

**STUDI KONFIGURASI DASAR SUNGAI DENGAN MATERIAL
DASAR KERIKIL PADA TIKUNGAN DENGAN MODEL FISIK**

*THE STUDY WITH PHYSICAL MODEL OF RIVER BASE
CONFIGURATION WITH GRAVEL BASE MATERIALS AT THE
BENDS*

LUTFI HAIR DJUNUR



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2013**

**STUDI KONFIGURASI DASAR SUNGAI DENGAN MATERIAL
DASAR KERIKIL PADA TIKUNGAN DENGAN MODEL FISIK**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai
Gelar Magister Teknik

Program Studi
Teknik Sipil

Disusun dan Diajukan Oleh

LUTFI HAIR DJUNUR

Kepada

**PROGRAM PASCA SARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2013**

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Lutfi Hair Djunur
Nomor Mahasiswa : P2301210008
Program Studi : Teknik Sipil
Konsentrasi : Keairan

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

Makassar, 14 Mei 2013

Yang menyatakan,

Lutfi Hair Djunur

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT, karena dengan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan tesis dengan judul “Studi Konfigurasi Dasar Sungai Dengan Material Dasar Kerikil Pada Tikungan Dengan Model Fisik”.

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

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam rangkaian kegiatan penelitian dan penulisan tesis ini tidak akan terlaksana sebagaimana yang diharapkan tanpa adanya bantuan, arahan, dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak, untuk itu pada kesempatan ini perkenankan penulis menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Prof. Dr. Ir. H. Muh. Saleh Pallu, M. Eng dan Dr. Ir. M. Arsyad Thaha, MT yang telah membimbing penulis dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan tesis.
2. Dr. Rudy Djameluddin, ST., M.Eng selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin Makassar.
3. Para Dosen dan Staff yang telah membantu dan membimbing penulis selama mengikuti pendidikan pada Program Studi S2 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.
4. Ayahanda Djunaid Wadda, BA dan Ibunda Nurhidayah Lodang tercinta, Saudara-saudaraku Abdul Halis Djunaid, Martinus Djunaid, Abdul Khafizul Khair Djunaid, Abul Khair Djunaid dan Fajriani Djunaid (*My little angel*) serta yang terus memberikan dukungan dan semangat dalam menyelesaikan tesis ini.
5. Paman Drs. Muzakkir, M.Pd.I dan Tante Hermayani Lodang tercinta, Adik – Adikku Ihsan MZ, Ishaq MZ, Muhammad Irfan MZ dan Lutfiah Khairah MZ (*Si Cantik*) yang

selalu ada disetip detik, menit, jam, hari bahkan tahun dalam proses penulisan tesis ini.

6. Rekan-rekan mahasiswa Pascasarjana Teknik Sipil Keairan 2010,terkhusus Hamzah Al Imran, Yuni Damayanti dan Sahabatku Mahlia Mahlan Humairah, M. Agusalm serta saudara-saudara seperjuangan dilaboratorium Kasmawati, Farmawati Fattah, Sahril J, Jamin Rusdin, Sri Utami Pratiwi, St Maryani dan semua pihak yang telah membantu penulis baik dalam bentuk materiil maupun immateriil, semoga Allah SWT membalas budi baik dengan amalan yang setimpal.

Akhir kata, Penulis mengharapkan tesis ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan khususnya dibidang teknik sungai. Amin.

Makassar, 14 Mei 2013
Penulis

Lutfi Hair Djunur

ABSTRAK

LUTFI HAIR DJUNUR. *Studi Konfigurasi Dasar Sungai Dengan Material Dasar Kerikil Pada Tikungan Dengan Model Fisik* (dibimbing oleh **Muh. Saleh Pallu** dan **M. Arsyad Thaha**).

Tujuan penelitian ini untuk mengkaji perubahan dasar sungai pada tikungan sungai akibat perubahan parameter aliran.

Penelitian ini dilakukan dengan uji model eksperimental di laboratorium dengan 4 macam variasi debit (Q), 4 variasi kecepatan (v), 4 variasi waktu (t), 4 variasi tinggi aliran (h_t) dengan variasi sudut (α) dan jari-jari tikungan (R_c). Pada penelitian ini menggunakan material dasar pasir sedang, dimana 50% material lolos lewat saringan atau $d_{50} = 0,47$ mm dengan kepadatan $1,47$ gram/cm³ yang ditaburkan di sepanjang saluran tersebut. Kecepatan rata-rata pada percobaan ini bervariasi yaitu $v = 0,65$ cm/dtk, pada $\alpha = 40^\circ$ dan $v = 0,55$ cm/dtk pada $\alpha = 60^\circ$.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa gerusan dan endapan terbesar terjadi pada sudut dan jari-jari tikungan yang kecil. Dengan bertambahnya debit, bilangan Froude dan kecepatan aliran, maka volume gerusan menjadi lebih besar. Pada sudut $\alpha = 40^\circ$ volume gerusan sebesar 16774 cm³ atau 68,96 % dan endapan sebesar 16011 atau 51,18 % untuk $R_c = 40$ cm. Sedangkan pada $R_c = 80$ cm volume gerusan sebesar 26910 cm³ atau 61,28 % dan endapan sebesar 24405 cm³ atau 49,63%.

Kata Kunci : Pola gerusan, tikungan, volume gerusan

ABSTRACT

LUTFI HAIR DJUNUR. *The Study With Physical Model of River Base Configuration with Gravel Base Materials at the bends. (Supervised by Muh. Saleh Pallu and M. Arsyad Taha).*

The purpose of this study is to assess changes in the riverbed on river bends due to changes in the flow parameters.

The research was conducted by testing experimental models in laboratoium with 4 kinds of variations of the model discharge (Q), 4 variation of velocity (v), 4 variation of duration (t), 4 high-flow variations (ht) with variation of angle (α) and the radius bend (Rc). This study used basic materials are sand, where 50% of the material passes through the filter or $d_{50} = 0,47$ mm with a density of 1.47 gram/cm³ sown along the channel. The average velocity in this experiment varies the $v = 0,65$ cm/sec, at $\alpha = 40^0$ and $v = 0,55$ cm/sec at $\alpha = 60^0$.

The results showed that the scour and deposition occurred at an angle and bend radius is small. With increasing discharge, Froude number and flow velocity, the scour volume becomes larger. At an angle $\alpha = 40^0$ 16774 cm³ or 68,96% and deposition amounts to 16011 or 51,18%, for Rc = 40 cm. While at Rc = 80 cm volume of scious is 26910 cm³ or 61,28% and deposition amounts to 24405 cm³ or 49.63%.

Keywords: Pattern scour, bend, volume scour

DAFTAR ISI

	halaman
HALAMAN SAMBUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERYATAAN KEASLIAN TESIS	iii
PRAKATA.....	iv
ABSTRAK	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR SIMBOL	xviii
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	3
D. Manfaat Penelitian	3
E. Batasan Masalah	4
F. Sistematika Penulisan	5
G. Hipotesa Penelitian	6
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	8
A. Hasil Penelitian Terdahulu	8
B. Klasifikasi Aliran	9
C. Saluran Trapesium	11
D. Kemiringan kritik Dasar Salura	12

E. Debit Pengaliran	13
F. Gaya Geser Pada Dasar Saluran	13
G. Prilaku Sungai	14
H. Tikungan Sungai	15
I. Arah Aliran Sungai	17
J. Degradasi dan Agradasi.....	19
K. Penggerusan dan Pengendapan	22
L. Transport Sedimen	25
M. Gerusan dan Pengendapan Pada Lengkung Sungai	28
N. Material Pembentukan Dasar Sungai	30
O. Kerikil Sungai	32
P. Model Fisika	32
Q. Skala Wentworth	38
R. Bilangan Tak Berdimensi	39
S. Kerangka Pikir Penelitian	41
BAB III. METODE PENELITIAN	42
A. Tempat dan Waktu Penelitian	42
B. Jenis Penelitian dan Sumber Data	42
C. Bahan dan Alat	43
D. Variabel Yang Diteliti ,.....	45
E. Perancangan Model	46
F. Langkah – langkah Penelitian	49
G. Penentuan Konfigurasi Dasar Sungai	49
H. Pencatatan Data	54
I. Kalibrasi Alat Ukut Thomson	59
J. Simulasi Penelitian ,	63
K. Analisa Data ,	64

L. Diagram Proses Penelitian Di Laboratorium	65
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	66
A. Data Hasil Peneliti	66
B. Analisa Hasil Penelitian	81
C. Pembahasan Hasil Penelitian ,	115
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	154
A. Kesimpulan ,	154
B. Saran ,	155
DAFTAR PUSTAKA	157
LAMPIRAN	159

