbagai jenis littoral barrier (US Army CERC, 1984 dalam (pratikno et.all 2014)

3. Bangunan ambang bawah air (Underwater Sill)

Underwater sill adalah bangunan bawah air yang berfungsi membelokkan aliran transpor sedimen agar tidak memasuki alur pelayaran yang dirawat (Thaha, 2006). Pembuatan bangunan underwater sill dapat digunakan untuk menghindari dan mengurangi pendangkalan di pelabuhan. Konsep pengendalian sedimen dengan bangunan underwater sill dengan melindungi kolam kolam labuh dengan bangunan underwater sill sehingga sebagian arus yang membawa sedimen

setinggi underwater sill akan terdefleksi sehingga tidak masuk ke area kolam labuh.

4. Bangunan jetty dan breakwater

Jetty adalah bangunan yang menjorok ke laut yang terletak di sisi mulut sungai yang dimaksudkan secara bersama-sama mengarahkan aliran debit sungai menggelontor sedimen dan memotong transpor sedimen menyusur pantai yang berpotensi mengendap di mulut alur. Dengan demikian kedalaman dan lebar mulut sungai atau alur pelayaran dapat terpelihara sesuai kebutuhan. Bangunan ini banyak dipakai khususnya oleh negara-negara maju untuk menstabilkan alur pelayaran dan muara sungai (Thaha, 2006).

Pemecah gelombang adalah merupakan suatu bentuk konstruksi yang terletak agak jauh dari pantai dan biasanya sejajar pantai ataupun tegak lurus arah datangnya gelombang. Fungsinya pemecah gelombang adalah sebagai memecah saat gelombang tiba pada konstruksi. Struktur pemecah gelombang ini dapat terbuat dari struktur masif atau kaku dan bisa juga berupa struktur fleksibel (tanaman hidup, *rubblemount* dan mengapung). Berdasarkan bentuknya, pemecah gelombang terdiri dari pemecah gelombang sisi miring, pemecah gelombang sisi tegak dan pemecah gelombang campuran (Triadmodjo, 2014).

2.2 Teknologi Fluidisasi

Fluidisasi adalah interaksi antara aliran zat cair atau gas dengan fraksi solid dasar (*bed deposit*) yang umumnya berbentuk butiran granular menyebabkan butiran tersebut terangkat, teragitasi dan berpindah dari posisinya semula. Sejak tahun 1940, teknik fluidisasi sudah dikenal dan telah menjadi bagian terintegral dalam bidang teknik kimia dan industri. Teknik fluidisasi digunakan dalam proses penyulingan minyak, pembakaran batubara, industri plastik, proses pemindahan panas dan massa seperti pengeringan makanan, dll. (Balcony, 2002). Sebuah proyek pembangkit listrik tenaga batubara yang terletak di Jacksonville, Florida, telah menggunakan teknologi *Circulating Fluidized Bed (CFB)* untuk membangkitkan kembali listrik 300 MW setelah habis masa pakainya sejak tahun 1983. Teknologi ini ternyata jauh lebih efisien dan murah dibandingkan dengan cara konvensional yang digunakan sebelumnya (US Department of Energy, DOE, 2000 dalam (Thaha, 2006)).

Penggunaan fluidisasi sebagai metode pembersihan saringan pasir dimulai sejak tahun 1960an. Amirtharajah (1970), Amirtharajah dan Cleasby (1972), Cleasby dan Fan (1981) dalam Weisman, Lennon dan Robert (1988) melakukan optimalisasi fluidisasi 1 dimensi untuk pembersihan filter secara efektif tanpa menghilangkan partikel pasir saringan itu sendiri. Kajian lanjutan metode fluidisasi untuk pembersihan filter (*filter backwashing*) telah dilakukan oleh Raveendram dan Amirtharajah (1995). Metode fluidisasi untuk aplikasi pengolahan limbah juga telah dikaji oleh Chen, Li dan Shieh (1997). Teknik pembuangan limbah ke laut dengan metode jet horisontal dari Rosette type riser telah dikaji secara eksperimen oleh Kwon dan Seo (2005).

Dalam beberapa hasil penelitian dan hasil percobaan dilapangan, metode fluidisasi telah berkembang pesat terutama pada bidang rekayasa pantai dan Teknik keairan. Diindonesia metode fluidisasi telah dikembangkan pada proses pengendalian waduk yang mengkombinasikan sistem penggelontoran (*flushing*) sedimen (Suroso; Wahyu Widiyanto, 2009). Beberapa penelitian terkait pengembangan fluidisasi alur terutama pada muara sungai seperti pada penanganan pendangkalan sungai (Moh Faiqun Ni'am, 2003), fluidisasi untuk pemeliharaan akur pelayaran (Widiyanto & Soedirman, 2018). Beberapa pengembangan penelitian fluidisasi terutama pada pemecahan masalah clogging (penyumbatan) dilakukan pada tahun 2006 (Thaha, 2006), dan perkembangannya hingga pada sistem pengurusan dan pengisapan slurry pada proses fluidisasi yang dilakukan oleh (Hendrik Pristianto; Muh. Arsyad Thaha; Mukhsan P. Hatta; Mery Selintung, 2019) dan (Anas, Andi Bunga Tongeng;Latif, 2018).

