

DISERTASI

**STRUKTUR PEREDAM ENERGI BERPORI UNTUK
PENGENDALIAN GERUSAN DI ABUTMEN JEMBATAN**

*Energy Dissipator of Porous Structure for Scour Countermeasure at
Bridge Abutment*

IRA WIDYASTUTI

D013181009



**PROGRAM STUDI DOKTOR TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PENGAJUAN DISERTASI

**STRUKTUR PEREDAM ENERGI BERPORI UNTUK
PENGENDALIAN GERUSAN DI ABUTMEN JEMBATAN**

Disertasi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor

Program Studi Ilmu Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

IRA WIDYASTUTI

D013181009

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

DISERTASI
STRUKTUR PEREDAM ENERGI BERPORI UNTUK
PENGENDALIAN GERUSAN DI ABUTMEN JEMBATAN

IRA WIDYASTUTI
D013181009

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk
dalam rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Ilmu Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
pada tanggal 14 Februari 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui
Promotor



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

Co-Promotor



Dr. Eng. Ir. Rita Tahir Lopa, MT
NIP. 196703191992032010

Co-Promotor



Dr. Eng. Ir. Mukhsan Putra Hatta, ST, MT
NIP. 197305121999031002

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



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

Ketua Program Studi
S3 Ilmu Teknik Sipil



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

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Ira Widyastuti

Nomor mahasiswa : D013181009

Program studi : Ilmu Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul “Struktur Peredam Energi Berpori untuk Pengendalian Gerusan Di Abutmen Jembatan” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT ; Dr.Eng. Ir. Hj. Rita Tahir Lopa, MT ; Dr. Eng Ir. Mukhsan Putra Hatta, ST., MT). 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 (IOP Conferences Series : Earth and Environmental Science, Vol : 841, Hal 1-13, dan DOI : 10.1088/1755-1315/841/1/012019) sebagai artikel dengan judul “*The influence of energy-reducing structure placement on friction velocity distribution in open channel*” dan di Jurnal (Civil Engineering Journal, Volume Vol : 8, Hal : 3939-3951, dan DOI : 10.28991/CEJ-2022-08-12-019) sebagai artikel dengan judul “*Dam-Break Energy of Porous Structure for Scour Countermeasure at Bridge Abutment*”.

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

Gowa, 14 Februari 2023

Yang menyatakan,



Ira Widyastuti

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Kuasa atas rahmatnya sehingga disertasi ini dapat diselesaikan.

Gagasan utama Struktur peredam energi berupa plat segitiga berpori sebagai hambatan di hulu abutmen untuk meredam aliran dan diharapkan dapat mengurangi kedalaman gerusan di sekitar abutmen tanpa membuat gerusan yang berarti di sekitar struktur hambatan segitiga.

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. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT sebagai promotor, Dr, Eng, Ir. Hj. Rita Tahir Lopa, MT sebagai co-promotor-1, dan Dr. Eng, Ir. H. Mukhsan Putra Hatta, MT sebagai co-promotor-2.
2. Prof. Dr. Ir. H. Muh. Saleh Pallu, M. Eng ; Prof. Dr. Ir. Mary Selintung, M.Sc ; Dr. Eng. Ir. H. Farouk Maricar, MT ; Dr. Eng. Ir. Bakrir ST., MT sebagai komisi tim penguji .
3. 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.
4. Ibu Hj. Rita Tahir Lopa atas kesempatan untuk menggunakan fasilitas dan peralatan di Laboratorium Sungai Fakultas Teknik Sipil Universitas Hasanuddin. Terima kasih juga saya sampaikan kepada Bapak Benyamin Tanan atas bantuan dalam pengujian statistik.
5. Kepada LPDP, saya mengucapkan terima kasih atas beasiswa bantuan Dana Sumbangan Pembinaan Pendidikan (SPP) yang diberikan (No. 1991/E4/BP/2020) selama menempuh program pendidikan doktor.
6. Rekan-rekan S1, S2, dan S3 Teknik Sipil yang telah banyak memberi bantuan dan dukungan atas selesainya Disertasi ini.

Akhirnya kepada almarhum bapak dan mama tercinta, saya mengucapkan terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan motivasi selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada suami tercinta Agustinus Masuri, SE, kedua anak terkasih Vini Putri Milenia dan Timothy Bagaskara Masuri serta keluarga besar atas kekuatan dan dukungan moril yang tak ternilai. Tak lupa kepada rekan-rekan seperjuangan, terkhusus mahasiswa S3 Angkatan 2018 Fakultas Teknik Sipil Universitas Hasanuddin, saya mengucapkan terimakasih atas kebersamaannya baik dalam suka maupun duka.

Penulis,

Ira Widyastuti

ABSTRAK

IRA WIDYASTUTI. *Struktur Peredam Energi Berpori untuk Pengendalian Gerusan di Abutmen Jembatan* (dibimbing oleh **Muhammad Arsyad Thaha, Rita Tahir Lopa dan Mukhsan Putra Hatta**)

Penelitian ini bertujuan mengendalikan kedalaman gerusan akibat kecepatan aliran yang berkontraksi dengan dinding abutmen dan mengurangi kecepatan aliran berupa perletakan struktur peredam energi (SPE) berpori di daerah hulu abutmen. Eksperimen dilakukan pada saluran persegiempat dengan dan tanpa sedimen. Pemilihan model peredam energi berupa plat segitiga dengan bukaan pori $MP_1=0\%$, $MP_2=5\%$ dan $MP_3=10\%$. Hasil eksperimen menunjukkan persentasi nilai kecepatan gesek untuk masing-masing bukaan pori sebelum SPE berturut-turut 31,42% (menurun), -9,27% (meningkat) dan -32,92% (meningkat). Selanjutnya setelah aliran melewati SPE, kecepatan aliran akan meningkat berturut-turut 37,80%, 25,00% dan 43,85% dan besaran koefisien gaya seret (C_D) yang terjadi di area plat dengan rerata $\approx 4,00$ dan bilangan *Reynolds* berkisar $2,9 \times 10^5 - 5,0 \times 10^5$ dengan lapis batas dapat laminar atau turbulen (Transisi). Analisis menunjukkan kecepatan gesek kondisi normal (u_{*cr}^*) lebih kecil dibandingkan kecepatan kritis (u_{*cr}) untuk daerah *inner region* ($u_{*cr}^* = 0,021 < u_{*cr} = 0,024$) maka butiran dasar relative tidak bergerak dan dapat disimpulkan bahwa gerusan yang terjadi di daerah sekitar abutmen adalah *clear water scour*. Pengukuran kedalaman gerusan (d_s) dilakukan di 6 (enam) titik krusial daerah abutmen. Adapun perletakan optimum SPE terhadap abutmen terjadi pada jarak $9L_b$ dan besarnya reduksi kedalaman gerusan adalah $MP_1=49,95\%$; $MP_2=61,13\%$, dan $MP_3=54,21\%$ sehingga semakin besar bukaan pori pada hambatan maka lubang gerusan di abutmen akan semakin dalam. Penentuan kedalaman gerusan di abutmen berdasarkan hubungan bilangan Reynold dan Froud yang menggunakan analisis non-linear berganda adalah $\frac{d_s}{L_b} = 1.636 + 3,978 \cdot 10^{-4} \left(\frac{U L_b}{\vartheta}\right) - 65,698 \left(\frac{U^2}{g L_b}\right)$ pada kondisi $U \geq u_{*cr}$, dimana semakin besar nilai *Reynolds* dan *Froude* maka semakin besar kedalaman gerusan yang terjadi, begitu pula dengan lebar maupun panjang gerusan di sekitar abutmen.

Kata kunci : Struktur peredam energi berpori, koefisien seret, kecepatan gesek, kedalaman gerusan, bilangan *Reynolds* dan *Froude*

ABSTRACT

IRA WIDYASTUTI. *Energy Dissipator of Porous Structure for Scour Countermeasure at Bridge Abutment* (supervised oleh **Muhammad Arsyad Thaha, Rita Tahir Lopa dan Mukhsan Putra Hatta**)

This study aims to control the scour depth due to the velocity that contracts with the abutment walls and creates turbulent flow (vortex) and reducing the velocity in the form of placing a porous structure of Dam-break energy (SPE) in the upstream area of the abutment. Experiments were carried out on rectangular channels with and without sediment. The energy absorber model was chosen in the form of a triangular plate with $MP_1=0\%$, $MP_2=5\%$ and $MP_3=10\%$ porous. The experimental results show that the percentage of frictional velocity for porous respectively before SPE is 31.42% (decreasing), -9.27% (increasing) and -32.92% (increasing). Furthermore, after the flow passes through the SPE, the velocity will increase respectively 37.80%, 25.00% and 43.85% and the magnitude of the drag coefficient (C_D) that occurs in the plate area with an average of ≈ 4.00 and Reynolds number ranging from $2.9 \times 10^5 - 5.0 \times 10^5$ with the boundary layer can be laminar or turbulent (Transition). The analysis shows that the frictional for normal conditions (u_{*cr}^*) is smaller than the critical (u_{*cr}) for the *inner region* ($u_{*cr}^* = 0,021 < u_{*cr} = 0,024$), so the sediment is relatively not moveable and it can be concluded that the scour that occurs in the area around the abutment is a clear water scour. The scour depth measurement (ds) is carried out at 6 (six) crucial points in the abutment area. The optimum placement of porous structure to the abutment occurs at a distance of $9L_b$ and the magnitude of the depth reduction for scour depth is $MP_1=49,95\%$; $MP_2=61.13\%$ and $MP_3=54,21\%$, furthermore the larger pore opening in the obstacle, the deeper the scour hole in the abutment. Determination of the depth of scour at the abutment based on the Reynolds and Froud number relationship using multiple non-linear analysis is $\frac{ds}{L_b} = 1.636 + 3,978 \cdot 10^{-4} \left(\frac{U L_b}{\vartheta} \right) - 65,698 \left(\frac{U^2}{g L_b} \right)$ with condition $U \geq u_{*cr}$, where the increasing the Reynolds and Froude values, the increasing the depth of scour that occurs, as well as the width and depth of the scour length around the abutment.

Keywords : Dam-break energy, drag coefficient, shear velocity, scour depth, Reynolds and Froude number

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMBUL	i
PENGAJUAN DISERTASI.....	ii
PERSETUJUAN DISERTASI.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	Error! Bookmark not defined.
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL.....	xviii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xx
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Tujuan Penelitian.....	5
D. Manfaat Penelitian.....	5
E. Batasan Masalah.....	6
F. Kebaruan/Novelti	6
G. Penelitian Terdahulu	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	19
A. Kajian Pustaka.....	19
1. Sungai.....	19

2.	Gerusan Dasar Sungai	20
3.	Mekanisme Gerusan di Sekitar Abutmen.....	21
4.	Pola Aliran.....	25
5.	Faktor yang Mempengaruhi Kedalaman Gerusan.....	26
5.1.	Kecepatan Aliran.....	26
5.2.	Kedalaman Aliran	27
5.3.	Panjang Abutmen, Rasio Kontraksi dan Rasio Bukaan.....	29
5.4.	Ukuran dan Gradasi Butir Sedimen	30
5.5.	Bentuk Abutmen	31
5.6.	Alinyemen Abutmen	32
5.7.	Geometri Saluran	33
6.	Pengendalian Gerusan Dasar.....	33
B.	Landasan Teori.....	35
1.	Konsep Teoritis Lapisan Batas.....	35
2.	Konsepsi Kekasaran Permukaan	37
3.	Koefisien Pembagian Kecepatan.....	39
3.1.	Pembagian Kecepatan dalam Aliran	40
3.2.	Distribusi Kecepatan aliran metode Clautser's.....	42
4.	Gaya Hidrostatik	43
4.1.	Gaya hidrostais pada bidang miring.....	43
4.2.	Seretan (<i>Drag</i>).....	45
5.	Aplikasi prinsip energi dalam saluran terbuka	46
5.1.	Energi spesifik.....	48
5.2.	Kriteria aliran kritis.....	50
6.	Material Dasar	51

6.1. Awal Gerak Butir	52
7. Persamaan Empiris Kedalaman Gerusan.....	55
8. Validasi menggunakan simulasi komputasi	59
8.1. Software iRIC	59
8.2. <i>Software i-Ric Nays2DH</i>	60
C. Metode Analisis Dimensi	63
D. Kerangka Pikir.....	66
E. Hipotesa.....	68
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	69
A. Tempat Dan Waktu Penelitian	69
B. Pra Penelitian.....	69
1. Saluran Sirkulasi sedimen (Recirculating sediment flume)	70
2. Dimensi Abutmen Jembatan.....	70
3. Karakteristik aliran dan sedimen dasar yang digunakan	71
C. Jenis Penelitian Dan Sumber Data	71
1. Jenis Penelitian	71
2. Sumber Data	72
D. Alat Dan Bahan	72
1. Alat	72
2. Bahan.....	73
E. Variabel Yang Diteliti	74
F. Perancangan Model	74
1. Struktur Peredam Energi Berpori (hambatan berpori)	75
2. Variasi Parameter Model dan Parameter Aliran.....	76
3. Penentuan Skala, Dimensi Model dan Rancangan Simulasi	77

G.	Tahapan dan Prosedur Pengambilan Data.....	80
H.	Bagan Alir Proses Penelitian Laboratorium dan Analisa Data.....	81
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		84
A.	Umum.....	84
B.	Parameter Utama Aliran.....	85
1.	Pengukuran debit di hulu saluran	85
2.	Pengukuran debit di hilir saluran.....	87
3.	Pengukuran debit di tengah saluran.....	87
3.1.	Pengukuran kecepatan aliran dengan <i>Current Meter (Flow Meter)</i>	88
3.2.	Pengukuran kecepatan aliran dengan <i>Electromagnetic Current Meter</i>	89
3.3.	Pengukuran kecepatan aliran dengan <i>Pitot PorTabel.</i>	90
4.	Validasi Debit dengan Persamaan Empiris	94
4.1.	Persamaan <i>Chezy</i>	94
4.2.	Persamaan <i>Manning</i>	95
4.3.	Rekapitulasi Hasil Validasi data debit	95
5.	Pemeriksaan Material Dasar.....	96
5.1.	Klasifikasi Distribusi Ukuran Butiran Sedimen.....	96
5.2.	Kecepatan Gesek (u^*) <i>Metode Clautser's</i>	98
5.3.	Rekapitulasi Hasil Validasi Distribusi Kecepatan Dengan Metode Empiris	107
5.4.	Kedalaman kritis dan penerapan energi spesifik.....	108
6.	Analisis Dimensi	110
6.1.	Parameter yang mempengaruhi Gaya seret (CD) pada SPE	111
6.2.	Parameter yang mempengaruhi kedalaman gerusan (ds) pada abutmen jembatan akibat SPE.....	114

C.	Kecepatan Aliran Pada Struktur Peredam Energi Berpori	118
1.	Distribusi kecepatan dan pola aliran pada struktur peredam energi berpori.....	119
2.	Kecepatan gesek (u^*) dan konstanta integrasi (C)	124
3.	Gaya seret (C_D) pada struktur peredam energi berpori	129
D.	Gerusan Lokal pada Abutmen Jembatan.....	133
1.	Gerak awal butir sedimen.....	134
2.	Karakteristik dan pola aliran pada aliran seragam	135
3.	Karakteristik gerusan di abutmen jembatan tanpa proteksi.....	138
4.	Kecepatan aliran di daerah abutmen jembatan tanpa proteksi	141
5.	Kedalaman gerusan abutmen akibat struktur peredam energi berpori .	144
5.1.	Penentuan jarak optimum struktur peredam energi	144
5.2.	Kecepatan aliran pendekat akibat struktur peredam energi berpori	149
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		155
A.	Kesimpulan.....	155
B.	Saran.....	156
DAFTAR PUSTAKA		157
LAMPIRAN.....		161

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Klasifikasi aliran	20
Gambar 2. Hubungan Kedalaman Gerusan (<i>Clear Water dan live bed scour</i>) dengan waktu (Chabert & Engeldinger (1956) dalam (Dey and Barbhuiya, 2005)	22
Gambar 3. Profil Aliran pada abutment jembatan (Kwan 1988 dalam (Dey and Barbhuiya, 2005).....	23
Gambar 4. Hubungan kedalaman gerusan dengan kecepatan geser (Breuser dan Raudviki, 1991 dalam Prasetyo, 2007)	24
Gambar 5. Hubungan diameter butiran dan kecepatan (Miller 2003 dalam Rustiati, 2007)	25
Gambar 6. Variasi Kedalaman Gerusan (ds) dengan ratio kecepatan tegangan geser $u * u * c$	27
Gambar 7. Variasi kedalam gerusan (ds) dengan Kedalaman aliran (h), (<i>Local scour at abutment; A Review, ASCE Journal 2004</i>)	28
Gambar 8. Variasi kedalaman gerusan ds dengan Panjang abutmen l , (<i>Local scour at abutment; A Review, ASCE Journal 2004</i>)	29
Gambar 9. Variasi kedalaman gerusan ds dengan gradasi sedimen d_{50} , (<i>Local scour at abutment; A Review, ASCE Journal 2004</i>)	30
Gambar 10. Perkembangan lapisan batas dalam saluran terbuka dengan kondisi pemasukkan yang ideal (Chow, 1997).....	35
Gambar 11. Pembagian kecepatan pada permukaan saluran licin ((Chow, 1997) 36	
Gambar 12. Sifat-sifat kekasaran permukaan (a) Licin,	37
Gambar 13. Sketsa tegangan geser aliran ke arah sumbu x ,	40
Gambar 14. Distribusi Profil kecepatan logaritmik, <i>Prandtl Von-Karman</i>	42
Gambar 15. Formula distribusi kecepatan <i>inner region</i> metode <i>clautser's</i>	43
Gambar 16. Gaya hidrostatis pada bentuk bidang sembarang yang bersudut θ	44
Gambar 17. Hubungan antara koefisien seret dengan bilangan Reynold untuk material bulat (Graft 1966), Pallu S.M, 2007	46
Gambar 18. Prinsip energi untuk aliran permanen.....	47

Gambar 19. Lengkung Energi spesifik.....	49
Gambar 20. Diagram Shields, Hubungan Tegangan Geser Kritis dengan Bilangan Reynolds (Breuser dan Raudkivi, 1991).....	55
Gambar 21. Pengaruh koefisien η_3 terhadap sudut datang aliran	58
Gambar 22. Bagan Pengoperasian Software iRIC	59
Gambar 23. Struktur umum model iRIC (Nelson et al, 2016).....	60
Gambar 24. Sistem Koordinat MBFC Non Dimensional	62
Gambar 25. Kerangka Pikir Penelitian.....	67
Gambar 26. Situasi lokasi Laboratorium	69
Gambar 27. <i>Recirculating sediment flume</i> yang digunakan untuk uji model	70
Gambar 28. Dimensi abutmen wingwall.....	71
Gambar 29. a) Alat pengukuran kedalaman gerusan (<i>Point Gauge</i>) ; b) Alat pengukuran kecepatan aliran (<i>Elegtromagnetic Current Meter</i>)	73
Gambar 30. Bahan Akrilik Transparan	73
Gambar 31. Skema struktur peredam energi dan komponen aliran	75
Gambar 32. Sketsa parameter mode.....	76
Gambar 33. Model Struktur Peredam Energi Berpori	79
Gambar 34. Tampak atas <i>recirculating sediment flume</i> dan letak uji model.....	79
Gambar 35. Rencana Titik-titik pengamatan kedalaman gerusan	79
Gambar 36. Bagan alir proses Analisa data	83
Gambar 37. Grafik Hubungan Debit Aktual dan Koefisien Debit.....	86
Gambar 38. Titik pengukuran pada tengah saluran terbuka	87
Gambar 39. Grafik hubungan Kedalaman (D) dan Debit (Q).....	89
Gambar 40. Alat ukur <i>Electromagnetic Current Meter (ECM)</i>	89
Gambar 41. Alat ukur <i>Pitot PorTabel</i> dan pengukurannya	91
Gambar 42. Grafik hubungan Kedalaman (D) dan Kecepatan (U).....	96
Gambar 43. Distribusi diameter sedimen.....	97
Gambar 44. Titik pengukuran <i>inner region</i> dan <i>outer region</i>	99
Gambar 45. Hubungan kedalaman (D) terhadap kecepatan aliran (u).....	101
Gambar 46. Penentuan kecepatan gesek (u^*) dan konstanta integrasi (C)	101
Gambar 47. Pengaruh debit aliran terhadap (a) u^*/u^*_c dan (b) C/C_c	104

Gambar 48. Hubungan Kedalaman (D) dan Kecepatan (u)	106
Gambar 49. Penentuan kecepatan gesek (u^*) dan konstanta integrasi (C)	106
Gambar 50. Distribusi kecepatan logaritmik kondisi normal dan kondisi kritis.	108
Gambar 51. Sketsa aliran pada struktur peredam energi berpori	109
Gambar 52. Diagram energi spesifik pada struktur peredam energi berpori	109
Gambar 53. (a) Variasi bukaan pori model struktur peredam energi dan (b) Pengukuran kecepatan aliran.....	118
Gambar 54. Skema percobaan pada saluran terbuka	119
Gambar 55. Ilustrasi profil kecepatan aliran non-dimensi	120
Gambar 56. (a) Distribusi kecepatan aliran (U) sebelum SPE.....	121
Gambar 57. Pola dan distribusi kecepatan aliran (u) pada Struktur Peredam Energi berpori	123
Gambar 58. Validasi pola aliran MP ₁ dengan aplikasi <i>IRIC-Nays2D</i>	124
Gambar 59. Penentuan kecepatan gesek (u^*) dan konstanta integrasi (C), (a) sebelum SPE (b) setelah SPE.....	125
Gambar 60. Pengaruh struktur peredam energi terhadap distribusi a) u^*_p/u^* dan b) C_p/C terhadap jarak pada arah longitudinal	127
Gambar 61. Skema gaya hidrostatis (F) pada bidang miring.....	129
Gambar 62. (a) Hubungan Gaya seret (C_D) dan Bilangan Reynolds (Re) dan (b) Hubungan C_D dan Re setelah dinormalkan.....	131
Gambar 63. Verifikasi koefisien seretan (C_D) vs bilangan <i>Reynolds</i> untuk berbagai jenis objek (<i>James R. Welty, dkk, 2000</i>)	132
Gambar 64. Hubungan kecepatan geser kritis (τ_c) dan diameter butir (mm).....	134
Gambar 65. Profil kecepatan <i>inner region</i> dengan kondisi (a) berbutir pasir dan (b) dasar licin	136
Gambar 66. Profil distribusi kecepatan aliran kondisi <i>clear water scour</i>	137
Gambar 67. Validasi Pola aliran MP ₁ di sekitar abutmen menggunakan <i>IRIC-</i> <i>Nays2D</i>	137
Gambar 68. Sketsa pola gerusan dan pola aliran lokal di abutmen	138
Gambar 69. Titik pengamatan kedalaman gerusan lokal abutmen	139