DAFTAR TABEL

Nomor	halaman
Tabel 1. Proses Penggerusan dan Pengendapan	23
Tabel 2. Perbandingan Model Terdistorsi dan Tak Terdistorsi	388
Tabel 3. Dimensi Saluran	48
Tabel 4. Analisa Kepadatan Dasar Sungai Model	53 53
Tabel 5. Skala Wentwort	54
Tabel 6. Kecepatan Aliran ($\alpha = 40^0$)	67
Tabel 7. Kecepatan Aliran ($\alpha = 60^0$)	68
Tabel 8. Debit Aliran ($\alpha = 60^0$)	68
Tabel 9. Debit Aliran ($\alpha = 40^0$)	69
Tabel 10. Hasil Perhitungan Bilangan <i>Reynold</i> dan Angka <i>Froude</i> ($\alpha = 60^0$)	69 69
Tabel 11. Hasil Perhitungan Bilangan <i>Reynold</i> dan Angka <i>Froude</i> ($\alpha = 40^0$)	70
Tabel 12. Hasil Perhitungan dengan Metode Ripley Pada ($\alpha 40^0$), Rc 40 cm dan R ₀ 70 cm	71
Tabel 13. Hasil Perhitungan dengan Metode Ripley Pada ($\alpha 40^0$), Rc 80 cm dan R ₀ 110 cm	71
Tabel 14. Hasil Perhitungan dengan Metode Ripley Pada ($\alpha 60^0$), Rc 40 cm dan R ₀ 70 cm	72

Tabel 15. Hasil Perhitungan dengan Metode Ripley Pada ($\alpha 60^0$), Rc 40 cm dan R ₀ 70 cm	73 75	
Tabel 16. Hasil Perubahan Dasar Saluran pada ($\alpha 40^0$)	75	75
Tabel 17. Hasil Perubahan Dasar Saluran pada ($\alpha 60^0$)	75	75
Tabel 18. Rekapitulasi Volume Gerusan ($\alpha = 40^0$)	77	77
Tabel 19. Rekapitulasi Volume Endapan ($\alpha = 40^0$)	78	78
Tabel 20. Rekapitulasi Volume Gerusan ($\alpha = 60^0$)	79	79
Tabel 21. Rekapitulasi Volume Endapan ($\alpha = 60^0$)	80	80
Tabel 22. Gerusan Rata-rata ($\alpha = 40^0$)	88	88
Tabel 23. Gerusan Rata-rata ($\alpha = 60^0$)	88	88
Tabel 24. Penentuan Nilai α β τ	149	149
Tabel 25. Penentuan Bilangan Tak Berdimensi (π_i)	150	150
Tabel 26. Perbandingan Gerusan antara Metode Ripley dan Hasil Laboratorium		152

DAFTAR GAMBAR

Nomor		halaman
Gambar 1.	Saluran bentuk trapezium	
Gambar 2.	Garis energi dan profil aliran disekitar lengkung	15
Gambar 3.	Penampang sungai empiris pada tikungan sungai	15
Gambar 4.	Sketsa Aliran pada Belokan	16
Gambar 5.	Proses terjadinya agradasi dan degradasi	17
Gambar 6.	Proses terjadinya degradasi	18
Gambar 7.	Proses terjadinya aggradasi	20
Gambar 8.	Diagram Shield	21
Gambar 9.	Kemiringan melintang dasar sungai	25
Gambar 10.	Kerikil Sungai	29
Gambar 11.	Kerangka Pikir Penelitian	32
Gambar 12.	Gambar Flume	41
Gambar 13.	Denah Skema Model Sungai pada Tikungan 60°	44
Gambar 14.	Denah Skema Model Sungai Pada Tikungan 40°	46
Gambar 15.	Detail Saluran	47
Gambar 16.	Potongan Profil Pengukuran pada Tikungan 60°	47
Gambar 17.	Potongan Profil Pengukuran pada Tikungan 40°	50
Gambar 18.	Grafik Analisa Saringan Material Dasar Sungai	51
Gambar 19.	Pengukuran Elevasi Dasar Sungai Kondisi Awal	56 52
Gambar 20.	Pengukuran Elevasi Muka Air	57 56
Gambar 21.	Pengukuran Kecepatan Aliran	58 57
Gambar 22.	Pengukuran Elevasi Dasar Sungai Sesudah Pengaliran	58 58
Gambar 23.	Bagan Aliran (Flow Chart)	65 58
Gambar 24.	Foto Gerusan di Tikungan 40°	65

Gambar	25. Foto Gerusan di Tikungan 60^0	74
Gambar	26. Grafik Perubahan Penampang Saluran pada Tikungan 40^0 dan Jari-jari 40^0 dengan Variasi Debit	84
Gambar	27. Grafik Perubahan Penampang Saluran pada Tikungan 40^0 dan Jari-jari 80^0 dengan Variasi Debit	87
Gambar	28. Grafik Perubahan Penampang Saluran Rata-rata pada Tikungan 40^0 dan Jari-jari 40^0 dengan Variasi Waktu	91
Gambar	29. Grafik Perubahan Penampang Saluran Rata-rata pada Tikungan 40^0 dan Jari-jari 80^0 dengan Variasi Waktu	94
Gambar	30. Grafik Perubahan Penampang Saluran pada Tikungan 60^0 dan Jari-jari 40^0 dengan Variasi Debit	97
Gambar	31. Grafik Perubahan Penampang Saluran pada Tikungan 60^0 dan Jari-jari 80^0 dengan Variasi Debit	100
Gambar	32. Grafik Perubahan Penampang Saluran Rata-rata pada Tikungan 60^0 dan Jari-jari 40^0 dengan Variasi Debit	100
Gambar	33. Grafik Perubahan Penampang Saluran Rata-rata pada Tikungan 60^0 dan Jari-jari 80^0 dengan Variasi Debit	103
Gambar	34. Kontur pola Gerusan disekitar Tikungan 40^0 , R_c 40 cm	106
Gambar	35. Isometri pola Gerusan disekitar Tikungan 40^0 , R_c 40 cm	107
Gambar	36. Kontur pola Gerusan disekitar Tikungan 40^0 , R_c 80 cm	108
Gambar	37. Isometri pola Gerusan disekitar Tikungan 40^0 , R_c 80 cm	109

Gambar	38. Kontur pola Gerusan disekitar Tikungan 60° , $R_c = 40$ cm	111
Gambar	39. Isometri pola Gerusan disekitar Tikungan 60° , $R_c = 40$ cm	111
Gambar	40. Kontur pola Gerusan disekitar Tikungan 60° , $R_c = 80$ cm	113
Gambar	41. Isometri pola Gerusan disekitar Tikungan 60° , $R_c = 80$ cm	113
Gambar	42. Ilustrasi kecepatan aliran maksimum pada area penelitian	116
Gambar	43. Grafik Hubungan Antara kedalaman aliran dan kecepatan 60°	116
Gambar	44. Grafik Hubungan Antara kedalaman aliran dan kecepatan 40°	117
Gambar	45. Grafik Hubungan Antara kedalaman Aliran dan volume gerusan $\alpha = 40^{\circ}$ dengan $R_o = 40$ cm	119
Gambar	46. Grafik Hubungan Antara Kedalaman Aliran dan Volume endapan $\alpha = 40^{\circ}$ dengan $R_o = 40$ cm	120
Gambar	47. Grafik Hubungan Antara kedalaman dan volume gerusan $\alpha = 40^{\circ}$ dengan $R_o = 80$ cm	121
Gambar	48. Grafik Hubungan Antara Kedalaman Aliran dan Volume endapan $\alpha = 40^{\circ}$ dengan $R_o = 80$ cm	122
Gambar	49. Grafik Hubungan Antara kedalaman dan volume gerusan $\alpha = 60^{\circ}$ dengan $R_o = 40$ cm	124
Gambar	50. Grafik Hubungan Antara Kedalaman Aliran dan Volume endapan $\alpha = 60^{\circ}$ dengan $R_o = 40$ cm	125
Gambar	51. Grafik Hubungan Antara kedalaman dan volume gerusan $\alpha = 60^{\circ}$ dengan $R_o = 80$ cm	127
Gambar	52. Grafik Hubungan Antara Kedalaman Aliran dan Volume endapan $\alpha = 60^{\circ}$ dengan $R_o = 80$ cm	127

