

G21
ACH
3

c.1

MODEL HIDRAULIK GERUSAN PADA PILAR JEMBATAN

TESIS

Disusun Untuk Memenuhi Persyaratan
Program Magister Teknik Sipil

Oleh :

Tri Achmadi
NIM : L4A 099 051



MAGISTER TEKNIK SIPIL
PROGRAM PASCASARJANA UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG

2001

UPT-PUSTAK-UNDIP

LEMBAR PENGESAHAN

MODEL HIDRAULIK GERUSAN PADA PILAR JEMBATAN

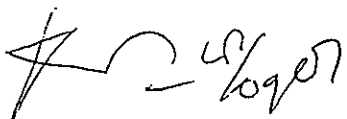
Diajukan guna ujian akhir

Disusun oleh :

TRI ACHMADI
NIM : L4A099051

Pembimbing I

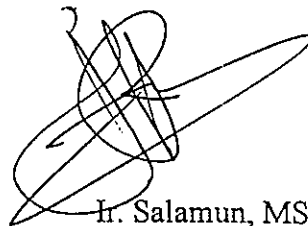
Tanggal : 2001



DR. Ir. Robert Kodoatie, M.Eng.

Pembimbing II

Tanggal : 18-9-2001



Ir. Salamun, MS.

LEMBAR PENGESAHAN

**MODEL HIDRAULIK
GERUSAN PADA PILAR JEMBATAN**

Diajukan oleh :

Tri Achmadi
NIM : L4A099051

Dipertahankan di depan Tim Penguji pada tanggal :

29 September 2001

Tesis ini diterima sebagai suatu persyaratan untuk memperoleh gelar
Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro

Semarang, September 2001

Tim Penguji

Ketua :

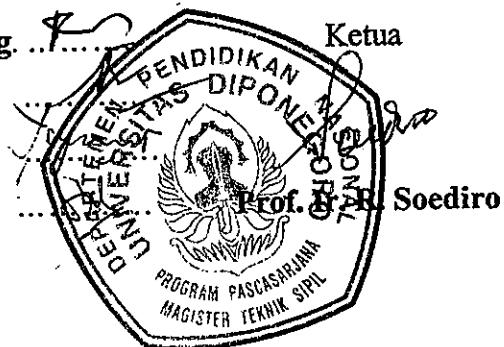
Prof. Ir. R. Soediro

Soediro
.....

Universitas Diponegoro
Program Pasca Sarjana
Magister Teknik Sipil

Anggota :

1. Dr. Ir. Robert Kodoatie, M.Eng.
2. Dr. Ir. Suripin, M.Eng.
3. Ir. Sri Sangkawati, MS.
4. Ir. Salamun, MS.



KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Swt, karena atas rahmatNya sehingga penulisan tesis dengan judul **Gerusan Pada Pilar Jembatan** ini dapat penulis selesaikan.

Tesis ini disusun guna memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro Semarang.

Taklupa penulis mengucapkan terima kasih setulus tulusnya kepada :

1. Ketua Program Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro Semarang
2. Dr.Ir. Robert Kodoatie, M.Eng. selaku pembimbing I.
3. Ir. Salamun, MS. selaku pembimbing II.
4. Dosen Penguji
5. Dosen & Staff S2, Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro Semarang
6. Laboratorium Pengaliran Jurusan Teknik Sipil Universitas Diponegoro Semarang
7. Seluruh keluarga
8. Semua pihak yang telah membantu dalam penulisan tesis ini

Serta penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun demi sempurnanya tesis ini.

Semarang, 2001

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR NOTASI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR	x
ABSTRACT	xii
BAB. I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Maksud dan Tujuan Penelitian	2
1.3. Ruang Lingkup	3
BAB. II. TINJAUAN KEPUSTAKAAN	
2.1. Pengertian Aliran.....	4
2.2. Pengertian Gerusan	4
2.3. Transportasi Sedimen	5
2.4. Pola Aliran.....	7
2.5. Proses Gerusan.....	8
2.6. Formula Penggerusan	9
2.7. Rancangan Model.....	14
2.7.1. Analisis Dimensi.....	14
2.7.1.1. Metoda Reyleigh	15
2.7.1.2. Metoda Buckingham	16
2.7.2. Kesebangunan	17
2.7.3. Skala Model	19
2.7.4. Model Terdistorsi.....	21
2.8. Material Dasar.....	22
2.9. Analisa Regresi Linier.....	23
2.10. Regresi Nonlinier	26

BAB. III. METODE PENELITIAN

3.1. Umum	27
3.2. Urutan Pelaksanaan	27
3.2.1. Dimensi model.....	27
3.2.2. Komponen model fisik	29
3.2.3. Alat, bahan-bahan pembuat model	29
3.2.4. Model pilar	30
3.2.5. Model morfologi sungai	30
3.2.6. Fasilitas bangunan pelengkap dan letak pilar	30
3.2.7. Pencatatan data	30
3.3. Diagram Alir Penelitian.....	32

BAB. IV. PELAKSANAAN PENGUJIAN

4.1. Umum.....	33
4.2. Perencanaan Saluran.....	34
4.3. Kalibrasi Alat dan Model.....	35
4.3.1. Pengukur debit (<i>Thompson</i>)	35
4.3.2. Kalibrasi debit.....	35
4.3.3. Kedalaman aliran (y).....	35
4.3.4. Kecepatan aliran (U)	36
4.4. Variasi Pengujian Model.....	36
4.4.1. Variasi debit	36
4.4.2. Lama pengaliran (<i>running</i>).....	36
4.5. Pengambilan data	37
4.6. Verifikasi.....	38

BAB. V. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1. Analisis Hasil Penelitian	40
5.1.1. Umum.....	40
5.1.2. Perhitungan tampang saluran	40
5.1.3. Pola gerusan	41
5.1.4. Hubungan kedalaman gerusan dengan waktu pengaliran (<i>running</i>)	43

5.1.5. Persamaan Laboratorium	47
5.1.6. Validasi dengan Data Laboratorium	49
5.1.7. Perbandingan kedalaman gerusan hasil perhitungan hasil pengukuran.....	50
5.1.8. Analisis persamaan dengan regresi linier.....	56
5.1.9. Validasi dengan Data Lapangan.....	58
5.2. Pembahasan.....	61
BAB. VI. KESIMPULAN DAN SARAN	
6.1. Kesimpulan	68
6.2. Saran.....	68
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN A (Analisis Dimensi dan Perencanaan Model Hidraulik)	
A.1. Analisis Dimensi	
A.2. Perencanaan Model Hidraulik	
LAMPIRAN B (Analisis Data)	
B.1. Debit pengamatan	
B.2. Perhitungan tampang saluran	
B.3. Hubungan kedalaman gerusan dan kedalaman aliran	
B.4. Hubungan kedalaman gerusan dan tipe pilar	
B.5. Persamaan laboratorium	
B.6. Data Laboratorium (untuk validasi)	
B.7. Perbandingan kedalaman gerusan	
B.8. Selisih gerusan	
B.9. Rasio gerusan	
B.10. Data lapangan (untuk validasi)	
LAMPIRAN C (Data Penelitian)	
C.1. Data Kalibrasi Pintu Thompson	
C.2. Data Penelitian Gerusan Pilar Jembatan	
LAMPIRAN D (Gambar Penelitian)	

DAFTAR NOTASI

ρ_s	= rapat massa butiran	(kg/m ³)
ρ_w	= rapat massa air.....	(kg/m ³)
θ	= sudut aliran.....	(tanpa dimensi)
Δ	= $(\rho_s - \rho) / \rho$	(tanpa dimensi)
ν	= kekentalan kinematik = 10^{-6}	(m ² /dt)
ρ	= rapat masa air	(kg/m ³)
τ_0	= tegangan geser	(tanpa dimensi)
τ_c	= tegangan geser dasar kritik	(N/m ²)
Δd_s	= selisih kedalaman.....	(m)
τ_o	= tegangan geser dasar	(N/m ²)
σ_x	= deviasi standart garis X.....	(tanpa dimensi)
σ_y	= deviasi standart garis Y	(tanpa dimensi)
a_1, a_2	= koefisien arah dari garis regresi	(tanpa dimensi)
b	= Lebar pilar.....	(m)
b'	= $b \cos \theta + L \sin \theta$	(tanpa dimensi)
b_1, b_2	= titik potong dari garis regresi	(tanpa dimensi)
Cd	= koefisien Thompson.....	(tanpa dimensi)
d	= diameter pilar	(m)
d_{50}	= D_{50} = diameter butiran lolos 50%.....	(m)
d_{50a}	= $d_{50} / 1.8$ = diameter butiran.....	(m)
d_{max}	= ukuran partikel maksimum dan ditentukan dari distribusi partikel.....	(m)
d_{Lab}	= kedalaman gerusan hasil laboratorium.....	(m)
d_{Lap}	= kedalaman gerusan hasil lapangan.....	(m)
d_p	= kedalaman gerusan hasil perhitungan	(m)
d_r	= rasio kedalaman	(tanpa dimensi)
d_s	= kedalaman gerusan	(m)

Fr	=	bilangan <i>Froude</i>	(tanpa dimensi)
g	=	gravitasi bumi	(m/dt ²)
H	=	Kedalaman air pada bak pengukur debit.....	(m)
K	=	koefisien pilar.....	(tanpa dimensi)
K _θ	=	arah aliran.....	(tanpa dimensi)
K _d	=	ukuran endapan.....	(tanpa dimensi)
K _g	=	geometri saluran.....	(tanpa dimensi)
K _i	=	Intensitas aliran	(tanpa dimensi)
K _s	=	bentuk pilar.....	(tanpa dimensi)
K _y	=	ukuran kedalaman.....	(m)
l	=	panjang pilar	(m)
L _H	=	skala horizontal.....	(tanpa dimensi)
L _V	=	skala vertikal.....	(tanpa dimensi)
Q	=	debit aliran	(m ³ /dt)
R	=	koefisien determinasi (<i>determination coefisien</i>)	(tanpa dimensi)
R _s	=	panjang karakteristik saluran.....	(m)
Re	=	angka <i>Reynolds</i>	(tanpa dimensi)
S	=	kemiringan memanjang saluran.....	(tanpa dimensi)
U	=	kecepatan aliran pada ketinggian rata-rata.....	(m/dt)
U*	=	kecepatan geser butiran	(m/dt)
U* _c	=	kecepatan geser kritis butiran.....	(m/dt)
U* _{ca}	=	kecepatan geser kritis butiran d _{50a}	(m/s)
U _c	=	kecepatan rata-rata saat butiran bergerak	(m/dt)
V* _c	=	Kecepatan geser kritis untuk ukuran d ₅₀	(m/dt)
V* _{ca}	=	Kecepatan geser kritis untuk ukuran d _{50a}	(m/dt)
V _a	=	0.8*V _{ca} = kecepatan aliran diatas permukaan butiran	(m/dt)
V _{ca}	=	kecepatan aliran pada permukaan butiran.....	(m/dt)
X	=	persamaan garis lurus X atas Y.....	(tanpa dimensi)
y	=	kedalaman aliran	(m)
Y	=	persamaan garis lurus Y atas X.....	(tanpa dimensi)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Faktor koefisien K_2	11
Tabel 2.2.	Faktor koefisien K_3	11
Tabel 2.3.	Metoda Reyleigh	15
Tabel 2.4.	Perbandingan Model Terdistorsi dan Tak terdistorsi.....	22
Tabel 4.1.	Dimensi saluran	34
Tabel 4.2.	Dimensi pilar.....	34
Tabel 4.3.	Variasi debit pengujian	36
Tabel 4.4.	Variasi waktu	37
Tabel 4.5.	Pengambilan data.....	37
Tabel 4.6.	Perbandingan Gerusan $y = 1.33$ cm	38
Tabel 4.7.	Selisih Gerusan $y = 1.33$ cm	38
Tabel 4.8.	Rasio Gerusan $y = 1.33$ cm.....	38
Tabel 5.1.	Perhitungan tampang saluran.....	41
Tabel 5.2.	Hubungan kedalaman gerusan waktu ($y = 1,33$ cm).....	43
Tabel 5.3.	Hubungan kedalaman gerusan waktu ($y = 1,59$ cm).....	43
Tabel 5.4.	Hubungan kedalaman gerusan waktu ($y = 2,18$ cm).....	43
Tabel 5.5.	Hubungan kedalaman gerusan waktu ($y = 2,63$ cm).....	44
Tabel 5.6.	Hubungan kedalaman gerusan waktu ($y = 3,15$ cm).....	44
Tabel 5.7.	Hubungan kedalaman gerusan waktu ($y = 3,67$ cm).....	44
Tabel 5.8.	Kedalaman gerusan hasil laboratorium.....	49
Tabel 5.9.	Perbandingan gerusan ($y = 1,33$ cm)	50
Tabel 5.10.	Perbandingan gerusan ($y = 1,59$ cm)	50
Tabel 5.11.	Perbandingan gerusan ($y = 2,18$ cm)	50
Tabel 5.12.	Perbandingan gerusan ($y = 2,63$ cm)	51
Tabel 5.13.	Perbandingan gerusan ($y = 3,15$ cm)	51
Tabel 5.14.	Perbandingan gerusan ($y = 3,67$ cm)	51
Tabel 5.15.	Analisis Persamaan dengan Regresi Linier.....	56
Tabel 5.16.	Perbandingan Persamaan Gerusan dengan Data Lapangan ..	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Diagram <i>Shields</i>	7
Gambar 2.2. Skema Pola Aliran dan Gerusan Lokal di Sekitar Pilar	8
Gambar 2.3. Kedalaman Gerusan sebagai Fungsi Waktu	9
Gambar 3.1. Detail gambar penelitian	28
Gambar 3.2. Tipe Pilar yang akan diuji	30
Gambar 4.1. Letak titik pengukuran gerusan pada pilar	37
Gambar 4.2. Perbandingan kedalaman gerusan	39
Gambar 5.1. Tampang saluran	40
Gambar 5.2. Pola Gerusan yang Terjadi pada Pilar Tipe A	42
Gambar 5.3. Pola Gerusan yang Terjadi pada Pilar Tipe B	42
Gambar 5.4. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu <i>running</i> ($y = 1,33$ cm)	45
Gambar 5.5. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu <i>running</i> ($y = 1,59$ cm)	45
Gambar 5.6. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu <i>running</i> ($y = 2,18$ cm)	45
Gambar 5.7. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu <i>running</i> ($y = 2,63$ cm)	46
Gambar 5.8. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu <i>running</i> ($y = 3,15$ cm)	46
Gambar 5.9. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu <i>running</i> ($y = 3,67$ cm)	46
Gambar 5.10. Perbandingan kedalaman gerusan (Tipe A1)	52
Gambar 5.11. Perbandingan kedalaman gerusan (Tipe A2)	53
Gambar 5.12. Perbandingan kedalaman gerusan (Tipe B1)	54
Gambar 5.13. Perbandingan kedalaman gerusan (Tipe B2)	55
Gambar 5.14. Perbandingan kedalaman gerusan hasil perhitungan dan pengukuran dengan menggunakan data laboratorium ..	57
Gambar 5.15. Perbandingan kedalaman gerusan hasil perhitungan dengan data lapangan	59

ABSTRACT

In recent years, much research had been conducted at and as result formulation to predict the bridge pier scouring. Most of the formulations are based on the laboratory data or the inductive consideration from the sediment continuity formulation because of the very restricted field data.

The object of this study was to identify the pattern and the depth of local scouring on the bridge pier. The first step was to analyze 6 selected local scour equations, including Laursen & Toch (1956), Shen (1996), Froehlich (1998), Richardson *at al.* (1990), Simons (1977) and Melville (1997).

The relation and correlation of hydraulic geometry to the scour around piers were analyzed carefully. The dominant parameters are pier width, depth of the stream, pier type, the stream direction, sediment characteristic and the Froude number. Using regression analysis simple scour equation was developed. A hydraulic model straight flow was conducted on a mobile bed model to analyze the bridge scouring both a around pier or elliptic pier.

96 laboratories test where conducted: 72 laboratory data were used to obtain scour relation statistically and 24 laboratory data were used for validation and verification. Additionally, 22 field data were used to validate the proposed equation.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Aliran yang terjadi pada sebuah sungai, biasanya disertai dengan proses gerusan transportasi sedimen akan terbentuk secara alamiah di mana dapat terjadi karena adanya pengaruh morfologi. Pengaruh morfologi sungai, dapat berupa tikungan-tikungan atau pada bagian penyempitan aliran sungai. Demikian pula pada struktur yang menghalangi aliran sungai, seperti misalnya aliran di sekitar pilar jembatan, sering pula terjadi proses gerusan untuk mencapai kesetimbangannya. Secara umum proses gerusan yang terbentuk akibat adanya suatu bangunan, dinamakan sebagai gerusan lokal atau *local scouring*.

Selama beberapa tahun terakhir telah banyak penelitian yang dilakukan dan telah banyak persamaan untuk memperkirakan kedalaman gerusan pada pilar jembatan. Sampai tahun 1989, lebih dari 35 persamaan telah dikembangkan untuk memprediksi kedalaman gerusan pada pilar jembatan (McIntosh, 1989). Namun, kebanyakan dari persamaan tersebut didasarkan pada data laboratorium atau pertimbangan induktif dari persamaan kontinuitas endapan (Richardson dkk., 1990). Untuk menguji persamaan-persamaan tersebut dengan menggunakan data lapangan sangat sedikit sekali, maka masih belum pasti berapa kedalaman gerusan pilar yang terjadi sebenarnya (Johnson, 1995).

Melihat pilar merupakan bagian dari jembatan yang paling penting karena berfungsi untuk menahan berat badan jembatan sendiri dan berat muatan yang melintasinya. Maka pilar jembatan yang dibangun pada alur sungai, kestabilan terhadap gerusan lokal akibat pengaruh aliran air sungai perlu diperhatikan. Gerusan lokal disekitar pilar jembatan disebabkan oleh adanya perubahan pola aliran. Perubahan ini terjadi akibat adanya bagian aliran yang ditahan oleh pilar. Selama berlangsungnya hal tersebut aliran yang kearah hilir akan berbelok ke samping. Jika pertambahan tekanan ini menjadi cukup kuat, maka *horseshoe vortex* akan terbentuk dengan sendirinya pada dasar pilar. Kemudian pusaran air ini akan menjangkau kearah bagian hilir pilar jembatan,

dengan demikian hal tersebut sangat mempengaruhi proses gerusan lokal. Pada kondisi ini, konsekwensi erosi serta transportasi sedimennya akan menjadi tinggi (Richardson dkk., 1990; Breusers dan Raudkivi, 1991; Graf, 1995). Ada beberapa faktor yang sangat menentukan besar kecilnya gerusan lokal yang terjadi pada dasar sungai di sekitar pilar, faktor-faktor tersebut yaitu bentuk geometri pilar, karakteristik aliran dan jenis sedimen. Gerusan lokal juga merupakan fungsi dari ukuran endapan, karakteristik aliran, geometri saluran, waktu dan pilar. Kedalaman gerusan maksimum akan mencapai kesetimbangan selama kondisi tertentu. (Shen, 1971; Richardson dkk., 1990; Breusers dan Raudkivi, 1991; Merville, 1997; Graf, 1995; Merville, 1997).

Sebagaimana diketahui, bahwa proses erosi dan sedimentasi merupakan suatu permasalahan yang sangat kompleks, di mana sangat dipengaruhi oleh kondisi aliran, material sedimen dan kondisi sungainya sendiri. Maka mengingat kompleks dan pentingnya permasalahan tersebut di atas, kajian tentang *local scouring* di sekitar bangunan-bangunan yang terdapat pada suatu sungai, perlu mendapat perhatian secara khusus. Maka pada penelitian ini akan dicoba untuk mengambil pokok permasalahan di atas, yaitu model hidraulik gerusan lokal pada pilar jembatan.

1.2. Maksud dan Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan maksud untuk memberikan bahan masukan bagi ahli hidraulik khususnya dalam menganalisis gerusan yang terjadi pada pilar jembatan.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pola gerusan lokal yang terjadi di sekitar pilar jembatan
2. Mengetahui kedalaman gerusan yang terjadi di sekitar pilar jembatan
3. Menganalisis faktor-faktor yang berpengaruh terjadinya gerusan kemudian membandingkan kedalaman gerusan hasil pengukuran (laboratorium) dengan hasil perhitungan menggunakan persamaan yang ada.

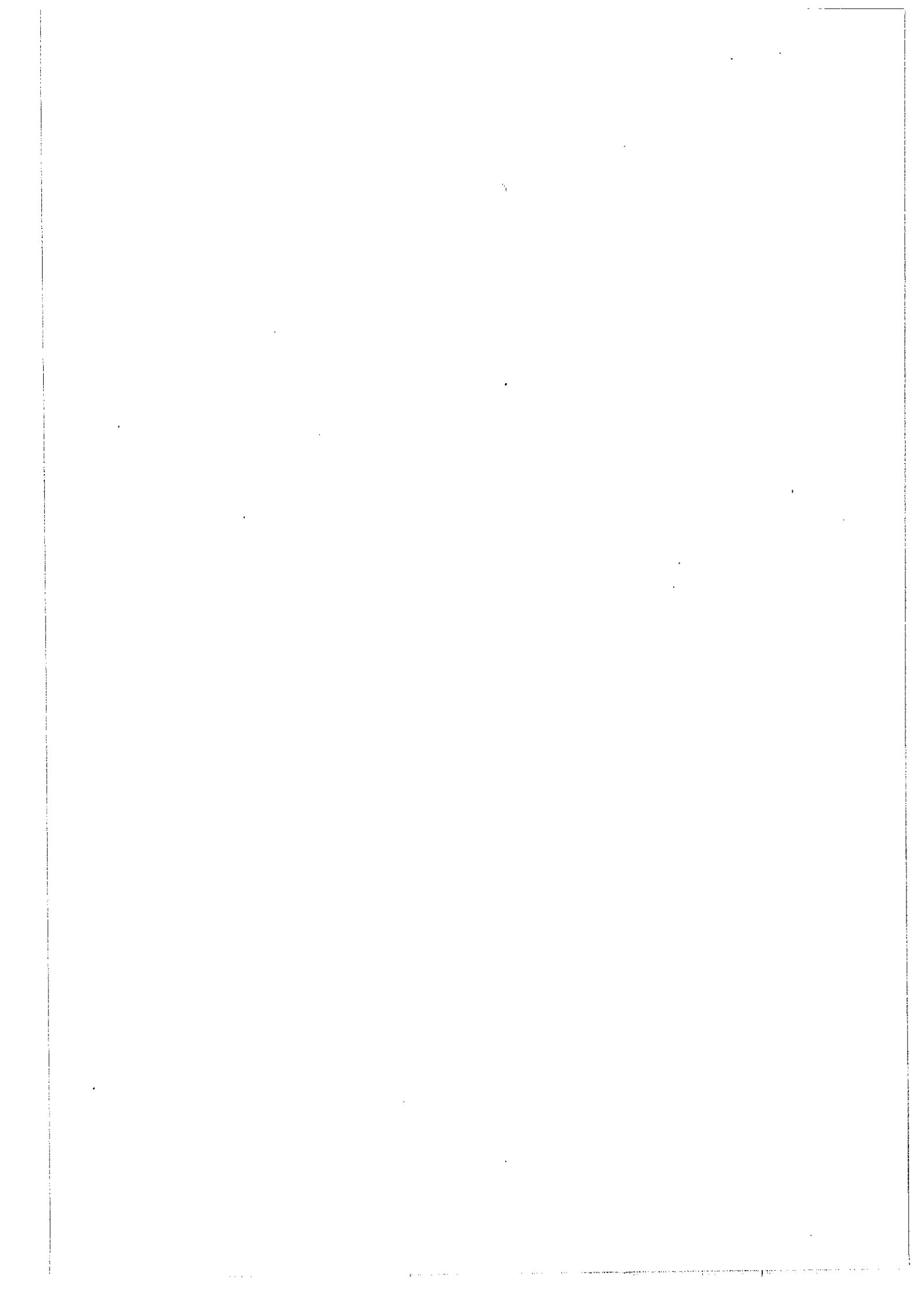
1.3. Ruang Lingkup

Penelitian ini merupakan suatu tahapan dari bagian penelitian menyeluruh mengenai gerusan yang terjadi di sekitar pilar jembatan.