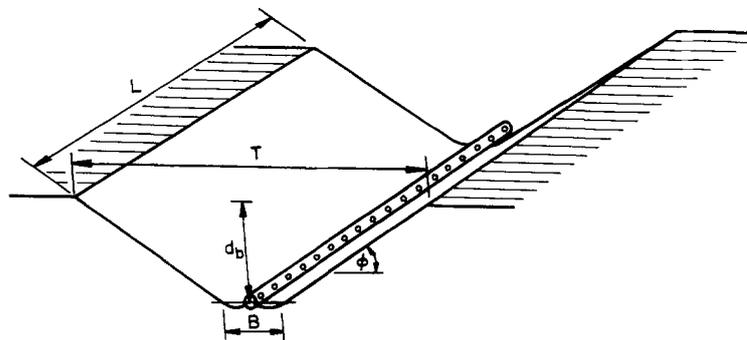
2.3 Metode Fluidisasi Dengan Pipa Hisap

Fluidisasi adalah suatu proses dimana lapisan partikel padat ditransformasikan menjadi sesuatu yang mirip cairan (*L.G. Gibilaro, 2018*). Metode Fluidisasi alur merupakan metode pembentukan alur baik itu alur pelayaran, alur muara, kolam Pelabuhan yang menggunakan prinsip kerja fluidisasi. Teknologi fluidisasi telah berkembang di berbagai bidang terutama sejak tahun 1940 yang penerapannya pada bidang teknik kimia dan industry seperti pada proses penyulingan minyak, pembakaran batubara, industry plastic, proses heat transfer (transfer panas dan massa) dan lain-lain (*Thaha, 2006*).

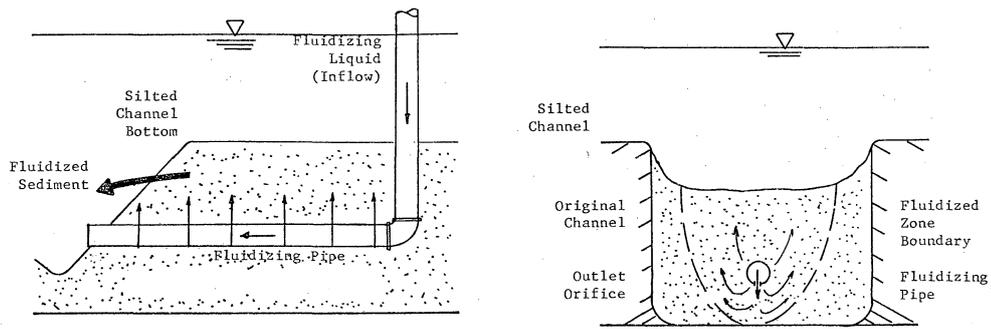
Perkembangan metode fluidisasi telah digunakan pada bidang teknik sipil terutama pada pekerjaan sand bypassing yang mula-mula dikembangkan pada penelitian yang dikembangkan pada aplikasi transportasi sedimen menggunakan teknik fluidisasi (*John T Kelley, 1977*). Selanjutnya pada tahun 1988 hingga tahun 1994 perkembangan metode fluidisasi telah mencapai pada tahap penerapan yang mula-mula diterapkan pada project pemeliharaan alur di Anna Maria dan Oceanside, California (*Weisman & Lennon, 1995*). Fluidisasi dengan menggunakan tabung pada pipa hisap selanjutnya dikembangkan pada tahap penelitian, yang bertujuan menambah efektifitas metode fluidisasi alur (*Tongeng Anas & Latif, 2018*).

2.4 Fluidisasi Dengan Pipa Hisap Untuk Pemeliharaan Alur

Pemeliharaan alur dengan metode fluidisasi telah dilakukan pertama kali pada proyek pemeliharaan alur di perairan Anna Maria, California untuk pengoperasian pekerjaan sand by passing pada tahun 1994 (*Richard N. Weismann, 1995*). Akan tetapi penelitian aplikasi Fluidisasi untuk transport sedimen pertama kali dilakukan pada tahun 1977 oleh John T. Kelley Sr. di Lehigh University (*John T Kelley, 1977*). Bentuk fluidisasi yang diusulkan baik oleh Weisman dan Kelley adalah bentuk fluidisasi dengan pipa tertanam dibawah lapisan sedimen (material non kohesif)



Gambar 2. Sketsa fluidisasi diusulkan oleh Weisman dan Lennon (1995)

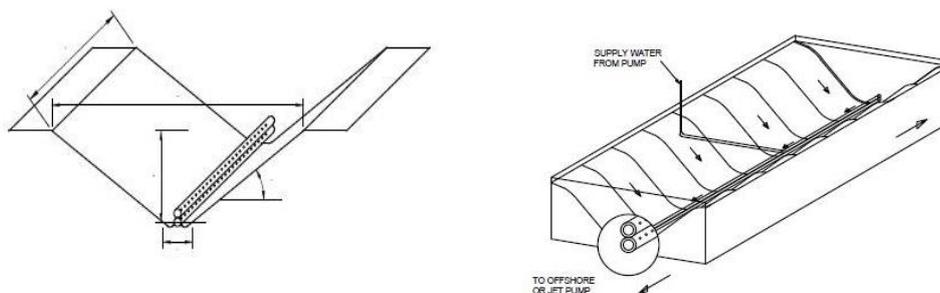


Gambar 3. Sketsa fluidisasi yang diusulkan oleh Kelley (1977)

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

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

Penelitian untuk menambah kinerja fluidisasi dilakukan dengan menambah pipa hisap (suction pipe) juga telah dilakukan di Indonesia namun belum diaplikasikan pada skala lapangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja fluidisasi akan semakin baik dengan menambahkan pipa hisap dengan lubang perforasi diameter 6 mm dan jarak antar lubang 5 cm (Anas, Andi Bunga Tongeng;Latif, 2018)



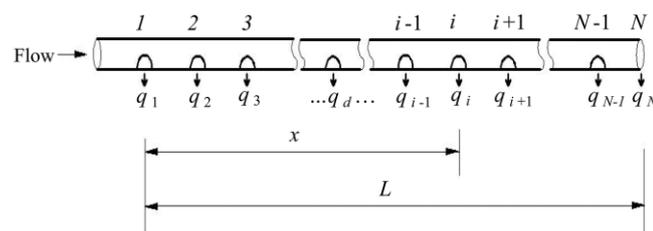
Gambar 4. Pipa Fluidisasi dengan penambahan Pipa Hisap Slurry (Anas, Andi Bunga Tongeng;Latif, 2018)