Gambar	53. Grafik Hubungan Antara kecepatan dan volume gerusan $\alpha = 40^\circ$ dengan $R_o = 40$ cm	130
Gambar	54. Grafik Hubungan Antara Kecepatan Aliran dan volume endapan $\alpha = 40^\circ$ dengan $R_o = 40$ cm	130
Gambar	55. Grafik Hubungan Antara kecepatan dan volume gerusan $\alpha = 40^\circ$ dengan $R_o = 80$ cm	132
Gambar	56. Grafik Hubungan Antara Kecepatan Aliran dan Volume endapan $\alpha = 40^\circ$ dengan $R_o = 80$ cm	135
Gambar	57. Grafik Hubungan Antara kecepatan dan volume gerusan $\alpha = 60^\circ$ dengan $R_o = 40$ cm	135
Gambar	58. Grafik Hubungan Antara Kecepatan Aliran dan Volume endapan $\alpha = 60^\circ$ dengan $R_o = 40$ cm	137
Gambar	59. Grafik Hubungan Antara kecepatan dan volume gerusan $\alpha = 60^\circ$ dengan $R_o = 40$ cm	138
Gambar	60. Grafik Hubungan Antara Kecepatan Aliran dan Volume endapan $\alpha = 60^\circ$ dengan $R_o = 40$ cm	140
Gambar	61. Grafik Hubungan Antara Jarak Melintang dari Pusat dan Presentase gerusan $\alpha = 40^\circ$ dengan $R_o = 40$ cm	140
Gambar	62. Grafik Hubungan Antara Jarak Melintang dari pusat dan Presentase endapan $\alpha = 40^\circ$ dengan $R_o = 40$ cm	142
Gambar	63. Grafik Hubungan Antara Jarak Melintang dari Pusat dan Presentase gerusan $\alpha = 40^\circ$ dengan $R_o = 80$ cm	143
Gambar	64. Grafik Hubungan Antara Jarak Melintang dari Pusat dan Presentase endapan $\alpha = 40^\circ$ dengan $R_o = 80$ cm	145
Gambar	65. Grafik Hubungan Antara Jarak Melintang dari Pusat dan Presentase gerusan $\alpha = 60^\circ$ dengan $R_o = 40$ cm	145
Gambar	66. Grafik Hubungan Antara Jarak Melintang dari Pusat dan Presentase endapan $\alpha = 60^\circ$ dengan $R_o = 40$ cm	147

Gambar 67. Grafik Hubungan Antara Jarak Melintang dari Pusat dan Presentase gerusan $\alpha = 60^\circ$ dengan $R_o = 80$ cm	147
Gambar 68. Grafik Hubungan Antara Jarak Melintang dari Pusat dan Presentase endapan $\alpha = 60^\circ$ dengan $R_o = 80$ cm	148
Gambar 69. Grafik Hubungan $\frac{Vg}{h^3}$ terhadap $\frac{U}{h^{0,5}g^{0,5}}$	151
Gambar 70. Grafik perbandingan Metode Ripley dan Hasil Laboratorium $\alpha = 40^\circ$	152
Gambar 71. Grafik perbandingan Metode Ripley dan Hasil Laboratorium $\alpha = 60^\circ$	152

DAFTAR SIMBOL DAN NOTASI

SIMBOL	ARTI
A	Luas Penampang
A_m	Luas Penampang Model
A_1, A_2, \dots	Variabel Lain
a	Perecepatan Lateral
B_D	Variabel dinamis
B_G	Varibel geometris
B_K	Variabel kinetic
b	Lebar dasa sungai
b_m	Lebar dasar sungai model
C	Konstanta perputaran gerak pusaran bebas
C_d	Koefisien debit alat Thompson
D	Kedalaman Hidrolik
E	Energi spesifik
f	Fungsi
F_r	Bilangan Froude
g	Percepatan gravitasi
H	Tinggi Pengukuran analisa data
H_{rep}	Elevasi acuan pengukuran dasar sungai
H_t	Tinggi aliran pada alat Thompson
h	Tinggi aliran pada sungai
I	Inersia
i	Kemiringan sungai arah memanjang
K	Konstanta
L	Panjang horizontal
L_m	Panjang model
LH	Skala horizontal
LV	Skala vertikal
M	Massa
N	Jumlah Putaran alat curren meter per 60 dt
N_1	Jumlah Putaran alat curren meter per 30 dt

n_a	Skala percepatan model
n_g	Skala gravitasi
n_h	Skala tinggi model
n_L	Skala panjang model
n_T	Skala waktu model
n	Koefisien manning
\bar{P}	Keliling basah
Q	Debit Aliran
Q_m	Debit model
R	Jari-jari hidrolis
R_e	Bilangan Reynold
R_c	Jari-jari lingkaran
T	Tebal permukaan air
t	Waktu
v	Kecepatan aliran pada sungai
v_m	Kecepatan aliran pada model
X	Variabel bebas
x	Absis
Y	Variabel tak bebas terhadap X
y	Kedalaman gerusan
U_s	Kecepatan geser butiran
U_{*c}	Kecepatan rata-rata geser
ρ_s	Rapat massa sedimen
ρ_w	Rapat massa air
Δ	$(\rho_s - \rho) / \rho$
τ	<i>Tegangan geser</i>
τ_c	Tengangan geser dasar kritis
τ_0	Tengangan geser awal
r_1	Jari-jari lengkung dalam
r_o	Jari-jari lengkung luar
Σ	Jumlah
θ	Besarnya sudut kemiringan talud
o	Besaran sudut

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pada sungai dengan alinemen tak linier, reaksi yang ditunjukkan aliran akan berbeda-beda, sesuai dengan kedalaman aliran yang bersangkutan. Pada aliran superkritis menunjukkan karakteristik pola gelombang bersilangan yang tidak teratur permukaannya, serta super elevasi yang berlebihan.

Menurut Thompson (1876) penyebab utama gejala aliran spiral adalah gesekan pada dinding saluran, gaya sentrifugal yang membelokkan partikel air yang bergerak dan distribusi kecepatan partikel yang terjadi pada saluran. Sungai maupun saluran merupakan salah satu badan air yang penting untuk memenuhi berbagai kebutuhan hidup manusia perlu memperoleh perhatian, agar dapat berfungsi sebagaimana mestinya.

Permasalahan sungai yang menarik untuk di amati adalah terjadinya perubahan morfologi sungai. Hal ini dapat terjadi secara alamiah maupun karena perlakuan yang ada disepanjang sungai misalnya adanya bendung, jembatan, dan kondisi alam yang tak dapat dihindarkan seperti adanya tikungan pada sungai. Akibat adanya aliran yang melengkung dan menelusuri tebing sungai bagian luar, akan mempengaruhi material tebing sungai bagian luar yang sering disebut

erosi. Erosi tanah terjadi melalui tiga tahapan, yaitu tahapan pelepasan partikel tunggal dari massa tanah dan tahapan pengangkutan oleh media yang erosif seperti halnya aliran air, dan pada kondisi keadaan energi tidak dapat mengangkut partikel maka akan terjadi tahap ke tiga yaitu pengendapan (Suripin, 2000).

Gerusan dan endapan terjadi karena adanya kecepatan aliran, debit aliran, kedalaman aliran, tegangan geser, dan kecepatan geser pada permukaan sungai (Fachrurazie, 2005).

Aliran air pada sungai disertai dengan angkutan sedimen. Sebagai konsekuensi dari angkutan sedimen, maka terjadinya proses gerusan dan deposisi. Bila sedimen yang masuk lebih kecil dari sedimen yang keluar, maka terjadi penurunan dasar sungai (degradasi), apabila terjadi sebaliknya, sedimen yang masuk lebih besar dari sedimen yang keluar maka akan terjadi kenaikan dasar sungai (agradasi).

Besarnya kekasaran dasar sungai dipengaruhi oleh butiran endapan dan butiran material di daerah gerusan. Akibat adanya endapan dan gerusan yang terjadi akan mengubah konfigurasi dasar sungai ditikungan, terlebih lagi pada sungai yang bahan dasarnya mudah tererosi baik dasar sungai maupun dinding tebing sungai. Hal ini dikarenakan akibat perubahan arus aliran air, dibagian sisi luar tikungan sering terjadi gerusan dan di bagian dalam akan terjadi endapan dan perubahan aliran air dapat mencakup adanya perubahan aliran, tinggi aliran serta lamanya pengaliran mempengaruhi terjadinya perubahan dasar sungai. Untuk

mengetahui perubahan yang terjadi pada kondisi dasar sungai di tikungan 40° dan 60° pada kondisi tidak ada angkutan sedimen (*clear water scour*) dan kondisi adanya angkutan sedimen (*live-bed scour*) sebagai kondisi paling kritis di alam. Perlu dilakukan pengujian dilaboratorium dengan model fisik. Pada uji model untuk mengetahui perubahan yang terjadi dilakukan dengan beberapa variabel tinggi aliran (h) dan jari-jari lengkung (R_c), durasi pengaliran (t) dan debit aliran (Q)

B. Rumusan Masalah

Masalah yang dibahas dalam penelitian ini adalah Perubahan konfigurasi dasar sungai ditikungan akibat adanya perubahan parameter aliran yang mencakup kecepatan aliran (v), debit aliran (Q), lamanya pengaliran (t) dan tinggi aliran (h).

C. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui perubahan dasar sungai akibat perubahan parameter aliran yaitu debit aliran (Q), kecepatan aliran (v), waktu pengaliran (t) dan tinggi aliran (h) melalui endapan dan gerusan dasar yang terjadi disekitar tikungan sungai, pada tikungan 40° dan 60° .

D. Manfaat Penelitian

Dengan selesainya penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan masukan untuk penanganan permasalahan gerusan dan endapan di

tikungan sungai oleh dinas/instansi terkait dan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik sungai.