Pada tahapan ini analisis dilakukan berdasarkan pengamatan/pengukuran dan parameter hidraulik serta parameter dari material uji. Sedangkan parameter gerusan dibahas secara kualitatif, mengingat keterbatasan alat ukur.

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Pengaliran UNDIP dengan diskripsi sebagai berikut :

- a. Model saluran (*flume*) persegi dan lurus
- b. Dasar saluran dilapisi pasir halus, untuk mengetahui pola gerusan / transpor sedimen yang terjadi (*mobile bed model*)
- c. Pengaliran dilakukan dengan debit yang dapat diatur (debit konstan), dengan sistem sirkuit tertutup dengan variasi debit
- d. Waktu pengaliran bervariasi (t)
- e. Perubahan dasar saluran tidak diperhitungkan.



BAB II TINJAUAN KEPUSTAKAAN

2.1. Pengertian Aliran

Menurut ilmu mekanika fluida aliran diklasifikasikan berdasarkan perbandingan antara gaya-gaya inersia (*inertial forces*) dan gaya-gaya kekentalan (*viscous forces*) menjadi tiga, yaitu aliran laminar, aliran transisi dan aliran turbulen (French, 1985; Chow, 1992). Variabel yang dipakai adalah bilangan *Reynolds* yang didefinisikan sebagai berikut.

$$Re = U * R_s / \nu \quad \dots\dots\dots(2.0)$$

di mana :

U = kecepatan aliran (m/dt).

R_s = panjang karakteristik (m).

ν = kekentalan kinematik = 10⁻⁶ (m²/dt)

Klasifikasi aliran berdasarkan bilangan *Reynolds* dapat dibedakan menjadi tiga kategori seperti berikut ini (French, 1985)

- ❖ Re < 500 aliran laminar
- ❖ 500 < Re < 12.500 aliran transisi
- ❖ Re > 12.500 aliran turbulen

Umumnya aliran pada saluran terbuka mempunyai Re > 12.500 sehingga alirannya termasuk dalam kategori aliran turbulen (French, 1985; Rajaratnam, 1987).

2.2. Pengertian Gerusan

Menurut Richardson dkk (1990) bahwa gerusan lokal pada pilar diartikan sebagai penurunan secara tiba-tiba ketinggian dasar sungai yang disebabkan oleh aliran air terhalangi pilar. Dengan demikian, untuk desain struktur hidraulik, prakiraan karakteristik gerusan bersifat setempat (Bormann, 1989).

Gerusan yang terjadi pada struktur bangunan air dapat dibagi menjadi beberapa kategori sebagai berikut :

a. Tipe Gerusan

General scour yaitu gerusan yang terjadi pada sebuah sungai atau saluran yang dihasilkan oleh proses alami tanpa adanya pengaruh atau gangguan dari sebuah struktur bangunan. *Constriction scour* yaitu jenis gerusan yang terjadi akibat penyempitan saluran. *Local scour* atau gerusan lokal, yaitu gerusan yang terjadi bila ada struktur bangunan dalam sebuah saluran pengaliran. Gerusan lokal termasuk tipe gerusan antara gerusan umum dan gerusan yang terjadi akibat penyempitan saluran.

b. Gerusan pada kondisi yang berbeda dalam Proses Transportasi Sedimen.

Clear water-scour yaitu terjadi jika material-material dasar pada aliran di bagian hulu telah mulai berhenti tergerus. Tegangan geser yang terjadi tidak lebih besar dari kondisi kritik untuk memulai Bergeraknya partikel butiran. Dengan perkataan lain bahwa sedimen yang bergerak dari lobang gerusan (*scour hole*) tidak akan kembali lagi.

Live-bed scour ditunjukkan oleh gerusan yang terjadi dengan disertai transportasi sedimen dari material dasar, hal ini terjadi ketika kondisi aliran dalam saluran telah menyebabkan Bergeraknya material dasar. Hal tersebut menunjukkan bahwa tegangan geser pada dasar saluran sudah lebih besar dari nilai kritiknya. Kesetimbangan kedalaman gerusan tercapai ketika banyaknya material yang telah Bergerak dari lobang gerusan sama banyaknya dengan material yang tersuplai ke lobang gerusan.

2.3. Transportasi Sedimen

Dalam mempelajari proses gerusan, maka tidak lepas untuk mempelajari karakteristik sedimen yang ada. Transportasi sedimen dan sifat-sifat aliran, merupakan beberapa hal yang biasanya digunakan dalam mengidentifikasi masalah tentang interaksi antara aliran fluida dan campuran material granular.

Permulaan pergerakan partikel sedimen dalam sebuah aliran akan diketahui, ketika timbulnya gaya untuk menarik dan mengangkat partikel yang menyebabkan partikel Bergerak, melebihi gaya gravitasi berat yang ada. Gerakan tersebut berawal dari suatu status keseimbangan gaya-gaya pada partikel yang dikenal

kondisi gerak awal (*initiation of motion*) di mana partikel berada dalam ambang batas atau keadaan diam menuju awal gerakan.

- Apabila nilai kecepatan geser di dasar aliran baru saja melampaui nilai kritis kecepatan geser untuk gerak awal, maka partikel akan menggelinding atau menggeser atau gabungan keduanya dengan selalu bertumpu pada dasar saluran (*rolling and sliding*).
- Apabila nilai kecepatan geser di dasar saluran saluran bertambah lagi, maka partikel akan bergerak sepanjang dasar dengan cara meloncat-loncat (*saltation*).
- Bila kecepatan geser didasar bertambah besar dan melampaui kecepatan jatuh partikel maka partikel akan terangkat/melayang (*suspended*).

Untuk sedimen seragam pada aliran, dinyatakan dalam *entrainment function* yang dikemukakan oleh *Shields*, yaitu tegangan geser non dimensional, yang merupakan fungsi dari angka *Reynolds* dan butiran.

$$\tau_{\theta} = \frac{\tau_c}{\rho_w g \Delta d_s} = \frac{u_{*c}^2}{g \Delta d_s} \dots \dots \dots (2.1)$$

$$\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w \dots \dots \dots (2.2)$$

$$U_{*c} = \sqrt{(\tau_{\theta} g \Delta d_s)} \dots \dots \dots (2.3)$$

$$\tau_c = \tau_{\theta} \rho_w g \Delta d_s \dots \dots \dots (2.4)$$

$$\tau_o = (\rho_w g y_o S) \dots \dots \dots (2.5)$$

$$U_* = \left(\frac{\tau_o}{\rho_w} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (2.6)$$

di mana :

ρ_w = rapat masa air (kg/m^3)

τ_{θ} = tegangan geser tanpa dimensi

τ_c = tegangan geser dasar kritik (N/m^2)

τ_o = tegangan geser dasar (N/m^2)

ρ_s = rapat masa sediment (kg/m^3)

d = diameter butiran (m)

g = percepatan gravitasi (m/dt^2)

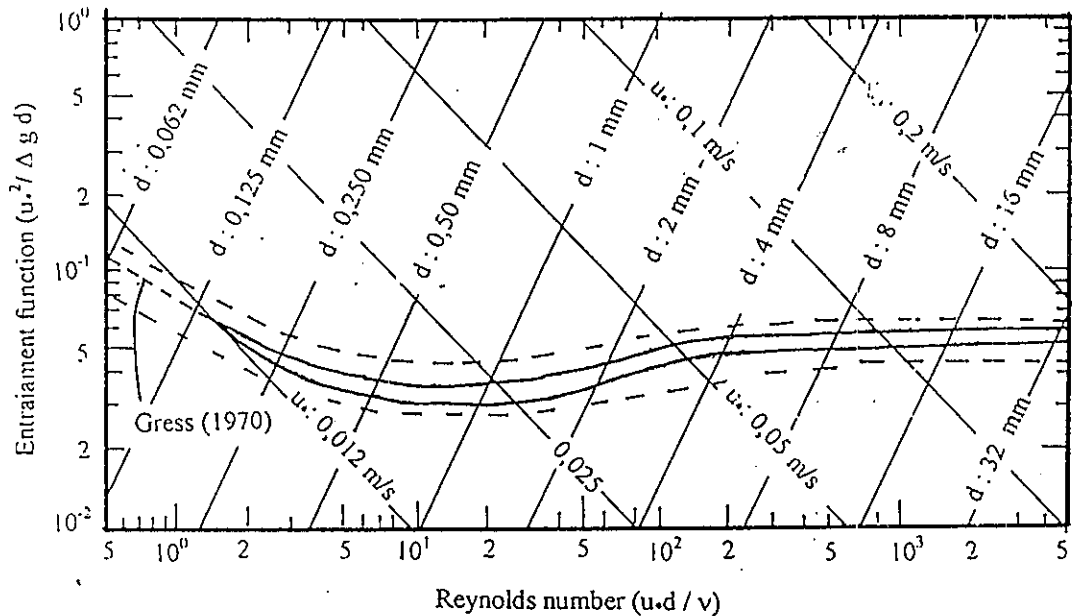
S = kemiringan dasar saluran

U_* = kecepatan geser (m/dt)

U_{*c} = kecepatan rata rata geser (m/dt)

y = ketinggian aliran (m)

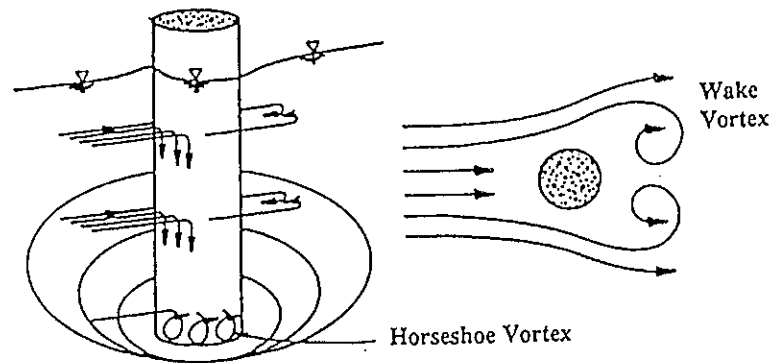
Diagram *Shields* yang merupakan fungsi dari angka *Reynolds* dan butiran (Gambar 2.1).



Gambar 2.1. Diagram *Shields*
(Breusers and Raudkivi, 1991)

2.4. Pola Aliran

Pola aliran disekitar pilar akan menjadi sangat kompleks dan sulit untuk ditaksir perilaku hidrodinamiknya, terutama pola aliran di ujung depan pilar. Kompleksitas pola aliran ini akan berkembang sejalan dengan perkembangan lobang gerusan itu sendiri. Formasi pasaran air ini merupakan hasil dari penumpukan air pada hulu dan akselerasi aliran di sekitar bagian depan pilar. Pada bidang vertikal simetri, aliran di bagian hulu pilar menurun dari permukaan mencapai nol di dasar. Aliran menurun tersebut menekan air dan menciptakan pusaran tapal kuda (*horseshoe vortex*), pusaran ini mengikis endapan di dasar ada sisi pilar (Richardson dkk., 1990).



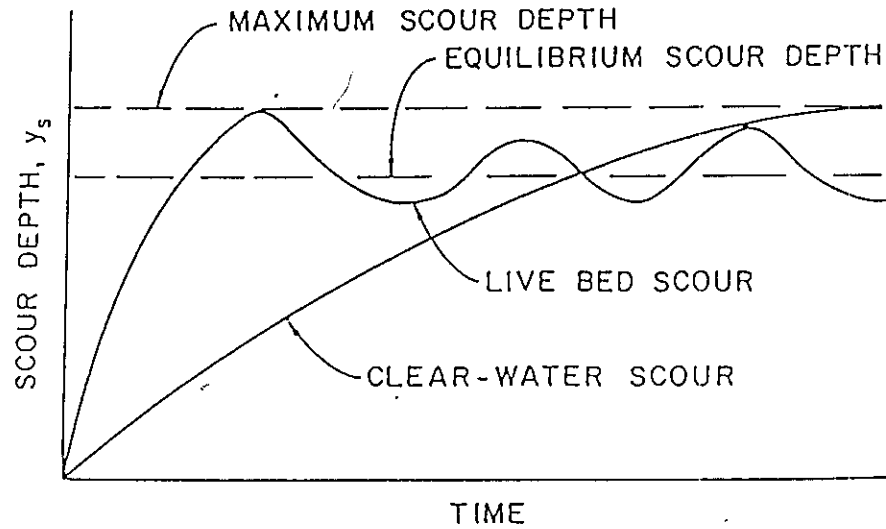
Gambar 2.2. Skema Pola Aliran dan Gerusan Lokal di Sekitar Pilar Silinder (Richardson dkk., 1990)

2.5. Proses Gerusan

Dalam mempelajari gerusan lokal, harus dibedakan antara *clear-water scour* dan *live-bed scour* :

1. *Clear-water scour* : pertambahan kedalaman gerusan terbentuk secara perlahan-lahan, ketika kapasitas keluarnya transportasi sedimen pada lobang gerusan adalah nol.
2. *Sediment-transport scour (live-bed scour)* : kedalaman gerusan bertambah dengan cepat dan akan mencapai nilai kesetimbangan, ketika kapasitas keluarnya transportasi sedimen adalah sama dengan masuknya transpor sedimen pada lobang gerusan.

Pada Gambar 2.3 menunjukkan bahwa *clear-water scour* mencapai gerusan maksimum memakan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan *live-bed scour*. Karena *clear-water scour* terjadi umumnya pada material dasar yang kasar. Kenyataannya *clear-water scour* tidak mencapai gerusan maksimumnya sampai setelah beberapa banjir. Maka *clear-water scour* mencapai maksimum berkisar 10 % lebih besar dari pada *live-bed scour* maksimum.



Gambar 2.3. Kedalaman gerusan sebagai fungsi waktu (Richardson dkk., 1990)

2.6. Formula Penggerusan

Ada beberapa metoda yang dapat dipakai untuk menghitung kedalaman gerusan yang terjadi pada dasar sungai di sekitar pilar.

Kandasamy (1989), mengidentifikasi bahwa kedalaman gerusan (d_s) tergantung pada kedalaman aliran (y) dan lebar pilar (b).

Laursen dan Toch (1956) mengembangkan persamaan gerusan pilar jembatan sebagai fungsi lebar pilar dan kedalaman aliran. Neill (1964) mengembangkan persamaan sebagai berikut :

$$d_s = 1,35 * b^{0,7} * y^{0,3} \dots\dots\dots(2.7)$$

di mana :

d_s = kedalaman gerusan (m)

b = lebar pilar (m)

y = kedalaman aliran (m)

Shen (1969), Breusers dan Raudkivi (1991) menyebutkan bahwa kedalaman gerusan merupakan fungsi angka *Reynolds*. Berdasarkan data laboratorium persamaannya adalah :

$$d_s = 1,05 * b^{0,075} \dots\dots\dots(2.8)$$

di mana :

- d_s = kedalaman gerusan (m)
- b = lebar pilar (m)

Menurut Froehlich (1988) bahwa kedalaman gerusan sebagai fungsi bilangan *Froude*, lebar pilar, sudut aliran, jenis pilar dan ukuran butiran.

$$d_s = 0,32 b * K * F^{0,20} * (b^1/b)^{0,02} * (y/b)^{0,46} * (b/d_{50})^{0,08} + 1,0 \dots\dots\dots(2.9)$$

di mana :

- F = bilangan *Froude*
- y = kedalaman aliran (m)
- b = lebar pilar (m)
- b^1 = $b \cos \theta + L \sin \theta$
- θ = sudut aliran
- l = panjang pilar (m)
- d_{50} = ukuran butiran (m)
- K = Koefisien jenis pilar ($K = 1,3$ untuk pilar berujung kotak, $K = 1,0$ untuk pilar bulat dan berujung bulat dan $K = 0,7$ untuk pilar berujung lancip).

(Persamaan 2.9, dengan faktor keamanan = +1.0)

Sedangkan persamaan gerusan pilar yang paling sering digunakan di AS adalah Persamaan Colorado State University (CSU) yang direkomendasi Federal Highway Administration Departement Transportation AS. Oleh Richardson dkk (1990) menyajikan persamaan tersebut sebagai berikut :

$$d_s = 2 y * K_1 * K_2 * K_3 * (b/y)^{0,65} * F^{0,43} \dots\dots\dots(2.10)$$

di mana :

- Fr = bilangan *Froude*

d_s = kedalaman gerusan (m)

b = lebar pilar (m)

y = kedalaman aliran (m)

K_1 = Koefisien pilar ($K_1 = 1,1$ untuk pilar berujung kotak, $K_1 = 1,0$ untuk pilar berujung bulat dan silinder dan kelompok silinder, $K_1 = 0,9$ untuk pilar berujung runcing).

K_2 = Koefisien terhadap sudut aliran (Tabel 2.1).

K_3 = Koefisien kondisi dasar saluran (Tabel 2.2).

Perbandingan nilai-nilai K menunjukkan bahwa faktor yang paling penting adalah K_2 jika sudut aliran lebih besar dari 30° . Kisarannya antara 2 – 5 (kali). Jadi untuk menghindari kedalaman gerusan yang lebih besar dibuat sudut aliran sekecil mungkin.

Tabel 2.1 Faktor koefisien K_2 (Richardson dkk., 1990)

Sudut aliran	$l/b = 4$	$l/b = 8$	$l/b = 12$
0	1,0	1,0	1,0
15	1,0	2,0	2,5
30	2,0	2,5	3,5
45	2,3	3,3	4,3
90	2,5	3,9	5,0

Tabel 2.2 Faktor koefisien K_3 (Richardson dkk., 1990)

Kondisi saluran	Ukuran	K_3
<i>Clear water scour</i>	n.a	1,1
<i>Plane bed / anti dunes</i>	n.a	1,1
<i>Small dunes</i>	0,6 – 3,0 m	1,1
<i>Medium dunes</i>	3,0 – 9,1 m	1,1 – 1,2
<i>Large dunes</i>	> 9,1	1,3

Simons (1977) mengembangkan persamaan :

$$d_s = K * y * (b/y)^{0,65} * Fr^{0,43} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dan Fr (bilangan *Froude*) dapat ditulis sebagai berikut :

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g * y}} \dots\dots\dots (2.12)$$

di mana :

Fr = bilangan *Froude*

d_s = kedalaman gerusan (m)

b = lebar pilar (m)

y = kedalaman aliran (m)

g = gravitasi bumi (m/dt^2)

U = kecepatan aliran (m/dt)

K = koefisien bentuk pilar ($K = 2,0$ untuk pilar berujung kotak,
 $K = 1,5$ untuk pilar berujung bulat dan silinder dan $K = 1,2$
 untuk pilar berujung runcing).

Melville (1997) menyajikan penghitungan kedalaman gerusan lokal pada pilar jembatan. Persamaan didasarkan pada hubungan empiris, K (Faktor) yang diperhitungkan untuk efek-efek kedalaman gerusan. Persamaannya ditunjukkan sebagai berikut :

$$d_s = K_y * K_i * K_d * K_s * K_\theta * K_g \dots\dots\dots(2.13)$$

di mana :

d_s = kedalaman gerusan (m)

K_y = ukuran kedalaman aliran (m)

K_i = intensitas aliran

K_d = ukuran endapan

K_s = bentuk pilar

K_θ = arah aliran

K_g = geometri saluran

Setiap parameter persamaan Melville diperhitungkan sendiri-sendiri. K_y diartikan sebagai berikut :

$$K_y = 2,4 * b \quad \longrightarrow \quad 2,4b \frac{b}{y} < 0,7 \dots\dots\dots(2.14)$$

$$K_y = 2\sqrt{yb} \quad \longrightarrow \quad 0,7 < \frac{b}{y} < 5 \dots\dots\dots(2.15)$$

$$K_y = 4,5 \cdot y \quad \rightarrow \quad \frac{b}{y} < 5 \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

$$K_i = \frac{U_{ca} - (U_a - U_c)}{U_c} \quad \rightarrow \quad \frac{U_{ca} - (U_a - U_c)}{U_c} < 1 \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

$$K_i = 1 \quad \rightarrow \quad \frac{U_{ca} - (U_a - U_c)}{U_c} \geq 1 \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

di mana :

$$V_a = 0,8 v_{ca} \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

V_a = rata-rata kecepatan aliran diatas butiran = 0,8 v_{ca}

v_{ca} = rata-rata kecepatan maksimum aliran diatas butiran

V_c dan V_{ca} diartikan sebagai

$$\frac{V_c}{U_{*c}} = 5,75 \log \left[5,53 \frac{y}{d_{50}} \right] \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

$$\frac{V_{ca}}{U_{*ca}} = 5,75 \log \left[5,53 \frac{y}{d_{50a}} \right] \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

Malville (1997) mengajukan persamaan kecepatan pengerusan ukuran masing-masing ditentukan menggunakan diagram *Shield* (Gambar 2.1).

$$U_{*c} = 0,0115 + 0,0125(d_{50})^{1,4} \quad \rightarrow \quad 0,1 \text{ mm} < d_{50} < 1 \text{ mm} \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

$$U_{*c} = 0,0305d^{0,5} - 0,0065(d_{50})^{-1} \quad \rightarrow \quad 1 \text{ mm} < d_{50} < 100 \text{ m} \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

di mana :

U_{*c} = kecepatan geser kritis untuk ukuran d_{50} (m/s)

U_{*ca} = kecepatan geser kritis untuk ukuran d_{50a} (m/s)

d = d_{50} atau d_{50a} = ukuran butiran (mm)

Penjelasan empiris d_{50a} diberikan oleh Chin (1985)

$$d_{50a} = \frac{d_{\max}}{1,8} \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

di mana :

d_{\max} = ukuran partikel maksimum dan ditentukan dari distribusi ukuran partikel

K_d diartikan sebagai :

$$K_d = 0,57 \log \left[2,24 \frac{b}{d_{50}} \right] \rightarrow \frac{b}{d_{50}} < 25 \dots\dots\dots(2.25)$$

$$K_d = 1 \rightarrow \frac{b}{d_{50}} > 25 \dots\dots\dots(2.26)$$

Efek geometri saluran tidak terhadap kedalaman gerusan, selama ada pendekatan kecepatan dan kedalaman aliran dalam pertimbangan (Melville, 1997). Dengan demikian, geometri saluran bisa disebut $K_g = 1$, faktor arah aliran K_0 (Tabel 2.1) dan K_s dari bilangan Richardson dkk (1990).