2.5 Aliran Sedimen (Slurry) Melalui Pipa Perforasi

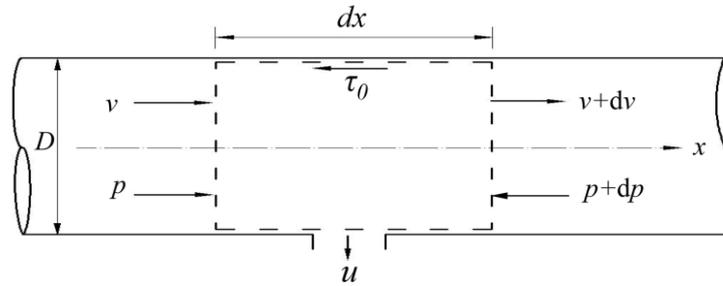
Aliran slurry melalui pipa perforasi telah diteliti sebagai bagian dari metode fluidisasi. Penggunaan pipa perforasi untuk metode suction (hisap) di rancang secara terpisah dengan pipa fluidisasi yang dikembangkan oleh weisman, lennon dimana pipa hisap slurry diletakkan diatas pipa fluidisasi secara parallel. Penelitian sebelumnya telah dilakukan oleh (Anas, Andi Bunga Tongeng;Latif, 2018) yang menghasilkan efektifitas bagi proses fluidisasi alur.

Pada prinsipnya pengaliran zat cair melalui pipa perforasi difokuskan pada kehilangan energy pada masing-masing outlet atau lubang pipa, dimana distribusi kecepatan aliran melalui lubang perforasi. Pada aliran dimana tekanan mendorong aliran keluar melalui lubang perforasi, maka prinsip perubahan momentum berlaku karena adanya perbedaan tekanan di dalam pipa dan pada luar pipa dimana terdapat tekanan atmosfer. Selain itu kehilangan tenaga akibat gesekan sepanjang dinding pipa juga bekerja pada waktu yang sama dengan perubahan momentum di lubang perforasi (Liu et al., 2017). (Liu et al., 2017) menggunakan persamaan momentum untuk menganalisis perubahan energy aliran disekitar lubang perforasi dengan membangun asumsi sebagai dasar analisis yakni

1. Aliran adalah aliran satu dimensi.
2. Zat cair dianggap incompressible.
3. Kecepatan aliran konstan pada lubang pipa.
4. Tekanan disekeliling konstan dan aliran melalui lubang adalah aliran bebas.
5. Orientasi lubang terletak secara vertical dengan jarak antara lubang sama atau seragam.
6. Ukuran penampang pipa konstan dan kemiringan seragam disepanjang aliran dalam pipa.
7. Aliran di lubang pipa bergantung pada tekanan, dan distribusi aliran pada lubang pipa bergantung pada distribusi tekanan



Gambar 5. skema pipa dengan banyak outlet (Liu et al., 2017)



Gambar 6. Variabel yang berlaku pada variasi massa aliran (Liu et al., 2017)

Pada volume kontrol variasi massa aliran terjadi tegangan geser zat cair terhadap dinding atas pipa sebesar τ_0 terhadap kecepatan aliran sebesar $v+dv$, dan pada lapisan bawah ($1/2$ penampang pipa pada arah aliran x) terjadi tekanan pada dua sisi sebesar $p+dp$, menghasilkan kecepatan aliran u . Maka pada kondisi tersebut, (Liu et al., 2017) memberikan persamaan momentum dan kontinuitas untuk bagian penampang yang kecil dengan massa variabel dimana koefisien gesek sepanjang aliran dan koefisien perubahan momentum terjadi, diberikan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{\lambda}{2D} V^2 + 2kV \frac{dV}{dx} = gI \quad (1)$$

Dimana p adalah tekanan hidrodinamik (N/m^2); ρ adalah densitas zat cair (kg/m^3); V adalah kecepatan aliran (m/s); D adalah diameter tabung (m); λ adalah koefisien gesek aliran sepanjang pipa; k adalah koefisien perubahan momentum; g adalah percepatan gravitasi (m/s^2); dan I adalah kemiringan (slope) tabung atau pipa.

Berdasarkan persamaan momentum, koefisien k dan λ terbentuk pada kondisi kemiringan pipa yang seragam. Dalam hal ini koefisien seret λ dan koefisien perubahan momentum k adalah fungsi dari slope pipa perforasi gI . Jika koefisien seret λ merupakan fungsi dari bilangan Reynold Re , maka diberikan perubahan koefisien seret sebesar $\lambda = \kappa\lambda_0$ dimana λ_0 adalah koefisien gesek untuk pipa halus, dan κ adalah koefisien modifikasi. Hubungan koefisien seret terhadap bilangan Reynold terjadi pada bentuk aliran (laminar atau turbulen) yang disebabkan oleh gaya seret sepanjang aliran. Sehingga (Liu et al., 2017) menemukan bahwa jika nilai $Re < 2000$ yang berarti aliran laminar, maka koefisien seret tidak membutuhkan modifikasi sehingga $\kappa = 1.0$, sebaliknya jika

aliran turbulen maka hal itu dapat terjadi pada perubahan dimensi pipa dimana berlaku pengaruh Rasio antara diameter pipa terhadap Panjang pipa D/L yang menghasilkan nilai modifikasi koefisien $\kappa > 1.0$.