E. Pembatasan Masalah

Dalam penelitian ini dilakukan pengujian dengan batasan pada sungai dengan model sebagai berikut:

1. Model terdiri dari bak sirkulasi, saluran penelitian, pompa air dan pipa sirkulasi.
2. Saluran berbentuk trapesium dengan lebar dasar saluran 50 cm dan kemiringan 1 : 2.
3. Skala ditentukan berdasarkan fasilitas laboratorium serta model yang akan digunakan.
4. Fluida yang digunakan dalam penelitian ini adalah air tawar.
5. Penelitian dasar memfokuskan pada kedalaman gerusan dan endapan disekitar tikungan $\theta = 40^{\circ}$ dengan jari-jari tikungan $R_{c1} = 40$ cm dan $R_{c2} = 80$ cm dan tikungan $\theta = 60^{\circ}$ dengan jari-jari tikungan $R_{c1} = 40$ cm dan $R_{c2} = 80$ cm. ,
6. Tinggi bukaan pintu $h_t = 3,5; 4,0; 4,5; \text{ dan } 5,0$ cm,
7. Durasi Pengaliran $t = 15, 30, 45$ dan 60 menit,
8. Aliran adalah tetap seragam (*steady uniform flow*)

9. Pada prototip, material dasar sungai adalah kerikil berukuran $d_{50} = 47$ mm. Untuk sedimen model digunakan pasir dengan d_{50} yang ditentukan dari skala model.
10. Ukuran butiran sedimen tidak dikaji.

F. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan tesis ini dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Bab I Pendahuluan

Dalam bab ini diuraikan mengenai hal-hal yang melatarbelakangi penelitian ini, dilanjutkan dengan uraian rumusan masalah, tujuan penelitian, kegunaan penelitian, ruang lingkup penelitian dan sistematika penulisan.

2. Bab II Tinjauan Pustaka

Pada bab ini diuraikan secara sistematis tentang teori, pemikiran dan hasil penelitian terdahulu yang ada hubungannya dengan penelitian ini. Bagian ini akan memberikan kerangka dasar yang komprehensif mengenai konsep, prinsip atau teori yang akan digunakan untuk pemecahan masalah.

3. Bab III Metode Penelitian

Bab ini menjelaskan waktu dan lokasi penelitian, bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian serta metode analisisnya secara terperinci.

4. Bab IV Analisa dan Pembahasan

Pada bab ini menjelaskan hasil-hasil yang diperoleh dari proses penelitian dan hasil pembahasannya. Penyajian hasil penelitian memuat deskripsi sistematis tentang data yang diperoleh. Sedangkan pada bagian pembahasan adalah mengolah data hasil penelitian dengan tujuan untuk mencapai tujuan penelitian.

5. Bab V Kesimpulan dan Saran

Pada bab ini dikemukakan kesimpulan dari seluruh rangkaian proses penelitian dan saran-saran terkait dengan kekurangan yang didapati dalam penelitian ini, sehingga nantinya dapat dijadikan acuan untuk penelitian selanjutnya.

G. Hipotesa Penelitian

Perubahan parameter aliran air pada sungai disertai dengan angkutan sedimen yang masuk dari saluran lurus lebih kecil dari sedimen yang keluar dari tikungan sungai, maka terjadi penurunan dasar sungai (degradasi), apabila terjadi sebaliknya, sedimen yang masuk dari saluran lurus lebih besar dari sedimen yang keluar dari tikungan maka akan terjadi kenaikan dasar sungai (agradasi).

Perubahan alur sungai akibat arus aliran air dari saluran lurus ke tikungan mengakibatkan degradasi dan agradasi dasar sungai yang relatif cepat dan pada suatu ketika mengalami keseimbangan kemiringan sungai.

Berdasarkan landasan teori dan tinjauan pustaka, parameter yang diperkirakan berpengaruh terjadinya degradasi dan aggradasi pada tikungan sungai adalah percepatan gravitasi (g), kehilangan tinggi akibat gesekan (h_f), kehilangan tinggi akibat perubahan penampang (h_c), kecepatan rerata (V), koefisien distribusi kecepatan (α), ketinggian air dalam datum (z) dan kedalaman aliran (Y). Hal ini didasari dari persamaan energi dalam saluran terbuka :

$$Y_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = Y_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_f + h_c \quad (1)$$

Dimana :

g = percepatan gravitasi (m/dt^2),

h_f = kehilangan tinggi akibat gesekan (m),

h_c = kehilangan tinggi akibat perubahan penampang (m),

v = kecepatan rerata (m/dt),

α = koefisien distribusi kecepatan

z = ketinggian air dalam datum (m)

Y = kedalaman aliran (m)

Berdasarkan hipotesis ini, maka akan dilakukan uji model fisik di Laboratorium. Spesifikasi model serta pendukung lainnya dijelaskan pada bab selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Hasil Penelitian Sebelumnya

Ukiman (2005) Program Pasca Sarjana Universitas Diponegoro Semarang, dengan studi konfigurasi dasar saluran pada tikungan 90° .

Pelaksanaan penelitian dilakukan dilaboratorim Pengaliran Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Semarang, dengan batasan pada saluran model sebagai berikut :

1. Tikungan sungai $\theta = 90^{\circ}$
2. Jari-jari tikungan $R_c = 50$ cm dan $R_c = 75$ cm
3. Tinggi aliran air $h = 7,0; 8,5; 10,0; 11,5; \text{ dan } 13,0$ cm
4. Durasi pengaliran $t = 15, 30, 45$ dan 60 menit

1. Kedalaman gerusan

Pada jari-jari $R_c = 50$ cm dengan tinggi aliran $h = 4,65$ cm gerusan mencapai kedalaman $4,43$ cm. Pada jari-jari yang lebih besar yaitu $R_c = 75$ cm gerusan paling besar pada tinggi aliran $h = 3,08$ cm gerusan mencapai kedalaman $3,16$ cm. Endapan yang terjadi pada dasar dan kaki tebing terjadi di luar daerah tikungan (hilir) bergerak mencapai 20 cm hingga 80 cm. Hal ini terjadi karena badan saluran merupakan saluran yang lurus sehingga efek gelombang silang sudah teredam dan menimbulkan aliran yang lebih seragam, karena adanya aliran seragam menyebabkan adanya aliran laminer di daerah dasar saluran sehingga

menyebabkan kecepatan geser butiran lebih kecil daripada kecepatan geser kritis ($U_* < U_{*c}$).

B. Klasifikasi Aliran

1. Jenis Aliran

Mengkaji suatu aliran pada saluran terbuka, haruslah dipahami tentang sifat dan jenis aliran itu sendiri. Adapun sifat utama aliran pada saluran terbuka yakni adanya suatu permukaan bebas yang berkaitan langsung dengan parameter-parameter aliran seperti kecepatan, kekentalan, gradien serta geometri saluran.

Aliran dalam saluran terbuka dapat digolongkan dalam berbagai jenis. Klasifikasi ini menyangkut perubahan kedalaman aliran menurut ruang dan waktu. Kriteria aliran dapat dibagi dalam :

a. Aliran Permanen (Steady Flow)

Apabila karakteristik fisik aliran, terutama kedalaman aliran atau kecepatan aliran tidak berubah atau dapat dianggap konstan selama interval waktu yang kita tinjau .

b. Aliran Non Permanen (Unsteady Flow)

Apabila karakteristik fisik aliran, terutama kedalaman aliran atau kecepatan aliran berubah atau dapat dianggap tidak konstan selama interval waktu yang kita tinjau.

2. Sifat 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, 1980). Variabel yang dipakai adalah bilangan Reynolds yang di definisikan sebagai berikut:

$$R_e = \frac{\mu R}{\nu} \quad (2)$$

dimana:

μ = kecepatan rata-rata (m/dtk)

R = jari-jari hidraulik (m)

ν = kekentalan kinematik ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{dt}$)

Klasifikasi aliran berdasarkan bilangan Reynolds dapat dibedakan menjadi tiga kategori seperti berikut:

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

Apabila yang dipertimbangkan adalah besarnya perbandingan antara gaya-gaya kelembaman dan gaya grafitasi maka aliran dapat dibagi menjadi : aliran subkritis, aliran kritis dan aliran superkritis.

Parameter tidak berdimensi yang membedakan tipe aliran tersebut adalah angka Froude (Fr) yaitu angka perbandingan antara gaya kelembaman dengan gaya grafitasi :

$$\frac{\bar{u}}{\sqrt{gD}}, \quad (3)$$

Dimana : \bar{u} = Kecepatan rata-rata penampang (m/det.)

D = Kedalaman maksimum aliran (m)

G = Gaya grafitasi (m/det.²)

Jika : $Fr < 1$ aliran subkritis

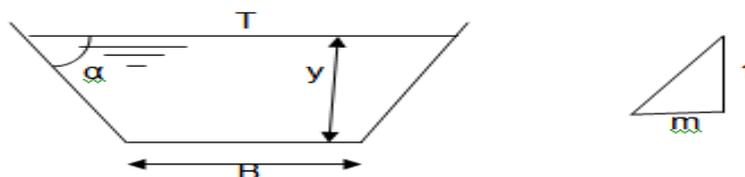
$Fr > 1$ aliran superkritis

$Fr = 1$ aliran kritis

Umumnya aliran pada saluran terbuka mempunyai $Re > 12.500$ sehingga alirannya termasuk dalam kategori aliran turbulen (French, 1980; Rajaratnam, 1987).