2.7. Rancangan Model

Tampang sungai lebar memiliki dimensi horizontal jauh lebih besar dan skala vertikal yang sama. Jika rancangan model sungai dibuat dengan skala horizontal dan skala vertikal yang sama, maka kedalaman air pada model menjadi sangat kecil. Kecilnya kedalaman air akan mempersulit pada waktu melakukan pengukuran. Untuk menghindari keadaan ini maka dibuat model dengan skala distorsi yang membedakan skala horisontal dan skala vertikal (Dake, 1983; Triatmojo, 1992).

2.7.1. Analisis dimensi

Konsep dasar analisis dimensi adalah menyederhanakan jumlah variabel terpisah yang tercakup dalam suatu sistem fisik tertentu menjadi grup variabel tak berdimensi dengan jumlah yang lebih kecil. Susunan grup variabel dipilih sedemikian rupa sehingga masing-masing grup menggambarkan karakteristik fisik signifikan.

Semua parameter fisik dalam teknik hidraulik dapat dinyatakan dalam tiga dimensi dasar, yaitu massa (M), panjang (L), dan waktu (T).

Teori analisis dimensi adalah murni matematika dimensi dan kuantitas, yang terdiri dari metoda pembentukan variabel-variabel yang signifikan kedalam group yang tak berdimensi. Ada dua macam metoda yang banyak dipakai, yaitu :

1. Metoda *Reyleigh*.
2. Metoda *Buckingham- π*

2.7.1.1. Metoda Reyleigh

Metoda ini dikembangkan oleh Lord Reyleigh (1899), yang biasa dikenal juga dengan nama metoda *Indical*. Prinsip dasar dari metoda ini adalah mencari hubungan variabel-variabel melalui proses aljabar dalam bentuk persamaan-persamaan. Persamaan ditulis dengan memasukkan dimensinya dan persamakan eksponennya kedalam tiga satuan dasar (M), (L), dan (T) sedemikian rupa sehingga dimensinya homogen.

Sebagai gambaran kita tinjau aliran laminar dengan variabel-variabel tegangan geser, τ , sebagai fungsi viskositas dinamis, μ , gradien kecepatan du, dan jarak vertikal, dy. Penyelesaian fenomena ini dapat diselesaikan seperti tabel berikut.

Tabel 2.3. Metoda Reyleigh
(Lord Reyleigh, 1899)

1. Tulis hubungan fungsional semua variable.	$\tau = f(\mu^a \cdot du^b \cdot dy^c)$				
2. Tulis persamaan dimensi dalam sistem yang diambil (FLT atau MLT).	$(FL^{-2}) = f(FL^{-2} \cdot T)^a (LT^{-1})^b (L)^c$				
3. Bentuk TIGA buah persamaan yang identik.		τ	μ	du	Dy
	<i>Force, F</i>	1=	A	0	0
	<i>Length, L</i>	-2=	-2a	b	C
		-2=	-2	b	C
4. Selesaikan nilai eksponen dari persamaan dimensi tersebut.	1. $a = 1$ 2. $b = -c \rightarrow b = 1 \ \& \ c = -1$ 3. $b = a$				

Harga-harga eksponensial dimasukkan kedalam persamaan fungsional sbb :

$$\tau = f(\mu^a \cdot du^b \cdot dy^c); \tau = f(\mu^1 \cdot du^1 \cdot dy^{-1}); \tau = f(\mu du/dy).$$

Persamaan fungsional tidak dapat diperoleh dari analisis dimensi. Hanya analisis fisik dan/atau eksperimen yang dapat menentukan. Berdasarkan analisis fisik, persamaan tegangan geser adalah :

$$\tau = \mu du / dy \dots\dots\dots(2.27)$$

2.7.1.2. Metode Buckingham - π

Metoda *Buckingham - π* dipakai dengan tujuan yang sama dengan metoda *Reyleigh* yaitu untuk membentuk parameter tak berdimensi. Metoda ini dipakai jika jumlah variabel lebih dari EMPAT. Untuk klarifikasi, π dalam hal ini tidak ada kaitannya dengan $\pi = 3,14$. Metoda ini menyatakan bahwa kuantitas fisik sejumlah n dengan dimensi dasar r secara umum dapat disusun menjadi hanya $(n-r)$ grup dimensi independen yang dikenal dengan rasio $-\pi$. Secara umum, aturan pemakaian dari metoda ini adalah sbb:

1. Variabel-variabel yang dipilih harus variabel-variabel fisik yang terpenting.
2. Variabel-variabel terpilih harus meliputi semua dimensi.
3. Variabel-variabel aliran dasar yang relevan harus dimasukkan, yaitu :
 - * Variabel geometris.
 - * Variabel kinematis
 - * Variabel dinamis

Langkah-langkah Pemakaian

1. Mereduksi data
 - a. Buat lis semua variabel fisik yang terkait dalam suatu sistem berdasarkan tipenya : variabel geometris, kinematis, dan dinamis.
 - b. Pilih sistem dimensi yang dipakai, FLT atau MLT.
 - c. Pilih kelompok dasar dari karakteristik variabel aliran sbb :
 - * B_g , variabel geometris.
 - * B_k , variabel kinematis
 - * B_d , variabel dinamis

Selebihnya dari ke-3 dimensi tersebut dipakai lambang "A", dimulai dengan A_1 .

2. Turunkan Rasio $-\pi$

Tuliskan persamaan dasar untuk masing-masing rasio $-\pi$. Jumlah rasio $-\pi$ sama dengan jumlah A.

$$\pi_1 = (B_G)^{x_1} (B_K)^{y_1} (B_D)^{z_1} (A_1)$$

$$\pi_2 = (B_G)^{x_2} (B_K)^{y_2} (B_D)^{z_2} (A_2)$$

$$\pi_n = (B_G)^{x_n} (B_K)^{y_n} (B_D)^{z_n} (A_n) \dots \dots \dots (2.28)$$

Eksponen pada persamaan (2.28) dapat disetarakan dengan menulis persamaan dimensi dan memberi harga eksponen x , y dan z untuk tiap-tiap rasio $-\pi$.

3. Ratio $-\pi$ dikonversikan dalam bentuk praktis.

Teori Buckingham $-\pi$ menyatakan bahwa sembarang rasio $-\pi$ dapat dinyatakan sebagai fungsi rasio $-\pi$ lainnya, atau

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n) = 0 \dots \dots \dots (2.29)$$

Persamaan (2.29) merupakan penyederhanaan dari pernyataan fungsional, yang dapat juga ditulis dalam bentuk lain, misalnya :

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n) \dots \dots \dots (2.30)$$

Persamaan (2.30) menyatakan bahwa π_1 merupakan suatu fungsi dari π_2 , π_3 , sampai π_n , tapi belum menyatakan bentuk fungsinya. Bentuk fungsinya hanya dapat ditentukan berdasarkan analisis eksperimental. Berdasarkan kondisi ini maka kita mempunyai kebebasan untuk mensubstitusi fungsi ke dalam Persamaan (2.30), misalnya π_1 disubstitusi dengan $2\pi_1^{-1}$, π_n dengan $a\pi_n^b$ dan seterusnya.

2.7.2. Kesebangunan.

Dalam desain suatu bangunan besar pembuatan model sangat perlu dikarenakan :

1. Dalam perencanaan sering kali dibuat suatu asumsi untuk menyederhanakan masalah. Namun dalam praktek tidak semua asumsi tersebut terdapat penyimpangan dari asumsi awal. Pemodelan dapat mengkaji sejauh mana penyimpangan tersebut terjadi dan cara mengatasinya.
2. Tidak semua masalah hidraulik dapat dengan mudah diselesaikan secara matematik, sehingga pembuatan model diharapkan dapat menyelesaikan masalah tersebut.

3. Pelaksanaan prototipe berbiaya mahal, untuk menghindari kesalahan didalam pelaksanaan dan mengkaji perilaku hidraulik sebelum pelaksanaan konstruksi pembuatan sangat penting disamping menghemat biaya.
4. Mencari kemungkinan terjadinya suatu gangguan yang mungkin terjadi di dalam pengoperasian prototipe.
5. Mengkoreksi dimensi yang ada yang tidak dilakukan didalam pekerjaan perencanaan, sehingga terhindar dari terjadinya dimensi terlalu besar.

Dalam penetapan skala, harus diperhatikan kesebangunan (*similitude*) antara model dan prototipe. Kesebangunan dalam model fisis meliputi :

- ❖ kesebangunan geometrik
- ❖ kesebangunan kinematik
- ❖ kesebangunan dinamik

❖ kesebangunan geometrik

Kesebangunan geometrik, disebut juga kesebangunan bentuk, mensyaratkan bahwa model harus sebangun dengan bentuk prototipe. Hal ini berarti bahwa semua besaran linear pada model dan prototipe dihubungkan dengan suatu nilai konstanta.

$$n_L = \frac{L_p}{L_m} \dots\dots\dots(2.31)$$

Skala besaran yang lain mengikuti hubungan diatas

$$\begin{aligned} n_A &= n_L \cdot n_h && \text{(skala luas)} \\ n_v &= n_L^2 \cdot n_h && \text{(skala volume)} \end{aligned}$$

Berkaitan dengan kesebangunan geometrik ini, dikenal dua jenis model yaitu model distorsi dan tak-terdistorsi (*distorted and undistorted model*). Model terdistorsi adalah model dengan skala panjang dan skala tinggi tidak sama, sedang model tak-terdistorsi skala panjang dan skala tinggi sama.

$$\text{model terdistorsi : } n_L \neq n_h$$

$$\text{model tak-terdistorsi : } n_L = n_h$$

❖ kesebangunan kinematik

Kesebangunan kinematik, disebut juga kesebangunan aliran, mensyaratkan bahwa pola aliran di model dan protipe sebangun. Hal tersebut berarti bahwa kecepatan aliran di model dan prototipe di titik-titik yang sama besarnya menurut nilai perbandingan tertentu.

$$n_t = \frac{t_p}{t_m} \quad (\text{skala waktu}) \dots\dots\dots(2.32)$$

$$n_u = \frac{L_p/t_p}{L_m/t_m} = \frac{L_p/L_m}{t_p/t_m} = n_L \cdot n_t^{-1} \quad (\text{skala kecepatan})$$

$$n_a = n_L \cdot n_t^{-2} \quad (\text{skala percepatan}) \dots\dots\dots(2.33)$$

$$n_Q = n_L^3 \cdot n_t^{-1} \quad (\text{skala debit}) \dots\dots\dots(2.34)$$

❖ kesebangunan dinamik

Agar kesebangunan kinematik terpenuhi, maka gaya yang bekerja pada model harus sebanding dengan gaya yang bekerja pada prototipe. Hal tersebut hanya akan terpenuhi bila model memenuhi kesebangunan dinamik. Kesebangunan dinamik mensyaratkan bahwa perbandingan antara gaya di model dan di prototipe mempunyai nilai yang konstan. Sebagai ukuran gaya pada model dan prototipe biasanya dipakai suatu gaya imajiner yang disebut gaya inersia yang nilainya didapat berdasar persamaan berikut :

$$\text{Gaya inersia } F_i = m \cdot a$$

$$MLT^{-1} = \rho L^3 LT^{-2} = \rho L^3 T^{-2} \dots\dots\dots(2.35)$$

$$n_m = \frac{m_p \cdot a_p}{m_m \cdot a_m} = n_\rho \cdot n_L^4 \cdot n_T^{-2} \quad (\text{Skala gaya inersia}) \dots\dots(2.36)$$

2.7.3. Skala Model

Aliran dengan permukaan bebas terutama dipengaruhi oleh gaya gravitasi dan gaya gesekan akibat kekentalan fluida. Kedua pengaruh ini dicerminkan pada nilai dua besaran dominan pada aliran dalam pipa, sedang pengaruh gaya gravitasi dominan pada aliran di sungai.

Pengaruh gesekan dan gaya gravitasi dijumpai pada aliran melalui bangunan sungai. Dalam studi model, kedua hal tersebut perlu diperhatikan dalam penetapan skala. Pengaruh gesekan yang dominan mensyaratkan bahwa nilai angka *Reynold* di model dan prototipe sama, atau $n_{Re} = 1$, sedang pengaruh gaya gravitasi yang dominan mensyaratkan bahwa nilai angka *Froude* di model, dan prototipe sama atau $n_{Fr} = 1$. Dalam studi model ini berkaitan dengan sifat aliran di mana pengaruh gaya gravitasi dominan, sehingga skala didasarkan pada syarat $n_{Fr} = 1$.

$$\begin{aligned}
 n_{Fr} &= 1 \\
 [Fr]_m &= [Fr]_p \\
 \left[\frac{\mu}{\sqrt{gh}} \right]_m &= \left[\frac{\mu}{\sqrt{gh}} \right]_p \\
 \frac{\mu_m}{\mu_p} &= \sqrt{\frac{g_m \cdot h_m}{g_p \cdot h_p}} \\
 n_\mu &= n_g^{1/2} \cdot n_h^{1/2} \\
 \text{karena } n_g &= 1 \text{ maka } n_\mu = n_h^{1/2} \dots \dots \dots (2.37)
 \end{aligned}$$

Skala waktu diturunkan berdasar skala kecepatan di atas:

$$\begin{aligned}
 n_\mu &= n_L \cdot n_t^{-1} \\
 n_h^{1/2} &= n_L \cdot n_t^{-1} \implies n_t = n_L \cdot n_h^{-1/2} \dots \dots \dots (2.38)
 \end{aligned}$$

Untuk model tak terdistorsi maka $n_t = n_L^{1/2}$

Skala *Chezy*. Formula *Chezy* $V = C \sqrt{(RI)}$

$$\begin{aligned}
 n_\mu &= n_c \cdot n_L^{1/2} \cdot n_I \implies n_I = n_L / n_L = 1, \quad n_\mu = n_L^{1/2} \\
 n_c &= n_L^{1/2} \cdot n_t^{-1/2} \\
 &= n_L^{1/2} \cdot n_L^{-1/2} = 1 \dots \dots \dots (2.39)
 \end{aligned}$$

Skala *Manning*. Formula *Manning*

$$\begin{aligned}
 n_\mu &= \frac{1}{n_n} \cdot n_L^{2/3} \cdot n_I \\
 n_L^{1/2} &= \frac{1}{n_n} \cdot n_L^{2/3} \cdot n_I
 \end{aligned}$$

$$n_n = n_L^{2/3} / n_L^{1/2} = n_L^{1/6} \dots\dots\dots(2.40)$$

Skala besaran-besaran lainnya ditetapkan dengan cara yang sama. Skala besaran-besaran yang lain yang penting disajikan di bawah ini (skala model untuk berbagai besaran dalam model tak terdistorsi).

2.7.3. Model Terdistorsi

Model terdistorsi adalah model untuk mencapai sedekat mungkin kesetaraan terhadap proses alamiah dengan memperhatikan parameter karakteristik tertentu yang dominan. Model ini selalu dipakai ketika kesetaraan geometri model tidak terdistorsi secara teknis tidak dapat dibuat.

Ada beberapa keterbatasan dalam membuat model terdistorsi, yaitu :

- Ketersediaan ruang dalam laboratorium membatasi ukuran maksimum model yang akan dibuat (*scale -limit space*)
- Toleransi maksimum yang diperkenankan dalam membuat model juga membatasi batas maksimum skala model yang mungkin dibuat.
- Untuk menghindari kekerasan model yang berlebihan, kekasaran model K_m tidak boleh lebih dari sepuluh kali dari kekasaran prototip K_p . Ketentuan ini juga berperan ikut menentukan skala model. $K_m/K_p = K_s$.
- Jika material granular tidak kohesif (*non-cohesive*) dipakai untuk model dasar tidak tetap (*moveble bed*), ukuran partikel harus cukup besar untuk mencegah terjadinya transportasi partikel tersebut oleh aliran (*smoothness limit*).
- Kapasitas debit maksimum pada laboratorium juga mungkin menjadi penentu skala model yang dibuat (*discharge limit*).

Dalam model terdistorsi dikenal apa yang disebut faktor distorsi atau laju distorsi "n" yang menyatakan hubungan antara skala horizontal terhadap skala vertikal, $n = L_H/L_V > 1$ untuk model terdistorsi vertikal, dan $n = L_H/L_V = 1$ untuk model tidak terdistorsi.

Tabel 2.4. Perbandingan Model Terdistorsi dan Tak terdistorsi (Raghunath, 1967)

Kuantitas fisik	Satuan	Takterdistorsi	Terdistorsi
Panjang	M	N_L	L_H
Lebar	M	n_L	L_H
Tinggi, kedalaman	M	n_L	L_V
Luas	m^2	N_L^2	$L_H \cdot L_V$ atau L_H^2
Volume	m^3	N_L^3	$L_H^2 \cdot L_V$
Waktu	Dt	$N_L^{1/2}$	$(L_H \cdot n)^{0,5} = (L_H^2/L_V)^{0,5}$
Frekuensi	1/dt	$N_L^{-1/2}$	$(L_H \cdot n)^{-0,5} = (L_H^2/L_V)^{-0,5}$
Kecepatan	m/dt	$N_L^{1/2}$	$(L_H/n) = L_V$
Percepatan	m/dt ²	N_L^0	$1/n = L_V/L_H$
Debit	m^3/dt	$N_L^{2,5}$	$(L_H^{2,5}/n^{1,5}) = L_H/L_V^{1,5}$
Gaya	N	N_L^3	-
Tekanan	N/m ²	N_L	$L_H/n = L_V$
Berat spesifik	N/m ³	N_L^0	$1/n = L_V/L_H$
Bilangan <i>Reynolds</i>	-	$N_L^{1,5}$	$(L_H/n)^{1,5} = L_V^{1,5}$

Keterangan : L_H = skala horizontal, L_V = skala vertikal

2.8. Material Dasar

Dalam penelitian ini digunakan tipe gerusan pada air bersih (*clear water scour*) dan sedimen dasar yang dapat bergerak sesuai dengan kecepatan aliran yang direncanakan. Persyaratan utama dalam suatu model dasar yang bergerak adalah bahwa bahan dasar tersebut harus bergerak (Yalin, 1972; Dake, 1983). Untuk menentukan bahan dasar itu bergerak atau tidak, dapat digunakan rumus *Shields* (syarat $\pi > \pi_c = 0,03$).

$$\frac{\rho_w * U_*^2}{(\rho_s - \rho_w) d_s} = \pi_c \dots\dots\dots(2.41)$$

Dengan kecepatan geser butiran sebesar :

$$U_* = \sqrt{(g * y * I)} \dots\dots\dots(2.42)$$

di mana :

- d_s = diameter butiran (m)
- g = gravitasi bumi (m/dt²)

- y = kedalaman air (m)
 S = kemiringan memanjang saluran
 ρ_s = rapat massa butiran (kg/m^3)
 ρ_w = rapat massa air (kg/m^3)
 U_c = kecepatan geser butiran (m/dt)

Bila kecepatan geser kritis butiran (U_{*c}) dari partikel bahan dasar lebih besar dari kecepatan geser butiran (U_*), maka bahan dasar tersebut tidak bergerak. Bila yang terjadi adalah sebaliknya, kecepatan geser kritis butiran (U_{*c}) dari partikel bahan dasar lebih kecil dari kecepatan geser butiran (U_*), maka dapat dipastikan bahwa bahan dasar tersebut bergerak.

2.9. Analisis Regresi Linier

Dua variabel berpasangan (X_i, Y_i); $i = 1, 2, 3, \dots, n$, bila dibuat hubungan maka akan didapat garis kurva linier sederhana dengan dua model persamaan regresi garis lurus sebagai berikut :

$$Y = a_1 X + b_1 \dots \dots \dots (2.43)$$

$$X = a_2 Y + b_2 \dots \dots \dots (2.44)$$

di mana :

X = persamaan garis lurus X atas Y

Y = persamaan garis lurus Y atas X

a_1, a_2 = koefisien arah dari garis regresi

b_1, b_2 = titik potong dari garis regresi

Dengan memakai metode kuadrat terkecil maka besarnya koefisien a_1, a_2, b_1, b_2 , dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X)(Y_i - Y)}{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2} \dots \dots \dots (2.45)$$

$$b_1 = Y - a_1(X) \dots \dots \dots (2.46)$$

$$a_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X)(Y_i - Y)}{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y)^2} \dots\dots\dots(2.47)$$

$$b_2 = X - a_2(Y) \dots\dots\dots(2.48)$$

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \dots\dots\dots(2.49)$$

$$Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \dots\dots\dots(2.50)$$

Besarnya koefisien korelasi yang menunjukkan derajat hubungan antara variabel Y_1 dan X_1 adalah :

$$R = \{(a_1)(a_2)\}^{0.5} \dots\dots\dots(2.51)$$

Dan dapat dihitung dengan rumus :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X)(Y_i - Y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - Y)^2}} \dots\dots\dots(2.52)$$

Besarnya koefisien penentu atau koefisien determinasi (*determination coefisien*), yang menunjukkan perbedaan varian dari data pengukuran Y_1 dan varian dari nilai pada garis persamaan regresi untuk nilai X adalah :

$$R^2 = (a_1)(a_2) \dots\dots\dots(2.53)$$

Untuk persamaan regresi Y terhadap X , nilai R^2 dapat dihitung sebagai berikut :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y)^2} \dots\dots\dots(2.54)$$

Nilai residu adalah merupakan ukuran perbedaan antara nilai pengukuran dengan nilai dari persamaan regresi. Deviasi standart dari nilai residu dapat dihitung dengan rumus :

$$\sigma_x = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2}{(n-1)} \right]^{0.5} \dots\dots\dots(2.55)$$

$$\sigma_y = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y)^2}{(n-1)} \right]^{0.5} \dots\dots\dots(2.56)$$

Perhitungan koefisien regresi a_1 dan a_2 dapat dihitung dengan koefisien korelasi R sebagai berikut :

$$a_1 = R \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \dots\dots\dots(2.57)$$

$$a_2 = R \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \dots\dots\dots(2.58)$$

Persamaan garis lurus Y pada X, yaitu persamaan untuk meramal Y jika X diketahui menjadi :

$$\hat{Y} = Y + Y \frac{\sigma_y}{\sigma_y} (Y - Y) \dots\dots\dots(2.59)$$

Persamaan garis lurus X pada Y, yaitu persamaan untuk meramal X jika Y diketahui menjadi :

$$\hat{X} = X + X \frac{\sigma_x}{\sigma_x} (X - X) \dots\dots\dots(2.60)$$

Persamaan garis lurus memerlukan nilai rata-rata dari variabel Y,X, deviasi standart dari X dan Y serta koefisien korelasi, sehingga dapat diketahui bahwa :

- a. Persamaan regresi selalu melalui titik (X,Y).
- b. Apabila (X_i, Y_i) mempunyai koefisien korelasi =1 maka persamaannya akan berimpit.
- c. Apabila (X_i, Y_i) mempunyai koefisien korelasi =0 maka persamaannya akan tegak lurus.
- d. Apabila (X_i, Y_i) mempunyai koefisien korelasi yang terletak antara =-1 dan 0 atau 0 dan +1 maka persamaannya akan membuat sudut tertentu.