Gambar 70. Hubungan (t/t_{total}) dengan (d_s/L_b) kondisi <i>clear water scour</i> pada 6 (enam) titik pengamatan.....	140
Gambar 71. Kontur permukaan gerusan tanpa proteksi.....	140
Gambar 72. Isometrik kontur gerusan <i>clear water scoure</i> , $T = 180$ menit.....	141
Gambar 73. Pengukuran kontur kedalaman gerusan.....	142
Gambar 74. Nilai bilangan <i>Reynolds</i> lokal pada arah longitudinal.....	142
Gambar 75. Hubungan kedalaman gerusan relative terhadap bilangan (a) <i>Reynolds</i> dan (b) <i>Froude</i> pada kondisi <i>clear water scour</i>	143
Gambar 76. Verifikasi variasi kedalaman gerusan (d_s) dengan ratio kecepatan tegangan geser u^*/u_{*cr}	144
Gambar 77. Grafik (a) reduksi kedalaman gerusan (d_s) dan (b) Kecepatan aliran relative (U/u_{*c}) terhadap jarak (X).....	146
Gambar 78. Hasil pengukuran kecepatan aliran, sebelum dan sesudah hambatan.....	147
Gambar 79. Kontur permukaan gerusan pada tiap jarak proteksi dengan kondisi aliran <i>clear water scour</i>	148
Gambar 80. Validasi Pola aliran arah vertikal antara abutmen dan SPE MP ₁ dengan <i>IRIc-Nays2DH</i> pada jarak $9L_b$	149
Gambar 81. Distribusi aliran arah longitudinal antara abutmen dan SPE.....	150
Gambar 82. Hubungan kedalaman gerusan terhadap (a) bilangan <i>Reynolds</i> dan (b) bilangan <i>Froude</i>	151
Gambar 83. Hubungan kecepatan aliran (U) akibat SPE berpori terhadap kedalaman gerusan relative pada kondisi <i>clear water scour</i>	152
Gambar 84. Hubungan kecepatan aliran akibat SPE berpori terhadap bilangan <i>Reynolds</i> dan bilangan <i>Froude</i> pada kondisi <i>clear water scour</i>	153
Gambar 85. Hubungan kecepatan relative terhadap (a) lebar gerusan dan (b) panjang gerusan.....	154

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Matriks Penelitian Terdahulu.....	7
Tabel 2. Faktor-faktor bentuk abutmen.....	31
Tabel 3. Faktor kesejajaran aliran untuk sudut yang berbeda-beda.....	32
Tabel 4. Taksiran Nilai Tinggi Kekasaran k	38
Tabel 5. Klasifikasi Ukuran Butiran	52
Tabel 6. Variasi nilai η_l (koefisien ukuran butir dan n (fungsi ukuran sedimen dan geometri halangan) terhadap d (distribusi ukuran butir)).....	58
Tabel 7. Variabel geometrik, kinematik, dinamis dan tak berdimensi.....	63
Tabel 8. Variasi parameter model struktur peredam energi.....	76
Tabel 9. Variasi parameter model aliran dengan sedimen tanpa hambatan.....	77
Tabel 10. Dimensi Model.....	78
Tabel 11. Variasi Rancangan Simulasi model	80
Tabel 12. Pengukuran debit aliran di pintu segitiga.....	85
Tabel 13. Pengukuran debit dengan gelas ukur	87
Tabel 14. Pengukuran kecepatan aliran dengan <i>Current Meter</i>	88
Tabel 15. Rekapitulasi kecepatan rerata dengan <i>Current Meter</i>	88
Tabel 16. Pengukuran kecepatan aliran dengan <i>ECM</i>	90
Tabel 17. Rekapitulasi hasil debit aliran dengan <i>ECM</i> untuk Q_1	90
Tabel 18. Pengukuran kecepatan aliran dengan <i>Pitot PorTabel</i> untuk Q_1	91
Tabel 19. Rekapitulasi hasil debit aliran dengan <i>Pitot PorTabel</i>	92
Tabel 20. Rekapitulasi Hasil Pengukuran Debit dengan 3 alat ukur.....	92
Tabel 21. Rekapitulasi Hasil Pengukuran Debit	93
Tabel 22. Parameter utama aliran.....	93
Tabel 23. Rekapitulasi Hasil Kecepatan Rerata Metode <i>Chezy</i>	94
Tabel 24. Rekapitulasi Hasil Analisis Kecepatan Metode Manning.....	95
Tabel 25. Hasil validasi kecepatan aliran dengan persamaan empiris.....	95
Tabel 26. <i>Analisis saringan sedimen berbutir</i>	97
Tabel 27. <i>Berat jenis material penelitian</i>	98
Tabel 28. Pengukuran kecepatan aliran titik 1/2B	100

Tabel 29. Hasil analisis kecepatan aliran titik 1/2B.....	102
Tabel 30. Distribusi kecepatan logaritmik Metode Clautser.....	103
Tabel 31. Rekapitulasi hasil u^* dan C arah transversal	104
Tabel 32. Pengukuran kecepatan aliran arah longitudinal	105
Tabel 33. Rekapitulasi hasil u^* dan C arah longitudinal	107
Tabel 34. Hasil validasi perhitungan U_z untuk dengan persamaan empiris.....	107
Tabel 35. Analisis kedalaman kritis dan energi spesifik pada SPE	110
Tabel 36. Variabel-variabel Gaya Seret (CD).....	111
Tabel 37. Variabel-variabel kedalaman gerusan (ds).....	114
Tabel 38. Distribusi kecepatan aliran berdasarkan pembagian daerah	120
Tabel 39. Hasil perhitungan kecepatan gesek (u^*)	125
Tabel 40. Rekapitulasi Hasil perhitungan kecepatan gesek (u^*_{cr}) dan Konstanta Integrasi (C)	126
Tabel 41. Rekapitulasi persentasi (%) perubahan kecepatan gesek (u^*)	128
Tabel 42. Hasil pengukuran kecepatan aliran (U) pada hulu struktur peredam energi berpori	129
Tabel 43. Perhitungan bilangan <i>Reynolds</i> dan gaya seret (CD).....	130
Tabel 44. Perbandingan nilai C_D	131
Tabel 45. Perbandingan Gaya (F)-hitung dan Gaya (F)-ukur	133
Tabel 46. Nilai kecepatan aliran dengan metode <i>Clautser's</i>	135
Tabel 47. Karakteristik Aliran	136
Tabel 48. Pengukuran kedalaman gerusan pada variasi waktu.....	139
Tabel 49. Perhitungan Angka <i>Reynolds</i> dan Angka <i>Froude</i> pada daerah abutmen	142
Tabel 50. Persentasi reduksi kedalam gerusan.....	145
Tabel 51. Kedalaman gerusan (ds) pada titik 3 (tiga) dan kecepatan relative U/u^*_c akibat hambatan	146
Tabel 52. Nilai kecepatan gesek (u^*) sebelum dan sesudah melewati SPE	147
Tabel 53. Hasil rerata kecepatan aliran akibat SPE berpori pada jarak $9L_b$	150
Tabel 54. Hasil perbandingan kedalam gerusan relative terhadap kedalaman aliran pada jarak $9L_b$	152

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Data hasil uji laboratorium Gradasi material sedimen dasar
- Lampiran 2 Data ukur pada model
- Lampiran 3 Data ukur kecepatan aliran kondisi kedalaman kritis
- Lampiran 4 Perhitungan kecepatan aliran pada kondisi kedalaman normal
- Lampiran 5 Perhitungan kecepatan aliran kondisi kedalaman kritis
- Lampiran 6 Perhitungan kecepatan aliran pada MP_1 ($x = 3,75$ m)
- Lampiran 7 Pengukuran kedalaman gerusan tanpa model SPE
- Lampiran 8 Data ukur kedalaman gerusan abutmen terhadap Model pada jarak $3L_b$
- Lampiran 9 Data ukur kedalaman gerusan abutmen terhadap Model pada jarak $5L_b$
- Lampiran 10 Data ukur kedalaman gerusan abutmen terhadap Model pada jarak $7L_b$
- Lampiran 11 Data ukur kedalaman gerusan abutmen terhadap Model pada jarak $9L_b$
- Lampiran 12 Perhitungan non-linear berganda untuk kedalaman gerusan
- Lampiran 13 Perhitungan lebar dan panjang kedalaman gerusan di abutmen
- Lampiran 14 Dokumentasi penelitian

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/singkatan	Arti dan Singkatan
A	Luas penampang aliran
A_p	Luas plat penampang pori
B	Lebar dasar penampang saluran
b	Panjang Abutmen
C	Nilai konstanta integrasi metode <i>Clautser's</i>
C_c	Konstanta integrasi tengah bentang
c	Faktor tahanan <i>Chezy</i>
C_D	Koefisien seret (drag)
D	Kedalaman aliran
D_m	Batas tinggi dari kecepatan maksimum
d	Diameter butiran
d_s	Kedalaman gerusan
F	Gaya tekanan
F_r	Bilangan Froude
H	Tinggi struktur abutmen
H_p	Tinggi struktur peredam energi berpori
k_s	Tinggi kekasaran kondisi licin
k_s'	Tinggi kekasaran kondisi kasar
L	Lebar kedalaman gerusan
L_b	Lebar abutmen
n	Faktor tahanan manning
P	Panjang kedalaman gerusan
L_p	Lebar struktur peredam energi
Q	Debit aliran
R	Jari-jari hidraulis
R_e	Bilangan Reynolds
S	Kemiringan dasar saluran

z	Titik tinjau kedalaman aliran
κ	Bilangan Von-Karman
t	waktu
U	Kecepatan aliran arah x dan y pada kondisi normal
\bar{U}	Rerata kecepatan arah x dan y pada kondisi normal
U^*	Kecepatan gesek arah x dan y pada kondisi normal
U_{cr}	Kecepatan geser arah x dan y pada kondisi kritis
U_m	Kecepatan aliran maksimum
u_z	Kecepatan aliran arah x dan y pada titik tinjau kedalaman z
u^*	Kecepatan gesek kondisi normal pada titik tinjau
u_{*cr}	Kecepatan geser kondisi kritis pada titik tinjau
u_p^*	Kecepatan gesek akibat hambatan pada kondisi normal
V	Kecepatan aliran arah x
\bar{V}	Rerata kecepatan aliran arah x
α	Sudut gradient aliran
α_v	Nilai koefisien energi arah vertikal
β_v	Nilai koefisien momentum energi arah vertikal
g	Percepatan grafitasi
ϑ	Viskositas (kekentalan) kinematik
μ	Viskositas (kekentalan) dinamis fluida (air)
ρ	Kerapatan fluida (air)
ρ_s	Berat jenis sedimen
γ	Berat jenis fluida (air)
τ_0	Tegangan geser

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Fenomena yang terjadi di sungai berupa pengikisan disepanjang alur memberikan gambaran tentang proses penggerusan/erosi dan endapan sedimen/deposisi. Gerusan adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan penurunan dasar saluran hingga berada di bawah permukaan aslinya (*Hoffman and Verheij, 1997* dalam (Rahmadani, 2014)). Hal ini merupakan fenomena alami yang disebabkan oleh laju perpindahan sedimen di daerah tersebut melebihi laju sedimen hulu. Ini terjadi ketika kecepatan aliran pada saluran melebihi kecepatan yang menyebabkan material dasar bergerak.

Selain itu, perubahan pola aliran akibat morfologi sungai terjadi karena adanya halangan yang melintang di sungai berupa bangunan sungai seperti pilar dan abutmen jembatan, krib sungai, pintu air dan sebagainya yang diikuti gerusan lokal disekitar bangunan. Ketika aliran dipisahkan oleh halangan (bangunan) tak bergerak di daerah dasar sungai maka akan berpotensi terjadinya gerusan dan sedimen yang timbul karena adanya akselerasi (percepatan) dan deselerasi (perlambatan) aliran di sekitar halangan.

Gerusan terjadi tidak terbatas hanya pada struktur dan bukanlah masalah. Gerusan akan menimbulkan masalah ketika penurunan dasar saluran sungai menyebabkan ketidakstabilan atau kegagalan struktur yang berada pada atau dekat dengan sungai tersebut. Struktur yang umumnya berada di sungai adalah jembatan. Survey statistik yang dilakukan pada penyelidikan alasan kegagalan jembatan menyiratkan bahwa sebagian besar jembatan telah gagal karena gerusan berlebihan pada elemen infrastruktur selama banjir (*Yanmaz and Apaydin, 2012*).

Dalam studi penyelidikan gerusan, perhatian telah lebih diutamakan kepada prediksi akhir kedalaman gerusan, dibandingkan perkembangan kepada pengalihan sementara gerusan menuju kondisi ekuilibrium (*Chiew dan Melville 1987, Lim dan*

Cheng 1998 dalam (Ballio, Radice and Dey, 2010)). Penyelidikan fitur sementara adalah penting untuk memahami waktu yang di dibutuhkan untuk mencapai kedalaman gerusan tertentu.

Saat ini telah banyak penelitian dilakukan dalam upaya mengurangi gerusan lokal di pilar maupun abutmen dengan melakukan rekayasa-rekayasa pengendalian gerusan lokal di sekitar elemen struktur jembatan dengan beragam tujuan seperti memberikan bentuk pada pilar dan abutmen, mengatur kemiringan dasar saluran, membuat kekasaran bahan di pilar dan abutmen, dan mengurangi kecepatan aliran dengan berbagai model hambatan. Metode paling umum adalah membuat rip-rap yakni dengan menempatkan batu-batuan kedalam lubang gerusan yang paling potensial. Hal ini dikuatkan oleh Graf (1998) dalam (Rinaldi, 2001) yang menyatakan bahwa rip-rap adalah perlindungan paling efektif untuk mengendalikan lubang gerusan dengan menimbun batuan kedalam gerusan dengan lebar $2-3b$ dan tebal $3d_r$.

Menurut *Melville* (1992, 1995, 1997) dalam (Dey and Barbhuiya, 2005), faktor bentuk mempengaruhi pengurangan gerusan lokal di abutmen dan menegaskan pentingnya bentuk abutment berkurang ketika abutment menjadi lebih panjang. Beberapa bentuk abutmen seperti *vertical-wall (VW)*, *semicircular-wall (SC)*, *spill-through (ST)* and *wing-wall (WW)* memiliki koefisien faktor bentuk yang berbeda. Dari beberapa bentuk tersebut yang memiliki produk besar terhadap gerusan adalah bentuk tipe *vertical wall (VW)*.

Untuk mengatur kemiringan dasar saluran, salah satunya dengan menempatkan ambang dasar di hilir abutmen namun akan berpengaruh di daerah hilir ambang berikutnya karena menimbulkan gerusan yang besar dibandingkan dengan tanpa adanya ambang dasar. Sehingga adanya ambang dasar saluran berpengaruh terhadap adanya gerusan lokal di hilir ambang dasar saluran ((Rustiati, 2007). (Hamidifar, Nasrabadi and Omid, 2018), melakukan penyelidikan efisiensi pengurangan gerusan dengan sebuah ambang dasar (*bed sill*) yang diletakkan di hilir struktur jembatan sebagai pengendali gerusan dengan melakukan efektifitas variasi letak ambang yang menghasilkan 95% pengurangan gerusan maksimum di daerah hilir abutmen.

Pengurangan gerusan lokal dapat juga dilakukan dengan menambahkan kekasaran di elemen struktur jembatan. Menurut (Li, Barkdoll and Kuhnle, 2005), gerusan lokal di abutmen akan berkurang bergantung pada lebar pemasangan plat kerah di dinding abutmen yaitu $0,23 L$ (L adalah lebar abutmen arah datang aliran). Selain itu, (Radice and Davari, 2014) melakukan penelitian tentang kekasaran pada elemen abutmen berupa alur buatan, dimana hasilnya menyatakan bahwa lebih dari 25% gerusan lokal di abutmen akan berkurang. Selanjutnya (Shahsavari, Heidarpour and Mohammadalizadeh, 2017), meneliti tentang gerusan lokal di abutmen dengan menggabungkan antara dinding abutmen yang dibuat alur (kasar) dan pemakaian plat kerah dan hasilnya adalah pengurangan gerusan lokal sebesar 83%.

Berdasarkan penyelidikan, gerusan lokal di abutmen juga dapat berkurang dengan memberikan hambatan di hulu abutmen yang bertujuan mengurangi kecepatan aliran datang. Hal ini di nyatakan dalam penyelidikan penggunaan vegetasi di ditebing saluran di sekitar abutmen. Hasil penyelidikan menyatakan bahwa kedalaman gerusan dapat berkurang sebesar 39% dibandingkan dengan tebing tanpa vegetasi (Amir *et al.*, 2018). Menurut (Pu *et al.*, 2019), vegetasi yang fleksibel mempengaruhi pengangkatan (C_d) dan gesekan (C_f) dari kecepatan aliran. Peneliti menyarankan nilai (C_d) dan (C_f) tidak konstan pada kedalaman dan kerapatan vegetasi yang berbeda.

Selain hambatan vegetasi, beberapa hambatan alami yang terjadi di sungai menyebabkan perpisahan aliran, mengontrol gerusan lokal dan pengendapan. Hal ini bergantung pada bentuk-bentuk hambatan, morfologi sungai, karakteristik aliran dan sedimen namun karena tidak ada pendekatan yang disetujui secara umum untuk analisis bentuk-bentuk ini belum ada, maka metode berbasis proses dikembangkan yang menghubungkan hubungan variabel morfometrik tertentu dengan angka *Reynolds* yang disesuaikan dengan hambatan (Euler and Herget, 2012).

Pemakaian hambatan juga digunakan untuk mengukur kekeruhan arus yaitu deviasi atau disipasi (kehilangan energi mekanik akibat gesekan) di reservoir dapat dicapai dengan menggunakan rintangan. (Asghari Pari, Kashefipour and Ghomeshi, 2017) menyarankan penggunaan hambatan dalam mengukur kekeruhan arus

bergantung pada variasi tinggi hambatan untuk mengontrol aliran subkritis dan superkritis. Pernyataan ini diperkuat (Yaghoubi *et al.*, 2017) bahwa kecepatan arus akan berkurang setelah melewati hambatan pada jarak $x = 4$ sebesar 37,4%. (Kordnaeij, Sajadi and Bajestan, 2017) melakukan penyelidikan hambatan berbentuk hambatan permeable (kedap) dan lembaran berpori untuk mengukur kekeruhan arus. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan hambatan permeable, rotasi kekeruhan air meningkatkan disipasi (kehilangan energi) dibandingkan dengan lembaran berpori. Selanjutnya, dengan meningkatkan ketinggian relatif, kendala pada saat kemiringan nol dan kemiringan tidak nol menunjukkan kinerja yang meningkat, baik hambatan permeable dan lembaran berpori. Selain itu, (Maghsoodi, Khademalrasoul and Sarkardeh, 2022) melakukan penelitian tentang model variasi hambatan dan menyatakan bahwa pada rintangan segi empat tekanan negatif terjadi di sekitar rintangan, sedangkan pada rintangan trapesium dan segitiga tekanan selalu positif. Hal ini menyatakan bahwa semakin tegak luas kontak maka aliran disekitar hambatan akan melambat.

Berdasarkan maksud tersebut maka terpikir tentang model pengendali gerusan yang lain berupa struktur yang dapat meredam energi tanpa membuat gerusan baru yang signifikan di sekitar struktur dan di letakkan di hulu abutmen jembatan yang berfungsi mengontrol kedalaman gerusan abutmen yang selanjutnya diberi nama Struktur Peredam Energi Berpori. Konsep pikir dari penelitian model struktur hambatan berpori ini di harapkan dapat mereduksi kecepatan aliran dan mengurangi kedalaman maksimum gerusan di abutmen.

Untuk itu dilakukan pendekatan dengan melakukan uji model fisik di laboratorium berupa model struktur pengendali gerusan berupa bangunan peredam energi berpori (lubang).

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang masalah, dalam tulisan ini akan dipelajari pengaruh model hambatan berpori terhadap kecepatan aliran dan transport sedimen pada area abutmen dengan uji model fisik, dengan rumusan masalah kajian adalah:

1. Bagaimana pengaruh struktur peredam energi berpori dalam mereduksi kecepatan aliran.
2. Bagaimana hubungan antara parameter kecepatan aliran terhadap struktur peredam energi berpori
3. Bagaimana pengaruh jarak penempatan struktur peredam energi terhadap pola gerusan yang terjadi di abutmen jembatan
4. Bagaimana mendapatkan persamaan rekayasa parameter dalam mengurangi kecepatan aliran akibat adanya struktur peredam berpori sehingga mengurangi kedalaman gerusan di sekitar abutmen.

C. Tujuan Penelitian

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

1. Menentukan besarnya pengaruh struktur peredam energi berpori dalam mereduksi kecepatan aliran.
2. Menemukan koefisien seret (C_D) pada Struktur Peredam Energi Berpori
3. Mendapatkan jarak efektif penempatan struktur peredam energi terhadap kedalaman gerusan yang terjadi di abutmen jembatan.
4. Mendapatkan hubungan antara parameter kecepatan aliran dan kedalaman gerusan, di abutmen akibat adanya struktur peredam energi.

D. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian dalam tulisan ini adalah:

1. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai referensi dalam mengembangkan model hambatan berpori sekaligus sebagai pengendali gerusan (*scouring*) yang sejauh ini belum pernah dikembangkan di Indonesia.
2. Hasil penelitian menjadi tambahan alternative tipe bangunan pengendali gerusan dan sekaligus sebagai referensi bangunan yang bisa mengendalikan sedimen dasar di abutment jembatan.

3. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai pedoman dan pendekatan teknis perencanaan bilamana model ini menjadi pilihan aplikatif di suatu lokasi yang mengalami masalah gerusan
4. Hasil kajian menjadi tambahan referensi untuk penelitian model pengendali gerusan yang berfungsi sebagai pengendalian laju aliran di abutmen.

E. Batasan Masalah

Ruang lingkup penelitian dalam tulisan ini adalah sebagai berikut :

1. Mengkaji kedalaman gerusan di daerah abutmen akibat adanya struktur peredam energi berpori
2. Kecepatan aliran yang datang, tegak lurus terhadap model dengan variasi kemiringan struktur peredam energi
3. Tidak mengkaji stabilitas struktur peredam energi sebagai pengendali gerusan
4. Fluida yang digunakan adalah kondisi *clear-water scour*. Pengamatan pengendalian kedalaman gerusan di sekitar abutmen dilakukan pada kondisi *live-bed scour without sediment supply* (tanpa pergerakan sedimen dasar).

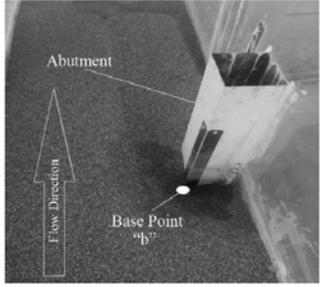
F. Kebaruan/Novelti

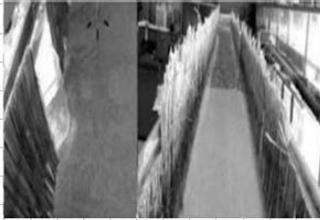
Kebaruan atau novelty dari hasil penelitian adalah adanya pengaruh struktur peredam energi berpori sebagai hambatan di hulu abutmen sehingga akibat diletakkannya hambatan maka besarnya aliran akan tereduksi ke arah abutmen dan mampu mengurangi kedalaman gerusan di area abutmen hingga keseimbangan gerusan di sekitar abutmen tercapai.

G. Penelitian Terdahulu

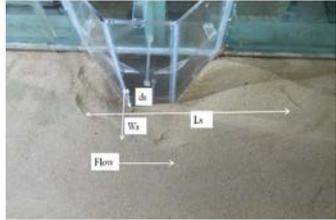
Pada bab ini diberikan gambaran beberapa penelitian terdahulu yang telah dilakukan dalam ranah model bangunan pengendali gerusan (*scouring*). Beberapa penelitian terdahulu disajikan dalam bentuk matriks.

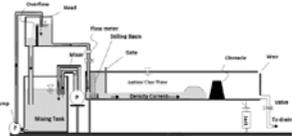
Tabel 1. Matriks Penelitian Terdahulu

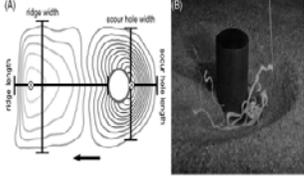
No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
1	(Osroush <i>et al.</i> , 2019)	The effects of height and vertical position of slot on the reduction of scour hole depth around bridge abutments	Ain Shams Engineering Journal, ASEJ ; Journal Of Elsevier, 2019	<ul style="list-style-type: none"> Efek dari tinggi dan posisi vertical slot untuk mengurangi gerusan pada keliling segiempat abutmen dengan model variasi konstruksi slot dalam berbagai dimensi dibawah kondisi variasi aliran 	<ul style="list-style-type: none"> Hasil penelitian juga menunjukkan penggunaan slot di abutment lebih efektif mengurangi gerusan dibandingkan penggunaan di pilar. 	<ul style="list-style-type: none"> Pengamatan dilakukan disekitar abutment jembatan Mendapatkan kedalaman gerusan yang lebih kecil di abutmen 	<ul style="list-style-type: none"> Adanya penambahan slot di abutmen untuk mengurangi kedalaman gerusan Menggunakan abutmen konvensional Gerusan yang terjadi adalah live bed scour
2	(Thanos Papanicolaou <i>et al.</i> , 2018)	Role of Structure Submergence on Scour Evolution in Gravel Bed Rivers: Application to Slope-Crested Structures	60 th Anniversary State-of-the-Art Reviews ; J. Hydraulic Eng, ASCE 144(2), 2018	Mensimulasi secara numerik perubahan gerusan di bawah struktur tumpukan batu yang terendam dan membandingkan angka-angka hubungan model dari bentuk lubang gerusan pada seputaran aliran yang menghilang dibawah tumpukan batu.	<ul style="list-style-type: none"> Model numerical pola gerusan, dimana waktu evolusi gerusan bergantung pada ratio volume gerusan (V_i/V_T) Struktur pada kondisi terendam penuh, luasan lubang gerusan sepanjang hulu dari hambatan dan 	<ul style="list-style-type: none"> Konsep dasar hambatan berlubang Model turbulen aliran dan dalamnya gerusan 	<ul style="list-style-type: none"> Hambatan batu bukan sebagai hambatan utk mengurangi kedalaman gerusan di abutmen Perubahan dasar sungai (gerusan) yang ditinjau adalah di abutmen jembatan Gerusan yang terjadi adalah live bed scour

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
					<p>hampir mendekati sisi dinding dimana tumpukan terpasang.</p> 		
3	(Amir <i>et al.</i> , 2018)	Experimental Investigation of Channel Bank Vegetation on Scouring Characteristics Around A Wing Wall Abutment	<i>Technical Journal, University of Engineering and Technology Taxila, Pakistan Vol. 23 No. 1-2018 ISSN:1813-1786 (Print) 2313-7770 (Online)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Pengujian tentang performa estimasi dampak vegetasi di tebing saluran pada karakteristik gerusan yang berbeda seperti kedalaman disekitar abutment, waktu keseimbangan yang dibutuhkan oleh partikel dasar dan kedalaman yang disarankan untuk mengganti partikel sedimen dasar dengan dua scenario (dengan dan tanpa vegetasi di tebing saluran) 	<ul style="list-style-type: none"> • Kedalaman gerusan berkurang 39% sebagai perbandingan saluran tanpa vegetasi pada laju aliran maksimum 0,04 m³/dtk • Partikel sedimen mencapai keseimbangan gerusan di 15 jam pertama pada kasus vegetasi tebing di bandingkan tanpa vegetasi tebing menunjukkan 42% tercapai keseimbangan 	<ul style="list-style-type: none"> • Pengamatan dilakukan disekitar abutment jembatan tipe wing wall • Mendapatkan keseimbangan gerusan di abutmen menggunakan hambatan 	<ul style="list-style-type: none"> • Hambatan yang digunakan adalah hambatan vegetasi

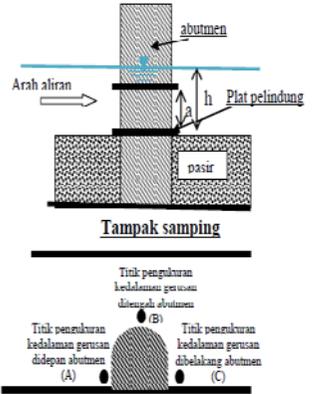
No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
4	(Shahsavari, Heidarpour and Mohammadalizadeh, 2017)	Simultaneous Effect Of Collar And Roughness On Reducing And Controlling The Local Scour Around Bridge Abutment	Journal of Acta Universitatis Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis, Volume 65, Number 2, 2017	<ul style="list-style-type: none"> •Maksimum kedalaman gerusan lokal pada kondisi clear water dan ambang gerakan partikel,. •Ambang pergerakan partikel ditentukan oleh hubungan pengujian terhadap waktu yang belum terpasang abutmen.Penyelidikan dari dampak corral (batu) pada mekanisme gerusan dan perubahan sementara dengan ukuran collar, 2 ukuran yaitu 1,5 L dan 2 L di atas permukaan) akan di uji dan dianalisis 	<ul style="list-style-type: none"> • Penelitian menggunakan kriteria yang berbeda untuk waktu yang digunakan untuk mencapai keseimbangan gerusan. Kumar (1999) mempertimbangkan waktu keseimbangan gerusan adalah 3 jam setelah kedalaman gerusan berubah kurang dari 1 mm ; • hasilnya adalah pengurangan gerusan lokal sebesar 83%. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mengurangi kedalaman gerusan di area abutmen • Gerusan yang terjadi adalah clear water scour 	<ul style="list-style-type: none"> • Menggunakan kekasaran bentuk di abutmen untuk mengurangi kedalaman gerusan • Menggunakan waktu keseimbangan untuk mendapatkan kedalaman gerusan minimal
5	(Abdelaziz and Lim, 2017)	Scour Hole Characteristics Around Abutment in Compound Channel	World Environmental and Water Resources Congress, American Society of Civil Engineers. (ASCE) 2017	<ul style="list-style-type: none"> • Studi ini berfokus pada gerusan disekitar 45° wing-wall bagian belakang abutment di saluran majemuk 	<ul style="list-style-type: none"> • Pengukuran kedalaman gerusan, Panjang, lebar, area permukaan dan volume dari lubang gerusan pada interval perbedaan waktu sampai menjadi kondisi gerusan setimbang terpenuhi. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensi abutmen tipe wing wall • Menganalisis kedalaman gerusan di abutmen • Menganalisis lebar dan panjang gerusan di abutmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Menggunakan pengaruh tinggi abutmen terhadap lubang gerusan

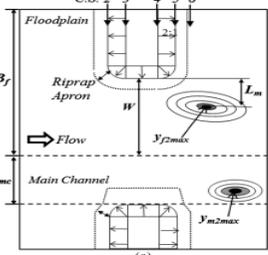
No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
					<ul style="list-style-type: none"> Ditemukan pengaruh kenaikan tinggi abutment pada kedalaman dan lebar gerusan lebih besar di bandingkan Panjang gerusan. 	<ul style="list-style-type: none"> Gerusan yang terjadi adalah clear water scour 	
6	(Khosravinia <i>et al.</i> , 2018)	Effect of trapezoidal collars as a scour countermeasure around wing-wall abutments	Journal Water Science and Engineering, Vol 8 No.1, 2017	<ul style="list-style-type: none"> Gerusan local yang terbangun disekitar wing-wall abutmen di selidiki dengan kerah yang dipasang dan tanpa kerah. 	<ul style="list-style-type: none"> Dengan terpasangnya kerah di abutmen, tidak terlihat terjadi gerusan di 200 menit pertama. Hasil menunjukkan pemasangan lebar kerah tidak hanya menahan scouring tapi juga mengurangi maksimum kedalaman gerusan Peningkatan lebar kerah memberikan performa terbaik buat abutmen yang lebih kecil. Biasanya kedalaman gerusan menurun dari 9% 	<ul style="list-style-type: none"> Pengamatan dilakukan pada abutment jembatan Variasi waktu yang dibutuhkan untuk gerusan mencapai kesetimbangan di area abutmen 	<ul style="list-style-type: none"> Menggunakan kekasaran di dinding abutmen dengan kerah yang terpasang dan tidak terpasang Gerusan yang terjadi adalah live-bed Scour

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
					<p>menjadi 37% dengan lebar kerah yang berbeda</p> 		
7	(Kordnaeij, Sajadi and Bajestan, 2017)	Experimentally Comparisons of the Effect of Porous Sheets and Porous Obstacles in Controlling Turbidity Current	Article of Research Gate Journal, Water and Soil 2017	<ul style="list-style-type: none"> • Pengukuran kekeruhan menjadi faktor utama angkutan sedimen dan deposisi di tampungan. • Penelitian ini, adalah efek dari lembaran berpori dan hambatan berpori dalam mengontrol kekeruhan. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hasil menunjukkan kasus penggunaan hambatan berpori, aliran yang berputar telah dibentuk dalam aliran kekeruhan dalam arah tegak lurus yang mana meningkatkan kehilangan energi kekeruhan dalam aplikasi hambatan berpori yang dibandingkan dengan aplikasi lembaran berpori. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menggunakan plat hambatan berpori • Mengukur kehilangan energi pada hambatan 	<ul style="list-style-type: none"> • Pengukuran kehilangan energi (kecepatan) diamati untuk lembar berpori dan hambatan berpori • Mengukur kekeruhan aliran • Menggunakan sedimen melayang

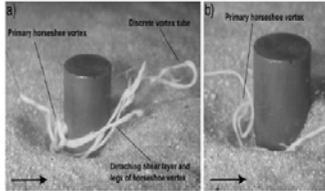
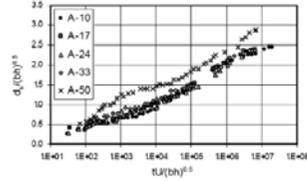
No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
					<ul style="list-style-type: none"> Selanjutnya, dengan meningkatnya tinggi relative dari hambatan di kedua kasus maka performa dengan slope dan tanpa slope dari kedua hambatan berpori dan lembar berpori makin meningkatkan 		
8	(Armenio, 2017)	Hydromorphological processes at submerged solitary boulder obstacles in streams	Journal of Elsiwier Catena 157 (2017) 250–267, 2017	<ul style="list-style-type: none"> Penyelidikan terhubung di flume laboratorium, proses hidromorphologi bebatuan terendam sendiri-seperti hambatan. Validasi dari hasil pengujian, lima posisi dengan hambatan yang ditandai dengan batu bear di ukur dua batu dasar di hilir lokasi di spanyol 	<ul style="list-style-type: none"> Tiga kondisi hydromorphologi (I) dominasi vortex-lemah dan tidak adanya gerusan (II) dominasi vortex-lemah dan gerusan di hilir (III) Dominasi vortex tapal kuda, gerusan terbuka dan belakang batu-akumulasi sedimen pada sisi kiri. 	<ul style="list-style-type: none"> Menggunakan hambatan di dasar flume dan sebagian hambatan terendam Gerusan yang terjadi adalah clear water scour 	<ul style="list-style-type: none"> Menggunakan model boulder sebagai hambatan di aliran bebas Mengukur kedalaman gerusan di area hambatan

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
9	(Asghari Pari, Kashefipour and Ghomeshi, 2017)	An experimental study to determine the obstacle height required for the control of subcritical and supercritical gravity currents	European Journal of Environmental and Civil Engineering, Taylor and Francis, 2016	Objek eksperimen dilakukan dengan cara membuat kondisi variasi aliran dengan perbedaan konsentrasi dan untuk mengontrol kekeruhan arus menggunakan sebuah penghambat berbentuk trapezoid dengan kemiringan di kedua sisi.	<ul style="list-style-type: none"> • Hubungan yang kuat antara kedalaman bilangan froude ($1,7 < Fr_d < 1,37$), kemiringan dasar saluran ($0, S < 3,86\%$) dan ratio dari tebal arus sampai dasar saluran ($0,06 < r < 0,24$) • Dlm membuat obstacle arus subcritical, tinggi obstacle 2-2,75 kali dari tinggi arus dan utk hambatan arus supercritical maka tinggi obstacle 3,2-5 kali sbg tinggi hambatan yang dirujuk. 	<ul style="list-style-type: none"> • Parameter skala laboratorium adalah non-dimensional • Penentuan tinggi hambatan berdasarkan bilangan Froude 	<ul style="list-style-type: none"> • Menentukan jenis aliran super kritis dan sub kritis berdasarkan tinggi hambatan • Hambatan berupa model trapezoid • Fungsi hambatan untuk mengontrol kekeruhan
10	(Sudiyono Ad, 2016)	Upaya Pengendalian Gerusan Di Sekitar Abutmen Jembatan	Jurnal NERSIA, Vol. XII No.1, Mei 2016	<ul style="list-style-type: none"> • Penelitian bertujuan mengetahui pengaruh hambatan ground sill sebagai pelindung abutmen terhadap proses gerusan, kedalaman gerusan dan perubahan konfigurasi dasar di sekitar abutmen jembatan 	<p>Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan plat pelindung mampu menurunkan kedalaman gerusan secara efektif pada bagian hulu, tengah dan hilir abutmen.</p> <p>Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi gerusan maksimum terjadi sebesar 63,3 % untuk jarak plat 0,25 h untuk titik A, 35 % dan 50</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pengamatan dilakukan pada abutment jembatan • Menggunakan hambatan untuk mereduksi kecepatan aliran. 	<ul style="list-style-type: none"> • Model struktur berupa groundsill sebagai pelindung abutmen • Meletakkan groundsill di hilir abutmen • Konsentrasi waktu yang dibutuhkan untuk gerusan mencapai kesetimbangan di area abutmen

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
					<p>% pada jarak plat 0,75 h untuk titik B dan titik C . Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa penggunaan plat ganda dengan jarak 0,75 h lebih efektif daripada pada jarak plat 0,25 h dan 0,5h.</p>  <p>Tampak samping</p> <p>Titik pengukuran kedalaman gerusan dibelakang abutmen (C)</p> <p>Titik pengukuran kedalaman gerusan dibelakang abutmen (B)</p> <p>Titik pengukuran kedalaman gerusan di depan abutmen (A)</p>		<ul style="list-style-type: none"> Variasi kombinasi pelindung abutmen yang digunakan adalah menempatkan plat di sekeliling abutmen

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
11	(Hong, Sturm and Stoesser, 2015)	Clear Water Abutment Scour in a Compound Channel for Extreme Hydrologic Events	Journal Hydraulics of Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2015	<ul style="list-style-type: none"> Parameter signifikan yang mempengaruhi gerusan pada lokasi abutmen jembatan di saluran gabungan adalah ditunjukkan oleh hasil analisis dimensional 	 <ul style="list-style-type: none"> Hasilnya, kedalaman gerusan aliran nondimensional adalah trend yang sama dengan produk q_2/q_1 dan $V1/Vc$, walaupun mereka asli dari dua tipe yang berbeda. 	<ul style="list-style-type: none"> Kontribusi utama dari penelitian ini untuk masalah kegagalan abutmen jembatan yaitu perpanjangan gerusan dgn metode prediksi gerusan berdasarkan teori gesekan panjang ke aliran bawah dan lampauan aliran sampai aliran bebas. 	<ul style="list-style-type: none"> Ukuran abutmen spill-through bervariasi sehingga menciptakan saluran compound Variasi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kedalaman maksimum gerusan di area abutmen Gerusan yang terjadi adalah live-bed Scour
12	(Radice and Davari, 2014)	Roughening Elements as Abutment Scour Countermeasures	Journal Hydraulics of Engineering, ASCE, 2014	<p>Untuk pengujian tanpa pelindung abutmen, hanya sebuah plat yang ditambahkan. Untuk pengujian dengan pelindung abutmen, alat plat dengan karakteristik elemen kekasaran dgn kombinasi yang berbeda dari <i>thickness</i>, <i>protrusion</i> dan <i>spacing</i> yang digunakan</p>	<p>Tulisan ini mengeksplorasi kemungkinan untuk menggunakan kekasaran elemen sebagai pelindung gerusan di abutmen. Kinerja perangkat seperti ini telah ditentukan penyelidikan eksperimental, untuk rentang kondisi yang digunakan, parameter konfigurasi terbaik dan dugaan reduksi gerusan.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Penggunaan skala laboratorium yang digunakan non-dimensional Pengujian kemampuan untuk mengontrol gerusan pada abutmen 	<ul style="list-style-type: none"> Menggunakan kekasaran elemen di abutmen Konsentrasi waktu yang dibutuhkan untuk gerusan mencapai kesetimbangan di area abutmen Gerusan yang terjadi adalah live-bed Scour

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
13	(Mohammadpour, Ghani and Azamathulla, 2013)	Estimation of dimension and time variation of local scour at short abutment	International Journal of River Basin Management, Vol. 11, No. 1 (March 2013), pp. 121-135 Taylor & Francis	<ul style="list-style-type: none"> • Prediksi keakuratan gerusan local di abutment menjadi penting untuk kriteria desain abutmen • Dimensi dan variasi gerusan local dengan waktu pada wing-wall abutmen diselidiki dengan kondisi clear-water. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hasil menunjukkan indikasi dimensi untuk lubang gerusan diarah antara 3L sampa 5L hulu dan hilir abutmen masing-masing, dan juga 4L araha y • Analisis menunjukkan indikasi gerusan loka sangat besar dampaknya di tiga parameter yaitu perbandingan waktu (t/t_e) > ratio Panjang abutmen (L/y) > perbandingan kecepatan (U/U_c) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pengamatan variasi waktu dilakukan disekitar abutment jembatan tipe wing wall • Parameter yang diamati perbandingan waktu (t/t_e) > ratio Panjang abutmen (L/y) > perbandingan kecepatan (U/U_c) • Gerusan yang terjadi adalah clear-water 	<ul style="list-style-type: none"> • Model struktur hambatan gerusan menggunakan plat berlubang di hulu abutmen jembatan • Variasi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kedalaman maksimum gerusan
14	(Ballio, Radice and Dey, 2010)	Temporal Scales for Live-Bed Scour at Abutments	Journal Hydraulc of Engineering, ASCE, 136;395-402, 2010	<ul style="list-style-type: none"> • Hasil yang gunakan untuk pengujian adalah gerusan dasar sungai (live-bed scour) • Skala waktu sementara untuk sedimen dasar di abutmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Fungsi transport sedimen $\Phi = 6 \times 10^{-5}$, dimana $\Phi = q / (\Delta g d_{50} J^3)^{0.5}$, g=gravitasi and q=sedimen flux per lebar. • Parameter shield, Θ, untuk kedua tes menggunakan estimasi dari kemiringan energy, disebut nilai kritis $\Theta_c \approx 0,03$ untuk angka kekasaran Reynold $\frac{R^* = u^* d_{50}}{\nu} \approx 60$, dimana u^* = kecepatan kritis dan ν = kekentalan cairan kinematic • Mengukur bilangan Froude sebagai $F = u/(gD)^{0.5}$, dimana D = kedalaman aliran. 	<ul style="list-style-type: none"> • Penggunaan skala laboratorium yang digunakan dari skala non-dimensional • Mengukur bilangan Froude sebagai $F = u/(gD)^{0.5}$, dimana D = kedalaman aliran. • Menggunakan parameter shield Θ 	<ul style="list-style-type: none"> • Variasi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kedalaman maksimum gerusan di area abutmen • Gerusan yang terjadi adalah live-bed Scour