Koefisien perubahan momentum k terjadi pada outlet dimana terdapat deviasi kecepatan antara aliran di entrance dan aliran di outlet yang disebabkan oleh komponen kecepatan yang terdiri dari rasio deviasi relatif momentum $\Delta V^2/V^2$ yang setara dengan rasio komponen momentum terdiri dari aliran yang keluar terhadap momentum mainstream total (Liu et al., 2017). Perubahan momentum yang terjadi di lubang outlet berkorelasi dengan gesekan, pusaran air, dan komponen momentum yang terdapat di aliran keluar lubang outlet, maka koefisien modifikasi β pada rasio deviasi relatif dari momentum sebesar $\beta (\Delta V^2)/V^2$, oleh karena itu Liu (2017) memberikan persamaan koefisien perubahan momentum arus utama pada lubang awal (first hole) sebagai a sebesar :

$$k = \alpha + \beta \frac{\Delta V^2}{V^2} \quad (2)$$

Jika distribusi kecepatan diberikan pada arus utama aliran maka didapatkan turunan dari deviasi momentum relatif yang merupakan fungsi dari deviasi momentum relatif, sehingga persamaan turunan tersebut menjadi

$$k = \alpha + 2\beta \ln \frac{V}{V_0} \quad (3)$$

Untuk distribusi kecepatan Liu (2017) memberikan persamaan yang diasumsikan sebagai fungsi tenaga yakni :

$$V = \frac{Q_x}{A} = \frac{Q_0}{A_0} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^z = V_0 \left(1 - \frac{x}{L}\right)^z \quad (4)$$

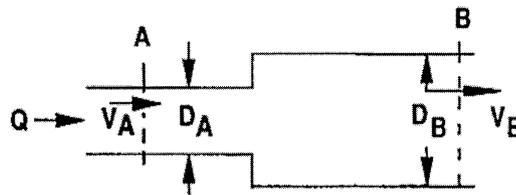
Dimana Q adalah debit melalui penampang x (m^3/s); Q_0 adalah debit total melalui entrance (m^3/s); L adalah Panjang pipa perforasi (m); V_0 adalah kecepatan pada entrance (m/s); A_0 adalah ukuran penampang ($1/4\pi D^2$) (m^2); X adalah rasio aliran melewati penampang x terhadap Panjang pipa (x/L) dan z adalah eksponen.

Beberapa parameter yang mempengaruhi kinerja sistem lubang manifold (lubang banyak) yakni parameter distribusi aliran yang terdiri dari parameter tak berdimensi seperti rasio Area (A_r^2), hambatan aliran lateral (H), rasio Panjang/diameter pipa, parameter momentum θ_1 dan θ_2 , parameter momentum β , dan faktor gesekan (Bajura & Jones, 2013).

Pada aliran slurry melalui metode hisap (suction) melalui lubang perforasi, kinerja aliran yang semula dianggap mantap (steady flow) dapat berubah menjadi aliran tak mantap yang diakibatkan karena aliran melalui perubahan dimensi pipa dimana pada lubang perforasi dianggap sebagai penampang pipa berukuran kecil dan pada pipa perforasi sebagai pipa berdimensi besar. Hal tersebut di gambarkan oleh (K.C. Wilson, G.R. Addie, A.Sellgren, 2006) dalam skema aliran melalui pipa dengan diameter berbeda yang dalam persamaan kecepatan awal diperoleh :

$$V_A = \frac{4Q}{\pi D_A^2} ; \text{ dan } V_B = \frac{4Q}{\pi D_B^2} \quad (5)$$

Dimana D_A adalah diameter internal pipa pada penampang A sehingga luas area penampang pipa sebesar $\pi D_A^2/4$ begitupun pada penampang pipa B



Gambar 7. Aliran melalui pipa melalui perubahan dimensi (K.C. Wilson, G.R. Addie, A.Sellgren, 2006)

2.6 Aliran Pada Media Berpori

Pada metode Fluidisasi berlaku mekanisme pengaliran air pada lapisan berpori dimana hukum darcy dinyatakan dalam awal tercapainya fluidisasi. Seperti pada aliran air dalam tanah, metode fluidisasi mengalirkan air bertekanan tinggi dengan maksud mengusik dan mengagitasi sedimen hingga menjadi bubur (slurry) dan digelontorkan melalui aliran permukaan. Berlakunya hukum darcy dikarenakan kecepatan aliran air melewati media berpori pada metode Fluidisasi mengalami hambatan selama dalam proses pengaliran. Bentuk persamaan darcy adalah sebagai berikut :

$$q = -K \frac{dh}{dl} \quad (6)$$

Persamaan darcy berlaku secara valid dengan ketentuan bahwa untuk semua arah hukum darcy dinyatakan valid, berlaku hukum linearitas dimana q proporsional dengan dh/dl, berlaku pada aliran jenuh dan tak jenuh, berlaku pada kondisi homogeneous dan heterogeneous, berlaku pada aliran mantap (steady) dan

tak mantap (unsteady) serta berkorelasi dengan angka Reynold antara 1-10 (Kodoatie, 1996 dalam (Thaha, 2006)).

Hambatan aliran pada media berpori diuraikan melalui hubungan substitusi antara kondisi aliran dua dimensi yang memiliki komponen kecepatan aliran dua arah yakni arah x dan z yang dinyatakan dalam persamaan :

$$u = q_x = K_x \frac{dh}{dx}; w = q_z = K_z \frac{dh}{dz} \quad (7)$$

Dalam hukum kontinuitas dimana persamaan aliran dua dimensi diatas berlaku pada kondisi sedimen yang tidak isotropis yang berarti belum terjadi perubahan struktur sedimen saat tahap prafluidisasi, sehingga $K_x = K_z = K$, maka persamaan aliran dua dimensi dalam hukum kontinuitas dapat dituliskan dengan persamaan :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial w}(\rho w) = 0 \quad (8)$$

Persamaan aliran dua dimensi dalam hukum kontinuitas diatas berlaku pada aliran tidak permanen (unsteady flow) yang termampatkan oleh dua dimensi arah x dan y. Sehingga untuk memudahkan pengujian dilapangan maka air dapat dianggap incompressible (Thaha, 2006). Persamaan aliran dua dimensi dalam kondisi tidak tunak atau non uniform dapat dituliskan menjadi :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