2.10. Regresi Nonlinier

Regresi nonlinier umumnya didasarkan pada fungsi (nilai purata) yang diasumsikan nonlinier dengan koefisien-koefisien tak tertentu yang akan dihitung dari data pengamatan. Type fungsi linier yang paling sederhana untuk regresi dari Y atas X adalah :

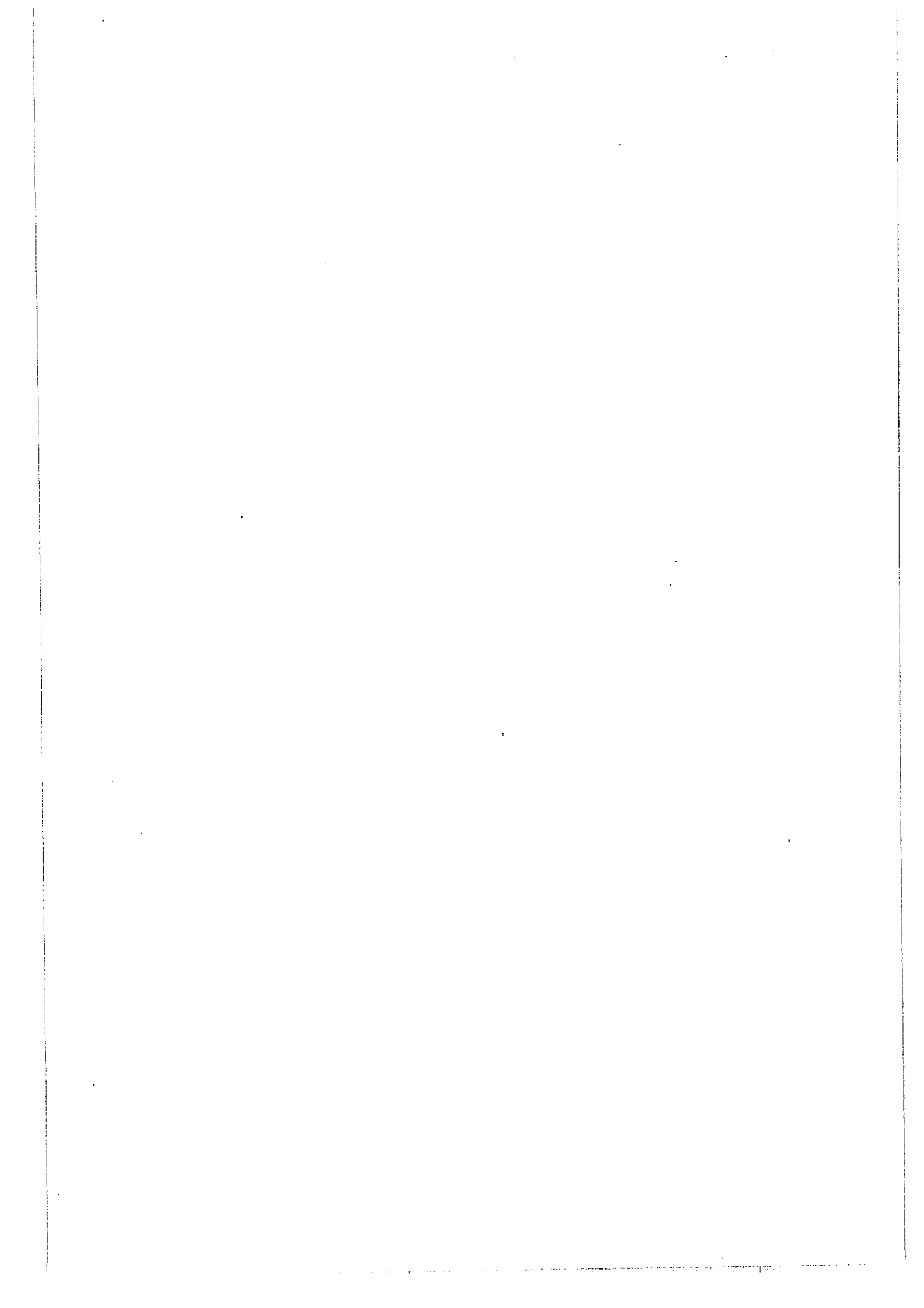
$$E(Y|x) = \alpha + \beta f(x) \dots\dots\dots(2.61)$$

Di mana $f(x)$ adalah fungsi nonlinier dari x yang ditentukan sebelumnya. Misalnya, $f(x)$ dapat diambil sebagai $x + x^2$, e^x , $\ln x$, atau fungsi x lainnya. Akhirnya analisis regresi nonlinier umumnya didasarkan atas asumsi variant $\text{Var}(Y|x)$ yang konstan, atau yang merupakan fungsi dari $f(x)$.

Dengan mendefinisikan variabel baru $x' = f(x)$, Pers. 2.61 menjadi :

$$E(Y|x') = \alpha + \beta f(x') \dots\dots\dots(2.62)$$

Maka persamaan tersebut mempunyai bentuk matematis yang sama dengan persamaan regresi linier. Jika pasangan data pengamatan (x_i, y_i) juga ditransformasikan ke $\{f(x_i), (y_i)\}$ atau (x_i', y_i') , regresi nonlinier semula antara x dan y berubah menjadi regresi linier antara variabel x' dan y' . Maka koefisien-koefisien regresi α , β dan $\text{Var}(Y|x)$ yang bersangkutan dapat diperkirakan.



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Umum

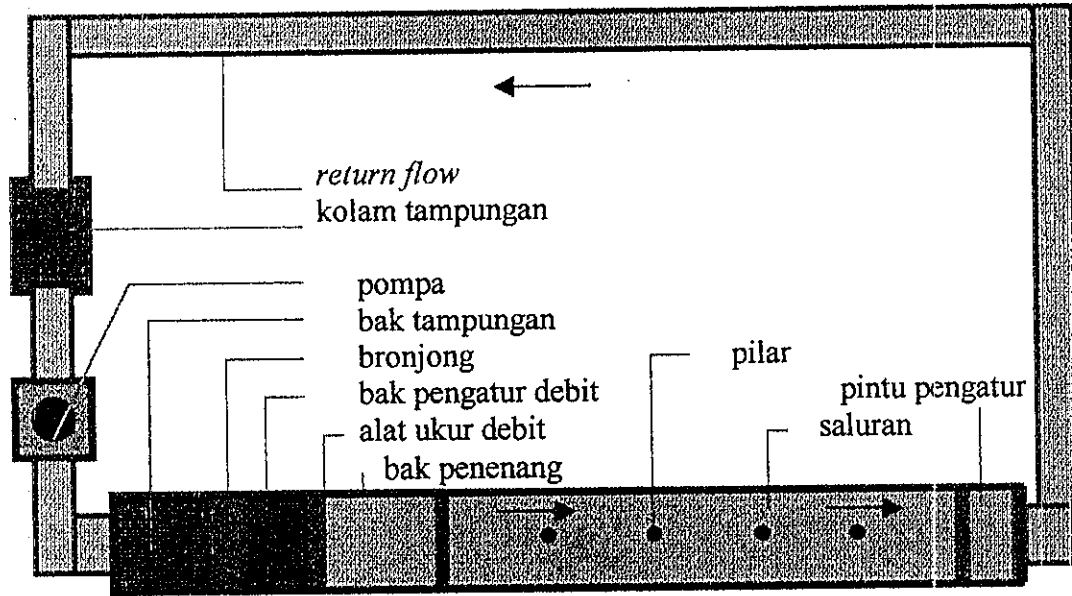
Penelitian dilakukan di Laboratorium Pengaliran, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang dengan menggunakan model saluran terbuka dengan bentuk persegi.

Dalam ruang laboratorium selain dipakai untuk panjang ruas sungai, juga dipakai untuk penempatan bak kontrol, bak penenang, dan bak pengatur muka air hilir. Sedangkan model sungai (saluran terbuka) serta komponen pelengkap model. Untuk model morfologi sungai atau saluran terbuka, dibuat dengan tampang model yang lurus, dengan tujuan untuk menghindari terjadinya pengaliran yang tidak seragam. Komponen pelengkap model di sini antara lain adalah bak kontrol untuk mengatur debit konstan, bak penenang (bak kalibrasi), bronjong pemecah energi untuk memperoleh aliran tenang, bak pengatur muka air hilir, dan peralatan penunjang lainnya untuk keperluan sistem sirkulasi air tertutup dengan pompa. Sedangkan untuk alat ukur debit, digunakan peluap *Thompson*, yang sebelumnya telah dikalibrasi. Untuk alat ukur tinggi muka air digunakan *point gauge*.

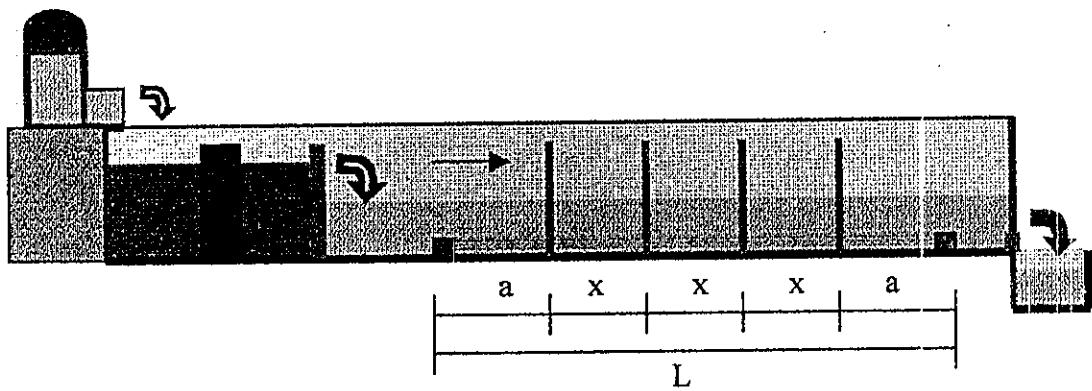
3.2. Urutan Pelaksanaan

3.2.1. Dimensi model.

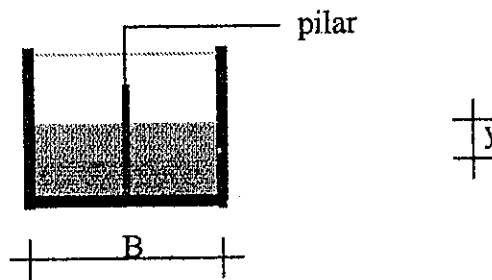
Pada penelitian ini menggunakan saluran (*flume*) lurus yang dilengkapi komponen pelengkap model antara lain adalah bak kontrol untuk mengatur debit konstan, bak penenang (bak kalibrasi), bronjong pemecah energi untuk memperoleh aliran tenang, bak pengatur muka air hilir, pompa, peluap *Thompson*. Adapun model yang dipakai dapat dilihat pada Gambar 3.1.



a. Skema Model Hidraulik



b. Potongan memanjang saluran (*flume*)



c. Potongan melintang saluran

Gambar 3.1. Detail gambar penelitian

3.2.2. Komponen model fisik

Komponen model antara lain, bak kontrol untuk mengatur debit konstan, bak penenang (bak kalibrasi), bronjong pemecah energi (untuk memperoleh aliran tenang), bak pengatur air muka hilir dan peralatan penunjang lain keperluan sistem sirkulasi air tertutup dengan pompa. Sebelum dilakukan pengujian semua alat dikalibrasi terlebih dahulu. Komponen tersebut antara lain :

- Bak Tampung
- Alat Ukur Debit
- Bak Pengukur Debit
- Peluap *Thompson*
- Saluran Terbuka
- Pintu Pengatur Muka Air Hilir
- Saluran Kembali (*Return Flow*)
- Kolam Tampung
- Pipa Pembuang dan Pengatur Debit.

3.2.3. Alat, Bahan Bahan Pembuat Model

a. Alat.

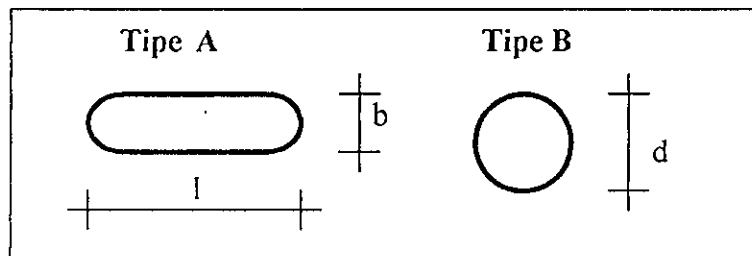
- Pompa
- Mistar
- Benang
- Jangka sorong
- Dokumentasi
- *Stopwach*
- *Point gauge*

b. Bahan.

- Butiran (Sedimen) pasir muntilan
- Pilar dari kayu

3.2.4. Model pilar.

Penelitian ini akan dipilih 2 type (pilar) yang berbeda, seperti terlihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Type pilar yang diuji

3.2.5. Model morfologi saluran.

Elevasi dasar saluran ditentukan sifat datar, di mana elevasi titik referensi sebelumnya ditentukan. Sedangkan dasar saluran dibuat dari pasir halus.

3.2.6. Fasilitas bangunan pelengkap dan letak pilar

Fasilitas ini diperlukan untuk menjamin lancarnya pelaksanaan model hidraulik yaitu dalam kaitanya untuk memperoleh debit konstan. Sitem aliran dibuat sirkulasi tertutup, agar pengamatan aliran dapat dilakukan secara kontinu tanpa adanya kehilangan banyak air (Gambar 3.1). Sesuai gambar tersebut air dipompa masuk bak tampungan yang dilengkapi kran pengatur debit, kemudian air dialirkan melewati bronjong pemecah energi (penenang aliran) selanjutnya air akan melewati alat ukur debit *Thompson*, kemudian masuk bak penenang, akhirnya masuk saluran terbuka yang telah dipasang model pilar, kemudian masuk dalam bak pengatur muka air hilir, yang kemudian masuk kesaluran kembali (*return flow channel*). Prosedur tersebut berlaku selama *running*.

3.2.7. Pencatatan Data.

Pencatatan data pada dasarnya dibedakan menjadi 3 jenis yaitu sebelum, selama dan setelah *running* dijalankan.

- a) Untuk pencatatan data sebelum *running* data yang dicatat diantaranya berupa elevasi dasar saluran dan tampang melintang sungai di mana terdapat lokasi pilar.
- b) Sedangkan pencatatan data selama *running* data yang dicatat diantaranya berupa : tinggi muka air yang terjadi pada benda uji yang diukur secara manual, sedangkan alat ukur debit dengan menggunakan peluap *Thompson*, adapun rumus debit tersebut sebagai berikut:

$$Q = (8/15) * C_d * H^{2.5} * \sqrt{2 * g} \dots\dots\dots (3.0)$$

di mana :

Q = debit aliran (m³/dt)

C_d = koefisien *Thompson* (tanpa dimensi)

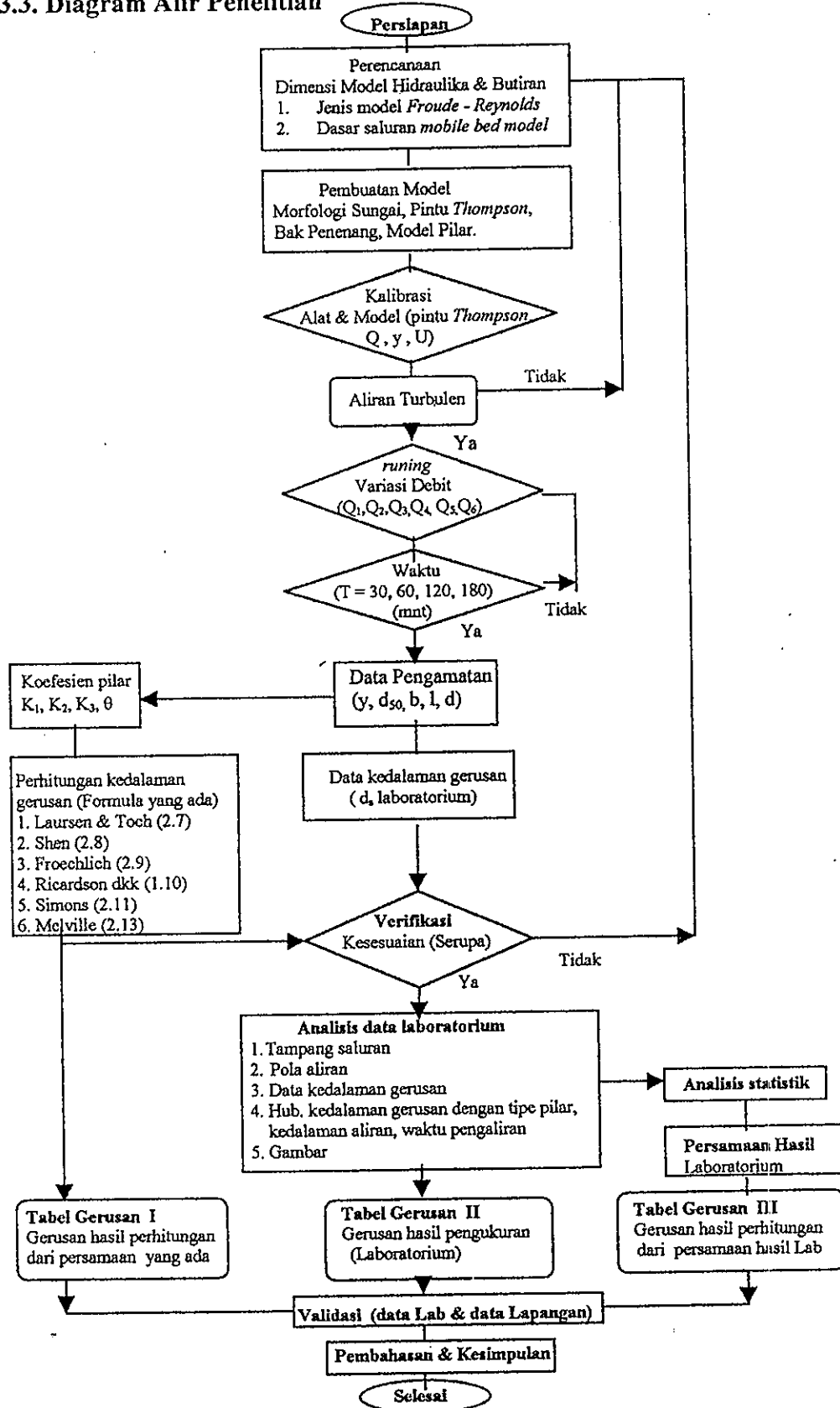
g = gravitasi bumi (m/dt²)

H = Kedalaman air pada bak pengukur debit (m)

- c) Pencatatan data setelah *running* berlangsung meliputi :

Pola dan kedalaman gerusan yang terjadi di sekitar pilar serta pengambilan dokumentasi.

3.3. Diagram Alir Penelitian



BAB IV PELAKSANAAN PENELITIAN

4.1. Umum

Sesuai dengan tujuan dari penelitian ini, pengujian model hidraulik dilakukan pada model saluran (*flume*) dengan diskripsi sebagai berikut :

- a. Saluran dibuat persegi dan lurus (dengan tujuan untuk menghindari terjadinya pengaliran yang tidak seragam)
- b. Dasar saluran dilapisi pasir halus, untuk mengetahui pola gerusan / transpor sedimen yang terjadi (*mobile bed model*)
- c. Pengaliran dilakukan dengan debit yang dapat diatur (debit konstan), dengan sistem sirkuit tertutup dengan variasi debit
- d. Waktu pengaliran bervariasi (t)

Model fisik ini dimaksudkan untuk mempelajari pola aliran dan pola gerusan yang terjadi pada pilar jembatan, dengan variasi debit aliran dan waktu pengaliran yang berbeda. Pengamatan elevasi muka air di titik pengamatan (pilar) dilakukan secara manual.

Karena sulitnya mengatur waktu penghentian aliran (untuk memperoleh waktu yang sama), maka informasi gerusan yang dapat diperoleh dari model hidraulik ini merupakan informasi gerusan rata-rata dari beberapa pengujian dengan waktu pengaliran yang berbeda. Serta perlu ditegaskan di sini bahwa model fisik ini tidak ditujukan untuk memodelkan pola gerusan (transpor sedimen) dalam arti kuantitatif, karena ukuran dan karakteristik (berat jenis, gradasi, dll) dari material sedimen tidak dimodelkan dari material sedimen yang ada pada prototipe.

Adapun secara umum urutan pelaksanaan pengujian adalah :

- a. Perencanaan model saluran
- b. Kalibrasi alat dan model (pengukur debit, debit, kedalaman aliran dan kecepatan aliran)
- c. Pelaksanaan pengujian

- d. Verifikasi
- e. Pengambilan data
- f. Analisis hasil pengukuran
- g. Validasi

4.2. Perencanaan Saluran

Berdasarkan Tabel 2.4 dan Lampiran A2, maka perencanaan dimensi model sebagai berikut :

Tabel 4.1. Dimensi saluran

	Saluran	Model	Prototipe	Satuan
1	Ls (Potongan memanjang)	5,00	1000,00	m
2	B (Lebar saluran)	0,395	79,00	m
3	x (Jarak tepi ke pilar)	1,00	200,00	m
4	a (Jarak antar pilar)	1,00	200,00	m
5	So (Kemiringan saluran)	0,0016	0,00079	-
6	Diameter sedimen (d_{50})	0,00028	-	m

Tabel 4.2. Dimensi pilar

	Tipe Pilar	Model			Prototipe		
		b	l	d	b	l	d
		cm	cm	cm	cm	cm	cm
1	A-1	1,00	2,50	-	200	500	-
2	A-2	1,40	2,50	-	280	500	-
3	B-1	-	-	1,00	-	-	200
4	B-2	-	-	1,40	-	-	280

4.3. Kalibrasi Alat dan Model

4.3.1. Pengukur debit (*Thompson*)

Kalibrasi dilakukan terhadap alat ukur debit *Thompson* dimaksudkan untuk menentukan koefisien debit C_d , berdasarkan rumus debit (3.0) :

$$Q = (8/15) * C_d * H^{2.5} * \sqrt{2 * g}$$

Pada prinsipnya untuk dapat menentukan nilai C_d dari persamaan di atas, harus diketahui nilai H untuk suatu debit Q . Agar C_d didapat lebih teliti, maka menentukan nilai C_d dilakukan beberapa kali, untuk nilai Q dan H yang berbeda. Hasil dari kalibrasi menunjukkan bahwa variasi nilai C_d untuk beberapa kali pembacaan adalah cukup kecil, dan perbedaan yang terjadi kemungkinan disebabkan karena kesalahan / ketidakteelitian dalam pembacaan. Hasil koefisien debit rata-rata dari alat ukur debit *Thompson* yang digunakan dalam penelitian ini adalah $C_d = 0,798$ (Lampiran B.1)

4.3.2. Kalibrasi debit (Q)

Setelah dilakukan kalibrasi terhadap alat ukur debit *Thompson* maka dapat ditentukan debit maksimum dan debit minimumnya. Di mana debit maksimum adalah kemampuan maksimum pompa dalam mengalir model sehingga terjadi gerusan ($Q_{maks} = 2030,65 \text{ cm}^3/\text{dt}$). Sedangkan debit minimum adalah debit terendah yang dipakai saat *running* dan jenis aliran turbulen (syarat model) ($Q_{min} = 106,64 \text{ cm}^3/\text{dt}$) (Lampiran B.2)

4.3.3. Kedalaman aliran (y)

Kalibrasi terhadap kedalaman aliran (y) dilakukan guna mendapatkan kedalaman aliran maksimum dan minimumnya. Di mana kedalaman aliran maksimum ($y_{maks} = 3,67 \text{ cm}$) terjadi bila debit maksimum. Sedangkan kedalaman aliran minimum ($y_{min} = 1,33 \text{ cm}$) terjadi pada saat debit minimum adalah debit terendah yang dipakai saat *running* dan jenis aliran turbulen (syarat model) (Lampiran B.2).