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
15	(Euler and Herget, 2012)	Controls on local scour and deposition induced by obstacles in fluvial environments	Journal hydraulic of Elsevier, 2010	<ul style="list-style-type: none"> Hambatan di lingkungan sungai menyebabkan pemisahan aliran dan munculnya aliran tiga dimensi yang mengarah pada gerusan dan deposisi bahkan ketika angkutan sedimen di dasar 	<ul style="list-style-type: none"> Ada hubungan yang signifikan antara morphometry hambatan dasar dengan hambatan bilangan Reynold, khususnya ketika variable morphometri di kombinasikan 	<ul style="list-style-type: none"> Menggunakan hambatan dasar Mendapatkan besarnya bilangan Reynold pada hambatan 	<ul style="list-style-type: none"> Gerusan yang terjadi adalah live-bed Scour Mengamati gerusan yang terjadi di hambatan Variasi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kedalaman maksimum gerusan
16	(Ballio, Teruzzi and Radice, 2009)	Constriction Effects in Clear-Water Scour at Abutments	Journal Hydraulic of Engineering, ASCE, 135:140-145., 2009	<ul style="list-style-type: none"> Teknik kontrol aliran dan sedimen di abutmen jembatan Kontrol parameter dampak kekentalan (termasuk bilangan Reynolds) diabaikan, sebagaimana seluruh bentuk abutmen dan alinyemennya. 	 <ul style="list-style-type: none"> Hasil typical adalah bahwa penyempitan besar dikenakan pada aliran masuk, besarnya nilai kedalaman gerusan yang diukur Pada prinsipnya proses dari erosi, pembuktian bergantung pada rasio b/B dimana pengamatan untuk penahan 	<ul style="list-style-type: none"> Penggunaan skala laboratorium yang digunakan dari skala non-dimensional Perbandingan antara b/B Gerusan yang terjadi akibat clear water 	<ul style="list-style-type: none"> Variasi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kedalaman maksimum gerusan di area abutmen

No	Nama Penulis	Judul	Sumber	Pokok Persoalan	Outcome	Persamaan Rencana Riset	Perbedaan Rencana Riset
					50%, menurut penemuan literature sebelumnya.		
17	(Widyastuti <i>et al.</i> , 2021)	Struktur peredam energi berpori untuk pengendalian gerusan di abutmen jembatan		<ul style="list-style-type: none"> • pengaruh hambatan berpori dalam mengurangi kecepatan aliran di daerah gerusan jembatan • Pola kedalaman gerusan yang terjadi di sekitar abutmen akibat adanya bangunan hambatan berpori • Pengaruh jarak penempatan hambatan pori terhadap abutmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Adanya pengaruh struktur peredam energi dalam mereduksi kecepatan aliran dan mengurangi kedalaman gerusan di abutmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Tipe abutmen adalah wing wall 45° • Model struktur peredam energi berupa hambatan plat segitiga berpori dan diletakkan di hulu abutmen dengan tujuan mengurangi kecepatan aliran sebelum tiba di abutmen • Menggunakan struktur di dasar flume dan keseluruhan hambatan terendam. • Menggunakan sedimen dasar D_{50} • Besarnya degradasi yang terjadi di dasar sampai terjadi keseimbangan gerusan di abutmen sebelum ada hambatan • Variasi waktu yang dibutuhkan untuk untuk mencapai kedalaman maksimum gerusan di area abutmen sebelum ada hambatan • Gerusan yang terjadi adalah <i>clear water scour</i> (tanpa pergerakan sedimen dasar) • Penggunaan skala laboratorium yang digunakan dari skala non-dimensional khusus skala geometrik • Menganalisis bilangan <i>Reynolds</i> dan <i>Froude</i> aliran inkompresibel • Menganalisis kecepatan gesek u^* dan kecepatan geser u_* yang terjadi 	

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

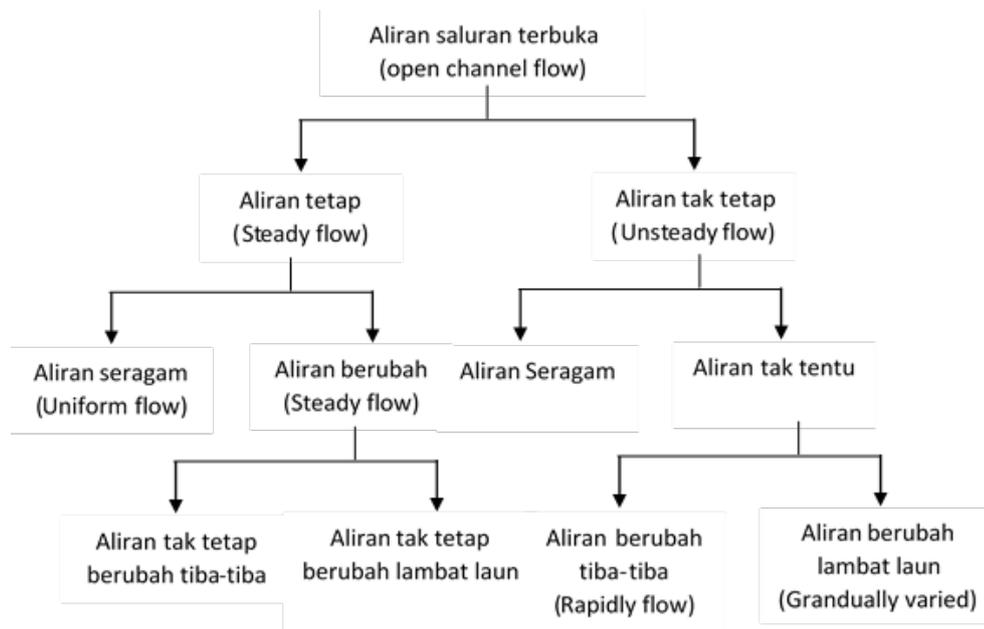
A. Kajian Pustaka

1. Sungai

Menurut Soewarno (1991) dalam (Prasetyo, 2006) mengemukakan bahwa sungai adalah torehan permukaan bumi yang merupakan penampung dan penyalur alamiah aliran air dan material yang dibawanya dari bagian hulu ke hilir, atau dari tempat tinggi ke tempat yang rendah kemudian bermuara ke laut. Sedangkan menurut (Lopa, 2013), sungai adalah badan air alamiah tempat mengalirnya air hujan dan air buangan menuju laut dan tempat bersemayamnya biotik dan abiotik.

Menurut (Triatmodjo, 2017), tipe aliran saluran terbuka adalah turbulen, karena kecepatan aliran dan kekasaran dinding relatif besar. Aliran melalui saluran terbuka akan turbulen apabila angka Reynolds $Re > 1.000$ dan laminar apabila $Re < 500$. Aliran melalui saluran terbuka dianggap seragam (*uniform*) apabila berbagai variabel aliran seperti kedalaman, tampang basah, kecepatan, dan debit pada setiap tampang saluran terbuka adalah konstan. Aliran melalui saluran terbuka disebut tidak seragam atau berubah (*non uniform flow* atau *varied flow*), apabila variabel aliran seperti kedalaman, tampang basah, kecepatan di sepanjang saluran tidak konstan. Apabila perubahan aliran terjadi pada jarak yang pendek maka disebut aliran berubah cepat, sedang apabila terjadi pada jarak yang panjang disebut aliran berubah tidak beraturan. Aliran disebut mantap apabila variabel aliran di suatu titik seperti kedalaman dan kecepatan tidak berubah terhadap waktu, dan apabila berubah terhadap waktu disebut aliran tidak mantap. Selain itu aliran melalui saluran terbuka juga dapat dibedakan menjadi aliran sub kritis (mengalir) jika $Fr < 1$, dan super kritis (meluncur) jika $Fr > 1$. Di antara kedua tipe tersebut aliran adalah kritis ($Fr=1$).

Klasifikasi aliran menurut *Chow* (1996) dalam *Wibowo* (2007) dapat digolongkan sebagai berikut :



Gambar 1. Klasifikasi aliran

2. Gerusan Dasar Sungai

Dasar sungai yang tersusun dari endapan material sungai adalah akibat dari suatu proses erosi dan deposisi yang dihasilkan oleh perubahan pola aliran pada sungai *alluvial*. Perubahan dasar dan tebing sungai dapat menyebabkan ketidakseimbangan angkutan sedimen sehingga perlu di tempatkan beberapa bangunan kontrol untuk menyeimbangkan kondisi sungai ((*Maricar Faraouk, Pongmanda Silman, 2017*). Berubahnya pola aliran dapat terjadi karena terdapat halangan/rintangannya pada sungai, berupa pilar jembatan, krib sungai, *spur dikes* (bronjong), abutmen jembatan, dan sebagainya. Bangunan semacam ini dipandang dapat mengubah geometri alur serta pola aliran, yang selanjutnya diikuti dengan terjadi gerusan lokal di dekat bangunan tersebut (*Legono 1990*) dalam (*Rinaldi, 2001*).

Bresuers dan *Raudviki* (1991) dalam (Rustiati, 2007) mendefinisikan gerusan yang terjadi pada suatu struktur dapat dibagi berdasarkan dua kategori yaitu :

1. Tipe dari gerusan

- a. Gerusan umum (*general scour*) merupakan gerusan yang terjadi akibat dari proses alami dan tidak berkaitan sama sekali dengan adanya bangunan sungai.
- b. Gerusan di lokalisir (*constriction scour*) merupakan gerusan yang disebabkan oleh penyempitan alur sungai sehingga aliran menjadi terpusat.
- c. Gerusan lokal (*lokal scour*) merupakan gerusan akibat langsung dari struktur pada alur sungai. Proses terjadinya gerusan lokal biasanya dipicu oleh tertahannya angkutan sedimen yang dibawa bersama aliran oleh struktur bangunan dan peningkatan turbulensi aliran akibat adanya gangguan dari suatu struktur.

2. Gerusan dalam perbedaan kondisi angkutan

- a. Kondisi *clear water scour* dimana gerusan dengan air bersih terjadi jika material dasar sungai di sebelah hulu gerusan dalam keadaan diam atau tidak terangkut.
- b. Kondisi *live bed scour* dimana gerusan yang disertai dengan angkutan sedimen material dasar saluran.

3. Mekanisme Gerusan di Sekitar Abutmen

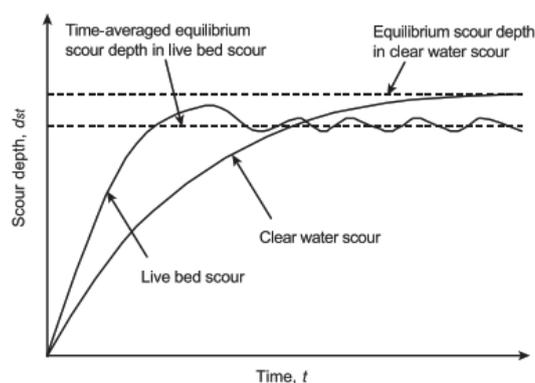
Gerusan dapat terjadi di jembatan jika struktur jembatan mempengaruhi keseimbangan antara air dan stabilitas material dasar saluran. Jika jembatan memiliki satu atau lebih tiang yang berada pada aliran sungai, atau jika muka air mencapai salah satu atau kedua abutmen, maka struktur akan mempengaruhi pola aliran sungai.

Efek pertamanya adalah mengurangi lebar sungai di lokasi jembatan tersebut berada. Untuk aliran tertentu, pengurangan lebar ini akan mengakibatkan kenaikan muka air di hulu jembatan dan meningkatkan kecepatan pada bukaan. Jika kenaikan kecepatan ini menyebabkan perpindahan atau pergerakan pada

material dasar saluran, maka permukaan dasar saluran di sekitar jembatan akan menurun. Penurunan permukaan dasar saluran ini dikenal dengan **gerusan umum** (*global scour*).

Efek kedua dari interaksi antara jembatan dan aliran air adalah gangguan lokal pada aliran. Hal ini dapat menyebabkan akselerasi aliran yang melalui tiang jembatan dan meningkatkan turbulensi, yang dapat mengakibatkan penurunan permukaan dasar saluran sampai ke level yang dapat mengganggu struktur jembatan. Penurunan dasar saluran ini dikenal sebagai gerusan lokal (*local scour*). Berdasarkan model transportasi sedimen oleh aliran yang mendekat, *Chabert & Engeldinger* (1956) dalam (Dey and Barbhuiya, 2005) mengelompokkan gerusan lokal menjadi dua kategori, yaitu *clear-water scour* dan *live-bed scour*.

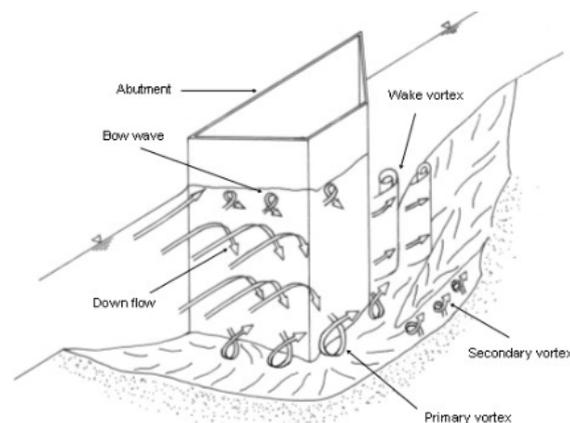
Gerusan air jernih terjadi tanpa adanya angkutan sedimen oleh aliran yang mendekat mengalir ke lubang gerusan. Di sisi lain, gerusan live-bed terjadi ketika lubang gerusan terus diberi supply dengan sedimen oleh aliran yang mendekat. Variasi waktu *clear-water scour* dan *live-bed scour* ditunjukkan secara skematis dalam Gambar 2. Hasil pengamatan bahwa air jernih maksimum kedalaman gerusan sekitar 10% lebih besar dari kedalaman gerusan dasar.



Gambar 2. Hubungan Kedalaman Gerusan (*Clear Water dan live bed scour*) dengan waktu (*Chabert & Engeldinger (1956)* dalam (Dey and Barbhuiya, 2005))

Mekanisme gerusan disekitar abutmen jembatan menurut Kwan dan *Melville* 1994 dalam (Dey and Barbhuiya, 2005), adalah pada bagian hulu abutmen, gradien tekanan vertikal dikembangkan karena stagnasi aliran yang

mendekat. Gradien tekanan menggerakkan fluida ke bawah dan ini menggulung ke atas menjadi pusaran utama, yang memperbesar ukurannya dengan perkembangan lubang gerusan. *Kwan & Melville* (1994) juga melaporkan bahwa pusaran primer dan aliran bawah terbatas terutama ke lubang gerusan di level dasar saluran. Aliran pusaran dan aliran bawah relatif tidak terpengaruh dengan perubahan kedalaman aliran yang mendekat. Inti bagian dalam vortex primer menempati 17% dari luas lubang gerusan dan mengandung hingga 78% dari total sirkulasi dalam aliran. Vortex primer berbentuk elips, dengan wilayah inti dalam menjadi pusaran paksa dan wilayah inti luar pusaran bebas. Komponen aliran pada abutmen dinding bersayap, diidentifikasi oleh *Kwan* (1988), diperlihatkan secara skematis dalam Gambar 3.

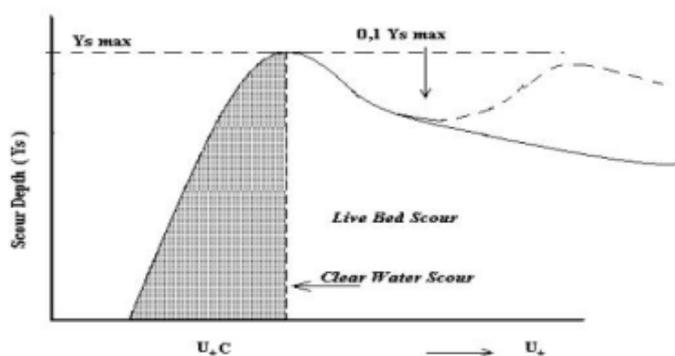


Gambar 3. Profil Aliran pada abutment jembatan (Kwan 1988 dalam (Dey and Barbhuiya, 2005))

Menurut *Miller* (2003) dalam (Prasetyo, 2006). Parameter yang digunakan untuk menentukan jenis gerusan (*clear water scour* atau *live bed scour*) adalah perbandingan antara kecepatan *upstream* dengan kecepatan batasnya atau kecepatan kritis sedimen yang dibutuhkan untuk memindahkan sedimen dari *bed*. Perbandingan ini disebut intensitas aliran (*flow intensity*), mungkin bisa dalam satu atau dua bentuk tergantung kecepatan yang digunakan. Jika digunakan kecepatan geser (u_*) yang digunakan, perbandingan/rasionya menjadi u_*/u_{*c} . Kecepatan geser (u_*) didefinisikan sebagai $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$, dimana τ adalah tegangan geser dasar saluran/*bed*. Titik batas atau kecepatan geser kritis (u_{*c}) berbanding

lurus dengan tegangan geser kritis (τ_c). Dalam bentuk ini intensitas aliran sama dengan rasio tegangan geser dimana $\tau/\tau_c = (u_*/u_{*c})^2$. Oleh sebab itu persamaan ini mempunyai korelasi langsung dengan transport sedimen, karena kebanyakan persamaan transport sedimen dalam bentuk tegangan geser bed. Kecepatan geser kritis bisa ditentukan pada sedimen yang ada (Gambar 3), akan tetapi nilai u_* biasanya tidak dapat langsung dibaca untuk percobaan situasi aliran dan harus dijabarkan menggunakan asumsi data kecepatan (*velocity profile assumption*).

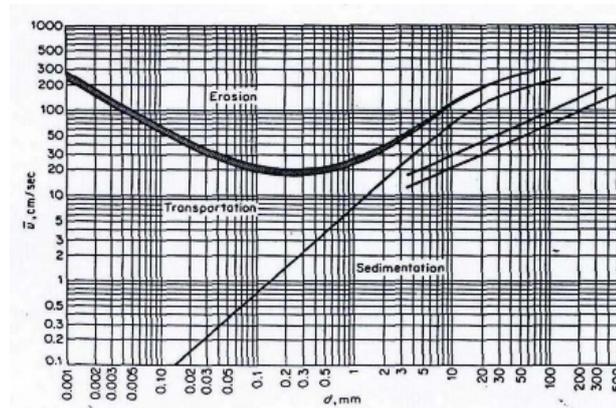
Pada grafik (Gambar 3) menunjukkan bahwa kedalaman gerusan untuk *clear water scour* dan *live-bed scour* merupakan fungsi dari kecepatan geser. Kesetimbangan gerusan tergantung pada keadaan yang ditinjau yaitu gerusan dengan air tanpa sedimen (*clear-water scour*) atau gerusan dengan air besedimen (*live-bed scour*). Pada *clear-water scour*, gerakan dasar sungai diasumsikan hanya terjadi pada sekitar pilar. Kesetimbangan tercapai bila tegangan geser yang terjadi di dekat permukaan lubang gerusan sudah tidak mampu untuk mengangkut material karena *clear water scour* cenderung terjadi pada material dasar yang kasar. Sedangkan pada keadaan *live-bed scour*, gerakan dasar sungai terjadi pada hampir sepanjang dasar sungai.



Gambar 4. Hubungan kedalaman gerusan dengan kecepatan geser (Breuser dan Raudviki, 1991 dalam Prasetyo, 2007)

Bentuk yang lebih umum dari intensitas aliran menggunakan kecepatan kedalaman rata-rata/*depth averaged approach velocity* (V) dan kecepatan kritis kedalaman rata-rata/*critical depth averaged approach velocity* (V_c). *Critical depth*

averaged approach velocity adalah kecepatan kedalaman rata-rata minimum dari aliran untuk gerakan sedimen yang akan terjadi. Bentuk intensitas aliran (V/V_c) membutuhkan data kecepatan vertikal yang diketahui atau diasumsikan (biasanya logaritmik) untuk menghitung *critical depth averaged velocity* (V_c) dari Gambar 5 untuk sedimen yang ada.



Gambar 5. Hubungan diameter butiran dan kecepatan (Miller 2003 dalam Rustiati, 2007)

4. Pola Aliran

Kondisi aliran pada saluran terbuka berdasarkan pada kedudukan permukaan bebas cenderung berubah sesuai dengan waktu dan ruang. Disamping itu ada hubungan ketergantungan antara kedalaman aliran, debit air, kemiringan, dasar saluran dan permukaan bebas.

Pola aliran disekitar pilar pada aliran saluran terbuka cukup kompleks. Bertambahnya *complexity* disertai semakin luasnya lubang gerusan. Suatu sail studi mengenai bentuk/pola aliran yang telah dilanjutkan oleh *Melville* dalam (Wibowo, 2007) agar lebih mengerti mekanisme dan peran penting pola aliran hingga terbentuknya lubang gerusan. Pola aliran dibedakan dalam beberapa komponen :

1. Punggung gelombang (*bow wave*)
2. Arus bawah didepan pilar.
3. Pusaran aliran arah vertikal (*horse shoes vortex*).
4. Pusaran yang terangkat (*cast-off vortices*) dan menjalar (*wake*)

Pola aliran pada pilar menurut *Graf* (1998) dalam (Prasetyo, 2006), yaitu terjadi aliran arah *vertical* kebawah yang membentuk *vortek*, dan aktif mengakibatkan gerusan. Besarnya pilar sangat menentukan besarnya *vortek*, yang berdampak pada besarnya gerusan. Akan tetapi pengaruh besarnya pilar juga menjadikan penyempitan tampang saluran (*constriction*).

Medan aliran disekitar abutmen umumnya mempunyai ciri-ciri yaitu percepatan aliran di hulu pilar, kemudian melemah didekat abutmen, atau terjadi perlambatan aliran, selanjutnya aliran dipisahkan oleh *system vortek*. Pada jarak yang cukup jauh dari abutmen, aliran *uniform* akan terbentuk kembali.