Dimana u = aliran tak berdimensi sepanjang saluran, v = profil kecepatan vertical pada arah sumbu x dan y. untuk profil kecepatan vertical dapat dituliskan sebagai berikut (Yang, 2019).

$$v = \int \frac{\partial u}{\partial x} dy \quad (10)$$

Persamaan aliran dua arah kemudian di masukkan kedalam persamaan aliran dua arah dalam kondisi permanen menjadi persamaan yang digunakan dalam mengurai kehilangan tinggi tenaga pada suatu aliran air melalui hambatan atau media berpori yang umumnya dikenal dengan persamaan Laplace dua dimensi (Thaha, 2006). Persamaan tersebut dapat dituliskan :

$$\frac{d^2 h}{dx^2} + \frac{d^2 h}{dz^2} = 0 \quad (11)$$

2.7 Aliran Sedimen Pada Pipa

Metode fluidisasi telah dikembangkan melalui berbagai metode dan berbagai kepentingan. Khusus pada bidang pemeliharaan alur navigasi metode fluidisasi berkembang dengan fluidisasi menggunakan metode agitasi sedimen dengan pipa perforasi tertanam dibawah lapisan sedimen dan fluidisasi dengan metode suction (hisap) menggunakan pompa jet slurry yang biasa digunakan pada metode sand bypassing.

Fluidisasi dengan metode suction pipe pada prinsipnya menggunakan metode pengaliran fluida di dalam pipa yang dihisap melalui lubang dengan menggunakan tekanan hisap dari Pompa. Fluida yang mengalir di dalam pipa dipengaruhi secara dominan oleh viskositas (kekentalan) zat cair. Oleh karena itu hubungan fluida terhadap nilai viskositasnya membagi aliran fluida menjadi fluida Newtonian dan Fluida Non-Newtonian. Khusus untuk pengaliran didalam pipa yang tidak tahan terhadap tegangan geser, gradient kecepatan dan tempratur maka kekentalan fluida berubah seiring waktu yang berarti kekentalan merupakan fungsi dari waktu seperti lumpur (slurry), bubur kertas, minyak pelumas dan lain-lain (Syahrudin, 2014).

Kondisi pengaliran fluida dalam pipa yang dipengaruhi oleh viskositas menghasilkan hubungan bilangan tak berdimensi yang menjelaskan hubungan kecepatan rerata yang dipengaruhi oleh kekentalan zat cair (μ), densitas (ρ) dan diameter pipa (D) dimana hubungan tersebut dinyatakan dalam

$$Re = \frac{V}{\frac{\mu}{\rho D}} = \frac{V\rho D}{\mu} \quad (12)$$

Persamaan Reynold diatas didefinisikan sebagai rasio antar Inersia terhadap viskositas dinamik. Viskositas pada hubungan tersebut masih berupa viskositas dinamik (μ) yang merupakan rasio antara tegangan geser terhadap laju perubahan atau kecepatan geser yang besarnya tergantung dari faktor densitas (ρ). Viskositas dimanik dapat dinyatakan sebagai tegangan geser sehingga persamaan tersebut dapat ditulis

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (13)$$

Persamaan ini dikenal sebagai hukum Newton tentang kekentalan yang menyatakan bahwa tegangan geser antar dua partikel zat cair yang berdampingan adalah sebanding dengan perbedaan kecepatan dari kedua partikel (gradien kecepatan) (Triadmodjo, 2017).

Besarnya perubahan faktor densitas sangat kecil untuk fluida air sehingga dapat diabaikan pengaruhnya maka viskositas dapat diukur berdasarkan satuan waktu. Oleh karena itu jika viskositas dinamik dibagi oleh desitas maka akan menghasilkan rasio antara viskositas dinamik terhadap densitas atau kerapatan yang dikenal sebagai viskositas kinematic (ν), sehingga bilangan Reynold yang dihasilkan adalah :

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (14)$$

2.8 Head loss dalam Pengaliran Slurry Melalui Pipa

1. Faktor Konsentrasi partikel Slurry dalam pipa

Kecepatan slurry melalui pipa salah satunya di pengaruhi oleh parameter endapan (settling) yang di ukur berdasarkan volume dan kecepatan endap partikel. Setiap aliran slurry melalui pipa akan menghindari terjadinya endapan partikel sedimen yang dalam bentuk slurry agar tercapai kecepatan aliran yang mampu menggelontorkan partikel sedimen melalui pipa. Dalam mekanika fluida aliran slurry dikategorikan sebagai fluida non-newtonian dikarenakan oleh viskositas yang tinggi yang disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja pada partikel selama aliran berlangsung.

Dalam hubungan nya dengan volume endap partikel terhadap aliran slurry, maka volume endapan partikel dapat dihitung sebagai konsentrasi volumetrik partikel setempat (C_{vi}) yang dibandingkan dengan konsentrasi volumetric terkirim (C_{vd}). Hubungan keduanya dapat di aplikasikan dalam menentukan debit volumetric fluida (Q_f) yang dihasilkan dari kecepatan aliran fluida (V_f) melalui penampang yang dilalui aliran fluida $(1-C_{vi})\pi D^2/4$. Maka total debit aliran melalui pipa (gabungan fraksi solid dan cair) disebut sebagai debit campuran (Q_m) juga sebanding dengan $\pi D^2/4$ kali rata-rata kecepatan aliran dari fraksi campuran yang dapat dilihat berdasarkan persamaan

$$\frac{4Q_m}{\pi D^2} = V_m = V_f(1 - C_{vi}) + V_s C_{vi} \quad (15)$$

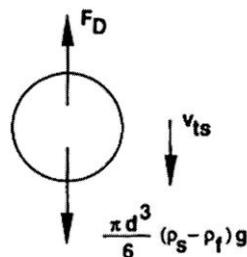
Untuk konsentrasi volumetric yang terkirim direpresentasikan melalui hubungan rasio antara debit fraksi solid (Q_s) terhadap debit campuran (Q_m) sehingga diperoleh persamaan :

$$C_{vd} = \frac{Q_s}{Q_m} = \frac{V_s}{V_m} C_{vi} \quad (16)$$

Pada persamaan ini (perbandingan konsentrasi setempat dengan konsentrasi yang terkirim) menunjukkan bahwa konsentrasi volumetric terkirim harus lebih kecil dari konsentrasi volumetric setempat dengan syarat nilai kecepatan rata-rata fraksi solid (V_s) lebih kecil dari kecepatan rata-rata fraksi campuran (V_m) (Wilson et al., 1992). kondisi tersebut menunjukkan endapan partikel lebih dominan dibandingkan dengan aliran fluida yang mengalir.