4.3.4. Kecepatan aliran (U)

Berdasarkan kedalaman aliran maksimum yang terjadi ($y_{maks} = 3,67$ cm), kecepatan aliran pada model tidak dapat dikalibrasi karena alat ukur kecepatan aliran pada model (*current meter laboratorium*) dapat dilakukan bila $y_{min} = 7$ cm. Dengan demikian kecepatan aliran pada model dicari secara matematis.

4.4. Variasi Pengujian Model

4.4.1. Variasi debit

Untuk memperoleh informasi sebanyak mungkin maka pengujian model ini dilakukan dengan variasi debit dan lama pengaliran (*running*). Dengan demikian informasi untuk mengetahui pola gerusan yang terjadi pada pilar jembatan akan semakin banyak. Variasi debit untuk pengujian diuraikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Variasi debit pengujian

No	H	Debit	
		Model	Prototipe
	cm	cm ³ /dt	m ³ /dt
1	2,0	106,64	21,328
2	2,5	186,29	37,258
3	3,5	432,04	86,408
4	4,5	809,81	16,962
5	5,5	1337,39	267,478
6	6,5	2030,65	406,130

Di mana :

$$Q_p = Q_m / \{(L_m/L_p)^v \cdot (L_m/L_p)_h\}$$

4.4.2. Lama pengaliran (*running*)

Lama *running* ditetapkan dengan tujuan untuk mendapatkan variasi kedalaman gerusan dan untuk mengetahui waktu yang diperlukan gerusan mencapai konstan. Adapun lama pengaliran pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Variasi waktu

No	t_m (jam)	$t_p = t_m / t_r$ (jam)
1	0,5	10
2	1,0	20
3	2,0	40
4	3,0	60

Di mana :

$$t_p = t_m / t_r$$

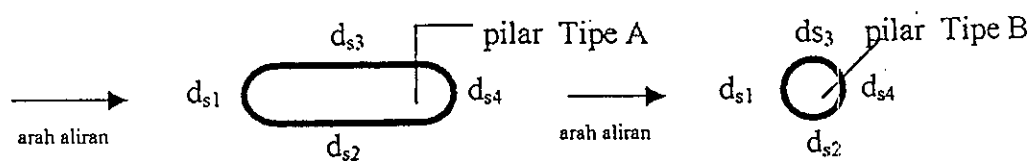
4.5. Pengambilan data

Tabel pengukuran, di mana ketinggian muka air diukur secara manual dengan lama pengaliran tertentu dan kedalaman gerusan diukur secara manual, contoh pengambilan data pada Tabel 4.5 dan Lampiran C.2.

Tabel 4.5. Pengambilan data

<i>Running</i>	I	
H	2,0	cm
Y	1,33	cm
T (pengaliran)	30	mnt

Type	b	l	d	d_{s1}	d_{s2}	d_{s3}	d_{s4}	d_s
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
A-1	1,00	2,50		0,850	0,800	0,810	0,150	0,850
A-2	1,40	2,50		1,100	0,900	0,980	0,170	1,100
B-1			1,00	0,820	0,800	0,760	0,090	0,820
B-2			1,40	1,050	0,950	0,970	0,180	1,050



Di mana :

$d_{s1}, d_{s2}, d_{s3}, d_{s4}$: kedalaman gerusan

Gambar 4.1. Letak titik pengukuran gerusan pada pilar

4.6. Verifikasi

Guna memperoleh hasil yang mendekati benar maka data yang diperoleh perlu diverifikasi. Verifikasi dititik beratkan pada pengamatan dan pengukuran kedalaman gerusan sekitar pilar dengan variasi ketinggian air.

Verifikasi dilakukan dengan membandingkan kedalaman gerusan hasil pengukuran/pengamatan rata-rata dengan formula penggerusan yang ada. Hasil verifikasi menunjukkan adanya kemiripan/kesesuaian dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.6. Perbandingan Gerusan ($y = 1,33$ cm)

No	Jenis	Gerusan (ds)						Hasil Lab (dL)
		Laursen Toch	Shen	Froehlich	CSU	Simons	Melville	
		Hasil Perhitungan (dp)						
Pilar		cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
1	A-1	1,47	1,05	1,23	0,70	0,48	1,69	0,95
2	A-2	1,86	1,08	1,28	0,88	0,60	2,76	1,17
3	B-1	1,47	1,05	1,23	0,70	0,48	1,69	1,03
4	B-2	1,86	1,08	1,28	0,88	0,60	2,76	1,25

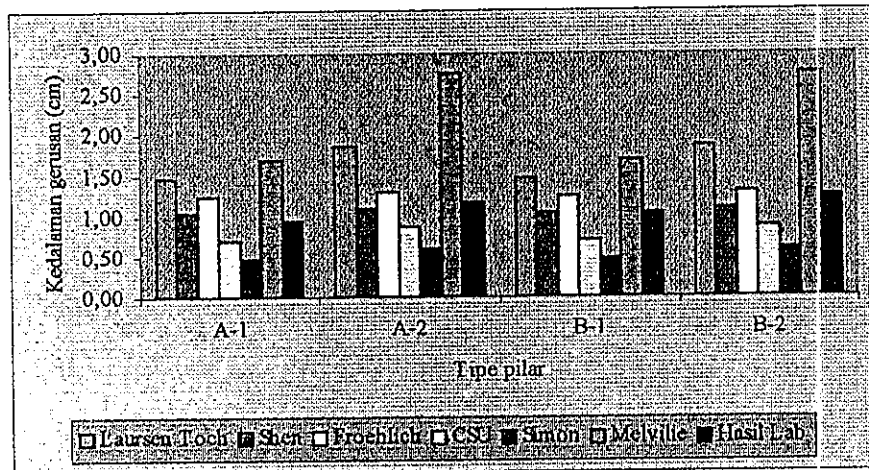
Tabel 4.7. Selisih Gerusan ($y = 1,33$ cm)

No	Jenis	Selisih gerusan ($\Delta.ds$)						(dp)
		Laursen Toch	Shen	Froehlich	CSU	Simons	Melville	
Pilar		cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
1	A-1	0,52	0,10	0,28	-0,25	-0,47	0,74	
2	A-2	0,69	-0,09	0,11	-0,29	-0,57	1,59	
3	B-1	0,44	0,02	0,20	-0,33	-0,55	0,66	
4	B-2	0,61	-0,17	0,03	-0,37	-0,65	1,51	

Tabel 4.8. Rasio Gerusan ($y = 1,33$ cm)

No	Jenis	Rasio Gerusan (dr)					
		Laursen Toch	Shen	Froehlich	CSU	Simons	Melville
Pilar		cm	cm	cm	cm	cm	cm
1	A-1	1,55	1,11	1,29	0,74	0,51	1,78
2	A-2	1,59	0,92	1,09	0,75	0,51	2,36
3	B-1	1,43	1,02	1,19	0,68	0,47	1,64
4	B-2	1,49	0,86	1,02	0,70	0,48	2,21

Gambar 4.2. Perbandingan kedalaman gerusan hasil perhitungan dengan hasil pengukuran (Laboratorium)



Dari Tabel 4.6 dan Gambar 4.2 di atas diperoleh gambaran secara kuantitatif mengenai tingkat kesesuaian (verifikasi) dari pada model tersebut. Pada ketinggian aliran $y = 1,33$ cm antara kedalaman hasil pengukuran/laboratorium (dL) dan hasil perhitungan menggunakan beberapa persamaan (dp), memberikan selisih nilai kedalaman (Δds) dan rasio kedalaman (dr) yang sangat kecil (Tabel 4.7; Tabel 4.8). Dengan demikian model yang digunakan tersebut sudah sesuai/serupa dengan yang diharapkan.

BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1. Analisis Hasil Penelitian

5.1.1. Umum

Seperti telah disebutkan pada bab-bab terdahulu bahwa tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan perkiraan pola dan kedalaman gerusan.

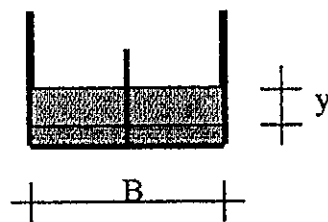
Pada penelitian ini dengan variasi debit 106,64; 186,29; 432,04; 809,8; 1337,39; 2030,65 cm^3/dt , dengan *running* selama 30; 60; 120; 180 menit

Hasil yang disajikan dari penelitian ini adalah informasi tentang :

- Perhitungan tampang saluran
- Pola gerusan
- Kedalaman gerusan hasil pengukuran (penelitian laboratorium)
- Hubungan kedalaman gerusan dan waktu *running*
- Persamaan laboratorium (hasil pengukuran)
- Perbandingan kedalaman gerusan hasil pengukuran dengan perhitungan
- Validasi kedalaman gerusan hasil perhitungan dengan data lapangan

5.1.2. Perhitungan tampang saluran

Untuk tampang saluran yang dipergunakan berbentuk persegi dapat dijelaskan dengan gambar sebagai berikut :



Gambar 5.1. Tampang saluran (*flume*) bentuk persegi

Kemudian untuk kecepatan (U) berdasarkan perhitungan dari debit dibagi dengan luas tampang saluran (yang telah dijelaskan pada bab 4.3.4). Sedangkan kedalaman aliran mendekati sama karena pada saat persiapan *running* elevasi dasar saluran diusahakan sama, dengan maksud untuk mempermudah pada waktu pengukuran dan perhitungan.

Data tampang saluran (flume) model pada setiap debit yang dipergunakan untuk *running* dapat dilihat pada Tabel 5.1.

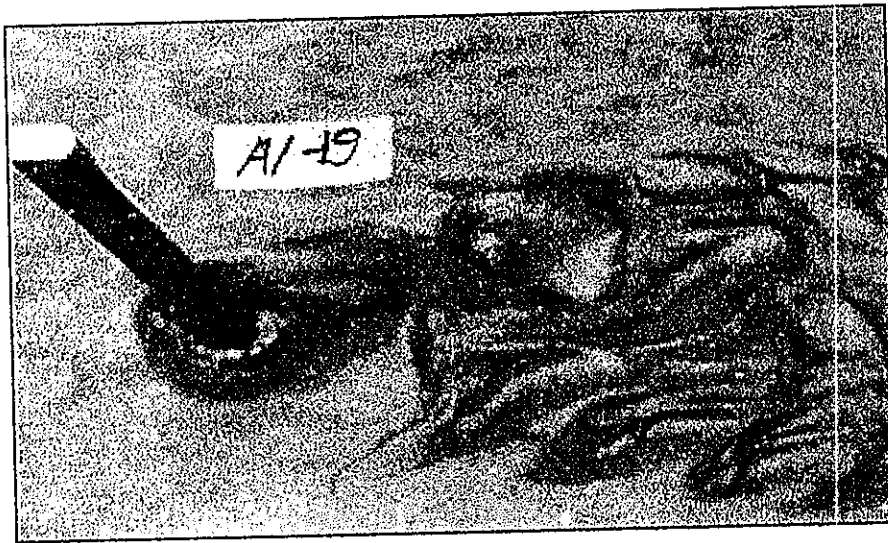
Tabel 5.1. Perhitungan tampang saluran

H	Cd	Q	B	y	A	P	R	U	v	G	Fr	Re
cm		cm ³ /dt	cm	cm	cm ²	cm	cm	cm/dt	cm ² /dt	cm/dt ²		
2,00	0,798	106,64	39,5	1,33	52,535	42,16	1,25	2,03	0,01	981	0,06	12.549,85
2,50	0,798	186,95	39,5	1,59	62,805	42,68	1,47	2,966	0,01	981	0,075	15.687,31
3,50	0,798	432,373	39,5	2,18	86,110	43,86	1,96	5,017	0,01	981	0,108	21.962,23
4,50	0,798	809,086	39,5	2,63	103,885	44,76	2,32	7,795	0,01	981	0,153	28.237,15
5,50	0,798	1337,389	39,5	3,15	124,425	44,8	2,72	10,75	0,01	981	0,193	34.512,08
6,50	0,798	2030,647	39,5	3,67	144,965	46,84	3,09	14,01	0,01	981	0,233	40.787,0

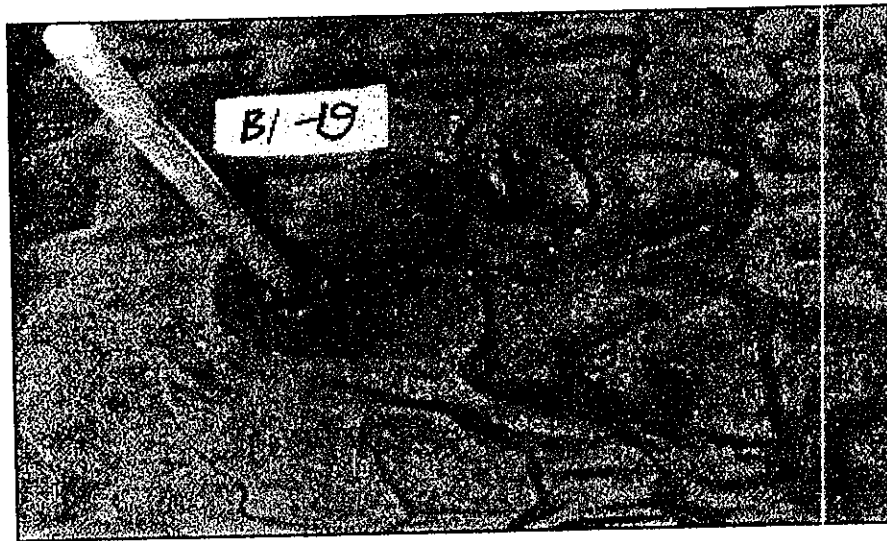
5.1.3. Pola gerusan

Berdasarkan Gambar 5.1; 5.2 dapat dilihat pola gerusan (*horseshoe vortek*) yang terjadi antara pilar tipe bulat (A) dan pilar tipe *elliptic* (B).

Horseshoe vortek terbentuk diakibatkan karena tekanan air yang cukup kuat, dengan demikian akan terjadi gerusan yang membentuk lobang kearah sisi-sisi pilar, dengan kedalaman berbeda. Formasi pasaran air ini merupakan hasil dari penumpukan air pada hulu dan akselerasi aliran di sekitar bagian depan pilar. Pada bidang vertikal simetri, aliran di bagian hulu pilar menurun dari permukaan mencapai nol di dasar. Aliran menurun tersebut menekan air dan menciptakan pusaran tapal kuda *horseshoe vortek* tersebut, pusaran ini mengikis endapan di dasar pada sisi pilar.



Gambar 5.2. Pola gerusan pilar tipe A-1. *running* ke 19 ($y = 3,15$ cm)
 $U = 7,8$ cm/dt



Gambar 5.3. Pola gerusan pilar tipe B-2. *running* ke 19 ($y = 3,15$ cm)
 $U = 7,8$ cm/dt

5.1.4. Hubungan kedalaman gerusan dengan waktu pengaliran (*running*)

Cara pengukuran kedalaman gerusan berdasarkan referensi elevasi tebing saluran dikurangi elevasi dasar saluran yang diukur sebelum *running* dimulai, pengukuran kedalaman gerusan dilakukan setelah *running* selama waktu. Hasil pengukuran kedalaman gerusan dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 5.2. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu *running*
($y= 1,33$ cm)

	T (<i>Running</i>)			
	30(mnt)	60(mnt)	120(mnt)	180(mnt)
Jenis	ds	ds	ds	ds
Pilar	cm	cm	cm	cm
A-1	0,85	0,99	0,98	0,95
A-2	1,10	1,18	1,19	1,17
B-1	0,82	0,99	0,97	0,94
B-2	1,05	1,17	1,17	1,14

Tabel 5.3. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu *running*
($y= 1,59$ cm)

	T (<i>Running</i>)			
	V	VI	VII	VIII
	30(mnt)	60(mnt)	120(mnt)	180(mnt)
Jenis	ds	ds	ds	ds
Pilar	cm	cm	cm	cm
A-1	0,94	1,08	1,06	1,04
A-2	1,15	1,34	1,30	1,27
B-1	0,95	1,07	1,05	1,03
B-2	1,16	1,28	1,27	1,25

Tabel 5.4. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu *running*
($y= 2,18$ cm)

	T (<i>Running</i>)			
	IX	X	XI	XII
	30(mnt)	60(mnt)	120(mnt)	180(mnt)
Jenis	ds	ds	ds	ds
Pilar	cm	cm	cm	cm
A-1	1,19	1,31	1,34	1,29
A-2	1,40	1,78	1,79	1,69
B-1	1,09	1,34	1,31	1,27
B-2	1,30	1,71	1,77	1,64

Tabel 5.5. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu *running*
($y=2,63$ cm)

	T (<i>Running</i>)			
	XIII	XIV	XV	XVI
	30(mnt)	60(mnt)	120(mnt)	180(mnt)
Jenis	ds	ds	ds	ds
Pilar	cm	cm	cm	cm
A-1	1,34	1,75	1,76	1,65
A-2	1,64	2,10	2,02	1,94
B-1	1,25	1,67	1,64	1,55
B-2	1,55	2,12	2,08	1,95

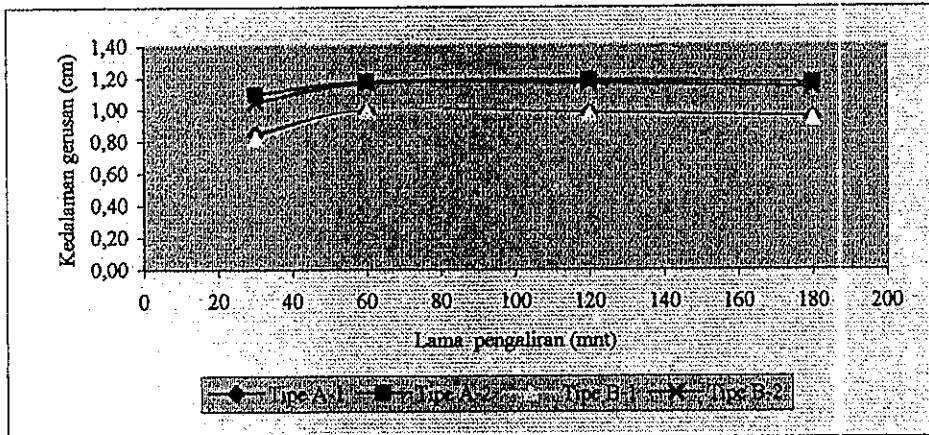
Tabel 5.6. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu *running*
($y=3,15$ cm)

	T (<i>Running</i>)			
	XVII	XVIII	XIX	XX
	30(mnt)	60(mnt)	120(mnt)	180(mnt)
Jenis	ds	ds	ds	ds
Pilar	cm	cm	cm	cm
A-1	1,42	2,01	2,00	1,86
A-2	1,84	2,32	2,34	2,21
B-1	1,31	2,01	2,04	1,85
B-2	1,80	2,34	2,28	2,18

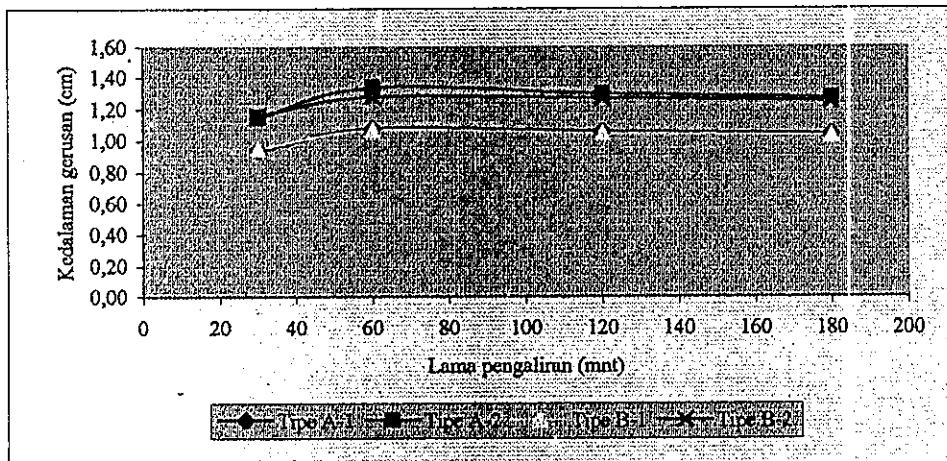
Tabel 5.7. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu *running*
($y=3,67$ cm)

	T (<i>Running</i>)			
	XXI	XXII	XXIII	XXIV
	30(mnt)	60(mnt)	120(mnt)	180(mnt)
Jenis	ds	ds	ds	ds
Pilar	cm	cm	cm	cm
A-1	1,71	2,26	2,26	2,12
A-2	2,01	2,73	2,72	2,55
B-1	1,68	2,16	2,18	2,05
B-2	2,00	2,66	2,68	2,50

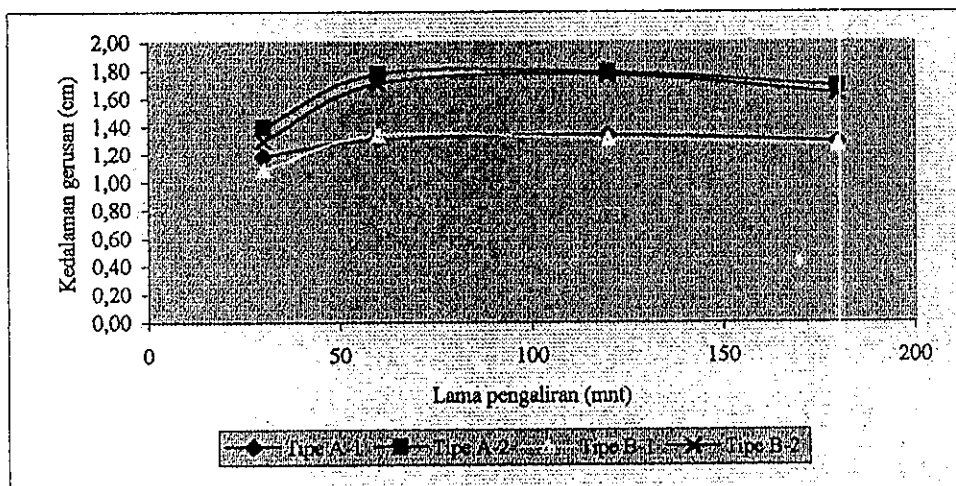
Gambar 5.4. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu *running* ($y = 1,33 \text{ cm}$)