C. Saluran Trapezium

Untuk saluran tanah dengan bentuk trapezium seperti yang ditunjukkan pada gambar 1. Dengan lebar dasar B, kedalaman y, lebar permukaan air T dan kemiringan tebing $\text{tg } \alpha = 1/m$.



Gambar 1. saluran bentuk trapesium

Nilai $m = 1/\text{tg } \alpha$ adalah fungsi dari jenis tanah. Kemiringan ini ditentukan oleh sudut longsor material tebing. Dengan demikian hanya

ada dua variable yaitu lebar dasar B dan kedalaman y untuk mendapatkan bentuk tampang basah yang paling efisien. Menurut (Triadmodjo B, 2003), luas tampang dan keliling basah dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$A = y (B + my) \quad (3)$$

$$P = B + 2y \sqrt{1 + m^2} \quad (4)$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{y (B+my)}{B+2y \sqrt{1+m^2}} \quad (5)$$

D. Kemiringan Kritik Dasar Saluran

Menurut (Triadmodjo B, 2003) Kemiringan dasar saluran yang diperlukan untuk menghasilkan aliran seragam di dalam saluran pada kedalaman kritik disebut dengan kemiringan kritik I_c . Apabila digunakan rumus Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (6)$$

Kecepatan aliran pada kedalaman kritik diberikan oleh persamaan:

$$V_c = \sqrt{g D_c} \quad (7)$$

Pada kondisi tersebut $R = R_c$ dan $I = I_c$ sehingga rumus Manning menjadi:

$$I_c = \frac{g D_c n^2}{R_c^{4/3}} \quad (8)$$

Untuk saluran lebar, $R_c = y_c = D_c$ sehingga:

$$I_c = \frac{g n^2}{y_c^{1/3}} \quad (9)$$

E. Debit Pengaliran

Debit pengaliran pada saluran dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut (Triadmodjo B,2003):

$$Q = V \cdot A \quad (10)$$

Dimana:

Q = debit aliran (m^3/dt)

V = Kecepatan aliran (m/dt)

A = Luas penampang aliran (m^2)

F. Gaya Geser Pada Dasar Saluran

Berdasarkan keseimbangan gaya-gaya yang bekerja pada material butiran di dasar sungai, gaya geser yang terjadi pada dasar sungai dirumuskan sebagai persamaan berikut (Masloman, 2006) :

$$\tau_0 = \rho_w g R S \quad (11)$$

Dimana: τ_0 = gaya geser dasar (N/m^2)

ρ_w = Rapat massa air (kg/m^3)

g = Percepatan gravitasi (m/det^2)

R = Jari-jari hidrolis (m)

S = Kemiringan dasar sungai

G. Perilaku Sungai

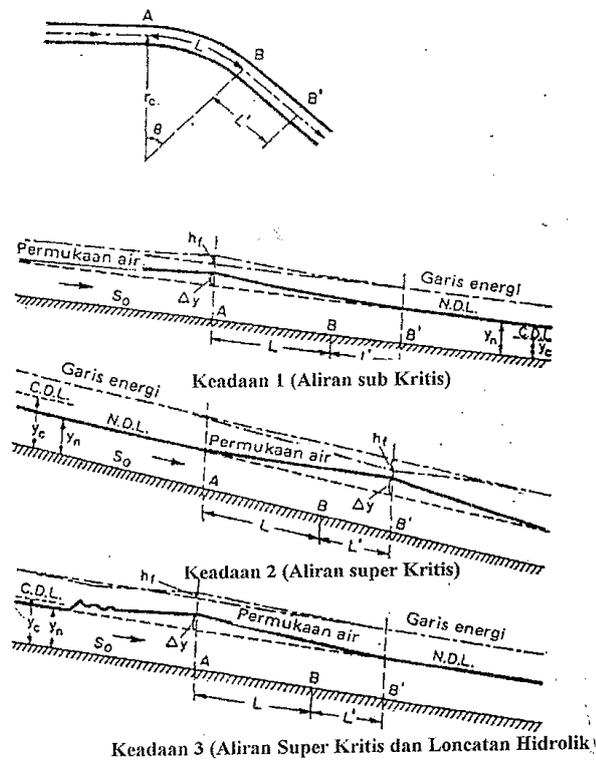
Sungai adalah suatu saluran drainase yang terbentuk secara alamiah. Akan tetapi disamping fungsinya sebagai saluran drainase, dan dengan adanya air yang mengalir didalamnya, sungai menggerus tanah dasarnya secara terus menerus sepanjang masa eksistensinya dan terbentuk lembah sungai. Volume sedimen yang sangat besar yang dihasilkan dari keruntuhan tebing. Tebing sungai di daerah pegunungan kemiringan sungainya curam, gaya tarik aliran airnya cukup besar. Tetapi setelah aliran sungai mencapai dataran, maka gaya tariknya sangat menurun. Dengan demikian beban yang terdapat dalam arus sungai berangsur-angsur diendapkan. Karena itu ukuran butir sedimen yang mengendap di bagian hulu, sungai itu lebih besar dari pada di bagian hilir (Sosrodarsono dan Tominaga, 1984).

Dengan terjadinya perubahan kemiringan yang mendadak pada saat alur sungai keluar dari daerah pegunungan yang curam dan memasuki dataran yang lebih landai, pada lokasi ini terjadi pengendapan yang sangat intensif yang menyebabkan mudah berpindahya alur sungai dan terbentuk apa yang disebut kipas pengendapan. Pada lokasi tersebut sungai bertambah lebar dan dangkal, erosi dasar sungai tidak lagi terjadi, bahkan sebaliknya terjadi pengendapan yang sangat intensif. Dasar sungai secara terusmenerus naik, dan sedimen yang hanyut terbawa arus banjir tersebut dan mengendap secara luas membentuk dataran aluviasi. Dalam keadaan tersebut apabila terjadi debit banjir yang besar dapat

menimbulkan luapan dan tergerusnya dinding bagian luar belokan sungai (Sosrodarsono dan Tominaga, 1984).

H. Tikungan Sungai

Pada saluran terbuka adanya tikungan pada alinimen tidak dapat dihindari, kompleksitas aliran disekitar lengkungan akan terjadi. Garis arus alirannya tidak hanya kurva linier, tetapi bersilangan satu sama lain yang menghasilkan arus spiral dan gelombang bersilang. Gaya sentrifugal yang terjadi pada aliran menelusuri lengkungan menghasilkan naiknya permukaan air tanggul luar dan disertai penurunan permukaan air tanggul dalam.



Gambar 2. Garis energi dan profil aliran disekitar lengkung (Chow, 1959)

Dalam usaha untuk melukiskan pengaruh dan besarnya aliran spiral pada berbagai lengkung dan kondisi aliran yang bervariasi maka Shury telah menggunakan istilah *kekuatan aliran spiral*.

Menurut Ripley (1932, dalam buku Chow 1059), konfigurasi pada suatu lengkung saluran aluvial dinyatakan dengan persamaan empiris sebagai berikut:

$$y = 6,35D \left(\sqrt{0,437 - \frac{x^2}{T^2}} - 0,43 \right) \left(1 + \frac{xK}{r_o} \right) \quad (12)$$

dimana:

y = kedalaman (ft)

x = absis (ft)

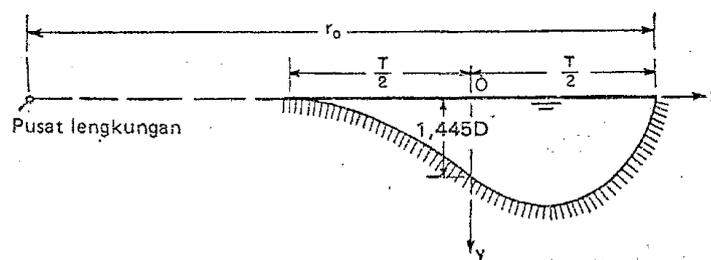
D = kedalaman hidrolis (ft)

T = lebar permukaan air (ft)

r_o = jari-jari lengkung luar(ft)

$K = 17,52$ (Chow, 1959)

Titik nol koordinat muka air (periksa Gambar 3)



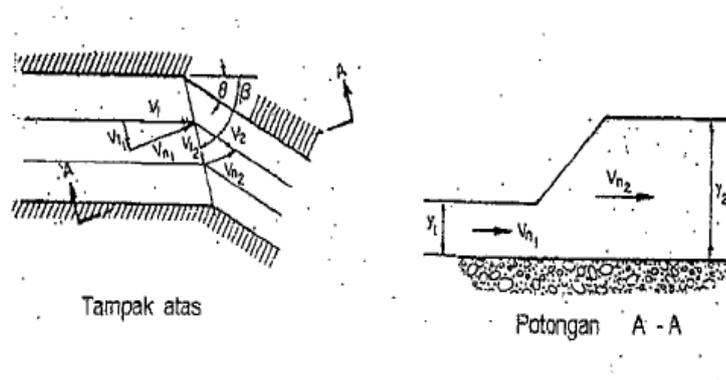
Gambar 3. Penampang sungai empiris pada tikungan sungai

(Chow, 1959)

Metode kecepatan yang diizinkan adalah kecepatan rata-rata yang tidak akan menimbulkan erosi pada tubuh sungai. Aliran cepat atau aliran

superkritis pada saluran terbuka yang melengkung menghasilkan pola gangguan silang yang berlangsung kearah hilir.