2. Kecepatan endap partikel

Sifat propertis slurry sangat bergantung pada kecenderungan partikel untuk mengendap dari proses pengaliran fluida (Wilson et al., 1992). Beberapa parameter mempengaruhi partikel dari kecepatan terminal partikel slurry seperti sifat cairan (ρ_f dan μ) yang terdiri dari diameter partikel (d) dan densitas partikel (ρ_s). (El-nahhas et al., 2009) melaporkan hasil aksperimental nya pada efek distribusi ukuran partikel dalam perilaku aliran dan kehilangan tekanan akibat gesekan pada aliran endapan slurry dalam pipa dimana endapan slurry dapat menunjukkan berbagai pola aliran yang kompleks tergantung pada sifat fisik fluida pembawa dan padatan yang diangkut serta kecepatan superfisial dan konsentrasi slurry. Distribusi ukuran partikel selanjutnya ditempatkan kedalam fraksi volume berdasarkan massa atau berat (kg) yang melewati ukuran saringan (size screen).



Gambar 8. Proses endap partikel pada kecepatan terminal (Wilson et al., 1992)

Dengan menggunakan definisi hukum Stokes tentang gerakan fluida dengan memberikan persamaan gaya gesek partikel sebesar

$$F_D = 6 \pi r \eta V \quad (17)$$

Dimana : F_s = gaya gesek (N), r = jari-jari benda (m), kecepatan jatuh dalam fluida (m/s), η = koefisien viskositas (kg/m.s). Kecepatan terminal adalah kecepatan benda berbentuk bola bergerak mengendap dalam fluida dengan kecepatan konstan. Kecepatan terminal suatu benda dapat ditentukan dengan persamaan yang diformulasikan sebagai berikut

$$V = \frac{2gr^2}{9\eta} (\rho_s - \rho_f) \quad (18)$$

Dimana :

- v = kecepatan terminal (m/s)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- ρ_s = berat jenis benda (kg/m^3)
- ρ_f = berat jenis fluida (kg/m^3)

Berdasarkan persamaan tersebut diketahui bahwa kecepatan terminal dipengaruhi oleh ukuran partikel, berat jenis partikel dan fluida serta viskositas (kekentalan) fluida.

Kecepatan terminal partikel didasarkan pada gaya gesek (drag force) partikel dengan koefisien hambatan (C_D) dimana diberikan persamaan gaya gesek sebesar (F_D) dimana gaya angkat merupakan fungsi dari densitas fluida (ρ_f), tegangan geser (μ), diameter partikel (d) dan kecepatan terminal partikel (V_{ts})

$$F_D = fn(\rho_f, \mu, d, V_{ts}) \quad (19)$$

$$F_D = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_s - \rho_f)g \text{ dimana, } C_D = fn(Re_p) \quad (20)$$

3. Faktor Gesek (f)

Von karman menggunakan formula untuk menjelaskan hubungan antara gaya gesek yang ditimbulkan oleh factor kekasaran pipa dan aliran sepanjang pipa dimana gaya gesek dinyatakan dalam $1/(f)^{0.5}$ yang merupakan factor gesek yang dikembangkan sebelumnya oleh Darcy (fD) pada formula yang digunakan oleh Colebrook-White. Haaland, SE menggunakan factor gesek Darcy (fD) untuk menggambarkan kondisi aliran pada pipa dengan kekasaran tertentu dengan persamaan :

$$fD = \frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{k}{3.7D} \right)^{1.11} \right] \quad (21)$$

4. Kehilangan tenaga Slurry melalui pipa

Untuk menghitung besarnya kehilangan tenaga pada proses pengaliran slurry atau bubur sedimen didalam pipa Durand and Condolious (1952) dalam Miedema (2013) mengajukan persamaan Froude Partikel (Frp) yang didasarkan pada hasil eksperimen dengan persamaan sebagai berikut :

$$Frp = \frac{1}{\sqrt{Cx}} = \left(\frac{V_t}{\sqrt{g \cdot d}} \right) \quad (22)$$

Dimana V_t = kecepatan endap partikel sedimen, g = gravitasi dan d = diameter partikel sedimen. Persamaan (Frp) merupakan kondisi aliran slurry dalam pipa untuk menjelaskan besarnya koefisien seret (Drag Coefficient) sepanjang pipa

2.9 Gaya-gaya Pada Aliran Sedimen Melalui Pipa

1. Distribusi ukuran sedimen

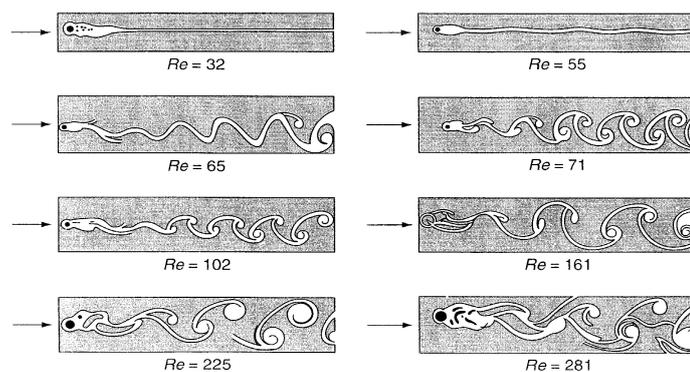
Distribusi ukuran sedimen pada aliran slurry dalam pipa penting untuk diuraikan, hal tersebut telah diuraikan pada beberapa penelitian terdahulu yang menguraikan hubungan antara distribusi ukuran partikel slurry dalam berbagai kondisi regime aliran dalam pipa. Distribusi ukuran sedimen merupakan salah satu parameter dalam hubungan gradient endapan slurry pada berbagai diameter pipa terhadap konsentrasi partikel.