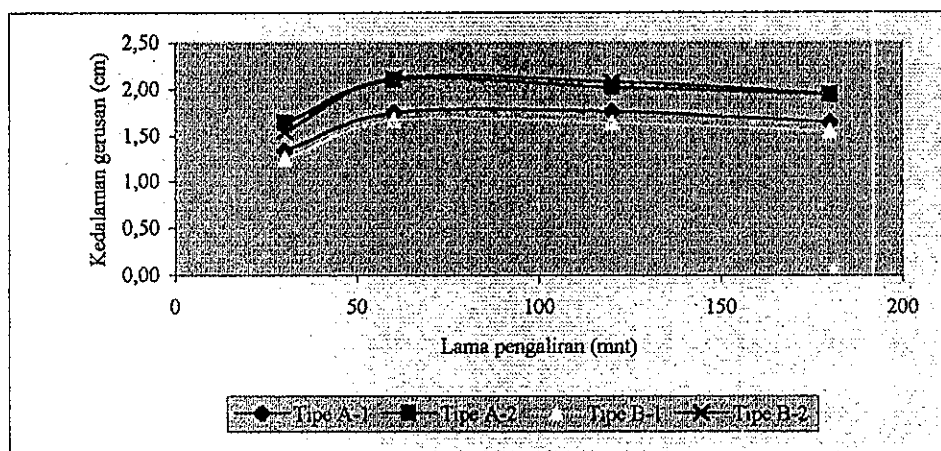
Gambar 5.5. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu *running* ($y = 1,59 \text{ cm}$)



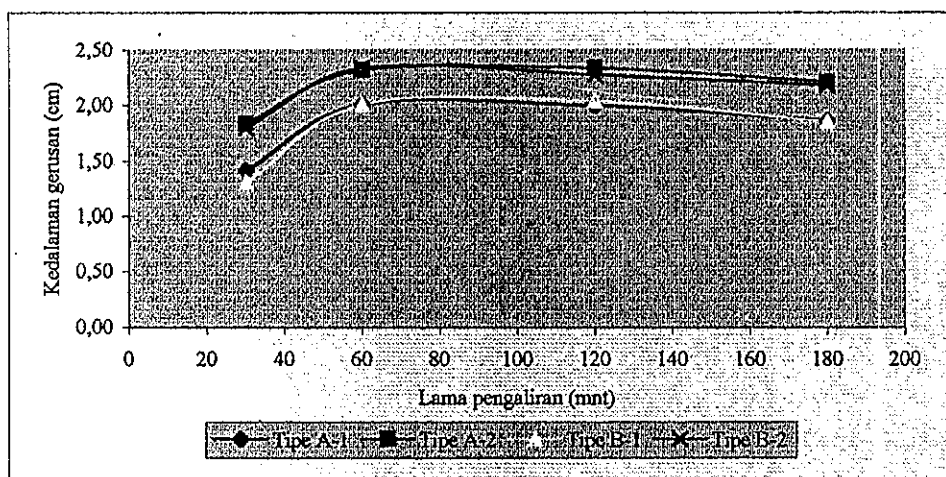
Gambar 5.6. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu *running* ($y = 2,18 \text{ cm}$)



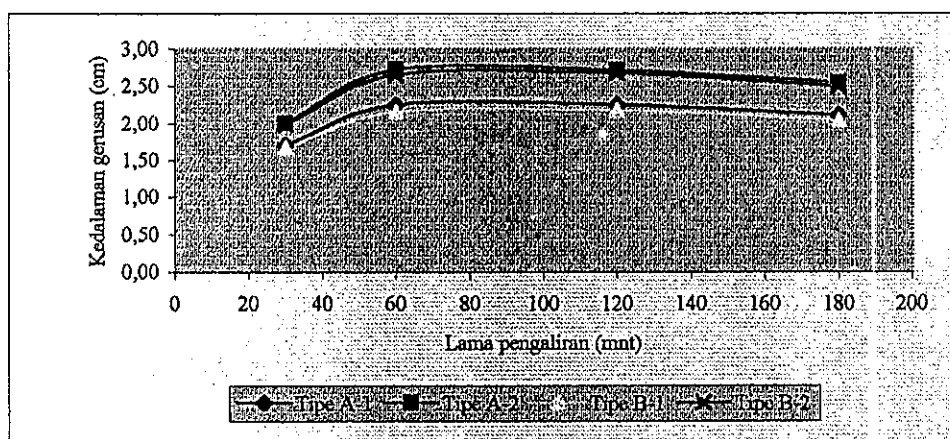
Gambar 5.7. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu *running* ($y = 2,63 \text{ cm}$)



Gambar 5.8. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu *running* ($y = 3,15 \text{ cm}$)



Gambar 5.9. Hubungan kedalaman gerusan dan waktu *running* ($y = 3,67 \text{ cm}$)



5.1.5. Persamaan laboratorium

Berdasarkan analisis dimensi (Lampiran A1), kedalaman gerusan

$$(d_s) = f \{ d_{50}, \nu, g, U, \rho, y, b, d, Re, Fr \}$$

di mana :

d_s : kedalaman gerusan (m)

d_{50} : diameter butiran (m)

ν : viskositas (kg m / dt)

g : gravitasi (m / dt²)

U : kecepatan (m/dt)

ρ : rapat massa air (kg/m³)

y : kedalaman air (m)

b : lebar pilar (m)

d : diameter pilar (m)

Re : bilangan *Reynolds*

Fr : bilangan *Froude*

Dari 72 data laboratorium dianalisis statistik (Lampiran B.5), kemudian dicoba untuk mengeluarkan persamaan berdasarkan data laboratorium tersebut. Adapun parameter yang diukur pada penelitian meliputi y, d, b, l, d_{50} . Sedangkan parameter hasil dari pada perhitungan meliputi U, Fr . Dalam penelitian ini parameter y, b yang divariasikan, dari data yang tersedia tersebut dicoba menghubungkan tiga parameter y, b dan Fr .

$$d_s = f \{ y, b, Fr \} \dots\dots\dots(5.1)$$

Suatu model eksponensial dapat digunakan untuk memperkirakan kedalaman gerusan (d_s) dari kedalaman aliran (y), lebar pilar (b) dan bilangan *Froude* (Fr) yaitu :

$$d_s = A_0 * b^{A_1} * y^{A_2} * Fr^{A_3} \dots\dots\dots(5.2)$$

Berdasarkan Persamaan (5.2), setelah data laboratorium dianalisis statistik (Lampiran B.5), kemudian dapat dicari koefisiennya yaitu :

$A_1 =$	0,26217
$A_2 =$	0,47871
$A_3 =$	0,41945

$$A_0 = \ln ds - A_1 \ln b - A_2 \ln y - A_3 \ln Fr \dots\dots\dots(5.3)$$

$$A_0 = 0,87743$$

Nilai A_0 tersebut tidak lain adalah $\ln A_0$, nilai A_0 sesungguhnya adalah e^{A_0}

$$\ln A_0 = e^{0,87743}$$

$$A_0 = 2,4071$$

Dengan demikian model eksponensial untuk persamaan gerusan tersebut adalah :

$$d_s = 2,4071 * b^{0,26217} * y^{0,47871} * Fr^{0,41945} \dots\dots\dots(5.4)$$

dimana :

d_s = Kedalaman gerusan (m)

b = Lebar pilar (m)

y = Kedalaman aliran (m)

Fr = Bilangan *Froude*

5.1.6. Validasi dengan Data Laboratorium

Pada Bab 5.1.5 dijelaskan bahwa sebagian data dipergunakan analisis statistik guna mendapatkan persamaan laboratorium, adapun jumlah data tersebut 72 data. Sedangkan data yang akan dipergunakan untuk validasi 24 data. Adapun data yang akan dipergunakan untuk validasi tersebut dapat dilihat pada Tabel di bawah ini.

Tabel 5.8. Kedalaman gerusan hasil laboratorium

No	Tipe	Dimensi (cm)			y (cm)	d _s (cm) Lab.
		b	l	d		
1	A-1	1,0	2,50		1,33	0,95
	A-2	1,4	2,50		1,33	1,17
	B-1			1,0	1,33	0,94
	B-2			1,4	1,33	1,14
2	A-1	1,0	2,50		1,59	1,04
	A-2	1,4	2,50		1,59	1,27
	B-1			1,0	1,59	1,03
	B-2			1,4	1,59	1,25
3	A-1	1,0	2,50		2,18	1,29
	A-2	1,4	2,50		2,18	1,69
	B-1			1,0	2,18	1,27
	B-2			1,4	2,18	1,64
4	A-1	1,0	2,50		2,63	1,65
	A-2	1,4	2,50		2,63	1,94
	B-1			1,0	2,63	1,55
	B-2			1,4	2,63	1,95
5	A-1	1,0	2,50		3,15	1,86
	A-2	1,4	2,50		3,15	2,21
	B-1			1,0	3,15	1,85
	B-2			1,4	3,15	2,18
6	A-1	1,0	2,50		3,67	2,12
	A-2	1,4	2,50		3,67	2,55
	B-1			1,0	3,67	2,05
	B-2			1,4	3,67	2,50

5.1.7. Perbandingan Kedalaman Gerusan Hasil Perhitungan dan Hasil Pengukuran (Laboratorium)
(Analisis selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran B.6, B.7, B.8)

Tabel 5.9. Perbandingan Gerusan ($y = 1,33$ cm)

		Gerusan (ds)							Hasil Lab (dL)
		Laursen Toch	Shen	Froehlich	CSU	Simons	Melville	Persamaan Lab.	
No	Jenis Pilar	Data Perhitungan (dp)							cm
		Pers.2.7 cm	Pers.2.8 cm	Pers.2.9 cm	Pers.2.10 cm	Pers.2.11 cm	Pers.2.13 cm	Pers. 5.4 cm	
1	A-1	1,47	1,05	1,23	0,70	0,48	1,69	0,82	0,95
2	A-2	1,86	1,08	1,28	0,88	0,60	2,76	0,90	1,17
3	B-1	1,47	1,05	1,23	0,70	0,48	1,69	0,82	1,03
4	B-2	1,86	1,08	1,28	0,88	0,60	2,76	0,90	1,25

Tabel 5.10. Perbandingan Gerusan ($y = 1,59$ cm)

		Gerusan (ds)							Hasil Lab (dL)
		Laursen Toch	Shen	Froehlich	CSU	Simons	Melville	Persamaan Lab.	
No	Jenis Pilar	Data Perhitungan (dp)							cm
		Pers.2.7 cm	Pers.2.8 cm	Pers.2.9 cm	Pers.2.10 cm	Pers.2.11 cm	Pers.2.13 cm	Pers. 5.4 cm	
1	A-1	1,55	1,05	1,26	0,85	0,58	1,69	1,01	1,04
2	A-2	1,96	1,08	1,32	1,06	0,72	2,75	1,11	1,27
3	B-1	1,55	1,05	1,26	0,85	0,58	1,69	1,01	1,03
4	B-2	1,96	1,08	1,32	1,06	0,72	2,75	1,11	1,25

Tabel 5.11. Perbandingan Gerusan ($y = 2,18$ cm)

		Gerusan (ds)							Hasil Lab (dL)
		Laursen Toch	Shen	Froehlich	CSU	Simons	Melville	Persamaan Lab.	
No	Jenis Pilar	Data Perhitungan (dp)							cm
		Pers.2.7 cm	Pers.2.8 cm	Pers.2.9 cm	Pers.2.10 cm	Pers.2.11 cm	Pers.2.13 cm	Pers. 5.4 cm	
1	A-1	1,71	1,05	1,33	1,11	0,76	1,68	1,38	1,28
2	A-2	2,16	1,08	1,40	1,38	0,94	2,74	1,50	1,69
3	B-1	1,71	1,05	1,33	1,11	0,76	1,68	1,38	1,27
4	B-2	2,16	1,08	1,40	1,38	0,94	2,74	1,50	1,64

UPT-PUSTAK-UNDIF

Tabel 5.12. Perbandingan Gerusan ($y = 2,63 \text{ cm}$)

		Gerusan (ds)							Hasil Lab (dL)
		Laursen Toch	Shen	Froehlich	CSU	Simons	Melville	Persamaan Lab.	
		Data Perhitungan (dp)							cm
No	Jenis Pilar	Pers.2.7 cm	Pers.2.8 cm	Pers.2.9 cm	Pers.2.10 cm	Pers.2.11 cm	Pers.2.13 cm	Pers. 5.4 cm	
1	A-1	1,80	1,05	1,38	1,38	0,94	1,68	1,74	1,65
2	A-2	2,28	1,08	1,47	1,72	1,17	2,74	1,90	1,94
3	B-1	1,80	1,05	1,38	1,38	0,94	1,68	1,74	1,55
4	B-2	2,28	1,08	1,47	1,72	1,17	2,74	1,90	1,95

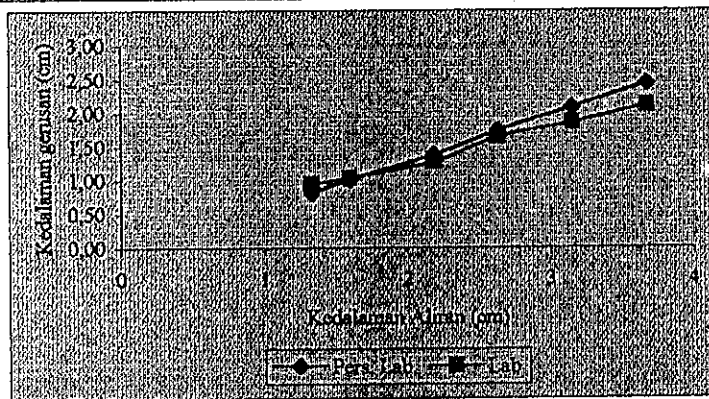
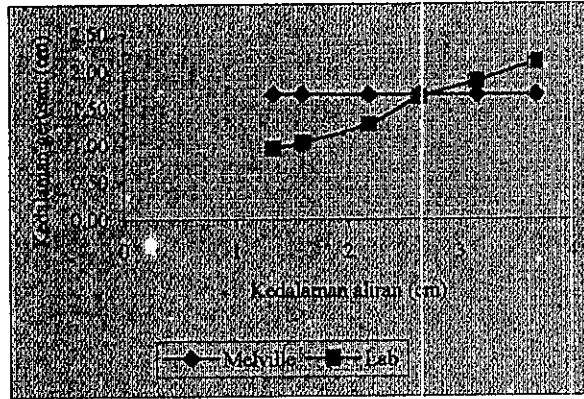
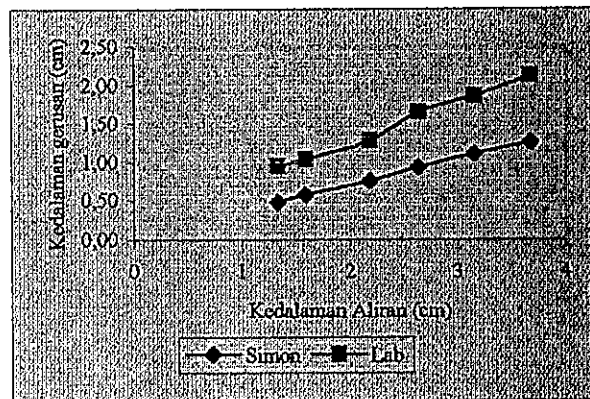
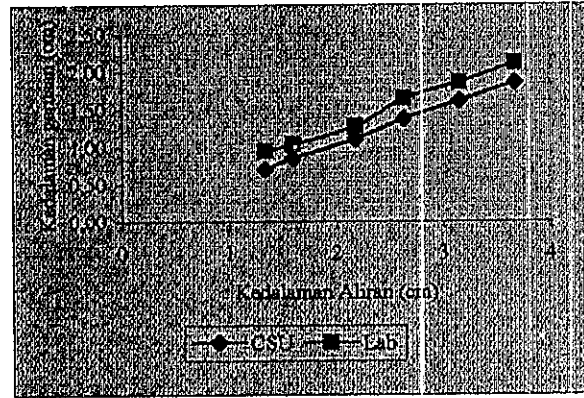
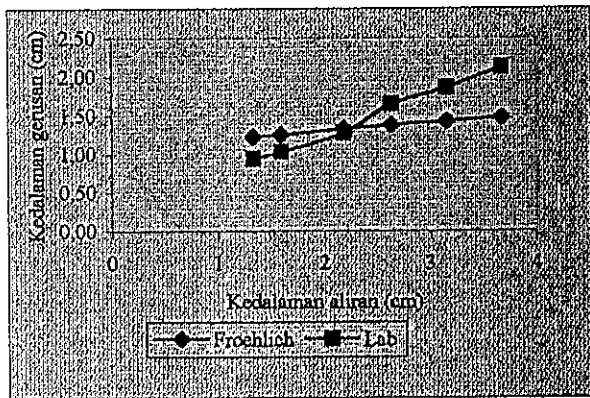
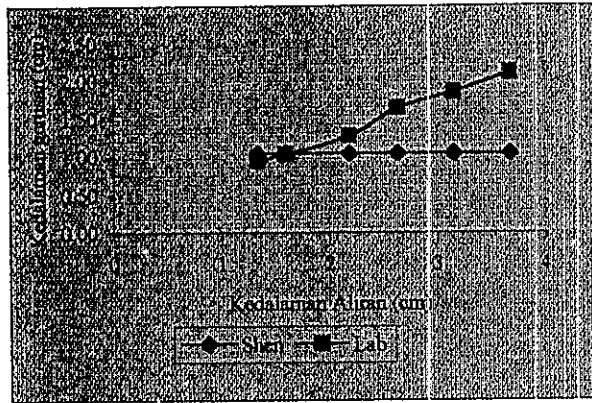
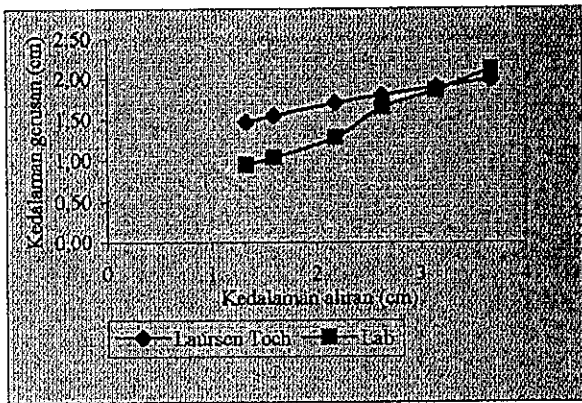
Tabel 5.13. Perbandingan Gerusan ($y = 3,15 \text{ cm}$)

		Gerusan (ds)							Hasil Lab (dL)
		Laursen Toch	Shen	Froehlich	CSU	Simons	Melville	Persamaan Lab.	
		Data Perhitungan (dp)							cm
No	Jenis Pilar	Pers.2.7 cm	Pers.2.8 cm	Pers.2.9 cm	Pers.2.10 cm	Pers.2.11 cm	Pers.2.13 cm	Pers. 5.4 cm	
1	A-1	1,90	1,05	1,43	1,62	1,11	1,68	2,09	1,86
2	A-2	2,41	1,08	1,53	2,02	1,38	2,73	2,29	2,21
3	B-1	1,90	1,05	1,43	1,62	1,11	1,68	2,09	1,85
4	B-2	2,41	1,08	1,53	2,02	1,38	2,73	2,29	2,18

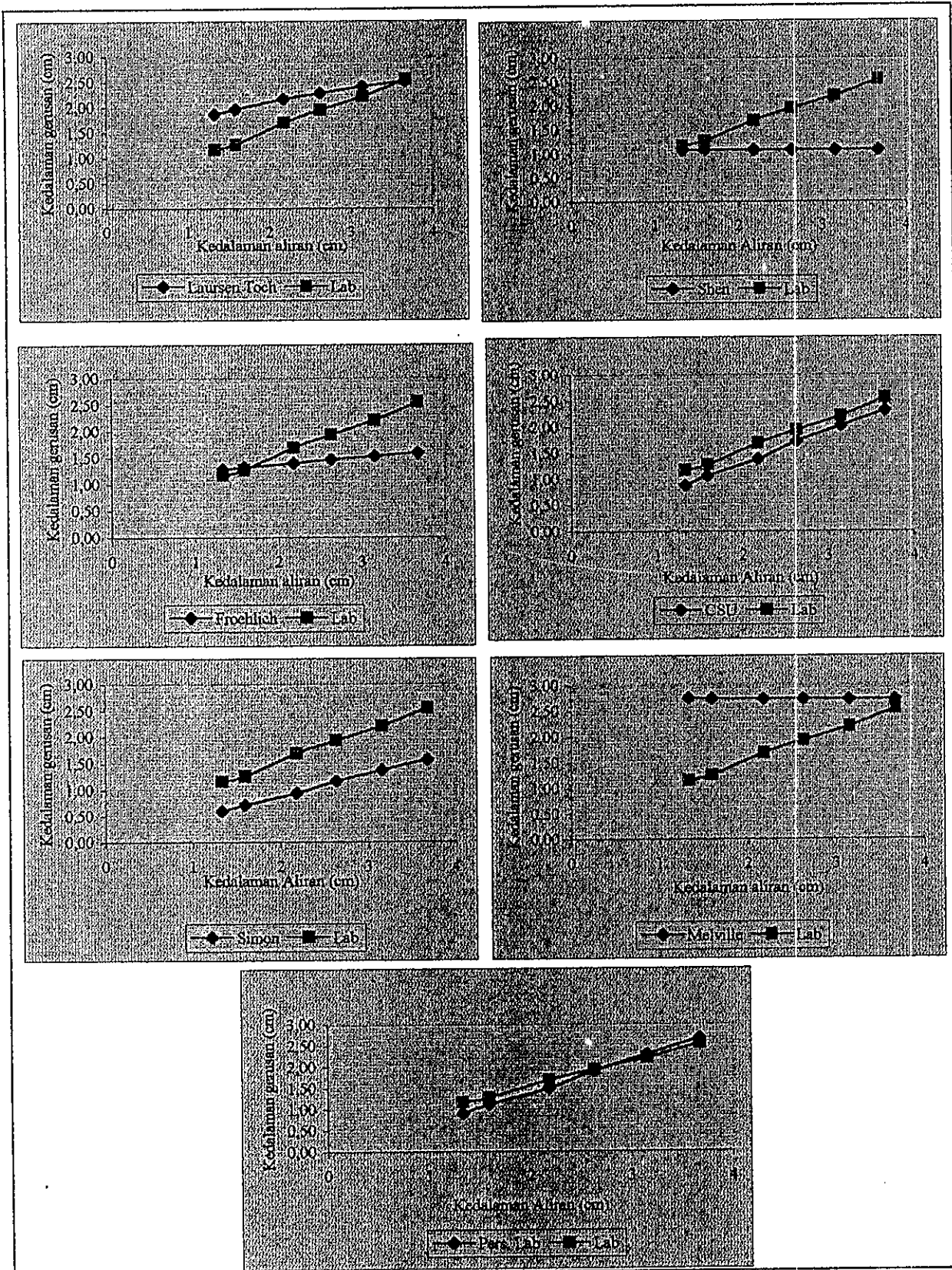
Tabel 5.14. Perbandingan Gerusan ($y = 3,67 \text{ cm}$)