Pola gangguan ini merupakan akibat dari keadaan yang tidak seimbang berlangsung terus menerus karena gelombang silang tersebut tidak dapat mengalir kearah hulu. Efek balik dari dinding tidak jatuh pada seluruh jaringan aliran pada saat yang sama dan keseimbangan aliran terganggu.



Gambar 4. Sketsa aliran pada belokan

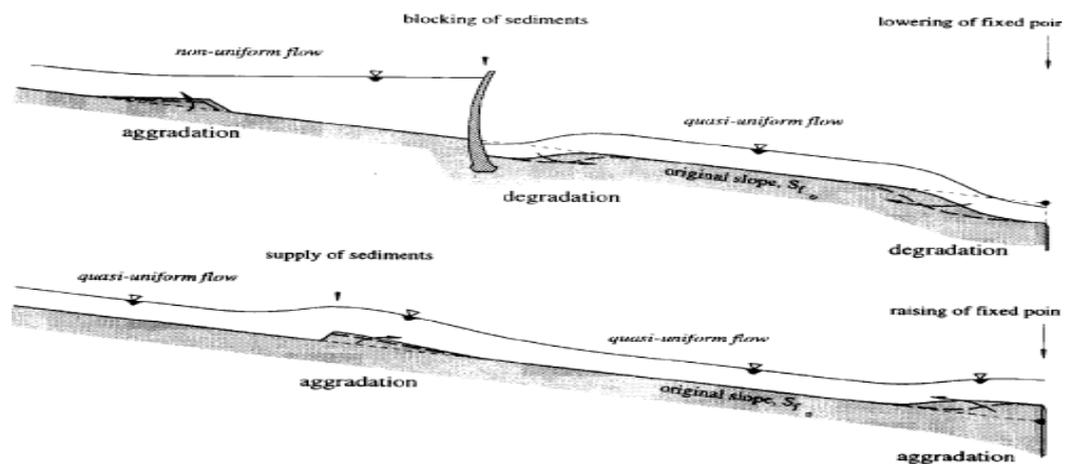
Gambar diatas membantu untuk menganalisa pola gelombang silang pada lengkung sungai dengan aliran superkritis.

I. Arah Aliran Sungai

Menurut Mulyanto (2007), Secara alami arah aliran sungai akan menuju ke laut mengikuti kondisi batas orografis. Sering mengikuti fault atau patahan geologi, tetapi tidak pernah mengikuti garis lurus sepenuhnya.

Perubahan alur sungai hampir selalu terjadi begitu lembah sungai cukup lebar untuk memungkinkan terjadinya penurunan dan kenaikan dasar sungai atau degradasi dan aggradasi.

Seluruh pola perubahan alur sungai yang terbentuk akan perlahan-lahan menjalar ke arah hilir, dengan melewati proses penggerusan dan pengendapan tebing-tebing pada tempat-tempat tertentu. Kecepatan menjalarnya kadang-kadang sangat lambat, tetapi dapat pula sangat cepat.



Gambar 5. Proses terjadinya aggradasi dan degradasi

Perubahan alur sungai terjadi hanya pada ruas alluvial di mana proses dinamik aggradasi dan degradasi sedimen yang dibawa aliran di dalam alurnya. Apabila tebing sungai tidak mudah tergerus, peristiwa ini tidak terjadi.

Pada bagian sungai di hulu proses pembentukan alur akan terhambat oleh sifat alurnya yang tidak mudah tergerus. Pada bagian sungai pasang surut pembentukan alur akan terhalang oleh adanya dua

arah aliran yaitu aliran pasang naik ke hulu dan surutnya kemudian bersama debit dari hulu ke arah hilir.

J. Degradasi dan Agradasi

1. Degradasi

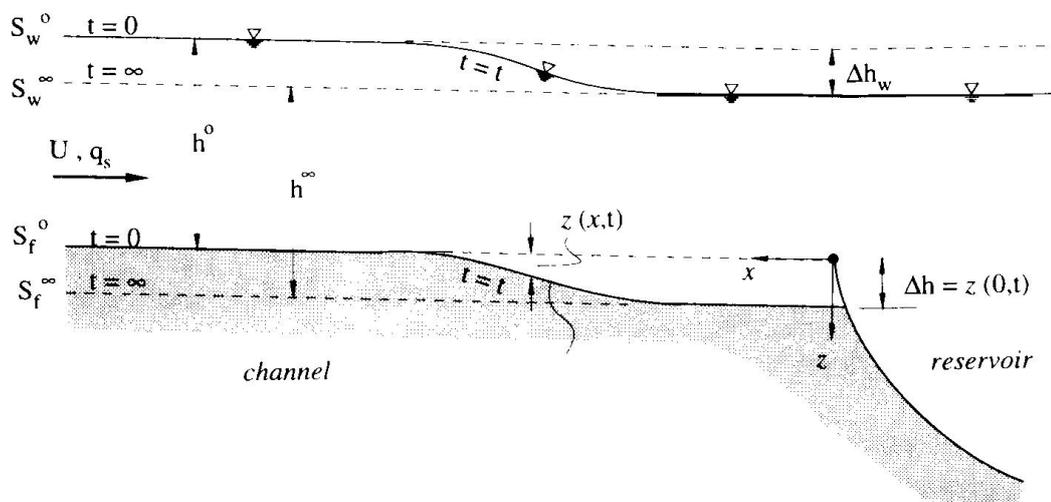
Aliran sungai menggerus tanah dasarnya secara terus menerus terlebih pada daerah pengunungan di mana sedimen yang terangkut aliran terjadi karena adanya reruntuhan tebing yang tertimbun pada dasar sungai dan terangkut dalam aliran kehilir. Pada bagian hulu, kemiringan dasar sungai cukup besar, sehingga sedimen yang terangkut sesuai dengan daya dukung angkut mengecil karena kemiringan dasar sungai mengecil sehingga terjadi proses pengendapan sedimen pada daerah ini.

Sedimen yang terangkut dalam aliran berangsur-angsur akan mengendap pada dasar sungai dimana ukuran mengendap dibagian hulu sungai lebih besar dari yang dibagian hilir. Keseimbangan antara sedimen yang terangkut dan yang mengendap pada suatu ruas sungai mempengaruhi morfologi sungai pada ruas tersebut. Apabila suplai sedimen yang terangkut dari ruas tersebut maka akan terjadi agradasi pada bagian tersebut. Sedangkan apabila suplai sedimen lebih kecil dibanding yang terangkut dari ruas tersebut maka akan terjadi degradasi pada ruas sungai tersebut.

Jenis degradasi ada beberapa macam antara lain :

- a. *Sheet degradation* dimana penurunan dasar sungai meningkat bertambah besar kearah vertikal,
- b. *Scour degradation* dimana penurunan dasar sungai diawali dengan penurunan setempat dibagian hilir kemudian merambat kebagian udiknya,
- c. *Pot holes degradation* dimana diawali dengan terjadinya lobang-lobang pada dasar sungai yang menyebabkan turbulensi aliran pada lobang tersebut akan hanyut kehilir, dan lobang pada dasar sungai itu akan bertambah besar.

Jenis degradasi tersebut diatas banyak dijumpai pada sungai aluvial.