2. Gaya yang Bekerja pada Butiran Sedimen

Terdapat dua komponen gaya hidrodinamik yang bekerja pada partikel sedimen yakni gaya seret (*drag hydrodynamic*) dan gaya angkat (*lift hydrodynamic*). Gaya-gaya yang bekerja pada partikel sedimen dalam pipa memiliki karakteristik berbeda terhadap sedimen pada saluran terbuka. Gaya seret/drag force dan gaya angkat/lift force merupakan gaya yang umumnya bekerja pada partikel sedimen. Akan tetapi, untuk aliran dua phase (solid – liquid phase) berupa lumpur dengan viskositas yang tinggi, maka indikasi bekerjanya gaya-gaya dapat ditinjau dari regime aliran yang umumnya dibedakan kedalam regime homogen, heterogen, moving bed dan stationery bed.

Aliran slurry atau aliran dua phase solid-liquid digolongkan sebagai aliran non Newtonian. Besarnya konsentrasi padatan dalam aliran mengakibatkan gaya yang bekerja pada partikel tidak saja dipengaruhi oleh tipe aliran (laminar, turbulen dan transisi) sebagai fungsi dari angka Reynold, melainkan dipengaruhi juga oleh gaya gesek antar partikel. Gaya gesek antar partikel digolongkan kedalam gaya seret pada partikel, karena secara individual gaya seret dalam partikel fluida digunakan untuk mengkalkulasi faktor gesekan (friction), dan kehilangan energi tekanan (Zimmels, 1988) . Maka dari itu untuk memudahkan memahami gaya yang bekerja pada partikel slurry dalam pipa, maka diasumsikan sebagai gaya-gaya yang bekerja pada partikel secara individu.

Partikel sedimen bergerak mengikuti arah aliran dengan dua arah gaya yakni gaya seret (drag force) yang bekerja searah dengan gerakan butiran, dan gaya angkat (lift force) yang bekerja dengan arah normal atau tegak lurus terhadap arah Gerakan butiran (Rijn, 1990) dalam (Thaha, 2006). Dinamika gaya yang bekerja pada fluida dapat ditinjau berdasarkan kondisi aliran yang diuraikan melalui nilai Reynold seperti pada gambar 9.

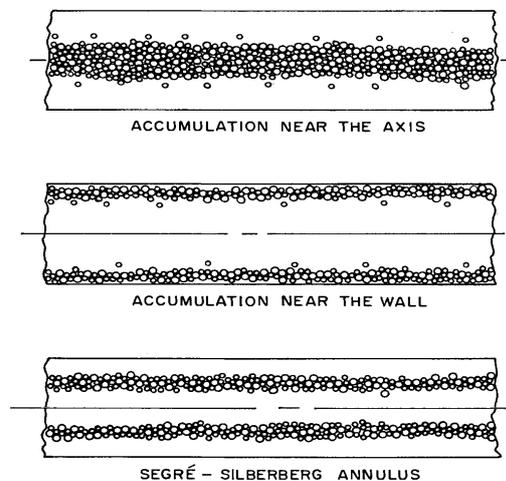


Gambar 9. Efek angka Reynold pada aliran yang melewati partikel (F. White, 2006)

Pada gambar diatas terlihat suatu aliran melewati silinder dan menghasilkan nilai Reynold yang bervariasi. Perbedaan nilai Reynold mengklasifikasikan aliran menjadi laminar, transisi dan turbulen. Pada dasarnya kondisi aliran (laminar, turbulen dan transisi) dapat ditentukan setelah aliran melewati silinder, dimana aliran terbagi menjadi aliran laminar pada nilai $Re = 32$ dan $Re=55$, sedangkan pada nilai $Re =65$ aliran transisi hingga $Re=281$ digolongkan kedalam aliran turbulen.

2.9.1 Gaya pada partikel untuk aliran dua phase dalam pipa

Beberapa penelitian telah mengamati gaya angkat (lift force) partikel sebagai salah satu gaya yang berperan dalam aliran dua phase (solid-liquid) dalam pipa. Gerakan partikel mendekat ke dinding pipa dan juga cenderung berpusat pada titik axial aliran (young, 1960), hingga pada penemuan (segre dan silberbeg) yang melaporkan bahwa pada keadaan tertentu partikel akan bermigrasi menjauh dari sumbu dan dinding pipa dan terakumulasi pada daerah sedikit ke pertengahan antara sumbu dan dinding pipa (Zandi, 1971). Oleh karena besarnya peranan gaya angkat pada aliran partikel dalam pipa, maka pada kondisi seperti yang digambarkan oleh young, segre dan silberbeg sering disebut sebagai migrasi radial. Migrasi radial merupakan kecenderungan partikel untuk berpindah dari satu posisi ke posisi lain (Zandi, 1971). Penjelasan tersebut dapat dilihat pada gambar 10.



Gambar 10. Bentuk gerakan partikel fluida dalam pipa (Zandi, 1971)

Angka Reynold partikel dan angka Reynold pada tabung percobaan yang dilakukan oleh Goldsmith dan Mason dalam (Zandi, 1971) menemukan hubungan bahwa ketika angka Reynold tabung kurang dari 2×10^{-2} dan angka Reynold partikel kurang dari 10^{-6} mengalir pada pipa dengan jarak axial hingga 3500 cm maka tidak terdapat Gerakan migrasi radial. Akan tetapi migrasi radial dapat diamati dan terjadi pada angka Reynold partikel dari 10^{-3} hingga 10^{-2} meskipun pada Gerakan yang sangat lambat, hal ini ditemukan pada penelitian lanjutan oleh Karnis, Goldsmith dan Mason dalam (Zandi, 1971).