Waktu merupakan hal yang sangat dominan pada saat terjadi aliran yang beraturan dalam mencapai kesetimbangan dalamnya gerusan, tergantung pada tipe aliran yang mengangkut sedimen ($U/U_c > 1$ atau $U/U_c < 1$). Kejadian pada pembentukan lubang gerusan ke sisi pilar/abutmen akan terjadi perubahan bentuk menyerupai kerucut di daerah hulu yang mempunyai dimensi kedalaman gerusan sama panjang pada sisi pilarnya. Material dasar sungai yang ditranspor ke daerah hilir dapat menjadi endapan ataupun gradasi dan dapat pula ditranspor ke daerah hilir tanpa menimbulkan pengaruh pada pilarnya. Untuk menentukan kondisi gerusan yang terjadi (*clear water scour* atau *live bed scour*) perlu kiranya diidentifikasi sifat alirannya serta komposisi material granulernya.

5. Faktor yang Mempengaruhi Kedalaman Gerusan

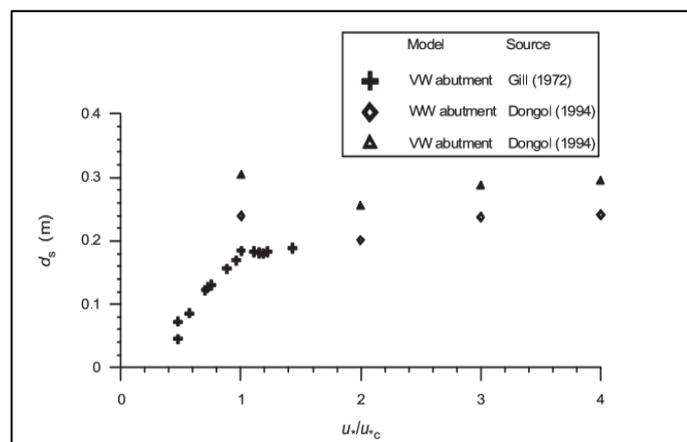
5.1. Kecepatan Aliran

Pengaruh pendekatan kecepatan aliran U adalah menggabungkan formula prediksi gerusan ke dalam bentuk bilangan *Froude* (Fr) atau kecepatan geser u_* . *Garde, dkk* (1961) dalam (Dey and Barbhuiya, 2005) menyimpulkan bahwa bilangan *Froude* untuk kecepatan aliran disaluran normal mewakili pengaruh kecepatan aliran pada kedalaman maksimum gerusan.

Secara umum pengenalan tegangan geser kecepatan u_* adalah parameter penting tidak hanya membedakan kondisi gerusan air jernih (*clear water scour*) dari gerusan dasar (*live bed scour*) tapi juga menggambarkan daya erosi aliran untuk ukuran sedimen yang diberikan. Pada kondisi *clear water scour*, kecepatan

aliran kritis (U_c) untuk sedimen dasar adalah $\frac{U}{U_c} \leq 1$, sedangkan *live bed scour* terjadi ketika $\frac{U}{U_c} \geq 1$.

Menurut (Dey, Chiew and Kadam, 2008), pada pengenalan dibawah kondisi clear water scour, kedalaman maksimum terjadi ketika $U = U_c$. Kedalaman ini disebut ambang batas puncak. Untuk $\frac{U}{U_c} > 1$, di bawah kondisi *live bed scour*, kedalaman gerusan pada awalnya berkurang dengan meningkatnya kecepatan aliran mendekati capaian nilai minimum dan kemudian meningkat lagi menuju maksimum kedua. Maksimum kedua terjadi pada saat tahap transisi dasar dari angkutan sedimen di dasar sungai dan disebut *live-bed peak*. Data yang terkumpul dari berbagai sumber di tunjukkan pada Gambar 6, yaitu pengaruh rasio kecepatan tegangan geser $\frac{u_*}{u_{*c}}$ pada kedalaman gerusan



Sumber : *Local scour at abutment; A Review, ASCE Journal 2004*

Gambar 6. Variasi Kedalaman Gerusan (d_s) dengan ratio kecepatan tegangan geser $\frac{u_*}{u_{*c}}$

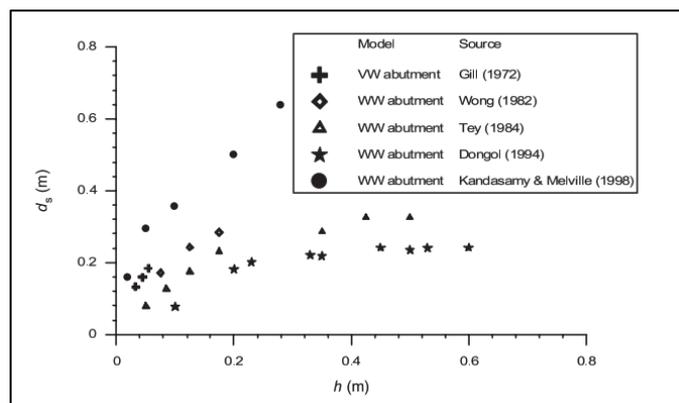
5.2. Kedalaman Aliran

Menurut *Laursen* (1952), pendekatan kedalaman aliran (h) adalah merupakan faktor penting dalam menentukan kedalaman gerusan. Hasil eksperimen *Gill* (1972), *Wong* (1982), *Tey* (1984) dan *Kandasamy* (1989) dalam (Dey and Barbhuiya, 2005) mengindikasikan bahwa nilai konstan dari rasio kecepatan tegangan geser $\frac{u_*}{u_{*c}}$, bahwa maksimum kedalaman gerusan akan

meningkat dengan bertambahnya kedalaman aliran. Hal ini juga diamati bahwa kedalaman gerusan meningkat pada saat laju aliran menurun dengan meningkatnya kedalaman aliran. Pada penelitian yang lain, untuk kedalaman aliran rata-rata, kedalaman gerusan bergantung pada h dan l .

Melville (1992) dalam (Dey and Barbhuiya, 2005) membedakan Panjang dan pendeknya abutment. Disimpulkan bahwa untuk abutmen pendek ($l/h \geq 1$), kedalaman gerusan bebas dari kedalaman aliran; dan untuk abutmen panjang $l/h \geq 25$, kedalaman gerusan bergantung pada kedalaman aliran. Dey & Barbhuiya (2004), melaporkan bahwa untuk kedalaman aliran yang lebih pendek, keseimbangan kedalaman gerusan meningkat signifikan dengan meningkatnya h ; dimana untuk kedalaman aliran yang lebih tinggi, keseimbangan kedalaman gerusan adalah bebas dari kedalaman aliran.

Ada konsensus bahwa kedalaman gerusan maksimum meningkat pada tingkat yang menurun dengan peningkatan kedalaman aliran dan ada batas kedalaman yang sesuai dengan kedalaman gerusan maksimum adalah tidak tergantung pada kedalaman aliran. Data dikumpulkan dari berbagai sumber diplot pada Gambar 7, untuk mewakili variasi kedalaman gerusan dengan kedalaman aliran

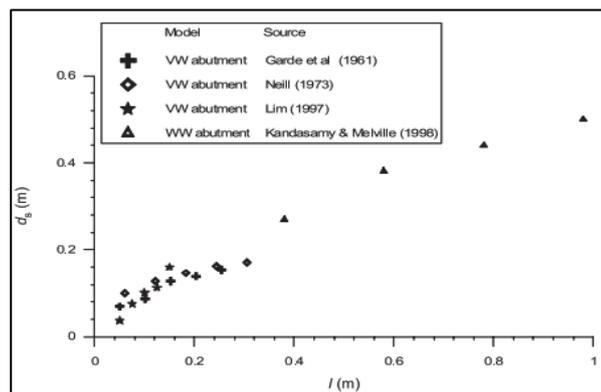


Gambar 7. Variasi kedalaman gerusan (ds) dengan Kedalaman aliran (h), (*Local scour at abutment; A Review, ASCE Journal 2004*)

5.3. Panjang Abutmen, Rasio Kontraksi dan Rasio Bukaannya

Panjang abutmen dan rasio kontraksi telah banyak digunakan dalam merumuskan kedalaman maksimum abutmen. Kebalikan dari rasio pembukaan disebut rasio kontraksi. *Kandasamy* (1989) dalam *Barbhuiyah* (2004:459), menunjukkan bahwa jika panjang penyangga ditingkatkan, rasio bukaan menurun, dan efek pada kedalaman gerusan dari perubahan tersebut dapat dianggap berasal dari penurunan keduanya rasio kontraksi dan peningkatan panjang abutmen.

Namun *Neill* (1973) berpendapat bahwa penggunaan rasio kontraksi sebagai parameter penskalaan tidak dapat dibenarkan dalam hal abutmen yang pendek diproyeksikan ke saluran yang sangat luas, dan bahwa kontraksi dapat dianggap sebagai pengaruh sekunder.



Gambar 8. Variasi kedalaman gerusan ds dengan Panjang abutmen l , (*Local scour at abutment; A Review, ASCE Journal 2004*)

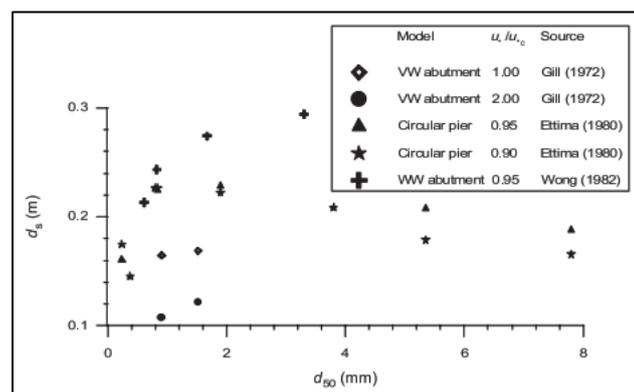
Argumen yang meyakinkan adalah bahwa selama lubang gerusan tidak meluas ke tepi yang berlawanan dari aliran atau dinding flume, dengan kondisi lain yang sama, kedalaman gerusan maksimum pada abutmen dengan panjang tetap adalah sama terlepas dari lebar flume atau aliran. Pendekatan akan menggunakan rasio kontraksi dan panjang abutmen ketika luas lubang gerusan dipengaruhi dan tidak terpengaruh oleh tebing atau dinding flume masing-masing. Gambar 8 menunjukkan ketergantungan keseimbangan kedalaman gerusan pada Panjang abutmen.

5.4. Ukuran dan Gradasi Butir Sedimen

Karakteristik sedimen dasar berasal dari kurva distribusi ukuran partikel. Dua parameter yang paling sering digunakan adalah diameter sedimen rata-rata d_{50} (atau d) dan standar deviasi $\sigma_g = \left(\frac{d_{84}}{d_{16}}\right)^{0,5}$ dari distribusi ukuran partikel, yang merupakan ukuran keseragaman dari sedimen dasar.

Ettema (1980) dan Raudkivi & Ettema (1983) menemukan bahwa kedalaman maksimum pada keseimbangan clear water scour ds di pilar jembatan tergantung pada gradasi sedimen σ_g . Mereka mengusulkan hubungan untuk memperkirakan kedalaman gerusan kesetimbangan dalam sedimen tidak seragam dalam hal standar deviasi σ_g diberikan oleh : $\frac{d_s(\sigma_g)}{D} = K_\sigma d_s / D$

Dey & Barbhuiya (2004b) melakukan percobaan untuk mempelajari efek dari lapis baja tipis pada kedalaman gerusan di abutment. Mereka menyimpulkan bahwa kedalaman gerusan pada abutment dengan lapisan pelindung dalam kondisi gerusan air jernih di bawah batas stabilitas dari permukaan partikel permukaan (mendekati kecepatan aliran hampir sama dengan kecepatan kritis untuk gerakan ambang permukaan partikel) adalah selalu lebih besar dari tanpa lapisan pelindung untuk partikel sedimen dasar yang sama.



Gambar 9. Variasi kedalaman gerusan ds dengan gradasi sedimen d_{50} . (*Local scour at abutment; A Review, ASCE Journal 2004*)

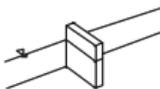
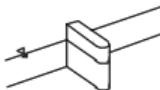
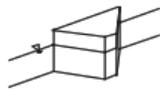
Laursen (1960) dalam *Dey* (2004) menemukan bahwa kedalaman gerusan maksimum dipengaruhi oleh ukuran sedimen pada kondisi *clear water scour*

tetapi tidak di kondisi *live bed scour*. Menurut Gill (1972) untuk dua ukuran sedimen ($d = 1,52$ mm dan $0,914$ mm) terindikasi memiliki nilai yang sama dari $\tau_0 / \tau_c < 1$, kedalaman gerusan lebih besar dengan sedimen yang kasar dibandingkan dengan sedimen yang halus, dimana $\tau_c =$ tegangan geser kritis untuk partikel sedimen. Untuk *wing-wall (WW)*, *spill-through (ST)* and *semicircular (SC) abutment*, Wong (1982) menemukan kedalaman gerusan meningkat seiring meningkatnya ukuran sedimen dasar untuk nilai konstan dari τ_0 / τ_c , dimana mendekati keseragaman.

5.5. Bentuk Abutmen

Bentuk abutmen memainkan peran penting pada keseimbangan kedalaman gerusan. Efisiensi bentuk abutmen seperti *semicircular (SC)*, *spill-through (ST)* dan *wing-wall (WW)* abutmen, menghasilkan pusaran vortex yang lemah; sementara penghalang yang tumpul, seperti abutmen dinding vertikal, mampu menghasilkan pusaran turbulen yang lebih kuat. Dampaknya, kedalaman gerusan lebih besar yang diamati pada penghalang yang tumpul (Laurson & Toch (1956), Liu et al (1961), Garde et al (1961) and Wong (1982)).

Tabel 2. Faktor-faktor bentuk abutmen

Abutment model	Abutment shape	Shape factor, K_s
	Vertical-wall	1.00
	Semicircular ended	0.75
	45° wing-wall	0.75
	Spill-through with slope horizontal : vertical 0.5 : 1 1 : 1 1.5 : 1	0.60 0.50 0.45

Sumber : *Local scour at abutment; A Review, ASCE Journal 2004*

Faktor bentuk yang diberikan pada Tabel 2 adalah berasal dari data percobaan laboratorium Gill (1972), Wong (1982), Tey (1984), Kwan (1984, 1988), Kandasamy (1989) dan Dongol (1994). Namun, Melville (1992) dalam

(Dey, Chiew and Kadam, 2008), menegaskan hal itu, pentingnya bentuk abutment berkurang ketika abutment menjadi lebih panjang. Jadi, untuk $l/h \geq 10$, disesuaikan faktor bentuk K_s^* telah direkomendasikan. Faktor bentuk yang disesuaikan K_s^* bervariasi secara linier dalam nilai K_s pada $l/h = 10$ dan keseragaman $l/h = 25$.

5.6. Alinyemen Abutmen

Pendekatan sudut aliran sehubungan dengan sejajarnya abutmen, disebut dengan sudut serangan, yang secara signifikan mempengaruhi kedalaman gerusan. Garde dan Raju (1961) dalam (Rustiati, 2007) menegaskan bahwa untuk kondisi aliran, sedimen, dan abutmen yang sama, kedalaman gerusan maksimum paling besar untuk sudut dengan kecenderungan 90° dan untuk kecenderungan lainnya kedalaman gerusan lebih kecil.

Melville (1992) dalam (Dey and Barbhuiya, 2005), memasukkan efek kesejajaran abutmen ke dalam faktor alinyemen K_0 pada persamaan desain. Nilai K_0 diberikan pada Table 3 dimana diturunkan dari metode kurva dari data Ahmad dkk (1953). *Melville* (1992) merekomendasikan bahwa faktor pelurusan hanya dapat diterapkan pada abutmen yang lebih panjang ($l/h \geq 3$). Efek alinyemen diabaikan untuk abutmen yang pendek ($l/h \geq 1$) dengan $K_0 = 1$. Untuk Panjang abutmen diantara dua batas tersebut, disarankan nilai K_0 ditunjukkan dari nilai interpolasi sudutnya.

Tabel 3. Faktor kesejajaran aliran untuk sudut yang berbeda-beda

θa (deg)	30	60	90	120	150
K_θ	0.90	0.97	1.00	1.06	1.08

Sumber : *Local scour at abutment; A Review, ASCE Journal 2004*

5.7. Geometri Saluran

Penampang sungai mungkin memiliki bentuk yang berbeda tergantung pada lokasi geografis, karakteristik sedimen yang dilaluinya dan karakteristik tangkapannya daerah (DAS). Biasanya, di daerah perbukitan, penampang sungai adalah parabola dengan kemiringan sisi curam, sedangkan di dataran, potongan melintangnya adalah majemuk, dengan dataran rendah dan saluran utama. Jadi, untuk jembatan di wilayah berbukit, abutmen didirikan di saluran utama. Sebaliknya, untuk jembatan di dataran, semua abutmen termasuk tanggul pendekat mungkin berakhir di dataran atau mungkin meluas ke saluran utama. (Wilson, Friedrich and Stevens, 2017) berargumen bahwa hasil eksperimen dalam fluida persegi panjang tidak secara akurat mencerminkan proses gerusan penyangga di saluran majemuk.

Froehlich (1989) mempertimbangkan efek geometri saluran dalam menghitung aliran yang mendekati bilangan *Froude*. Dia menghitung angka, berdasarkan kecepatan rata-rata dan kedalaman area yang terhalang oleh tanggul dan abutmen di penampang aliran. Menurut *Ettema* (1993) dan *Melville* (1995), pengaruh geometri saluran terhadap kedalaman gerusan diwakili oleh faktor perkalian K_G , yang didefinisikan sebagai rasio kedalaman gerusan pada abutment yang terletak di saluran majemuk ke kedalaman gerusan pada abutment yang berada dalam saluran persegi panjang yang sesuai dengan lebar keseluruhan yang sama dengan saluran utamanya. Secara umum, K_G tergantung pada ukuran, bentuk, kekasaran saluran utama dan dataran banjir, dan batasnya panjang abutmen sehubungan dengan lebar dataran banjir.

6. Pengendalian Gerusan Dasar

Pengendalian gerusan di abutmen jembatan antara lain dilakukan dengan membuat *riprap* yaitu dengan menempatkan batuan kasar di sekitar abutmen tersebut. Seperti pada penelitian *Bonasoundas* dan *Breusers* dan *Roudkivi* (1991) dalam (Prasetyo, 2006). Dimensi riprap terdiri atas riprap $6b$, panjang $7b$, ketebalan $b/3$, dimana b adalah lebar pilar dan ukuran minimum batuan, d_r adalah

$$d_r (cm) = 6 - 3,3 U + 4U^2$$

Hal Ini di kuatkan oleh *Graf* (1998) dalam (Prasetyo, 2006) yang menyatakan bahwa riprap adalah perlindungan paling efektif untuk mengendalikan lubang gerusan yaitu dengan menimbun batuan kedalam lubang gerusan tersebut dengan lebar $2-3b$ dan tebal $3dr$. Untuk menetapkan ukuran batuan, dr (m), hubungan secara empiris adalah $U_d \cong 2,4 \sqrt{d_r}$ dengan U_d adalah kecepatan rata-rata pada debit rencana.

Menurut Sosrodarsono, 1994 dalam (Rustiati, 2007), perlindungan terhadap gerusan lokal adalah dengan membuat Ambang. Ambang merupakan suatu bangunan pengendali gerusan yang bertujuan untuk menjaga agar dasar sungai tidak turun secara berlebihan dan diharapkan dengan adanya hambatan tersebut maka gerusan lokal pada bangunan sungai dapat direduksi. Ambang diletakkan di hilir abutment jembatan dibangun pada posisi porosnya tegak lurus arah aliran.

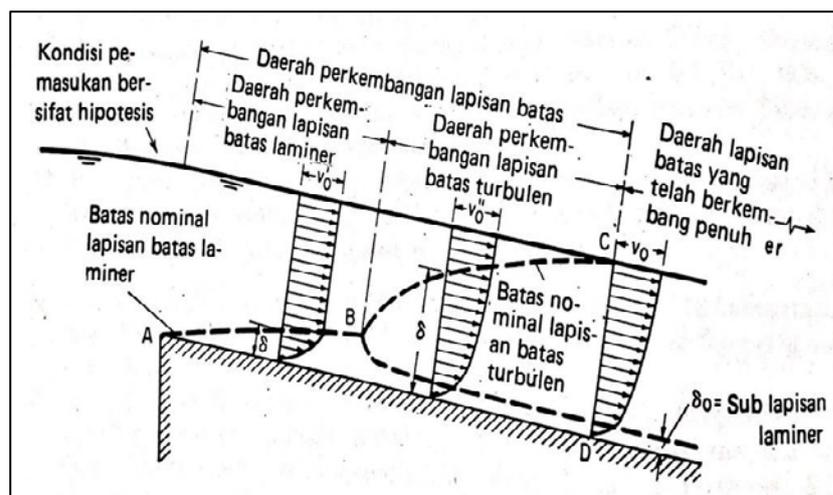
Selain perlindungan tersebut diatas, menurut (Jaji Abdurrosyid 1) dan Achmad Karim Fatchan 2) and 1)şah, 2007) pemasangan proteksi berupa hambatan tirai di hulu abutmen dapat mereduksi kedalaman gerusan di abutmen Spill-through sebesar 26,58% dan akan mencapai nilai maksimum pada jarak tirai yang optimum terhadap as abutmen. Jarak optimum untuk saluran majemuk dicapai sejauh 1,75 kali lebar dasar abutmen ($1,75 Lb$) pada kondisi *live bed scour*. Untuk ketinggian hambatan, menurut (Asghari Pari, Kashefipour and Ghomeshi, 2017) di sarankan 2 – 2,75 kali dari ketinggian muka air. Untuk luasan pori, menurut (Kordnaeij, Sajadi and Bajestan, 2017) diasumsikan 25% pada pengukuran kekeruhan di hambatan.

B. Landasan Teori

Hasil pengamatan terhadap saluran terbuka yang sangat lebar menunjukkan bahwa pembagian kecepatan pada daerah pusat dari penampang adalah persis sama dengan pada saluran persegi empat yang lebarnya tak terhingga. Dengan kata lain, berdasarkan keadaan tersebut, tepi saluran praktis tidak mempengaruhi pembagian kecepatan daerah pusat, dan aliran di daerah pusat penampang dapat dianggap bersifat dua dimensi dalam analisis hidrolisnya.