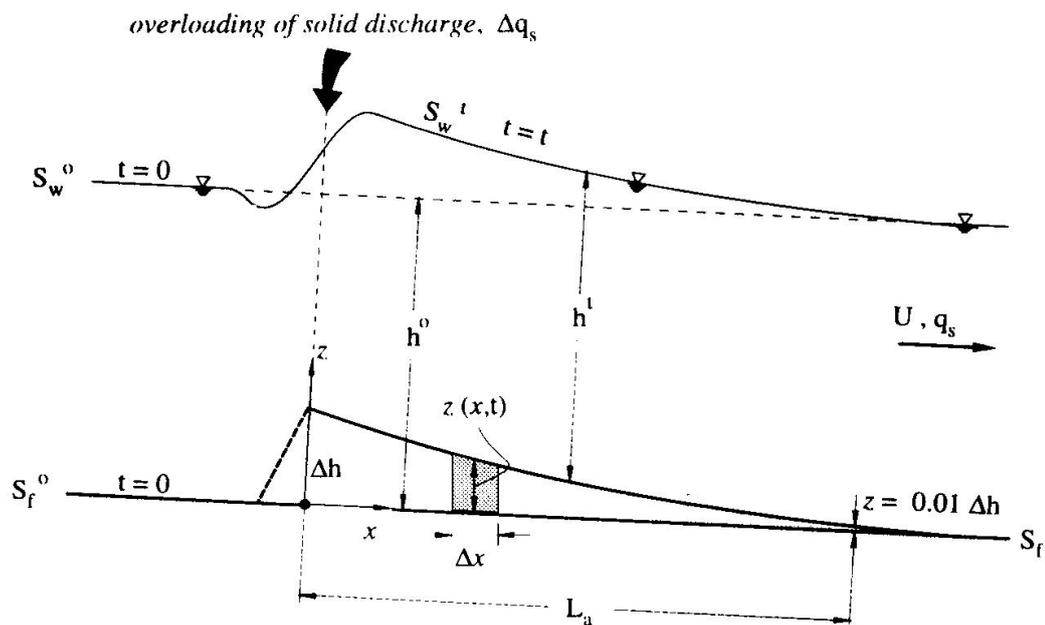
Gambar 6. Proses terjadinya degradasi

2. Agradasi

Pengurangan kapasitas aliran pada sungai dapat disebabkan oleh pengendapan berasal dari erosi daerah aliran sungai dan erosi tanggul sungai yang berlebihan. Sedimentasi sungai terjadi karena tidak adanya vegetasi penutup dan adanya penggunaan lahan yang tidak tepat,

sedimentasi ini menyebabkan terjadinya aggradasi dan pendangkalan pada sungai, hal ini dapat menyebabkan berkurangnya kapasitas tampungan sungai.

Efek langsung dari fenomena ini menyebabkan meluapnya air dari alur sungai keluar dan menyebabkan banjir.



Gambar 7. Proses terjadinya aggradasi

Menurut (Suseno Darsono, 1994) Erosi dan sedimentasi merupakan proses yang terjadi secara terus menerus pada alur sungai, yang akan mengakibatkan proses perubahan alur sungai ke arah horisontal (pembentukan meander) dan ke arah vertikal (aggradasi maupun degradasi dasar sungai). Maka angkutan sedimen sangat menentukan tingkat perubahan maupun kestabilan sebuah alur sungai.

Sebuah alur sungai dikategorikan relatif stabil, apabila proses erosi maupun sedimentasi terjadi keseimbangan dalam periode waktu tertentu.

Angkutan sedimen sungai berfluktuasi, sesuai dengan parameter aliran, sedimen dan transportasi. Perbedaan antara input dan output sangat menentukan terhadap proses erosi dan sedimentasi pada alur tersebut.

K. Penggerusan dan Pengendapan

Menurut (Setyono, 2007) Gerusan adalah perubahan dari suatu aliran yang disertai pemindahan material melalui aksi gerakan fluida. Atau dapat dikatakan juga bahwa gerusan adalah merupakan erosi pada dasar dan tebing saluran alluvial.

Bila dari satu penampang ke penampang berikutnya (penampang 1 → penampang 2) pada waktu tertentu kapasitas transport T meningkat, akan terjadi gerusan pada dasar untuk memenuhi kekurangannya. Jadi apabila:

$$\frac{dT}{dx} > 0 \rightarrow \text{gerusan}$$

dimana x adalah jarak antara titik 1 dan titik 2.

Jadi bukan kecepatan yang besar yang menimbulkan gerusan, tetapi adanya perubahan kapasitas angkut sedimen.

Pada keadaan $\frac{dT}{dx} = 0$ akan terjadi kondisi setimbang, yang hanya terjadi pada aliran setimbang juga yaitu bila $h = h_e$, karena tidak terjadi perubahan-perubahan terhadap Q dan v atau I juga tetap nilainya. Walaupun rumus h_e tidak mengandung factor sedimen, tetapi akan mencerminkan kesetimbangan:

Pada $h = h_e \rightarrow \frac{dT}{dx} = 0 \rightarrow$ tidak terjadi gerusan maupun pengendapan.

Secara analogi, apabila: $\frac{dT}{dx} < 0 \rightarrow$ akan terjadi kelebihan angkutan, sehingga sebagian akan diendapkan \rightarrow timbullah pengendapan.

Tabel 1. Proses penggerusan dan Pengendapan

Perbandingan Jumlah T (kapasitas transport)	Proses yang terjadi	
	Sedimen	Dasar
$T1 = T2$	Seimbang	Stabil
$T1 < T2$	Gerusan	Degradasi
$T1 > T2$	Pengendapan	Agradasi

Adapun faktor-faktor penentu angkutan sedimen (Cahyono, 2007), yaitu:

- Sifat-sifat aliran air (flow characteristic)
- Sifat-sifat sedimen (sedimen characteristic)
- Pengaruh timbal balik (interaction)

Untuk sedimen dasar pada aliran, tegangan geser dinyatakan dengan persamaan *Shield*, yaitu tegangan geser non dimensional yang merupakan fungsi dari angka *Reynold* dan diameter butiran.

$$\theta = \frac{\tau_c}{\rho_w g \Delta d} = \frac{U_{*c}^2}{g \Delta d} \quad (13)$$

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \quad (14)$$

$$U_{*c} = \sqrt{\theta g \Delta d} \quad (15)$$

$$\tau_c = \theta \rho_w g \Delta d \quad (16)$$

$$\tau_0 = \rho_w g y_0 S \quad (17)$$

$$U_* = \left(\frac{\tau_0}{\rho_w} \right)^{1/2} \quad (18)$$

Dimana:

U_{*c} = kecepatan geser kritis (m/det)

U_* = kecepatan geser (m/det)

ρ_s = rapat massa sedimen (kg/m³)

ρ_w = rapat massa air (kg/m³)

d = diameter butiran (m)

g = percepatan gravitasi (m/det²)

y_0 = ketinggian aliran (m)

S = kemiringan dasar saluran

θ = parameter mobilitas kritis

τ_0 = tegangan geser dasar (N/m²)

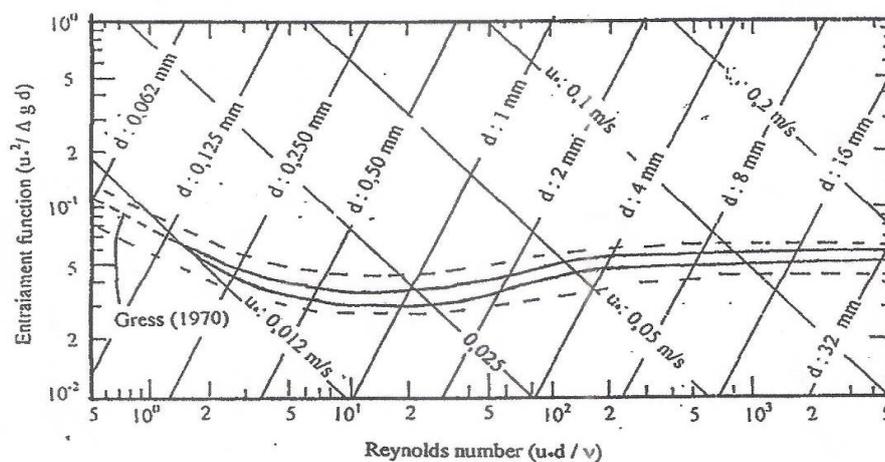
τ_c = tegangan geser kritis (N/m²)

Keterangan

$\tau_0 > \tau_c \rightarrow$ terjadi gerusan

$\tau_0 < \tau_c \rightarrow$ terjadi pengendapan

Dalam menganalisa tegangan geser dan variable-variabel di atas digunakan diagram *Shield*, yang menggambarkan hubungan antara parameter mobilitas kritis dengan bilangan *Reynold*, seperti pada gambar 2 berikut.



Gambar 8. Diagram *Shield* (hubungan antara parameter mobilitas kritis dan bilangan *Reynold*)

L. Transport Sedimen

Secara umum sedimen transpor dapat diartikan sebagai proses perpindahan secara horisontal dari satu tempat lainnya baik dalam bentuk campuran sedimen dengan fluida pengangkutnya (river and coastal transport) maupun aliran massa oleh fluida yang mengangkutnya (*massa flows*). Laju transpor sedimen adalah ukuran volume sedimen yang melintas suatu penampang dalam satuan waktu.

1. Angkutan Dasar (Bed Load Transport)

Menurut Pallu (2011), Angkutan dasar terjadi apabila gerakan partikel sedimen terguling, tergelincir, atau kadang-kadang meloncat sepanjang dasar, hal ini disebut *angkutan dasar (bed load transport)*. Pada umumnya, besar angkutan dasar pada sungai adalah berkisar 5 – 25% dari angkutan melayang. Material kasar tinggi persentasenya menjadi angkutan dasar.