2.10 Analisis Dimensi

Bilangan tak berdimensi digunakan untuk menyatakan hubungan antar parameter serta dipakai untuk menggambarkan hasil-hasil penelitian. Untuk menentukan bilangan tak berdimensi dapat dilakukan dengan analisis dimensi. Beberapa cara/metode yang umum digunakan untuk analisis dimensi yaitu Metode *Basic Echelon*, Metode *Buckingham*, Metode *Rayleigh*, Metode *Stepwise* dan Metode *Langhaar*.

Tabel 1. Sistem Dimensi

No	Kuantitas	Satuan	Simbol	Dimensi	
				Sistem fisik	Sistem engineering
	Geometrik				
1.	Panjang (Length)	m	L	L	L
2.	Luas (Area)	m ²	A	L ²	L ²
3.	Volume	m ³	V	L ³	L ³
4.	Kemiringan (Slope)	-	S	-	-
	Kinematik				
5.	Waktu (Time)	sec (s)	T	T	T
6.	Kecepatan (linear)	m/sec	v	LT ⁻¹	LT ⁻¹
7.	Kecepatan (angular)	rad/sec	ω	T ⁻¹	T ⁻¹
8.	Percepatan (linear)	m/sec ²	f	LT ⁻²	LT ⁻²
9.	Percepatan (angular)	rad/sec ²	α	T ⁻²	T ⁻²
10.	Debit (Discharge)	m ³ /sec	Q	L ³ T ⁻¹	L ³ T ⁻¹
11.	Percepatan Gravitasi	m/sec ²	G	LT ⁻²	LT ⁻²
12.	Viskositas kinematik	m ² /sec	ν (nu)	L ² T ⁻¹	L ² T ⁻¹
	Dinamik				
13.	Massa	Kg	M	M	FL ⁻¹ T ²
14.	Gaya (Force)	N	F	MLT ⁻²	F
15.	Berat (Weight)	N	W	MLT ⁻²	F
16.	Densitas Massa	slug/cum	ρ	ML ⁻³	FL ⁻⁴ T ²
17.	Berat spesifik	kg/cum	w	ML ⁻² T ⁻²	FL ⁻³
18.	Viskositas Dinamik	kg.sec/m ²	μ (mu)	ML ⁻¹ T ⁻¹	FL ⁻² T
19.	Tegangan permukaan	kg/m	λ	MT ⁻²	FL ⁻¹
20.	Modulus Elastisitas	kg/m ²	E	ML ⁻¹ T ⁻²	FL ⁻²
21.	Tekanan	N/m ²	p	ML ⁻¹ T ⁻²	FL ⁻²
22.	Gaya Geser	N/m ²	τ	ML ⁻¹ T ⁻²	FL ⁻²
23.	Kerja (energy)	kg.m	W,E	ML ² T ⁻²	FL
24.	Impuls, Momentum	kg.m/sec	I, M	MLT ⁻¹	FT

No	Kuantitas	Satuan	Simbol	Dimensi	
				Sistem fisik	Sistem engineering
25.	Torsi	kg.m	T	ML ² T ⁻²	FL
26.	Tenaga (Power)	kg.m/sec	P	ML ² T ⁻³	FLT ⁻¹

Metode *Buckingham phi* menjelaskan fenomena model hidraulik dengan n parameter Pi dengan i = 1,2,3, n. Jika parameter tersusun oleh m elemen pokok, maka produk bilangan tak berdimensi dapat diturunkan sejumlah (n-m). Untuk keperluan teknik hidraulik biasanya ada 3 elemen pokok yaitu Massa (M), Panjang (L) dan Waktu (T). Bilangan tak berdimensi dapat dinyatakan :

$$\pi_j = P_1^{k_1} P_2^{k_2} P_3^{k_3} \dots \dots \dots P_n^{k_n} \quad (23)$$

Dimana π_j = produk bilangan tak berdimensi dengan j = 1, 2, 3, n jika Pi mempunyai dimensi M^{α1} L^{β1} T^{τ1}, maka dapat ditulis :

$$\pi_j = (M^{\alpha_1} L^{\beta_1} T^{\tau_1})^{k_1} \cdot (M^{\alpha_2} L^{\beta_2} T^{\tau_2})^{k_2} \dots \dots \dots (M^{\alpha_n} L^{\beta_n} T^{\tau_n})^{k_n} \quad (24)$$

Atau

$$\pi_j = (M^{\alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2 + \dots \dots \dots \alpha_n k_n}) \cdot (L^{\beta_1 k_1 + \beta_2 k_2 + \dots \dots \dots \beta_n k_n}) \cdot (T^{\tau_1 k_1 + \tau_2 k_2 + \dots \dots \dots \tau_n k_n}) \quad (25)$$

α_j merupakan bilangan tak berdimensi jika :

$$\begin{aligned} \alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2 + \dots \dots \dots + \alpha_n k_n &= 0 \\ \beta_1 k_1 + \beta_2 k_2 + \dots \dots \dots + \beta_n k_n &= 0 \\ \tau_1 k_1 + \tau_2 k_2 + \dots \dots \dots + \tau_n k_n &= 0 \\ \alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2 + \dots \dots \dots + \alpha_n k_n &= 0 \\ \beta_1 k_1 + \beta_2 k_2 + \dots \dots \dots + \beta_n k_n &= 0 \\ \tau_1 k_1 + \tau_2 k_2 + \dots \dots \dots + \tau_n k_n &= 0 \end{aligned} \quad (26)$$