		Gerusan (ds)							Hasil Lab (dL)
		Laursen Toch	Shen	Froehlich	CSU	Simons	Melville	Persamaan Lab.	
		Data Perhitungan (dp)							cm
No	Jenis Pilar	Pers.2.7 cm	Pers.2.8 cm	Pers.2.9 cm	Pers.2.10 cm	Pers.2.11 cm	Pers.2.13 cm	Pers. 5.4 cm	
1	A-1	1,99	1,05	1,48	1,86	1,26	1,68	2,44	2,12
2	A-2	2,52	1,08	1,59	2,31	1,57	2,73	2,66	2,55
3	B-1	1,99	1,05	1,48	1,86	1,26	1,68	2,44	2,05
4	B-2	2,52	1,08	1,59	2,31	1,57	2,73	2,66	2,50

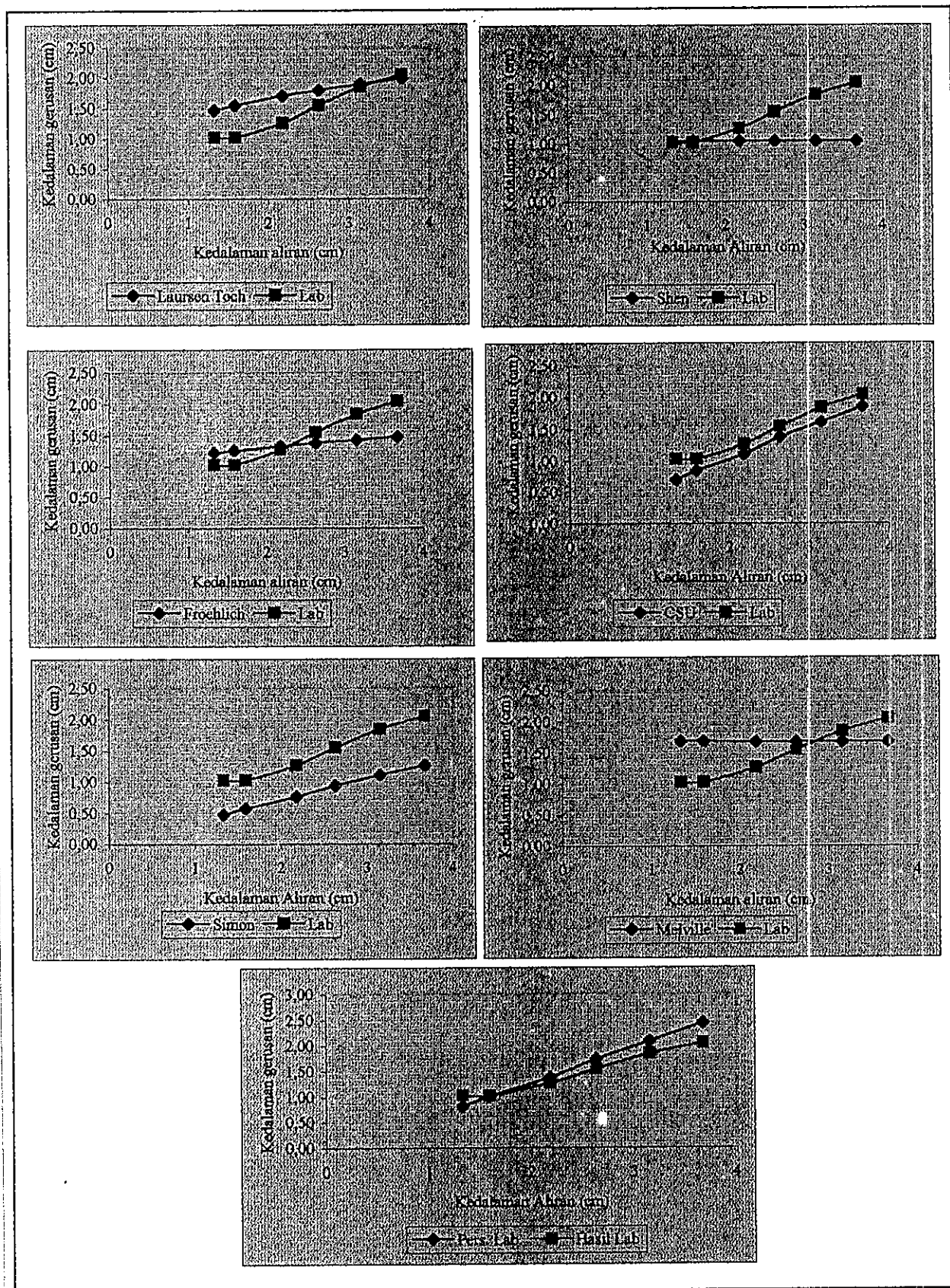
Gambar 5.10. Perbandingan kedalaman gerusan (Tipe A1)



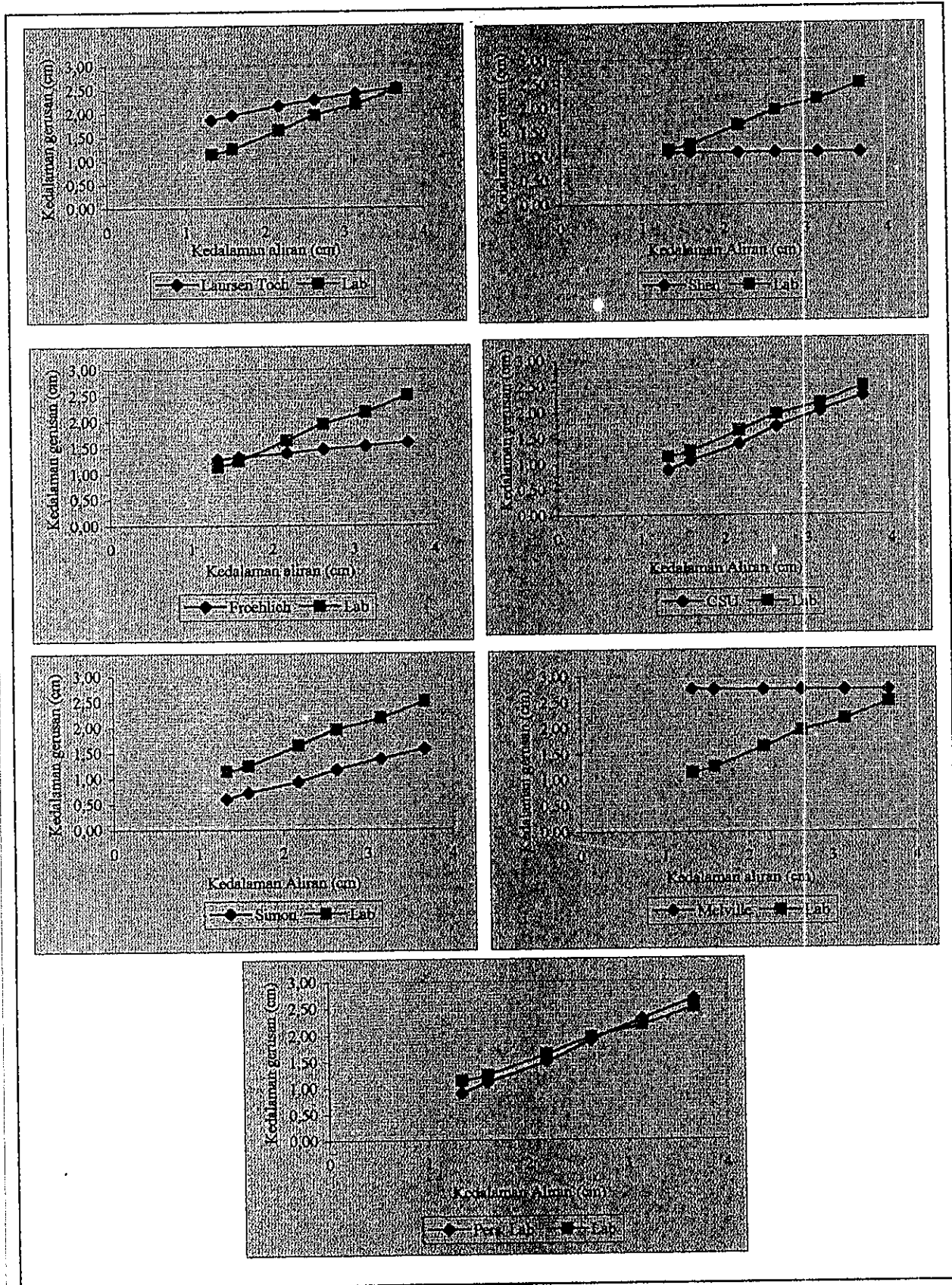
Gambar 5.11. Perbandingan kedalaman gerusan (Tipe A2)



Gambar 5.12. Perbandingan kedalaman gerusan (Tipe B1)



Gambar 5.13. Perbandingan kedalaman gerusan (Tipe B2)



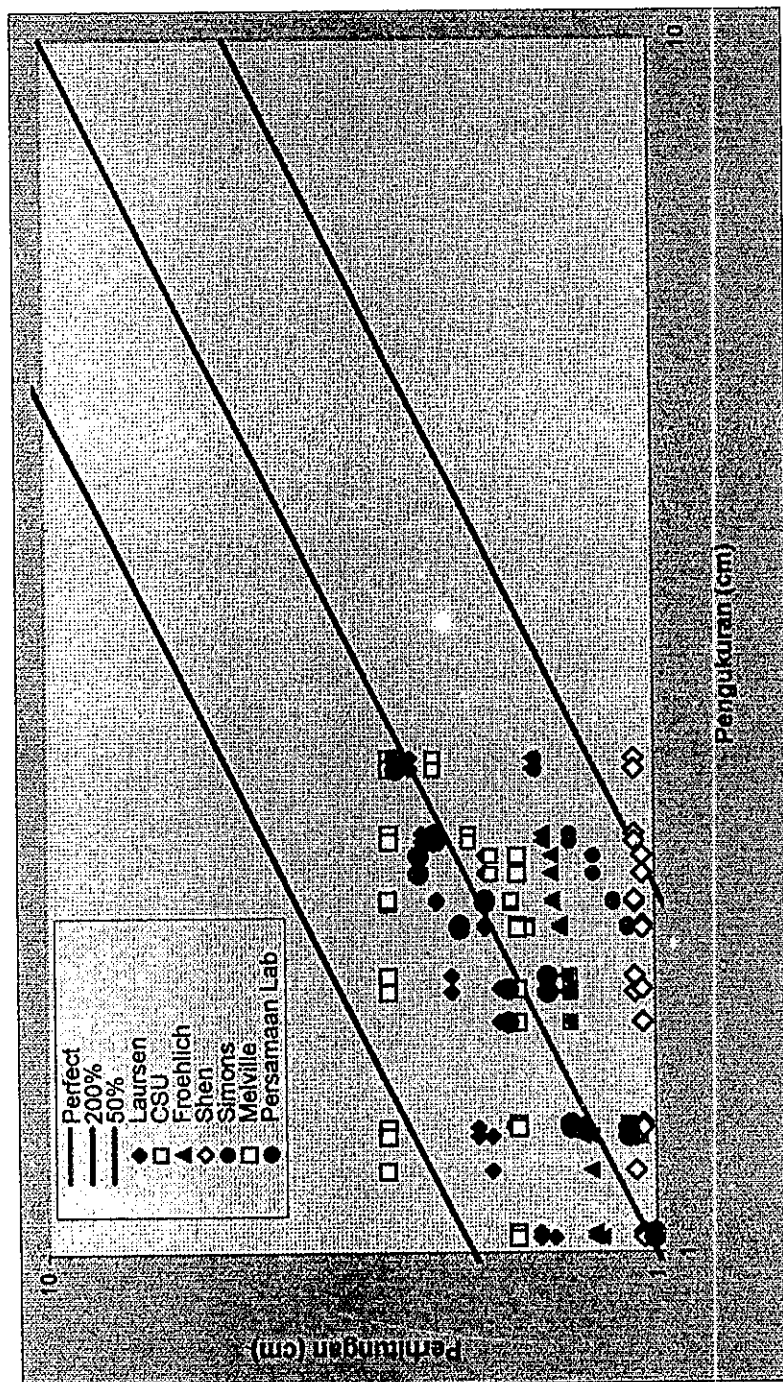
5.1.8 Analisis persamaan dengan regresi linier

Berdasarkan Bab 2.9, dari hasil perhitungan kedalaman gerusan akan dianalisis dengan regresi linier. Adapun hasil analisis tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.9. Dan Gambar 5.14.

Tabel 5.15. Analisis Persamaan dengan regresi linier

No	Type	b	y	Hasil		Laursen		Shen		Froehlich		CSU		Simons		Melville		Pers	
				Lab	cm	Toch	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
1	A-1	1,00	1,33	0,950	1,470	1,050	1,230	0,700	0,480	1,690	0,820								
2	A-2	1,40	1,33	1,170	1,860	1,080	1,280	0,880	0,600	2,760	0,900								
3	B-1	1,00	1,33	0,940	1,470	1,050	1,230	0,700	0,480	1,690	0,820								
4	B-2	1,40	1,33	1,140	1,860	1,080	1,280	0,880	0,600	2,760	0,900								
5	A-1	1,00	1,59	1,040	1,550	1,050	1,260	0,850	0,580	1,690	1,010								
6	A-2	1,40	1,59	1,270	1,960	1,080	1,320	1,060	0,720	2,750	1,110								
7	B-1	1,00	1,59	1,030	1,550	1,050	1,260	0,850	0,580	1,690	1,010								
8	B-2	1,40	1,59	1,250	1,960	1,080	1,320	1,060	0,720	2,750	1,110								
9	A-1	1,00	2,18	1,290	1,710	1,050	1,330	1,110	0,760	1,680	1,380								
10	A-2	1,40	2,18	1,690	2,160	1,080	1,400	1,380	0,940	2,740	1,500								
11	B-1	1,00	2,18	1,270	1,710	1,050	1,330	1,110	0,760	1,680	1,380								
12	B-2	1,40	2,18	1,640	2,160	1,080	1,400	1,380	0,940	2,740	1,500								
13	A-1	1,00	2,63	1,650	1,800	1,050	1,380	1,380	0,940	1,680	1,740								
14	A-2	1,40	2,63	1,940	2,280	1,080	1,470	1,720	1,170	2,740	1,900								
15	B-1	1,00	2,63	1,550	1,800	1,050	1,380	1,380	0,940	1,680	1,740								
16	B-2	1,40	2,63	1,950	2,280	1,080	1,470	1,720	1,170	2,740	1,900								
17	A-1	1,00	3,15	1,860	1,900	1,050	1,430	1,620	1,110	1,680	2,090								
18	A-2	1,40	3,15	2,210	2,410	1,080	1,530	2,020	1,380	2,730	2,290								
19	B-1	1,00	3,15	1,850	1,900	1,050	1,430	1,620	1,110	1,680	2,090								
20	B-2	1,40	3,15	2,180	2,410	1,080	1,530	2,020	1,380	2,730	2,290								
21	A-1	1,00	3,67	2,120	1,990	1,050	1,480	1,860	1,260	1,680	2,440								
22	A-2	1,40	3,67	2,550	2,520	1,080	1,590	2,310	1,570	2,730	2,660								
23	B-1	1,00	3,67	2,050	1,990	1,050	1,480	1,860	1,260	1,680	2,440								
24	B-2	1,40	3,67	2,500	2,520	1,080	1,590	2,310	1,570	2,730	2,660								

Gambar 5.14. Perbandingan kedalaman gerusan hasil perhitungan dan pengukuran dengan menggunakan data laboratorium

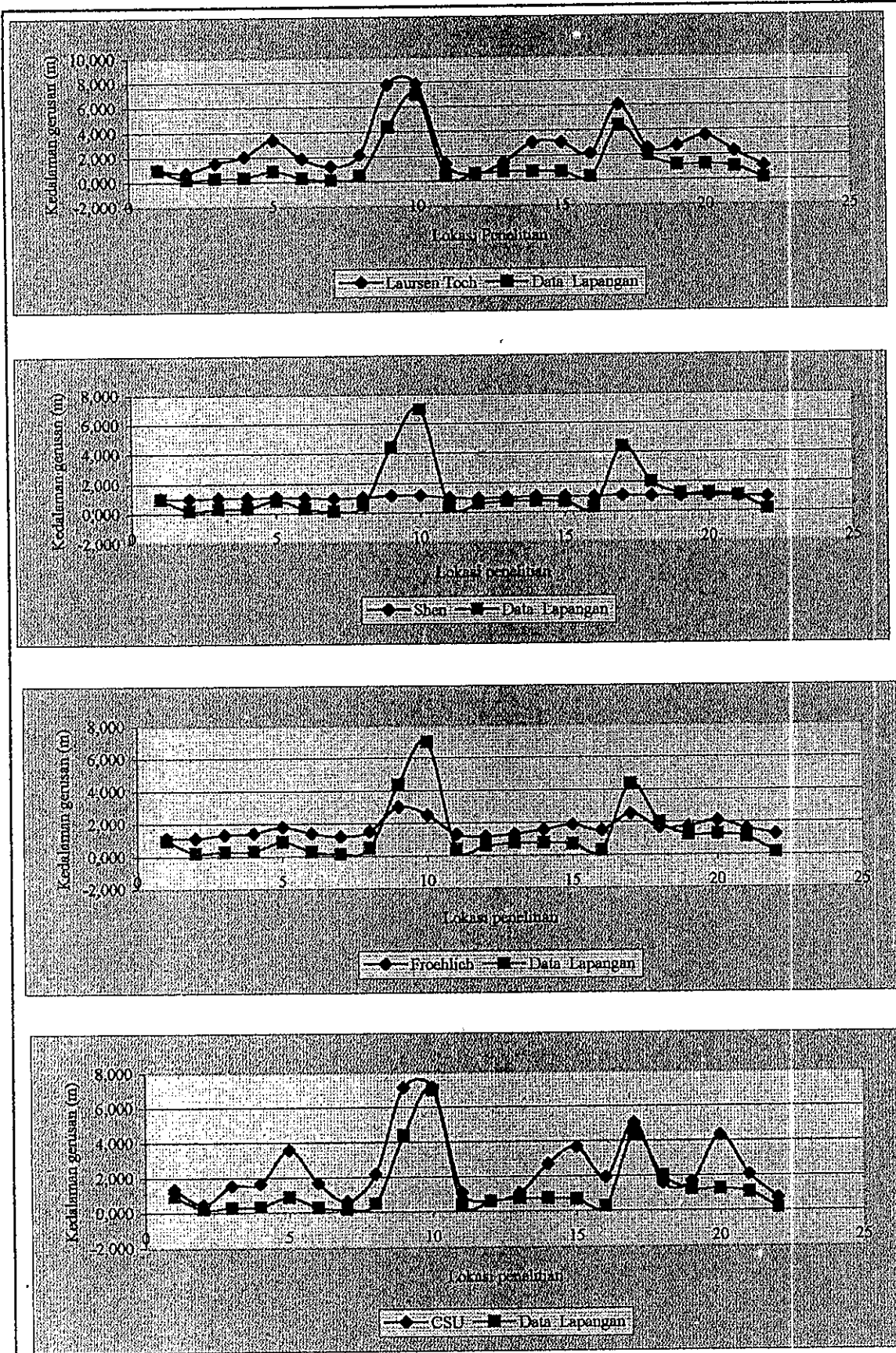


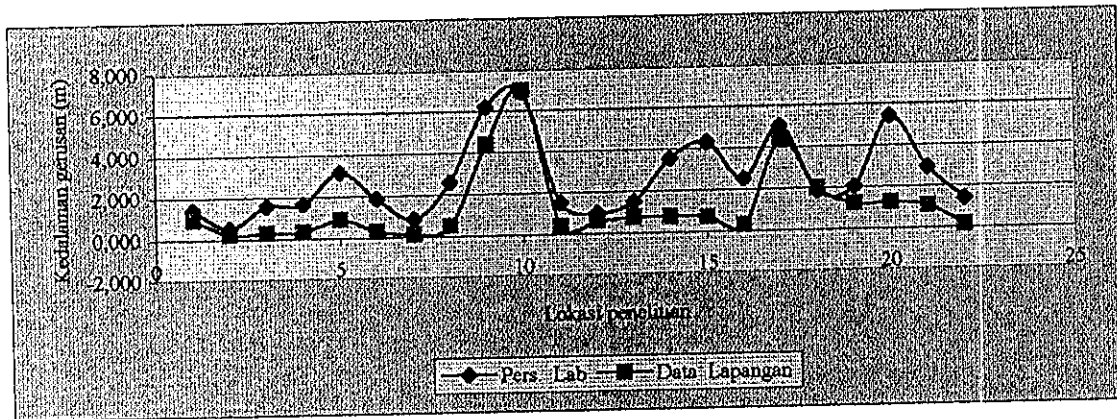
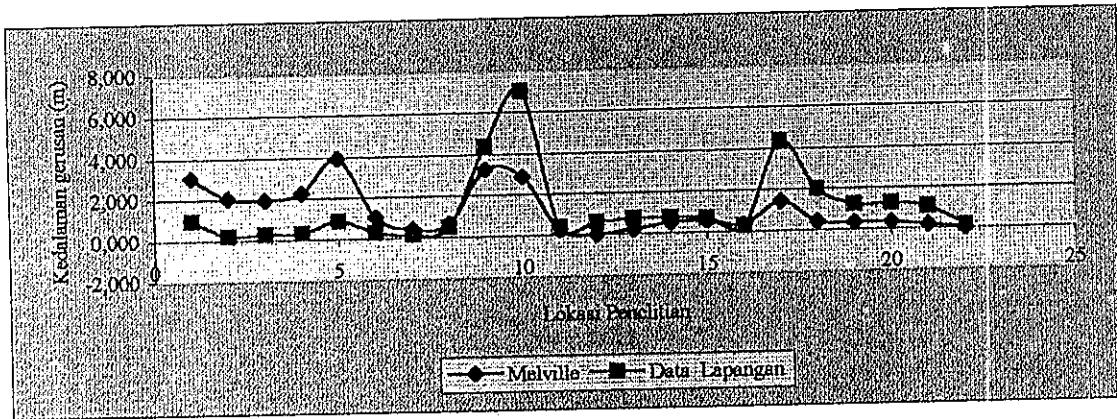
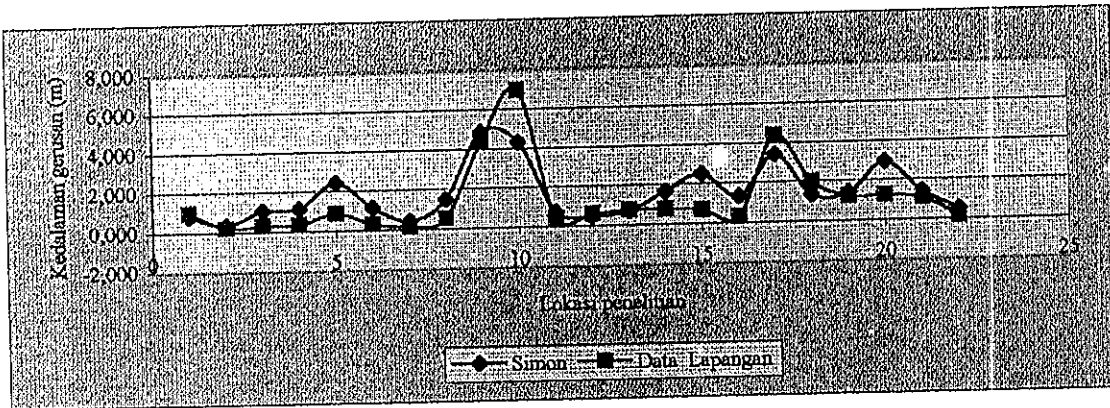
Persamaan gerusan yang ada kemudian dicoba untuk menghitung data lapangan kedalaman gerusan 22 sungai (Lampiran B.10), Adapun hasil dari validasi tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.16, Gambar 5.15,