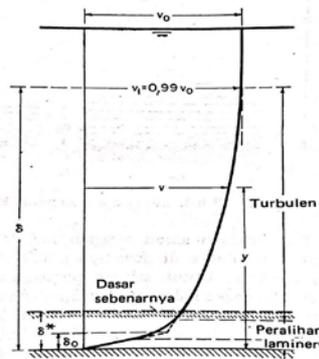
1. Konsep Teoritis Lapisan Batas

Pembagian kecepatan sepanjang penampang saluran akibat adanya kekasaran batas, akan bervariasi menurut jaraknya dimana air mengalir di saluran. Di saluran (Gambar 10), efek terhadap pembagian kecepatan akibat kekasaran batas ditunjukkan dengan garis ABC. Diluar ABC, pembagian kecepatan praktis seragam. Didekat permukaan saluran dan di dalam daerah ABC, kecepatan bervariasi menurut jaraknya dengan permukaan saluran. Bagian didalam ABC walaupun tidak begitu jelas disebut lapisan batas (*boundary layer*) dan ketebalannya dinyatakan dalam δ .



Gambar 10. Perkembangan lapisan batas dalam saluran terbuka dengan kondisi pemasukan yang ideal (Chow, 1997)

Definisi yang umum adalah bahwa ketebalan δ merupakan besaran jarak normal dari permukaan batas dimana kecepatan v_1 sama dengan 99% dari kecepatan batas v_0 , dengan kurva pembagian kecepatan dilapisan batas berbentuk asimtotis.



Gambar 11. Pembagian kecepatan pada permukaan saluran licin ((Chow, 1997)

Efek lapisan batas terhadap aliran sama dengan perpindahan semu keatas dasar saluran ke tempat sebenarnya yang setara dengan napa yang disebut tebal perpindahan (displacement thickness) δ^* , yang dinyatakan dengan $\delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{v}{v_1}\right) dy$ dengan v kecepatan pada jarak y dari permukaan saluran dan v_1 kecepatan di tepi lapisan batas. Besarnya tebal perpindahan biasanya bervariasi dari 1/8 sampai 1/10 tebal lapisan batas tergantung pada besarnya bilangan *Reynolds*.

Bila permukaan bidang saluran relative halus, kecepatan didekat bidang saluran akan rendah, dengan demikian akan terbentuk selapis tipis aliran yang stabil, dikenal dengan *sub lapisan laminar* di permukaan bidang tersebut. Di dalam sub lapisan ini aliran tetap laminar. Diatas sub lapisan ini merupakan daerah peralihan aliran dari laminar ke turbulen.

Kriteria untuk menentukan jenis lapisan batas yang ada adalah magnitude dari *bilangan Reynolds*, Re , yang dikenal sebagai bilangan Reynold local, yang didasarkan pada jarak x dari tepi utama/depan. *Bilangan Reynolds* lokal didefinisikan sebagai :

$$Re_x = \frac{xv\rho}{\mu} \quad (1)$$

dimana:

x adalah jarak dari tepi utama/depan

ν adalah viskositas kinematik

μ adalah kekentalan dinamik fluida (air)

ρ adalah berat jenis aliran

Pada saluran terbuka, jenis aliran laminar sangat jarang ditemui dikarenakan lapis-batas antara laminar dan turbulen sangat tipis sehingga *bilangan Reynolds* (Re) yang terjadi disebut *bilangan Reynold lokal*, yang didasarkan pada jarak x dari tepi utama/depan. Adapun kriteria lapis batas untuk bilangan *Reynold* lokal (Welty *et al.*, 2004) adalah :

$Re_x < 2 \times 10^5$	Lapis-batas adalah laminar
$2 \times 10^5 < Re_x < 3 \times 10^6$	Lapis-batas dapat laminar atau turbulen
$3 \times 10^6 > Re_x$	Lapis-batas adalah turbulen

2. Konsepsi Kekasaran Permukaan

Konsepsi adanya sub lapisan laminar di lapisan batas turbulen menghasilkan penjelasan mengenai sifat-sifat kekasaran permukaan.

Gambar 12. Sifat-sifat kekasaran permukaan (a) Licin,

(b) bergelombang, (c) kasar

Bila tinggi kekasaran lebih kecil dari suatu pecahan tertentu dari tebal sub lapisan laminar, ketidakteraturan permukaan menjadi sangat kecil sehingga semua tonjolan tenggelam dalam sub lapisan laminar (Gambar 12. a). Pada keadaan ini

kekasarn tidak berpengaruh terhadap aliran di atas sub lapisan laminar, dan permukaan tersebut disebut hidrolis licin (*hydraulically smooth*). Permukaan hidrolis licin disebut bergelombang (*wavy*) bila profil permukaan rata-rata mengikuti suatu lengkung (gambar 12.b). Pada saluran terbuka, Chezy memberikan syarat bahwa permukaan hidrolis licin, tinggi kekasaran harus lebih kecil dari pada kekasaran kritis (*critical roughness*), dinyatakan dengan

$$k_c = \frac{5C}{\sqrt{g}} \frac{v}{V} \quad (2)$$

Dengan C koefisien C dari Chezy, v kekentalan kinematis dan V kecepatan rata-rata. Kemungkinan syarat tertentu dibuat untuk kekasaran yang diperoleh dari pasir dengan nilai C lebih besar dari 100. Untuk syarat rata-rata, Schlichting menyarankan nilai $k_c = 100 v/V$ yang sesuai dengan $C = 113,5$. Persamaan (2) dapat dipakai sebagai pendekatan untuk suatu saluran. Adapun pendekatan taksiran nilai tinggi kekasaran k dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4. Taksiran Nilai Tinggi Kekasaran k

Bahan	$ks, kaki$
Kuningan, perunggu, timah, kaca	0,0001 – 0,0030
Besi tempa, baja	0,0002 – 0,0080
Besi tuang diaspal	0,0004 – 0,0070
Besi berlapis seng	0,0005 – 0,0150
Besi tuang	0,0008 – 0,0180
Papan	0,0006 – 0,0030
Semen	0,0013 – 0,0040
Beton	0,0015 – 0,0100
Ubin	0,0020 – 0,0100
Baja dikeling	0,0030 – 0,0300
Dasar sungai alamiah	0,1000 – 3,0000

3. Koefisien Pembagian Kecepatan

Karena pembagian kecepatan yang tidak sama pada penampang saluran, tinggi kecepatan untuk aliran saluran terbuka biasanya lebih besar dari harga yang dihitung berdasarkan rumus $\frac{V^2}{2g}$, dengan V merupakan kecepatan rata-rata. Bila dalil energi terapkan, tinggi kecepatan sesungguhnya dapat dinyatakan sebagai $\alpha \frac{V^2}{2g}$ dengan α adalah koefisien energi.

Pembagian kecepatan yang tidak sama juga mempengaruhi perhitungan momentum dalam aliran saluran terbuka. Menurut dalil mekanika, momentum cairan yang melalui penampang saluran per satuan waktu dinyatakan dengan $\beta w Q V / g$ dengan β adalah koefisien momentum; w adalah berat jenis air; Q adalah debit air dan V adalah kecepatan rerata.

Jika ΔA sebagai bagian luas air keseluruhan A , dan ω adalah berat isi air, lalu berat air melalui ΔA per satuan waktu dengan kecepatan v adalah $\omega v \Delta A$. Energi kinetik air melalui ΔA persatuan waktu $v^3 \Delta A / 2g$. Nilai ini sama dengan gabungan berat $\omega v \Delta A$ dan tinggi kecepatan $\frac{v^2}{2g}$. Jumlah energi kinetik untuk luas air keseluruhan sama dengan $\Sigma \omega v^3 A / 2g$. Anggap luas keseluruhan A , kecepatan rata-rata V , dan tinggi kecepatan setelah dikoreksi untuk luas keseluruhan $\alpha \frac{V^2}{2g}$, energi kinetic total $\alpha \omega v^3 A / 2g$. Samakan besaran ini dengan $\Sigma \omega v^3 A / 2g$ lalu ringkaskan,

$$\alpha = \frac{\int v^3 dA}{V^3 A} = \frac{\Sigma v^3 dA}{V^3 A} \quad (3)$$

Momentum air yang melalui ΔA per satuan waktu adalah hasil kali massa $\omega v \Delta A / g$ dengan kecepatan v , atau $\omega v^2 \Delta A / g$. Momentum total adalah $\Sigma \omega v^2 \Delta A / g$. Samakan besaran ini dengan momentum yang telah dikoreksi untuk luas keseluruhan atau $\beta \omega A V^2 / g$, lalu diringkas,

$$\beta = \frac{\int v^2 dA}{V^2 A} = \frac{\Sigma v^2 dA}{V^2 A} \quad (4)$$

3.1. Pembagian Kecepatan dalam Aliran

Pembagian kecepatan aliran seragam di saluran akan stabil bila lapisan batas turbulen telah tercapai secara sempurna. Pada lapisan batas terbuka, diketahui bahwa pembagian ini mendekati pola logaritmis.

Pada aliran saluran terbuka, distribusi kecepatan seringkali dibedakan sebagai distribusi kecepatan di daerah *inner region*, yang berada di dekat dasar dimana distribusi kecepatan logaritmik berlaku, dan di daerah *outer region*, yang berada jauh dari dasar dimana distribusi kecepatan menyimpang secara jelas dan sistematik terhadap hukum logaritmik (Kironoto, 2009). Diketahui bahwa :

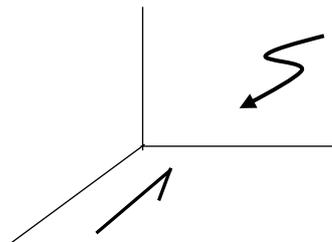
$$S_f = \frac{\tau_0}{\gamma R} = \frac{u_*^2}{gR} = \frac{u^2}{C_*^2 gR}, \quad (5)$$

dimana τ_0 = tegangan geser, u_* = kecepatan geser, γ = berat jenis fluida (air), ρ = kerapatan fluida (air), C_* = koefisien Chezy tak berdimensi, g = gravitasi, R = radius hidrolis, maka besarnya kecepatan geser dan tegangan geser dapat diketahui :

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (6)$$

Karakteristik aliran saluran terbuka akan mengalami tahanan geser dan hampir selalu turbulen sehingga unsur laminar dapat diabaikan. Hanya sebagian kecil di dekat batas-batasnya (dasar saluran dan tebing) aliran bisa bersifat laminar. Dengan prinsip tegangan Reynolds dari hasil perataan waktu (*time averaging*) Persamaan *Navier-Stoke*, diketahui bahwa besarnya tegangan :

$$\tau_{yx} = \underbrace{\mu \frac{dv_x}{dy}} + \underbrace{\rho l^2 \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^2} \quad (7)$$



Gambar 13. Sketsa tegangan geser aliran ke arah sumbu x ,

dimana :

τ_{yx} adalah tegangan dasar saluran

u adalah kecepatan kearah x

μ adalah kekentalan dinamik fluida (air)

l adalah Panjang campur Prandtl (*Prandtl mixing length*)

Menurut *Von-Karman* (Kodoatie. J. R, 2001), besarnya l adalah proposional dengan jarak y dari batas (dasar saluran), yaitu : $l = \kappa y$, dimana $\kappa =$ konstanta *Von Karman* ($\kappa = 0,4$).

Dengan $\tau_o \approx \tau_{yx}$, maka didapat hubungan (6) dan (7) adalah :

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} = \kappa y \frac{dv_x}{dy} \quad (8)$$

Hubungan kecepatan u dan u_* dengan mengacu pada persamaan adalah :

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln y + c \quad (9)$$

Harga c dapat dievaluasi pada jarak y_o , sehingga

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{y_o} \quad (10)$$

dimana $y_o =$ konstanta dari integrasi persamaan (10) atau ketinggian dari dasar saluran yang secara hipotesis kecepatan alirannya adalah nol. Konstanta integrasi y_o mempunyai urutan besaran yang sama dengan tebal lapisan laminar (δ) yang merupakan fungsi yang tergantung dari kondisi batas halus sampai kasar (*French*, 1987 dalam Kodoatie, 2001). Pada kondisi halus (*smooth*), maka

$$y_o = \frac{mv}{u^*}, \quad (11)$$

dimana $m = 10^{-0,96} = 1/9$, $\nu =$ viskositas kinematik, $u^* =$ kecepatan gesek. Pada kondisi kasar (*rough*), y_o tergantung dari ketinggian kekasaran pada dasar saluran k_s maka $y_o = m \cdot k_s$. (Kodoatie. J. R, 2001)

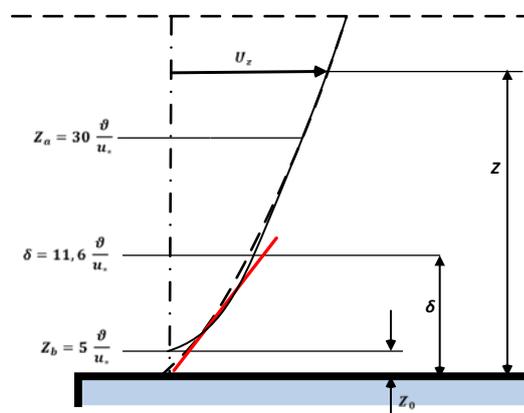
Dengan $\kappa \cong 4$, *Keulegan* (1938) dan (Chow, 1997) menyimpulkan persamaan Universal *Prandtl-Von Karman* untuk saluran dengan kekasaran halus adalah :

$$\frac{u}{u_*} = 2.5 \ln \left(\frac{R u_*}{\nu} \right) + 3.25 \quad (12)$$

Dan untuk kekasaran kasar adalah :

$$\frac{u}{u_*} = 2.5 \ln \left(\frac{R}{k_s} \right) + 6.25 \quad (13)$$

Sesungguhnya perubahan kecepatan dari hukum logaritmik menjadi linier tidak terjadi secara mendadak namun melalui transisi dari z_a dan z_b . Adapun profil distribusi transisi kecepatan aliran dari laminar ke turbulen berdasarkan hukum kecepatan logaritmik *Prandtl Von-Karman* (daerah turbulen) seperti terlihat pada Gambar 14



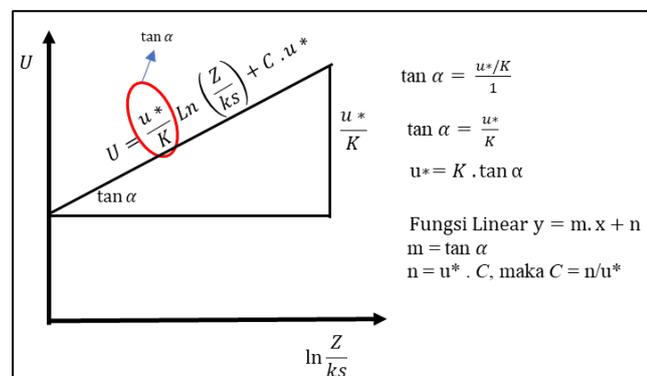
Gambar 14. Distribusi Profil kecepatan logaritmik, *Prandtl Von-Karman*

3.2. Distribusi Kecepatan aliran metode Clautser's

Metoda Clautser adalah merupakan suatu metoda dimana kecepatan gesek, u_* , dapat diperoleh dari data pengukuran distribusi kecepatan bersama-sama dengan hukum distribusi kecepatan logaritmik oleh Prandtl (Cardoso, et al.,1989, dan (Kironoto, 2009) dan Graf, 1994). Cara ini sering dipergunakan, karena disamping ketelitiannya yang cukup tinggi, juga relatif mudah untuk diterapkan. Hanya saja untuk dapat menggunakan metode ini diperlukan data pengukuran distribusi kecepatan (khususnya di dekat dasar; *inner region data*) dan informasi bahwa hukum logaritmik (Persamaan 1) masih berlaku di daerah dekat dasar (*inner region*). Jadi tingkat ketelitian dari metode ini tergantung pada berlaku tidaknya hukum logaritmik, disamping ketelitian dari data pengukuran kecepatan yang diperoleh di dekat dasar.

Pada metoda *Clautser*, kecepatan rata-rata titik dari data pengukuran distribusi kecepatan di daerah *inner region*, sebagai ordinat, diplotkan dengan

nilai $\ln(y/ks)$ sebagai absisnya. Bilamana plot data pengukuran distribusi kecepatan membentuk korelasi (*trend*) linear, dapat diartikan bahwa data distribusi kecepatan di daerah *inner region* masih mengikuti hukum logaritmik, dan metode Clauser dapat digunakan. Dengan metode pencocokan kurva (regresi linear), dapat diperoleh nilai u^* dan Br (dengan menggunakan nilai konstanta Karman, $\kappa = 0.4$). Dengan demikian, selain dapat diperoleh nilai kecepatan gesek, u^* , metode Clauser juga dapat memberikan nilai konstanta integrasi numerik dari persamaan distribusi kecepatan, C .



Gambar 15. Formula distribusi kecepatan *inner region* metode *clautser's*

Untuk aliran seragam, banyak sekali penelitian eksperimental [Nezu dan Rodi (1986), Kironoto dan Graf (1994), Coleman (1981)] yang membuktikan bahwa hukum kecepatan logaritmik berlaku pada aliran dalam saluran terbuka, khususnya pada daerah yang berada di dekat dasar /*inner region* ($y < 0.2 D$, dimana D adalah kedalaman aliran). Di daerah jauh dari dasar, data distribusi kecepatan biasanya sedikit menyimpang terhadap persamaan distribusi kecepatan logaritmik; hal ini tidak menjadikan masalah, karena metode Clauser hanya menggunakan data distribusi kecepatan di daerah dekat dasar (Kironoto, 2009)Kironoto, 1992).

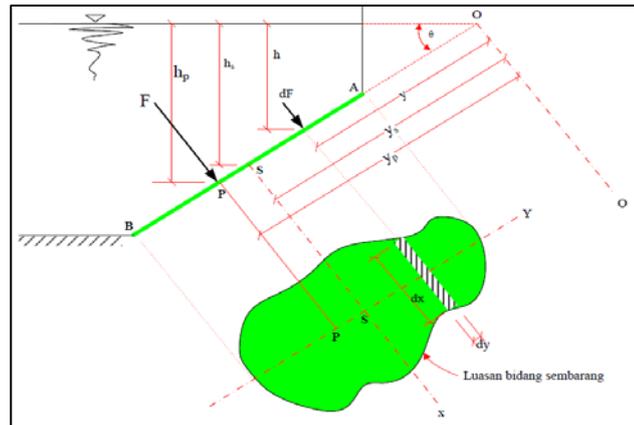
4. Gaya Hidrostatik

4.1. Gaya hidrostais pada bidang miring

Secara umum, gaya memiliki 3 atribut yaitu besar, letak titik tangkap, dan arah kerja. Besarnya gaya hidrostatik F yang bekerja pada luasan bidang

sembarang dan membentuk sudut θ terhadap permukaan air, seperti diperlihatkan pada Gambar 16. Tinjau gaya yang bekerja pada bagian bidang seluas strip dA sama dengan tekanan pada strip p dikalikan dengan luasan strip dA , atau :

$$dF = p \cdot dA = \gamma \cdot h \cdot dA$$



Gambar 16. Gaya hidrostatik pada bentuk bidang sembarang yang bersudut θ

Dengan menjumlahkan semua gaya yang bekerja pada luasan bidang sembarang tersebut, dengan mempertimbangkan bahwa $h = y \cdot \sin \theta$, yaitu :

$$\begin{aligned} F &= \int \rho g h dA = \int \rho g (y \sin \theta) dA \\ &= (\rho g \sin \theta) \int y dA \\ &= (\rho g \sin \theta) y_s A \end{aligned}$$

Karena $h_s = y_s \sin \theta$, maka :

$$F = \rho g h_s A \quad (14)$$

dimana :

- F = gaya hidrostatik, dinyatakan dengan satuan (N)
- ρ = kerapatan massa air, dinyatakan dengan satuan (kg/m^3)
- g = gravitasi bumi, (m/dtk^2)
- h_s = kedalaman pusat bidang terhadap permukaan air, (m)
- A = luas bidang sembarang, (m^2)

Dikarenakan $\int y^2 dA$ merupakan momen inersia dari luas bidang sembarang tersebut terhadap sumbu O, maka :

$$\frac{I_o}{y_s A} = y_p$$

Dalam bentuk yang lebih tepat, digunakan teorema momen inersia sumbu sejajar,

$$y_p = \frac{I_x + A y_s^2}{y_s A} = \frac{I_x}{y_s A} + y_s \quad (15)$$

Dimana :

y_p = jarak miring dari pusat tekanan terhadap permukaan air, (m)

y_s = jarak miring dari pusat bidang terhadap permukaan air, (m)

I_x = momen inersia bidang terhadap sumbu yang melalui pusatnya, (m⁴)

A = Luas bidang (m²)

Atau :

$$y_p = \frac{I_x}{(h_s/\sin\theta) A} + (h_s/\sin\theta) \quad (16)$$

Dimana :

y_p = jarak miring dari pusat tekanan terhadap permukaan air, (m)

h_s = jarak vertical dari pusat bidang terhadap permukaan air, (m), (m)

I_x = momen inersia bidang terhadap sumbu yang melalui pusatnya, (m⁴)

A = Luas bidang (m²)

4.2. Seretan (*Drag*)

Gaya seretan yang disebabkan gesekan oleh tegangan geser dipermukaan benda padat yang bergerak melalui suatu fluida viskos. Sereta gesekan dihitung dengan persamaan :

$$\frac{F}{A} = C_f \frac{\rho v^2}{2} \quad (17)$$

dengan F adalah gaya; A adalah luas kontak antara benda pada dan fluida, C_f adalah koefisien gesekan kulit; ρ adalah densitas fluida; v adalah kecepatan fluida arus bebas. Sedangkan seretan total pada sebuah benda dapat disebabkan tekanan maupun karena pengaruh gesekan. Pada situasi semacam ini, koefisien yang lain, C_D didefinisikan sebagai :

$$\frac{F}{A_p} = C_D \frac{\rho v^2}{2} \quad (18)$$

dengan F , ρ , v seperti penjelasan diatas dan disamping itu C_D = Koefisien seretan (*drag*); nilai A_p adalah luas permukaan yang di proyeksikan. Nilai A_p yang digunakan adalah luas proyeksi maksimum untuk benda. Kuantitas $\frac{\rho v^2}{2}$ merupakan nilai dari tekanan dinamik.