Tabel 5.16. Perbandingan persamaan gerusan dengan data lapangan
(Lander & Muller, 1995 dan USGS, 1987),

No	Jenis	Pilar	Gerusan (ds)							Data Lapangan (dlap)
			Laursen	Shen	Frochlich	CSU	Simon	Melville	Persamaan	
			Toch						Lab	
			Data Perhitungan (dp)							
			m	m	m	m	m	m	m	m
1	MT	Lancip	1,048	1,053	1,160	1,356	0,822	3,065	1,446	0,975
2	DE	Bulat	0,782	1,029	1,114	0,494	0,337	2,045	0,527	0,213
3	CO	Bulat	1,567	1,066	1,323	1,543	1,052	1,941	1,590	0,305
4	AK	Bulat	2,057	1,084	1,404	1,668	1,137	2,264	1,664	0,335
5	MS	Bulat	3,375	1,123	1,788	3,579	2,440	3,956	3,176	0,884
6	MD	Bulat	1,886	1,066	1,404	1,677	1,143	1,047	1,877	0,305
7	OH	Bulat	1,259	1,029	1,208	0,650	0,443	0,417	0,856	0,152
8	MD	Bulat	2,173	1,066	1,526	2,191	1,494	0,653	2,598	0,518
9	LA	Bulat	7,791	1,171	3,017	7,143	4,871	3,271	6,203	4,389
10	LA	Lancip	7,845	1,171	2,493	7,144	4,330	2,877	6,897	6,980
11	OH	Bulat	1,419	1,029	1,299	1,099	0,750	0,280	1,511	0,396
12	CO	Kotak	0,589	0,961	1,168	0,620	0,512	0,010	0,992	0,610
13	VA	Bulat	1,506	1,029	1,312	1,066	0,727	0,230	1,506	0,762
14	AK	Lancip	3,071	1,084	1,553	2,710	1,643	0,536	3,558	0,762
15	NY	Bulat	3,071	1,084	1,868	3,686	2,513	0,596	4,333	0,701
16	OH	Bulat	2,155	1,055	1,519	1,946	1,327	0,355	2,529	0,305
17	AR	Bulat	6,079	1,140	2,532	5,028	3,428	1,434	5,032	4,389
18	GA	Kotak	2,588	1,066	1,672	1,599	1,321	0,437	1,887	2,012
19	GA	Kotak	2,792	1,066	1,745	1,696	1,402	0,340	2,069	1,219
20	NY	Bulat	3,560	1,084	2,082	4,322	2,947	0,364	5,415	1,250
21	VA	Bulat	2,298	1,048	1,589	2,068	1,410	0,186	2,942	1,067
22	DE	Bulat	1,122	0,980	1,248	0,718	0,490	0,023	1,410	0,152

Gambar 5.15. Perbandingan kedalaman gerusan hasil perhitungan dengan data lapangan





5.2. Pembahasan

a. Penampang saluran

Penampang saluran yang dipergunakan berbentuk persegi dan lurus (Gambar 3.1), dengan tujuan untuk menghindari terjadinya pengaliran tidak seragam. Berdasarkan Tabel 5.2, data-data lainnya dapat diketahui secara matematis diantaranya :

- **Kedalaman aliran**

Kedalaman aliran mendekati sama karena pada saat persiapan *running* elevasi dasar saluran diusahakan sama, dengan maksud untuk mempermudah pada waktu pengukuran dan perhitungan.

- **Bilangan Reynolds**

Bilangan Reynolds dipergunakan untuk mengetahui apakah model telah sesuai dengan perencanaan. Dalam hal ini dapat diketahui dari besarnya bilangan Reynolds. Bila $Re > 12.500$ maka aliran yang terjadi pada saluran turbulen dengan demikian sesuai kenyataan dilapangan (syarat model). Dari persyaratan tersebut maka dapat diketahui debit minimum dan debit maksimum yang dipergunakan dalam penelitian.

- **Kecepatan aliran**

Kecepatan aliran (U) bila kedalaman aliran (y) > 7 cm dapat diukur dengan alat *curent meter laboratorium* (sebagai kalibrasi model). Tetapi pada penelitian ini kedalaman aliran maksimum (y_{maks}) < 7 cm, maka kecepatan dicari secara matematis yaitu debit dibagi dengan luas tampang saluran.

b. Pola gerusan

Berdasarkan Gambar 5.2, 5.2 serta Lampiran D dapat dilihat pola gerusan (*horseshoe vortek*) yang terjadi antara pilar tipe bulat (A) dan tipe *elliptic* (B). *Horseshoe vortek* terbentuk diakibatkan karena tekanan air yang cukup

kuat, dengan demikian akan terjadi gerusan yang membentuk lobang kearah sisi-sisi pilar, dengan kedalaman berbeda. Formasi pasaran air ini merupakan hasil dari penumpukan air pada hulu dan akselerasi aliran di sekitar bagian depan pilar. Pada bidang vertikal simetri, aliran di bagian hulu pilar menurun dari permukaan mencapai nol di dasar. Aliran menurun tersebut menekan air dan menciptakan pusaran tapal kuda *horseshoe vortek* tersebut, pusaran ini mengikis endapan di dasar pada sisi pilar. Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi pola gerusan tersebut adalah :

- **Lebar pilar**

Faktor yang paling berpengaruh langsung pada kedalaman erosi adalah lebar pilar. Kerena lebar pilar akan menyebabkan aliran air akan terhalang (perubahan pola aliran) dan akan terjadi penimbunan air di depan pilar yang menghasilkan formasi *vortek* (pusaran) di dasar pilar. Pusaran tersebut akan mengikis material dasar di sekitar pilar serta menyebabkan pusaran baling-baling yang mengikis material yang berada di hilir pilar. , hal ini dapat dilihat pada Tabel 5.8. Di mana lebar (b) pilar $A1 < A2$, lebar pilar $B1 < B2$, maka kedalaman gerusan yang terjadi (ds. $A1 < ds. A2$) serta (ds. $B1 < B2$).

- **Panjang pilar**

Panjang pilar tidak memiliki efek yang berarti terhadap kedalaman gerusan, tetapi jika sudut alirannya (θ) besar, panjang pilar memiliki efek yang sangat besar. Menurut (Richardson dkk.,1990), pada sudut aliran yang sama panjang pilar akan meningkatkan kedalaman erosi sampai 33 % . Beberapa persamaan memperhitungkan faktor panjang ini dengan menggunakan rasio panjang pilar terhadap kedalaman aliran atau lebar pilar. Sementara persamaan yang lainnya tidak mempertimbangkan panjang pilar . Namun, pengaruh panjang pilar terhadap kedalaman gerusan ada batasnya. Batas ini dicapai saat panjang pilar (l), lebar (b) dengan sudut aliran (θ) 90° adalah 5 (Tabel 2.1).

- **Kedalamaman Aliran**

Kedalaman aliran berpengaruh langsung terhadap kedalaman gerusan, hubungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.8, di mana pada penelitian ini kedalaman aliran (y) yang ($y_1 < y_2 < y_3 < y_4 < y_5 < y_6$), akibat perbedaan kedalaman tersebut gerusan yang terjadi juga berbeda. Menurut beberapa peneliti bahwa efek kedalaman aliran bagi kedalaman gerusan masih diperdebatkan. Oleh Larsen dan Toch (1956) seperti ditunjukkan pada persamaan (2.7), menyebutkan bahwa parameter dominan yang mempengaruhi gerusan adalah lebar pilar bukan kedalaman aliran. Kandasamy (1989) dan Melville (1997) menyimpulkan bahwa untuk aliran yang dalam, kedalaman erosi meningkat secara proporsional dengan lebar pilar tapi hal tersebut tidak tergantung pada kedalaman aliran. Menurut Shen (1969) persamaan (2.8) bahwa efek kedalaman aliran sangat sedikit pada kedalaman gerusan. Di air dangkal Etterma (1980) menjelaskan bahwa meningkatnya kedalaman aliran mengurangi pengaruh kedalaman dan akhirnya menjadi tidak signifikan. Melville (1997) menyebutkan bahwa kedalaman gerusan naik seiring dengan kedalaman aliran dan lebar pilar.

- **Tipe pilar**

Tipe pilar yang sering digunakan adalah tipe bulat dan *elliptic*, dari hasil penelitian pada Tabel 5.8, dapat dilihat kedalaman gerusan pada pilar berujung bulat (karena tipe pilar berujung kotak/runcing jarang digunakan maka pada penelitian ini tidak diuji). Tetapi menurut Richardson dkk (1990) menyebutkan bahwa tidak ada efek dari jenis pilar berujung bulat dan silinder. Efek maksimum jenis pilar $K = 1,2$ untuk ujung kotak dan minimum $K = 0,9$ untuk ujung runcing. Menurut Froehlich (1988) memberikan $K = 1,3$ untuk ujung kotak (maksimum), $K = 0,7$ untuk ujung runcing (minimum). Sedangkan menurut Simons (1977) memberikan nilai K lebih besar, $K = 2,0$ untuk ujung kotak (maksimum) dan $K = 1,2$ untuk

ujung runcing. Sedangkan formula lainya Melville (1997) memberikan nilai K sama yang diberikan Richardson dkk (1990), untuk formula Laursen & Toch (1956), Shen (1969), Froehlich (1988) tidak memperhitungkan nilai K . Dengan demikian bentuk pilar memiliki efek yang penting pada gerusan. Untuk tipe pilar pada bagian belakangnya bulat/lancip dapat mengurangi kekuatan *vorteks* (tapal kuda) serta akan mengurangi kedalaman gerusan pada bagian belakang pilar karena akan terjadi pengendapan sedimen. Pada tipe pilar bulat, pada bagian depan pilar kedalaman gerusan maksimum sekitar 20 % lebih besar daripada tipe pilar yang tajam 10 % (Richardson dkk., 1990).

- **Arah aliran**

Menurut (Richardson dkk.,1990), Seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.1, arah aliran tidak memiliki pengaruh jika sudut benturan aliran $\theta = 0$. namun meningkatnya sudut aliran dan naiknya l/b akan menambah kedalaman gerusan. Kemudian merekomendasikan bahwa nilai lima (5) harus merupakan nilai maksimum untuk penempatan/arah.

- **Ukuran Endapan**

Menurut Melville (1997) mempertimbangkan ukuran endapan, Melville menyebutkan bahwa kedalaman erosi naik seiring dengan ukuran endapan relatif sampai $b/d_{50} = 25$. Bila $b/d_{50} > 25$ maka tidak akan memberikan pengaruh lagi karena koefisien endapan ($K_d = 1$). Semakin besar ukuran material dasar, semakin kecil pengaruhnya terhadap gerusan, sehingga hanya kedalaman aliran (y) yang akan berpengaruh. Ukuran material dasar akan menentukan terjadinya gerusan di sekitar pilar, material dasar yang halus (lumpur dan lempung) akan menyebabkan kedalaman gerusan semakin dalam atau lebih dalam bila material dasar dari pasir. Hal ini benar karena ada faktor kohesi pada lumpur atau lempung. Efek kohesi akan menentukan lamanya waktu untuk gerusan mencapai maksimum. Dengan material dasar berupa pasir kedalaman gerusan maksimum bisa di

ukur dengan jam. Tapi dengan material dasar kohesif (lumpur dan lempung) mungkin butuh hari, bulan, bahkan tahun untuk mencapai kedalaman gerusan maksimum.

- **Kecepatan aliran**

Kecepatan yang meningkat akan menambah kedalaman gerusan, semakin besar kecepatannya semakin dalam gerusannya. Dari Tabel 5.8, dapat dijelaskan bahwa meningkatnya debit aliran berarti meningkat pula kecepatan aliran serta akan menentukan tipe aliran yaitu laminar atau turbulen. Dengan demikian besarnya kecepatan akan mempengaruhi kedalaman erosi.

c. Lama pengaliran (*running*)

Pada Bab 5.1.4, dapat dilihat Tabel 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, serta beberapa grafik bahwa gerusan akan terjadi selama waktu tertentu. Tetapi kedalaman gerusan tersebut kemudian akan mencapai keadaan konstan setelah waktu tertentu. Pada Gambar 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 dapat dilihat dari setiap tipe pilar mencapai gerusan konstan setelah lama pengaliran (*running*) 1 (satu) jam. Selanjutnya perkembangan kecepatan akan mempengaruhi proses masuk dan keluarnya sedimen pada lobang gerusan, tetapi kedalaman gerusan pada dasarnya tetap konstan. Sehingga rerata kedalaman gerusan pada kondisi kesetimbangan (*equilibrium scour dept*) menjadi agak kecil dari kedalaman gerusan maksimum. Dalam hal ini telah pada Gambar 2.3, bahwa gerusan kondisi setimbang (*equilibrium scour dept*) lebih kecil dari pada gerusan maksimum (*maximum scour dept*) tetapi lebih besar dari pada gerusan minimum (*live bed scour*).

d. Perbandingan Kedalaman gerusan

Dari hasil penelitian laboratorium (d.lab), kemudian dianalisis statistik dapat dicari persamaan gerusan laboratorium. Dari beberapa persamaan tersebut didapat kedalaman gerusan hasil perhitungan, kemudian dari hasil

perhitungan (d_p) tersebut dibandingkan dengan hasil pengukuran (d_{lab}). Adapun perbandingan tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, Gambar 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 serta Lampiran B.8, B.9.

Berdasarkan beberapa tabel dan gambar tersebut dapat dijelaskan bahwa :

- Persamaan Melville (1990) memberikan nilai d_s tertinggi diikuti Laursen dan Toch (1956) bila dibandingkan dengan kedalaman gerusan hasil pengukuran
- Sedangkan persamaan Simons (1977) memberikan nilai d_s terendah.
- Untuk Persamaan laboratorium (Pers. 5.4) memberikan nilai d_s , yang hampir sama dengan nilai terukur (hasil laboratorium), diikuti Richardson dkk (1990), Froecllich (1988) dan Shen (1969).
- Berdasarkan Lampiran B.8 dan B.9, Persamaan laboratorium memberikan nilai selisih gerusan (Δd_s) dan nilai rasio gerusan (d_r) paling mendekati hasil pengukuran (penelitian). Sehingga bila dibandingkan dari beberapa persamaan yang ada, Persamaan laboratorium (Pers.5.4) lebih mendekati hasil pengukuran dibandingkan Richardson dkk (1990) dan Melville (1997).

e. Uji persamaan dengan analisis regresi

Hasil perhitungan kedalaman gerusan dari persamaan yang ada kemudian dilakukan analisis regresi (Tabel 5.15 dan Gambar 5.14). Secara grafis dapat dilihat perbandingan kedalaman gerusan hasil perhitungan kedalaman gerusan hasil pengukuran dari laboratorium, dengan demikian dari gambar tersebut dapat dijelaskan bahwa :

- Persamaan Melville (1990) memberikan nilai d_s tertinggi diikuti Laursen dan Toch (1956) di atas garis perfect.
- Sedangkan persamaan Simons (1977) dan Shen (1969) memberikan nilai d_s terendah di bawah garis perfect.
- Untuk Persamaan laboratorium (Pers. 5.4) memberikan nilai d_s , yang hampir sama dengan nilai terukur sehingga hampir semua perhitungan berimpit garis perfect.

- Persamaan Richardson dkk (1990), Froehlich (1988) hasil perhitungan hampir mendekati garis perfect dengan besarnya simpangan lebih besar dibandingkan simpangan hasil perhitungan dari persamaan laboratorium.

f. Uji persamaan dengan data lapangan

Kemudian beberapa persamaan gerusan tersebut diuji dengan menggunakan 22 data lapangan Tabel 5.16. Berdasarkan Gambar 5.15 dapat dijelaskan bahwa kedalaman gerusan yang dihitung dengan menggunakan Persamaan laboratorium, Laursen & Toch (1956) hasilnya lebih besar dan mendekati kedalaman gerusan data lapangan, demikian juga hasil perhitungan dari persamaan (Richardson dkk., 1990 / CSU).

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian gerusan pada pilar jembatan ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Perbedaan pola aliran yang terjadi antara pilar *elliptic* dan pilar bulat secara visual tidak jauh berbeda (pada aliran searah).
2. Faktor-faktor yang mempengaruhi kedalaman gerusan lebar pilar (b), panjang pilar (l), kedalaman aliran (y), material dasar (d_{50}) dan kecepatan aliran (U).
3. Kedalaman gerusan akan mencapai keadaan konstan (*equilibrium scour dept*) setelah lama pengaliran (*running*) 1 (satu) jam.
4. Dari hasil perhitungan beberapa persamaan gerusan memberikan nilai gerusan yang bervariasi.
5. Berdasarkan uji persamaan menggunakan data laboratorium dan data lapangan, bahwa Persamaan Richardson, dkk (CSU/1990) dan Persamaan Laboratorium yang diusulkan hasilnya lebih mendekati dibandingkan dengan persamaan lainnya.
6. Apabila tersedia data lapangan secara lengkap (b , y , U/Fr) Persamaan Laboratorium yang diusulkan cocok untuk digunakan.
7. Apabila data lapangan tidak lengkap, Melville (1997) dapat digunakan karena memberikan perhitungan kedalaman gerusan yang lebih besar dari pada nilai terukur (laboratorium).

6.2. Saran

1. Penelitian lapangan yang lebih teliti harus dilakukan agar permasalahan yang kompleks dapat diperhitungkan.
2. Untuk penelitian lebih lanjut perlunya pengukuran secara elektronik, sehingga data yang terukur lebih teliti.
3. Pada dasarnya penelitian ini merupakan langkah awal dari studi gerusan lainnya.
4. Tidak menutup kemungkinan untuk meneliti masalah proteksi pada gerusan.
5. Perlu diperdalam penelitian masalah yang menyangkut faktor terjadinya gerusan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bormann, Noel E., 1989. *Prediction Local Scour for Design of Hydraulic Structures in Alluvial Channels*. Proceedings of the Second International Symposium on Design of Hydraulic Structures-Design of Hidraulic Structures 89. Ed. Maurice Albertson and Rahim A.Kia, Fort Collins, CO/26-29 Juni 1989.
- Breasures, H.N.C., dan Raudkivi, A.J., 1991. *Scouring*, IAHR Hydraulic Structure Design Manual, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Chow V.T., 1992. *Hidrolika Saluran Terbuka* (Terjemahan), Erlangga, Jakarta.
- Chin, C.O., 1985. *Stream Bed Armauring*. Univ. of Auckland, N.Z., Dept. of Civil Engng. Rep. No. 403.
- Dake, J.M.K., 1983. *Hidrolika Teknik*, (terjemahan, 1985), Edisi Kedua, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Etterma, R.E., 1980. *Scours at Bridge Piers*. Rep. No. 236, School of Engineering, the University of Aucjland, New Zealand.
- French, R.H., 1985. *Open Chanel Hydraulics*. McGraw Hill Book Company, New York.
- Froehlich, D.C., 1988. *Analysis of Onsite Measurement of Scours at Piers*. Hydraulic Engineering – Proceedings of 1988 National Conference, American Society of Civil Engineering, p. 534 – 539.
- Graf. W.H., 1995. *Pier Scour A Review*, Rapport Annuel, Laboratoire de Recherches Hydrauliques, Ecole Polytechnique Federale, Lausanne, Switzerland.
- Hariandja, B., 1987. *Konsep-konsep Probabilitas dalam Perencanaan dan Perancangan Rekayasa* (Terjemahan), Erlangga, Jakarta.
- Johnson, Peggy A., 1995. *Comparison of Pier Scour Equations Using Filed Data*. Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Enggineer – Water Resources Engineering Division Vol. 121 No. 8 August , p. 625 – 629.
- Julien, P.Y., 1995. *Erosion and Sedimentation*. Cambredge University Press.
- Kandasamy, J.K., 1989. *Abutmen Scaour*, University of Ouklend. Dep of Civil Laboratorium National d'hydroulique, Chatan France, Eng. No.458.
- Kodoatie, Robert J., 2000. *Hidroulika Saluran Terbuka*, Andi Offset, Yogyakarta.

- Kodoatie, Robert J., 2000. *Comparison of Selected Pier Scour Equations Using Filed Data*, Fakultas Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Semarang, Pilar Vol.9, No.1.
- Laursen, E.M dan Toch. 1956. *Scour Araund Bridge Piers and Abutments*, Iowa Highway, Res Board, Buletin No.4. 60.pp.
- Landers, M.N., and Mullers, D.S., 1995. *Channel Scours at Bridges in the United States*. Federal Highway Administration Publication FHWA-IP-95 xxx 94p.
- McIntosh, J.L., 1989. *Use of Scour Prediction Formula*. Proceeding of the Bridge Scour Symposium: Federal Highway Administration Publication FHWA-RD-90-035, p. 78-100.
- Melville, B.W. dan Raudkivi, A.J., 1996. *Effects of Foundation Geometry on Bridge Pier Scour*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 122, No. 4.
- Melville, Bruce W., 1997. *Pier and Abutment Scour*. Integrated Approach. Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers – Water Resources Engineering Division Vol. 123 No. 2, February 97 p. 125-136.
- Neill, C.R., 1964. *Mean velocity criterion for scour of coarse uniform bed material*. Proc. 12th Congress I AHR, Fort Collins, 3; 46-54.
- Ragunath, H.M., 1967. *Dimensional Analysis And Hydraulic Model Testing*. New York.
- Ratjaratnam, N., 1987. *Engineering Fluid Mechanics*. Civil Eng. Dept Faculty of Engineering, Alberta Edmonton Canada.
- Raudkivi, A.J., 1991. *Loose Boundary Hydraulics*, University of Aucjland, New Zealand.
- Richardson, E.V., Simons, D.B. and Julien, P.Y., 1990. *Highway in the River Environment*. Federal Highway Administration Publication FHWA-HI 90-106.719p.
- Shen, H.W., 1971. *Modeling of Rivers*, Wiley, New York.
- Shen, HW, Scneider, V.R. and Karaki, S., 1969. *Local Scour Around Bride Piers*. proceeding, American Society of Civil Engineers, 95(6) p. 1919-1940.
- Simon, D.B., and F. Sentruk, Fuad., 1992. *Sedimen Transport Technology, Water and Sediment Dynamics*, Water Resources Publication, Lattleton, CO.

Simon, D.B., and F. Sentruk,. 1977. *Sedimen Transport Technology*, Water Resources Publication Fort Collins, Colorado, USA.

Triatmodjo, B., 1992. *Mekanika, Fluida dan Hidrolika*, Universiats Gadjah Mada, Yogyakarta.

Yalin, M.S., 1972. *Mechanichis of Sediment Transport*, Pergamon Perss, New York.