Oseen (1927) dalam (Pallu, 2012) memasukan beberapa syarat-syarat inersia dalam penyelesaian persamaan Navier Stoke. Penyelesaian tersebut adalah:

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re \right) \quad (19)$$

Goldstein (1929) melengkapi penyelesaian lebih sempurna dari pendekatan Oseen, dan koefisien seret menjadi:

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re - \frac{19}{1280} Re^2 + \frac{71}{20480} Re^2 + \dots \right) \quad (20)$$

Persamaan 20 berlaku untuk bilangan Reynold diatas 2,0. Hubungan antara koefisien seret dan bilangan Reynold, terdapat pada persamaan 19 dan 20, dietapkan oleh peneliti lainnya dan kemudian diringkas oleh Graf dan Acaroglu (1966) melalui grafik sperti pada Gambar 17.



Gambar 17. Hubungan antara koefisien seret dengan bilangan Reynold untuk material bulat (Graft 1966), Pallu S.M, 2007

5. Aplikasi prinsip energi dalam saluran terbuka

Energi aliran melalui suatu penampang saluran dinyatakan sebagai jumlah tinggi air (H) diatas suatu bidang persamaan (datum). Dalam aliran saluran

saluran diberi notasi S_0 , dimana $S_0 = \sin \theta$. Untuk aliran seragam, $S_f = S_w = S_0 = \sin \theta$

Menurut prinsip kekekalan energi, tidak ada energi yang musnah atau lenyap; namun energi dapat berubah, misalnya energi aliran dapat berubah menjadi energi panas akibat gesekan antara aliran dengan saluran sebagai media pengaliran. Dalam ilmu hidrolika, perubahan energi aliran disebut ‘kehilangan energi’.

Secara matematis, prinsip kekekalan energi dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$z_1 + d_1 \cos \theta + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + d_2 \cos \theta + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f = C \quad (23)$$

dimana C adalah konstanta yang nilainya bergantung pada bidang referensi atau bidang persamaan (datum). Untuk saluran yang kemiringan dasarnya kecil ($\theta \approx 0$), persamaan (23) menjadi:

$$z_1 + h_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + h_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f = C \quad (24)$$

Persamaan (23) dan (24) disebut persamaan energi (*energy equation*). Selanjutnya, apabila $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ dan kehilangan energi dapat diabaikan ($h_f = 0$), persamaan (3.4) menjadi:

$$z_1 + h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + h_2 + \frac{V_2^2}{2g} = C \quad (25)$$

yang dikenal sebagai persamaan energi dari Bernoulli.

5.1. Energi spesifik

Energi spesifik dalam aliran saluran terbuka didefinisikan sebagai tinggi energi di atas dasar saluran atau sama dengan kedalaman aliran ditambah tinggi kecepatan. Secara matematis, energi spesifik dinyatakan dengan persamaan:

$$E = d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (26)$$

Selanjutnya, untuk saluran yang kemiringan dasarnya kecil dan $\alpha = 1$, persamaan energi spesifiknya menjadi:

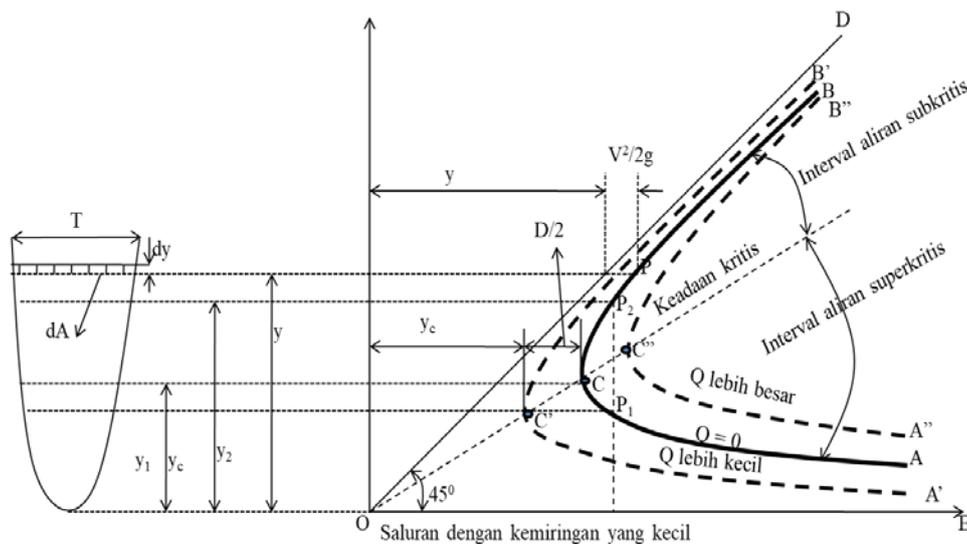
$$E = h + \frac{V^2}{2g} \quad (27)$$

Karena $Q = A \cdot V$ atau $V = \frac{Q}{A}$; persamaan (3.7) dapat ditulis:

$$E = h + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (28)$$

Dari persamaan (28), kelihatan bahwa untuk suatu penampang saluran A dan debit Q tertentu, energi spesifik E hanya merupakan fungsi dari kedalaman aliran h . Bila digambarkan hubungan antara kedalaman aliran dan energi spesifik untuk suatu penampang dan debit tertentu, diperoleh **lengkung energi spesifik** (Gambar 19)

Lengkung tersebut menunjukkan bahwa untuk suatu energi spesifik tertentu, terdapat dua kemungkinan kedalaman (h_1 dan h_2). Pada titik C energi spesifik menjadi paling kecil (minimum). Pada kondisi ini, seolah-olah kedalaman h_1 dan h_2 menyatu ($h_1 = h_2 = h_c$). Kondisi dimana energi spesifik minimum disebut kondisi aliran kritis dan kedalaman alirannya h_c disebut kedalaman kritis. Jika $h > h_c$ kecepatan aliran V lebih kecil dari kecepatan kritis V_c dan aliran disebut aliran subkritis, dan sebaliknya jika $h < h_c$ kecepatan aliran V lebih besar dari kecepatan kritis V_c dan aliran disebut aliran superkritis.



Gambar 19. Lengkung Energi spesifik

Menurut (Greco *et al.*, 2004), untuk kemiringan model hambatan yang landai atau horizontal, energi spesifik menurun sepanjang profil air superkritis sedangkan ini harus meningkat untuk mencapai energi minimum yang dibutuhkan oleh penyempitan. Hanya aliran subkritis melalui lompatan hidrolis yang dapat memastikan peningkatan energi ini.

5.2. Kriteria aliran kritis

Dalam uraian sebelumnya, telah didefinisikan bahwa aliran dalam keadaan kritis apabila bilangan Froude sama dengan satu ($\mathbf{F} = 1$). Definisi yang lebih umum adalah keadaan aliran dimana untuk suatu debit tertentu energi spesifiknya minimum. Secara matematis, pernyataan tersebut dinyatakan dengan persamaan:

$$\frac{dE}{dh} = 0 \quad (27)$$

Jika persamaan (27) didiferensialkan terhadap kedalaman aliran h , diperoleh:

$$\frac{dE}{dh} = 1 - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dh} = 1 - \frac{V^2}{gA} \frac{dA}{dh} \quad (28)$$

dimana $dA = T \cdot dh$ atau $\frac{dA}{dh} = T$.

Karena kedalaman hidrolis $D = \frac{A}{T}$, maka persamaan (28) dapat ditulis

$$\frac{dE}{dh} = 1 - \frac{V^2 T}{gA} = 1 - \frac{V^2}{gD} \quad (29)$$

Substitusi persamaan (29) ke persamaan (27) menghasilkan:

$$V^2 = gD \quad (30a)$$

$$\text{Atau } \frac{V^2}{2g} = \frac{D}{2} \quad (30b)$$

Persamaan (30b) merupakan kriteria untuk aliran kritis yang menyatakan bahwa pada aliran kritis, tinggi kecepatan sama dengan setengah dari kedalaman hidrolis.

Selanjutnya, persamaan (30) dapat pula ditulis:

$$\frac{V}{\sqrt{gD}} = 1 \quad (30c)$$

Persamaan (30c) berarti $F = 1$, yang merupakan definisi untuk aliran kritis.

Dengan demikian, kriteria aliran kritis secara umum adalah:

- a) Aliran sejajar atau berubah lambat laun
- b) Kemiringan dasar saluran kecil
- c) Koefisien energi (α) dianggap sama dengan satu.

Jika koefisien energi tidak sama dengan satu, maka kriteria aliran kritis adalah:

$$\alpha \frac{V^2}{2g} = \frac{D}{2} \quad (31)$$

sedangkan untuk saluran dengan kemiringan dasar θ besar dan koefisien energi α , maka kriteria aliran kritis menjadi

$$\alpha \frac{V^2}{2g} = \frac{D \cos \theta}{2} \quad (32)$$

dan bilangan Froude dinyatakan dengan:

$$F = \frac{V}{\sqrt{\frac{gD \cos \theta}{\alpha}}} \quad (33)$$

6. Material Dasar

Distribusi sedimen sering ditunjukkan dengan pendekatan distribusi probabilitas normal logaritmik (semi-logaritmik). Kurva yang dihasilkan merupakan hubungan antara ukuran butiran sebagai absis dan persen lolos kumulatif sebagai ordinat. Keseragaman butiran sedimen yang menyusun suatu gradasi dapat dinyatakan dengan koefisien keseragaman, C_u (*coefficient of uniformity*), sedangkan untuk mengetahui bentuk kurva gradasi butiran dinyatakan dengan koefisien gradasi, C_g (*coefficient of gradation*).

Berdasar komposisi butiran yang menyusun suatu gradasi dibagi menjadi dua bentuk, yaitu kurva bergradasi seragam (*uniform*), dan kurva bergradasi tidak seragam (*ununiform*). Pada material pasir, kurva gradasi butirannya dikatakan bergradasi seragam jika $C_u < 6$ dan $1 < C_g < 3$ dan diluar dari tersebut kurva dikatakan tidak seragam. koefisien keseragaman merupakan fungsi dari diameter butiran yang lolos 60% dan 10%, dan dinyatakan sebagai:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (34)$$

Sedangkan koefisien gradasi merupakan fungsi dari diameter butiran dengan presentase lolos saringan 10%,30%,60%, dan dinyatakan sebagai:

$$C_u = \frac{D_{30}^2}{d_{10}d_{60}} \quad (35)$$

Adapun ukuran material dasar sungai menurut *American Geophysical Union* dapat dilihat pada Tabel 5:

Tabel 5. Klasifikasi Ukuran Butiran

Interval/range (mm)	Nama	Interval/range (mm)	Nama
4096 - 2048	Batu sangat besar (<i>Very Large Boulders</i>)	1/2 - 1/4	Pasir sedang (<i>Medium Sand</i>)
2048 - 1024	Batu besar (<i>Large Boulders</i>)	1/4 - 1/8	Pasir halus (<i>Fine Sand</i>)
1024 - 512	Batu sedang (<i>Medium Boulders</i>)	1/8 - 1/16 (s/d 0.0625 mm)	Pasir sangat halus (<i>Very Fine Sand</i>)
512 - 256	Batu kecil (<i>Small Boulders</i>)	1/16 - 1/32	Lumpur kasar (<i>Coarse Silt</i>)
256 - 128	Kerakal besar (<i>Large Cobbles</i>)	1/32 - 1/64	Lumpur sedang (<i>Medium Silt</i>)
128 - 64	Kerakal kecil (<i>Small Cobbles</i>)	1/64 - 1/128	Lumpur halus (<i>Fine Silt</i>)
64 - 32	Kerikil sangat kasar (<i>Very Coarse Gravel</i>)	1/128 - 1/256	Lumpur sangat halus (<i>Very Fine Silt</i>)
32 - 16	Kerikil kasar (<i>Coarse Gravel</i>)	1/256 - 1/512	Lempung kasar (<i>Coarse Clay</i>)
16 - 8	Kerikil sedang (<i>Medium Gravel</i>)	1/512 - 1/1024	Lempung sedang (<i>Medium Clay</i>)
8 - 4	Kerikil halus (<i>Fine Gravel</i>)	1/1024 - 1/2048	Lempung halus (<i>Fine Clay</i>)
4 - 2	Kerikil sangat halus (<i>Very Fine Gravel</i>)	1/2048 - 1/4096	Lempung sangat halus (<i>Very Fine Clay</i>)
2 - 1	Pasir sangat kasar (<i>Very Coarse Sand</i>)		Koloid
1 - 1/2	Pasir kasar (<i>Coarse Sand</i>)		

Sumber : Garde dan Raju, 1985 dalam Jurnal Fropil

6.1. Awal Gerak Butir

Akibat adanya aliran air, timbul gaya-gaya yang bekerja pada material sedimen. Gaya-gaya tersebut mempunyai kecenderungan untuk menggerakkan atau menyeret butiran material sedimen. Untuk sedimen kasar seperti pasir dan kerikil, gaya tahanan utamanya adalah berhubungan dengan berat sendiri partikel. Ketika gaya hidrodinamik bekerja terhadap butiran sedimen yang mempunyai nilai, dan kalau itu naik secara pelan-pelan, akhirnya butiran sedimen akan mulai bergerak. Gerakan dasar ini biasanya disebut dengan kondisi kritis (Pallu, 2012).

Parameter aliran pada kondisi tersebut, seperti tegangan geser dasar (τ_0), kecepatan aliran (U) juga mencapai kondisi kritis.

Garde dan Raju (1977) dalam (Wibowo, 2007) menyatakan bahwa yang dikatakan sebagai awal gerakan butiran adalah salah satu dari kondisi berikut :

1. Satu butiran bergerak,
2. Beberapa (sedikit) butiran bergerak,
3. Butiran bersama-sama bergerak dari dasar, dan
4. Kecenderungan pengangkutan butiran yang ada sampai habis.

Tiga faktor yang berkaitan dengan awal gerak butiran sedimen yaitu:

1. kecepatan aliran dan diameter/ukuran butiran,
2. gaya angkat yang lebih besar dari gaya berat butiran, dan
3. gaya geser kritis

Distribusi ukuran partikel menurut *Raudkivi* (1991) dalam Wibowo (2007:22) dinyatakan dalam diameter rata-rata geometrik (d_{50}), standar geometri (σ_g) adalah sebagai berikut:

$$\sigma_g = \left(\frac{d_{84}}{d_{50}} \right)^{0,5} \quad (36)$$

Einstein dalam Kironoto (2011) menurunkan persamaan angkutan sedimen dasar (bed load) dengan metode pendekatan teoritik, yaitu teori statistik.

$$\psi_* = f(\Phi_*)$$

Parameter Intensitas aliran:

$$\psi_* = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{d}{\mu R_b S} \quad (37)$$

$$\mu = \left(\frac{C}{C_{d_{90}}} \right) = \left(\frac{k_s}{k_{s'}} \right)$$

$$C_{d_{90}} = 18 \log \frac{12 h}{d_{90}}$$

$$\Phi_* = \frac{q_B}{\gamma_s} \sqrt{\frac{\rho}{(\rho_s - \rho)} - \frac{1}{g d^3}} \quad (38)$$

Untuk dinding kasar:

$$C = 18 \log \frac{12 h}{k} \quad (39)$$

dimana k adalah tinggi kekasaran.

Shield dalam (Rustiati, 2007) mengungkapkan suatu diagram untuk awal gerak butiran pada material dasar seragam. *Shield* menyatakan parameter mobilitas kritis yang dinamakan parameter *Shields*:

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{\rho \cdot g \cdot \Delta \cdot d} = \frac{u_{*c}^2}{g \cdot \Delta \cdot d} \quad (40)$$

Tegangan geser :

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot R \cdot I \quad (41)$$

Kecepatan geser:

$$u_* = \left(\frac{\sigma_0}{\rho} \right)^{0,5} \quad (42)$$

Kecepatan kritik dihitung diatas dasar rumus sebagai berikut:

$$U_c = u_{*c} \left(5,75 \log \left(\frac{y_0}{2 \cdot d_{50}} \right) + 6 \right) \quad (43)$$

Kecepatan geser kritik diberikan:

$$u_{*c} = \sqrt{\theta_c \cdot g \cdot \Delta \cdot d} \quad (44)$$

dengan :

σ_g = Standar geometri

d = diameter butiran d_{50} (m)

g = Percepatan grafitasi (m/s^2)

Δ = Relatif density (-)

ρ = massa jenis air (kg/m^3)

u_{*c} = Kecepatan geser kritik (m/s)

τ_c = Nilai kritik (N/m^2)

θ_c = Parameter mobilitas kritik (-)

R = Jari-jari hidraulik (m)

y_0 = Kedalaman aliran (m)

I = Kemiringan dasar sungai

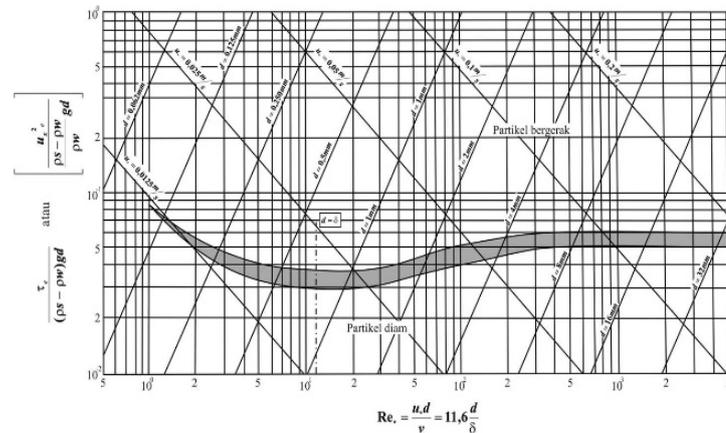
Menurut *Breuser & Raudkivi* (1991), dimensi analisis untuk menentukan beberapa parameter tak berdimensi dan ditetapkan dalam bentuk diagram pergerakan awal (*incipient motion*). Melalui grafik *Shield*, dengan mengetahui angka *Reynold* (Re) butiran atau diameter butiran (d), maka pada nilai tegangan

geser kritis (τ_c) dapat diketahui. Bila tegangan geser dasar aliran berada diatas nilai kritiknya maka butiran sedimen bergerak, atau dengan kata lain:

$\sigma_0 < \tau_c$ butiran tidak bergerak

$\sigma_0 = \tau_c$ butiran dasar mulai akan bergerak

$\sigma_0 > \tau_c$ butiran dasar bergerak



Gambar 20. Diagram Shields, Hubungan Tegangan Geser Kritis dengan Bilangan Reynolds (Breuser dan Raudkivi, 1991)

7. Persamaan Empiris Kedalaman Gerusan

a. Persamaan Dey (2008) dan Emergent (2004)

Dey dan Emergent, memperkenalkan persamaan kedalaman gerusan di hambatan menggunakan hambatan silinder (Euler and Herget, 2012). Meskipun model analitik mengacu pada kedalaman gerusan *steady state* sebagai variabel dependen, dapat diterapkan pada panjang morfometrik lainnya variabel (mis. lebar atau panjang lubang gerusan). Pendekatan berlaku untuk kondisi air jernih, aliran tetap, sedimen tidak kohesif dan kondisi aliran subkritis. Sejauh ini tidak terbukti berlaku untuk hambatan dengan bentuk bulat alami, seperti batu besar, karena faktor bentuk yang hilang. Dalam bentuk non-dimensionalnya persamaannya adalah ditulis sebagai

$$\left(\frac{d_s}{v}\right)^{1/2} = f(R_{eo}, F^{1/2}, K_{D50}, K_\sigma^{1/2}) \quad (45)$$

Dan untuk bentuk dimensionalnya adalah :

$$d_s = f(R_{eo}, F, L_A, K_{D50}^2, K_\sigma) \quad (46)$$

Dimana :

K_σ = Faktor koreksi untuk keseragaman sedimen = $1/\sigma_g$

σ_g = Standar deviasi geometri dari distribusi ukuran butir
 $(D_{84}/D_{16})^{1/2}$

v = Viskositas kinematik, m^2/dtk

K_{D50} = Faktor koreksi untuk ukuran butir = $1/(-0.05 (W_o/D_{50}) + 3.5)$

Jika $(W_o/D_{50}) < 50$ atau = $1/(0.0003(W_o/D_{50}) + 0.99)$, jika
 $(W_o/D_{50}) > 50$

R_{eo} = Bilangan hambatan Reynolds = $U_m L_A/v$

F = Bilangan Foude = $\left(\frac{U_m}{d_w g}\right)^{1/2}$

U_m = Kecepatan aliran rerata, m/dtk

L_A = Panjang ekuivalent area arus datang dari hambatan, $m (h_o^{2/3} w_o^{1/3})$

h_o = Tinggi hambatan, m

W_o = Lebar hambatan, m

d_w = Kedalaman aliran, m

b. Persamaan *Breuser* dan *Raudkivi*

Menurut *Breusers* dan *Raudkivi* (1991), kedalaman gerusan tergantung dari beberapa variabel, yaitu karakteristik fluida, material dasar, aliran dalam saluran dan bentuk pilar atau abutmen jembatan yang dapat ditulis::

$$\frac{d_s}{L_b} = f \left(\frac{UL_b}{\nu}, \frac{U^2}{gL_b}, \frac{h_0}{L_b}, \frac{d}{L_b}, \Delta \right) \quad (47)$$

dengan :

$$\Delta = \text{rapat massa relative dari butir terendam, } \Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$$

d_s = Kedalaman gerusan, (m)

h_0 = Kedalaman aliran

U = kecepatan aliran rerata, m/det

ρ = Rapat massa fluida, (m)

ρ_s = Rapat massa sedimen

ν = Kekentalan kinematik fluida

g = Percepatan gravitasi

d = diameter butir sedimen

L_b = Lebar abutmen, (m)

c. Persamaan *Garde* dan *Raju*

Persamaan *Garde* dan *Raju* (1997) dalam (Rustiati, 2007) digunakan pada gerusan lokal disekitar pilar dan abutmen jembatan untuk aliran *clear-water scour* dan *livebed scour*, menghitung kedalaman gerusan

$$\frac{d_s}{b} = \frac{4,0}{a} \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \left(\frac{u}{\sqrt{gh_0}} \right)^{n^*} \quad (48)$$

dengan :

a = perbandingan bukaan (B-L)/B

n^* = eksponen, fungsi ukuran sedimen dan geometri halangan

$\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ = koefisien ukuran butir, lebar abutmen, sudut datang dan bentuk geometrik abutmen.

d. Persamaan *Shen I* dan *Shen II*

Beberapa rumus praktis untuk memperkirakan gerusan lokal di sekitar abutmen dalam Legono (1990) dalam Purwantoro (2015):

Persamaan Shen I

$$Y_s = 1,17 U_o^{0,62} b^{0,62} K_3 \quad (49)$$

Persamaan Shen II

$$Y_s = 1,59 U_o^{0,67} b^{0,67} K_3 \quad (50)$$

dengan :

Y_s = kedalaman gerusan, diukur (arah vertical)) dari dasar sampai elevasi muka pasir dekat sebelah hulu abutmen, (m)

b = Lebar abutmen, m

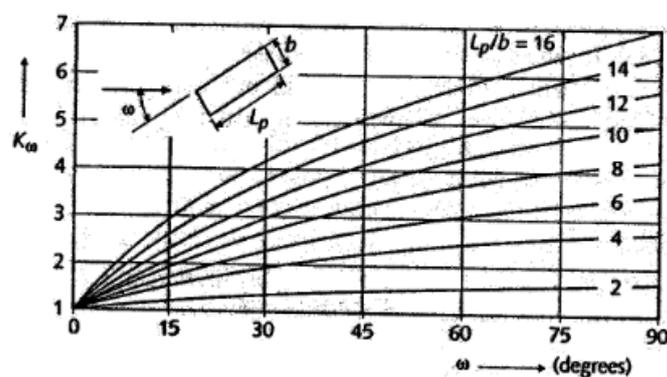
U_o = Kecepatan aliran, m/det

k_3 = Faktor pengali abutmen

Tabel 6. Variasi nilai η_1 (koefisien ukuran butir dan n (fungsi ukuran sedimen dan geometri halangan) terhadap d (distribusi ukuran butiran)

Sumber : *SMARTEK Journal, Rustiati, 2004*

$d(\text{mm})$	0,29	0,45	1	2,15	4	7,5	10,5
η_1	1	1,09	1,15	1,0	0,85	0,66	0,54
n	0,68	0,75	0,85	0,93	1,05	0,9	0,85



Sumber : *SMARTEK Journal, Rustiati, 2004*

Gambar 21. Pengaruh koefisien η_3 terhadap sudut datang aliran

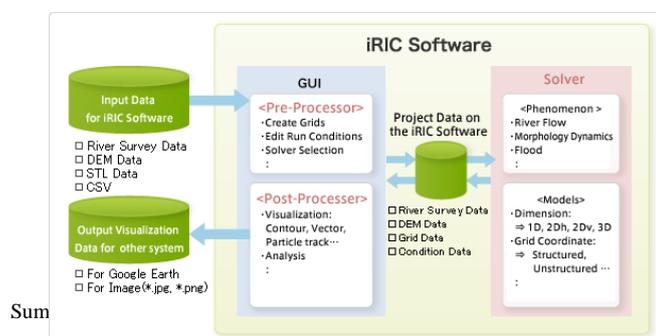
8. Validasi menggunakan simulasi komputasi

Validasi data dilakukan dengan membandingkan simulasi dengan teoritis, dimana persen (%) penyimpangan diharapkan sekecil mungkin tanpa menyebutkan batasan penyimpangan. Keakuratan metode numerik yang digunakan untuk merepresentasikan Saluran tergantung pada banyak faktor, misalnya, keakuratan kondisi batas, numerik presisi dari diskritisasi persamaan yang mengatur (*metode finite difference, metode finite volume, metode finite element*), dan kebenaran kode computer yang dihasilkan.

8.1. Software iRIC

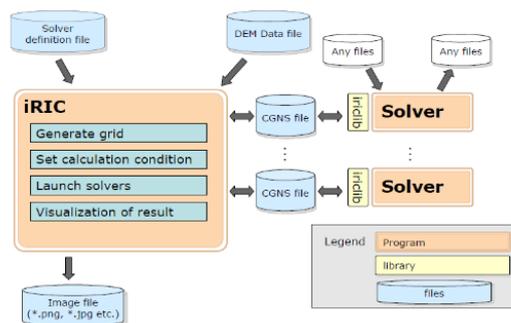
iRIC (*International river interface cooperative*) adalah software simulasi numerik analisis aliran komputasi untuk masalah dalam ilmu teknik keairan. Perangkat lunak ini digunakan untuk menganalisis morfodinamika, prediksi banjir, curah hujan limpasan, Tsunami, aliran debris yang dikembangkan USGS dan *iRicNays* melalui *Foundation of Hokkaido River Disaster Prevention Research Center* (i-ric.org).

Aplikasi perangkat lunak *The International River Interface Cooperative* (iRIC) menyediakan ruang simulasi yang terintegritas. iRIC menyediakan lingkungan yang komprehensif dan terpadu di mana data yang diperlukan oleh pemecah analisis dapat dihimpun, disimulasikan dan hasil analisis simulasi dapat divisualisasikan.



Gambar 22. Bagan Pengoperasian Software iRIC

Secara umum pengoperasian simulasi menggunakan software i-RIC mempunyai tiga tahapan utama, yaitu pre-processing, solver, dan post-processing.



Gambar 23. Struktur umum model iRIC (Nelson et al, 2016)

Software iRIC mempunyai banyak fungsi sebagai problem solver yang dimiliki, sehingga metode penggunaannya bergantung pada software yang dipilih.

8.2. Software *i-Ric Nays2DH*

Nays2DH adalah modul komputasi dua dimensi (2D) simulasi aliran, transpor sedimen, perubahan morfologi dasar dan tepi sungai hasil gabungan komputasi Nays2D dan Morpho2D.

Nays2D dikembangkan oleh Dr. Yasuyuki Shimizu dari Hokkaido University merupakan ahli bidang 2D untuk menganalisis aliran, transportasi sedimen, evolusi lapisan dan erosi tepi di sungai. Juga pada beberapa model simulasi seperti evolusi dasar sungai akibat pengaruh vegetasi, perhitungan dan prediksi genangan pada dataran banjir, sedimentasi pada pertemuan sungai, analisis erosi tepi sungai, dan sebagainya.

Morpho2D adalah solver yang digunakan untuk mensimulasikan perubahan morfologi sungai secara dua dimensi. Morpho2D dapat menghitung beberapa kemungkinan dalam simulasi perubahan morfologi sungai dengan sedimen seragam dan beragam serta mensimulasikan perkembangan ambang sungai dengan menggolongkan partikel sedimen pada dasar sungai.

Pada dasarnya kedua *solver* ini sama-sama berbasis dua dimensi sehingga dikembangkanlah *solver* Nays2DH agar pengguna dapat memilih model transportasi sedimen berdasarkan fungsi yang diimplementasikan pada kedua *solver*.

Pada Nays2DH *solver* manual (2014) membagi gerak aliran menjadi dua sistem koordinat yaitu sistem koordinat ortogonal (x,y) dan sistem koordinat

kurvalinear atau moving boundary fitted coordinates (MBFC). Persamaan dasar aliran dalam koordinat orthogonal.

8.2.1. Persamaan dasar I-ric Nays-2DH

Pada Nays2DH solver manual, (Y, 2011) membagi gerak aliran menjadi dua sistem koordinat yaitu sistem koordinat ortogonal (x,y) dan sistem koordinat kurvalinear atau moving boundary fitted coordinates (MBFC).

a. Persamaan dasar aliran

Persamaan dasar dalam sistem koordinat orthogonal (x,y) adalah sebagai berikut :

Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = 0 \quad (51)$$

dimana:

h = Kedalaman air

t = waktu

u = kecepatan rata-rata pada arah x

v = kecepatan rata-rata pada arah y

Persamaan momentum dalam arah x dan y

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + D^x \quad (52)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + D^y \quad (53)$$

dengan:

$$\frac{\tau_x}{\rho} = C_f u \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = C_f v \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$D^x = \frac{\partial}{\partial x} \left[v_t h \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_t h \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (54)$$

$$D^y = \frac{\partial}{\partial x} \left[v_t h \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_t h \frac{\partial v}{\partial y} \right] \quad (55)$$

dimana:

g = gaya gravitasi

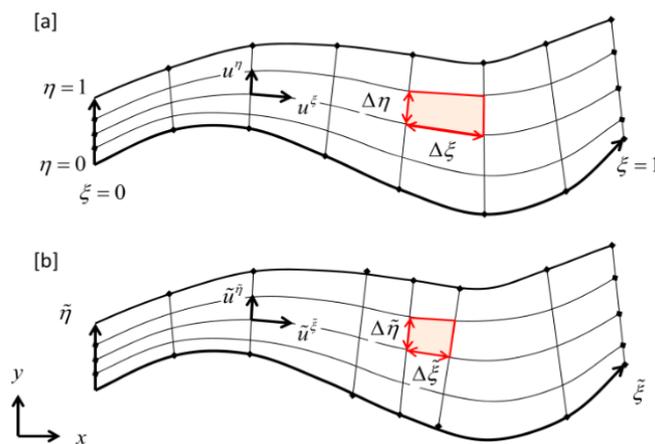
τ = tegangan geser

F = gaya tarik akibat vegetasi

C_f = koefisien tegangan geser dasar

V_t = koefisien viskositas pusaran

Persamaan kontinuitas dan persamaan momentum diatas masih dalam system koordinat orthogonal. Perhitungan persamaan kontinuitas dan persamaan momentum pada simulasi pemodelan memiliki berbagai bentuk grid sehingga untuk mempermudah perhitungan persamaan tersebut perlu diubah ke sistem koordinat kurvalinear atau bisa disebut juga *moving boundary fitted coordinates* (MBFC) (Sarkawt, 2017).



Gambar 24. Sistem Koordinat MBFC Non Dimensional

C. Metode Analisis Dimensi

Permasalahan yang ada dalam mekanika fluida dan hidraulika 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 analisa dimensi ini akan dapat ditentukan bentuk hubungan diantaranya.

Dalam Internasional Sistim/System International (SI) dasar dimensi yang di pakai adalah : massa (M), Panjang (L), waktu (T) dan temperature (T°). Variabel dapat dibedakan berdasarkan dimensinya menjadi : geometric dengan dimensi L ; kinematic dengan dimenasi L,T ; dinamik dengan dimensi M. L. T dan variable tak berdimensi. Selengkapnya variable-variabel dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Variabel geometrik, kinematik, dinamis dan tak berdimensi

No	Quantity	Satuan	Simbol	Dimensi	
				Sistim MLT	Sistim FLT
GEOMETRIK					
1	Panjang karakteristik hambatan	M	L	L	L
2	Luas plat	m ²	A_p	L ²	L ²
3	Volume	m ³	V	L ³	L ³
4	Kedalaman aliran	M	H_w	L	L
5	Tinggi Plat	M	h_p	L	L
6	Lebar Abutmen	M	L_b	L	L
KINEMATIK					
7	Time	S	T	T	T
8	Kecepatan (linear)	m/s	u	LT ⁻¹	LT ⁻¹

No	Quantity	Satuan	Simbol	Dimensi	
				Sistim MLT	Sistim FLT
9	Kecepatan (putaran)	rad/s	ω	T^{-1}	T^{-1}
10	Percepatan (linear)	m/s^2	f	LT^{-2}	LT^{-2}
11	Percepatan (putaran)	rad/s^2	α	T^{-2}	T^{-2}
12	Debit	m^3/s	Q	L^3T^{-1}	L^3T^{-1}
13	Percepatan gravitasi	m/s^2	g	LT^{-2}	LT^{-2}
14	Viskositas Kinematik	m^2/s	$\vartheta(nu)$	L^2T^{-1}	L^2T^{-1}
DINAMIK					
15	Massa	Kg	M	M	$FL^{-1}T^2$
16	Gaya	$(Kg.m/s^2) = N$	F	MLT^{-2}	F
17	Berat	$(Kg.m/s^2) = N$	W	MLT^{-2}	F
18	Kerapatan air	Kg/cm^3	ρ_w	ML^{-3}	$FL^{-4}T^2$
19	Berat spesifik	$(kg.m/s^2)/m^3 = N/m^3$	γ	$ML^{-2}T^{-2}$	FL^{-3}
20	Viskositas Dinamik	$(Kg.m/s^2)s/m^2 = N.s/m^2$	$\mu (mu)$	$ML^{-1}T^{-1}$	$FL^{-2}T$
21	Kerapatan massa jenis sedimen	mg/ltr	ρ_s	ML^{-3}	$FL^{-4}T^2$

Parameter yang terlibat dalam fenomena gerusan di abutmen dapat dikelompokkan sebagai berikut.:

- a) Parameter yang berkaitan dengan geometri saluran: lebar, bentuk penampang, dan kemiringan.

- b) Parameter yang berkaitan dengan abutmen : ukuran, bentuk, orientasi sehubungan dengan aliran utama dan kondisi permukaan.
- c) Parameter yang berkaitan dengan sedimen dasar: ukuran rata-rata, distribusi ukuran butir, kerapatan massa, bentuk butiran (sudut) dan kepadatan butir sedimen.
- d) Parameter yang berkaitan dengan fluida: massa jenis, kekentalan (*viskositas*), percepatan gravitasi dan suhu.
- e) Parameter yang berkaitan dengan kondisi aliran: kecepatan aliran rata-rata, kedalaman aliran, kecepatan geser dan kekasaran saluran.
- f) Waktu gerusan dapat diambil sebagai parameter tambahan untuk lubang gerusan yang berkembang.

Bilangan tak berdimensi digunakan untuk menyatakan hubungan antar parameter serta dipakai untuk menggambarkan hasil-hasil penelitian. Untuk menentukan bilangan tak berdimensi tersebut 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* (Yuwono, 1996). Untuk penelitian ini digunakan metode *Buckingham*, menggunakan penalaran fisik, dan berbagai penyelidikan menggabungkan parameter yang sesuai yang mempengaruhi kedalaman gerusan pada abutmen di berbagai tempat bentuk nondimensional.

Metode *Buckingham* menjelaskan fenomena model hidraulik, bila ada fungsi yang terdiri dari n parameter $g(q_1, q_2, \dots, q_n) = 0$ maka parameter-parameter tersebut dapat dikelompokkan menjadi $(n - m)$ kelompok independent dimensionless ratio atau yang dinotasikan sebagai parameter π dan dapat diekspresikan sebagai $G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{(n-m)}) = 0$

dimana :

m = adalah repeating parameter yang umumnya diambil sama dengan r (tetapi tidak selalu) ; r = adalah jumlah minimum dimensi bebas yang dibutuhkan untuk menspesifikasikan dimensi-dimensi dari seluruh parameter.

Untuk keperluan teknik hidraulik biasanya ada 3 elemen pokok yaitu Massa (M), Panjang (L) dan waktu (T) (Yuwono, 1996).

Contoh : $g(F_d, D, V, \rho, \mu) = 0$, maka dimensinya adalah
 $[MLt^{-2}], [L], [Lt^{-1}], [Mt^{-3}], [ML^{-1}t^{-1}]$

Dengan mengabaikan efek kekentalan aliran, *Melville* (1992) dalam *Barbhuiya* dan *Dey* (2004:456) menyatakan parameter tak berdimensi sebagai berikut :

$$\frac{d_s}{l} = f \left(\frac{U^2}{gd}, \frac{h}{l}, \frac{d}{l}, \sigma_g, K_s, K_\theta, K_G \right) \quad (56)$$

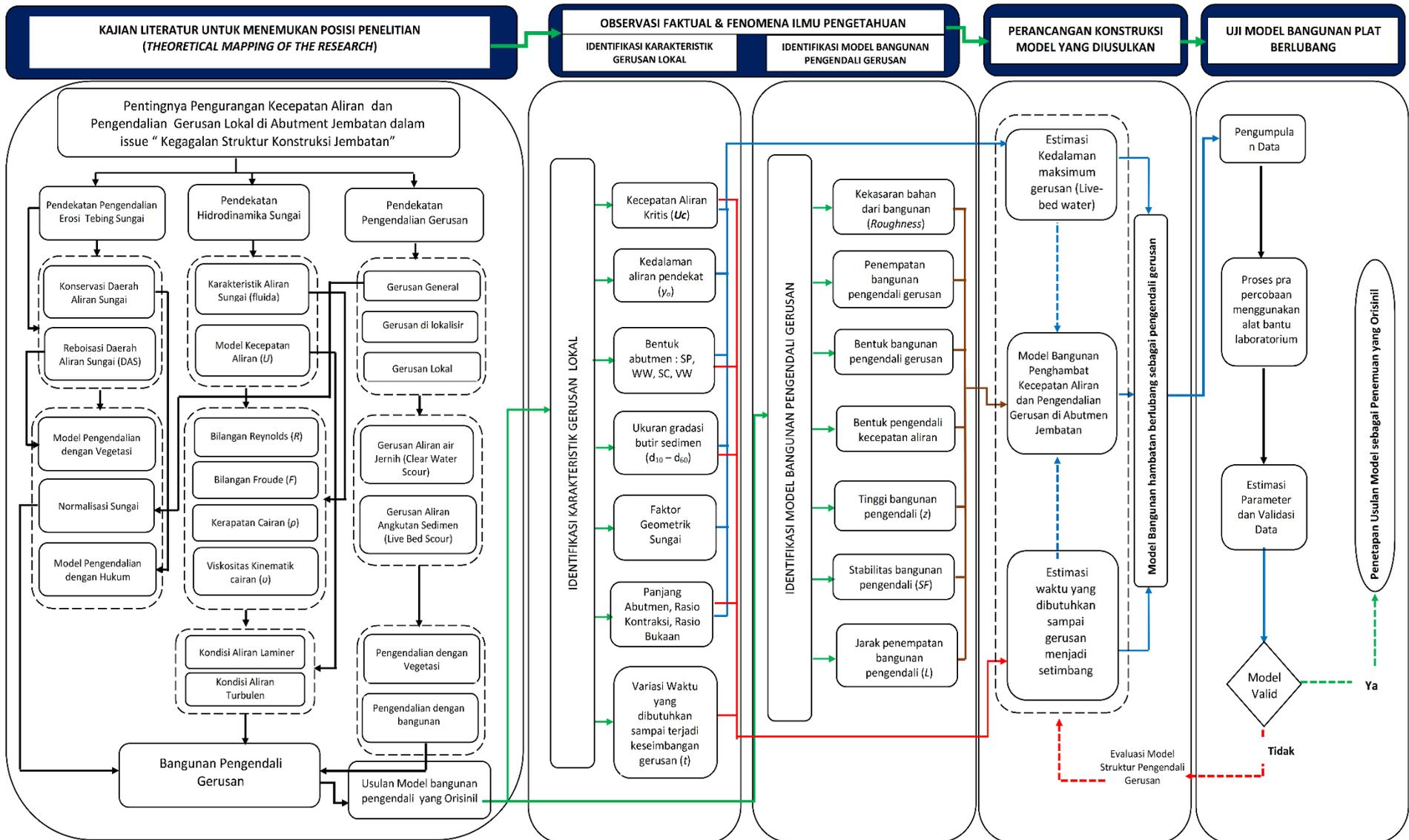
Dimana : $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{0,5}$

Lim (1997) memperoleh parameter tak berdimensi berikut untuk gerusan pada dinding vertikal abutmen dengan mengabaikan efek kontraksi saluran:

$$\frac{d_s}{h} = f \left(F_d, \frac{h}{d}, \frac{l}{h}, \sigma_g, K_s, \theta_a, K_G \right) \quad (57)$$

D. Kerangka Pikir

Kerangka pemikiran penelitian yang dilakukan, disajikan dalam bentuk bagan alir pada gambar 23.



Gambar 25. Kerangka Pikir Penelitian

E. Hipotesa

Berdasarkan landasan teori dan tinjauan pustaka, maka konsep struktur peredam energi diharapkan dapat memiliki pengaruh mengurangi kecepatan aliran dan meminimalisir kedalaman gerusan di abutmen. Pada penelitian ini, parameter-parameter yang digunakan adalah parameter yang berpengaruh pada Struktur peredam energi berpori dan parameter kedalaman gerusan di abutmen : Luas plat berpori (A_p), panjang karakteristi (L), kecepatan aliran struktur peredam (u), kerapatan air (ρ_w), viskositas dinamik (μ) gaya gravitasi (g), viskositas kinematik (ϑ), bentuk geometrik struktur peredam energi berpori (η), kedalaman aliran (D), ukuran partikel butiran dasar (d_m), berat jenis sedimen (ρ_s). Hipotesa dapat dinyatakan secara non-dimensional sebagai berikut:

Gaya Hambat, D_F dan gaya angkat, L_F dapat dinyatakan sebagai :

$$D_F = f_1(L, \rho_w, \mu, u, g, \eta) \quad (58)$$

$$L_F = f_2(L, \rho_w, \mu, u, g, \eta) \quad (59)$$

Dan untuk kedalaman gerusan di abutmen akibat struktur peredam energi berpori adalah:

$$ds = f_3(L_b, g, \rho_w, D, \vartheta, d_m, \rho_s, u) \quad (60)$$

Dimana :

D_F : Gaya hambat

L_F : Gaya angkat

$\frac{ds}{L_b}$: Kedalaman gerusan dalam bentuk tak berdimensi

d_s : Kedalaman gerusan maksimum diukur dari muka air ($h_o + h_p$), m

u : Kecepatan aliran rerata akibat hambatan, m/det

D : Kedalaman aliran akibat hambatan, m

L_b : Lebar abutmen, m

d_m : Diameter rerata sedimen, mm

ρ_s : Kerapatan massa jenis sedimen, m^g/ltr

ϑ : viskositas kinematik, m²/s

g : Percepatan gravitasi, m/s²