Dalam studi gerakan awal sedimen, Shield menentukan besarnya angkutan sedimen dasar dengan rumus semi-empiris, sebagai berikut:

$$\frac{q_b \gamma_s}{q \gamma S} = 10 \frac{\tau - \tau_c}{(\gamma_s - \gamma) d} \quad (19)$$

dimana:

q_b dan q = debit angkutan dasar dan air per satuan lebar saluran

$$\tau = \gamma D S$$

D = kedalaman air

S = kemiringan saluran

d = diameter partikel sedimen

γ_s dan γ = berat jenis sedimen dan air

Kalinske mengasumsikan bahwa:

$$U_s = b(U - V_c) \quad (20)$$

Dimana:

U_s dan U = kecepatan sedimen dan fluida

V_c = kecepatan aliran kritis pada saat bergerak

b = nilai konstan mendekati 1

Kalinske mendefinisikan gerakan angkutan dasar menjadi:

$$q_b = q\alpha PdU_s \quad (21)$$

dimana:

q_b = debit angkutan dasar per satuan lebar

P = fraksi dasar dari partikel sedimen

d = ukuran partikel sedimen medium

α = faktor bentuk = 2/3 untuk bentuk seragam

2. Angkutan Sedimen Melayang (Suspended Load Transport)

Suspended Load merupakan sedimen yang didukung oleh komponen yang cenderung ke atas dari suatu aliran turbulen dan tetap dalam keadaan melayang selama waktu tertentu. Suspended load dapat didefinisikan secara matematis sebagai berikut (Pallu , 2011):

$$q_{sv} = \int_a^D u c dy \quad (22)$$

$$q_{sw} = \gamma_s \int_a^D u c dy \quad (23)$$

dimana:

q_{sv} dan q_{sw} = debit angkutan sedimen melayang dalam volume dan berat

u dan c = kecepatan dan konsentrasi sedimen rata-rata dalam volume pada jarak diatas dasar

a = ketebalan angkutan sedimen dasar

D = kedalaman air

γ_s = berat jenis sedimen

Angkutan sedimen di sungai juga dapat diselesaikan berdasarkan persamaan Exner (Baskoro, 2009) , yaitu:

$$(1-\lambda_p)B \frac{\partial \eta}{\eta t} = \frac{\partial Q_s}{\partial x} \quad (24)$$

Dimana:

B = lebar saluran

η = elevasi saluran

λ_p = porositas lapisan aktif

t = waktu

x = jarak

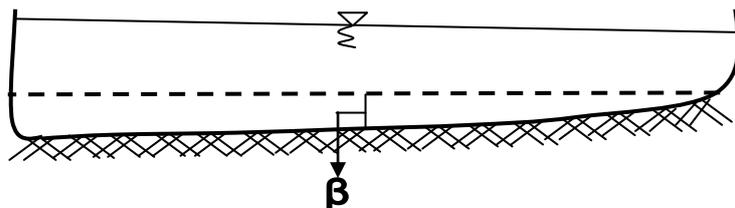
Q_s = jumlah angkutan sedimen

M. Gerusan dan Pengendapan Pada Lengkung Sungai

Menurut Mulyanto (2007), Perputaran bumi akan menimbulkan percepatan Coriolis yang menjadi penyebab pertama timbulnya arus spiral pada sebuah aliran sungai. Arus spiral ini mengakibatkan penggerusan pada tebing luar sebuah alur sungai dan pengendapan pada sisi dalamnya. Akan timbul angkutan sedimen ke arah transversal/melintang. Di sini kecepatan kritis tidak berperan lagi karena butir-butir sedimen sedang dalam keadaan bergerak terbawa oleh aliran longitudinal dengan kecepatan v_x , sehingga mudah disimpangkan arahnya ke arah sisi dalam lengkungan. Proses ini akan merangsang terjadinya lengkung aliran yang

akan makin berkembang. Pada bagian sungai alluvial akan terjadi pembentukan rangkaian agradasi dan degradasi yang ekstensif. Dengan menggunakan kriteria penggerusan dan pengendapan dapat diketahui bentuk dari tampang lintang sebuah sungai pada lengkungannya, dan terbentuknya kemiringan melintang pada dasarnya.

Jika pada tebing luar suatu sungai tahan terhadap gerusan, maka pada kaki tebing luar besarnya angkutan dasar $T_y = 0$. Pada jarak tertentu kemudian akan terjadi gerusan pada dasar sungai, oleh mulai bekerjanya arus spiral pada butir-butir dasar sungai. Kapasitas angkut T_y akan mencapai besar tertentu yang akan mengakibatkan $dT/dx > 0 \rightarrow$ terjadilah gerusan olehnya. Dengan demikian, pada kaki tebing di sebelah dalam lengkungan, akan terjadi pengendapan karena $dT_y / dx < 0$. Setelah beberapa lama, elevasi dasar sungainya akan menurun di sisi luar dan meninggi di sisi dalam lengkungan sungai.



Gambar 9. Kemiringan melintang dasar sungai

lengkung sungai akan berlanjut; tetapi dengan miringnya dasar sungai akan timbul gaya gravitasi yang akan berusaha menggelindingkan butir-butir sedimen ke arah sisi luar lengkungan sungai.

Dua gaya akan timbul dan saling meniadakan; gaya seret /drag force (F_y) dan komponen gaya gravitasi (G_y) sehingga proses menjadi

miringnya dasar sungai ini akhirnya akan terhenti, dan tercapailah keadaan setimbang:

$$F_y = G_y \quad (25)$$

Pada saat ini hanya akan terjadi aliran mengarah ke hilir saja (arah x).

Timbullah sudut lereng transversal pada dasar sungai:

$$\sin\beta = 12h^2i_x / \rho r d \quad (26)$$

Dimana:

β = sudut transversal dasar sungai

h = kedalaman rata-rata

r = radius lengkungan

d = diameter rata-rata butir

$$\rho = (\rho_{\text{pasir}} - \rho_{\text{air}}) / \rho_{\text{air}} = 1.65$$

i_x = kelandaian aliran sungai

Jika pada tebing luar suatu sungai mudah tergerus, kesetimbangan tidak akan tercapai karena akan terus tersedia pasokan sedimen dari tebing luar sehingga $F_y > G_y$ yang akan menyebabkan terjadinya dasar yang lebih landai dan pengendapan di sisi dalam lengkungan.

N. Material Pembentukan Dasar Sungai

Material yang digunakan dalam penelitian adalah material tidak berkoheisi (*non cohesive soil*). Dalam penelitian digunakan tipe gerusan

pada air bersih (*clear water scour*) dan sedimen dasar yang bergerak sesuai dengan aliran yang direncanakan.

Persyaratan utama dalam suatu model dasar yang bergerak yaitu bahan dasar harus dapat bergerak (Yalin,1972, Dake,1982). Untuk menentukan baha dasar bergerak dan tidak, dapat digunakan rumus Sheilds (syarat $\eta > \eta_c = 0,03$)

$$\frac{\rho_w U^2}{(\rho_s - \rho_w) d_s} = \eta_c \quad (27)$$

Dengan Kecepatan geser butiran sebesar:

$$U = \sqrt{(g * h * I)} \quad (28)$$

Keterangan:

d_s = diameter butiran (m)

g = percepatan gravitasi (m/dt)

h = kedalaman aliran (m)

I = kemiringan dasar saluran arah memanjang

ρ_s = rapat massa butiran (kg/m^3)

ρ_w = rapat massa fluida (kg/m^3)

U^* = kecepatan geser butiran (m/dt)

Apabila kecepatan geser kritis (U^*_{cr}) dari partikel bahan dasar lebih besar dari kecepatan butiran (U^*), maka bahan dasar tersebut tidak bergerak. Bila terjadi sebaliknya, kecepatan geser kritis butiran (U^*_{cr}), dari partikel bahan dasar lebih kecil dari kecepatan geser butiran (U^*), maka dapat dipastikan bahwa bahan dasar tersebut bergerak.

O. Kerikil Sungai

Kerikil merupakan batuan hasil pelapukan secara berangsur diangkat ke tempat lain oleh tenaga air. Air mengalir di permukaan tanah atau sungai membawa batuan halus baik terapung, melayang atau digeser di dasar sungai menuju tempat yang lebih rendah. Pengendapan yang terjadi di sungai disebut sedimen fluvial. Hasil pengendapan ini biasanya berupa batu giling, batu geser, pasir, kerikil, dan lumpur yang menutupi dasar sungai.

Sungai yang mengalir dengan membawa berbagai jenis batuan akhirnya bermuara di laut, sehingga di laut terjadi proses pengendapan batuan yang paling besar. Pada kerikil sungai seperti Gambar 10 biasa disebut ukuran butiran breksi tufa lapili atau disingkat PBT.



Gambar 10. Kerikil sungai

P. Model Fisik

1. Hukum Dasar Model

Konsep dasar pemodelan dengan bantuan skala model adalah membentuk kembali masalah atau fenomena yang ada di prototipe dalam

skala yang lebih kecil, sehingga fenomena yang terjadi di model akan sebangun (mirip) dengan yang ada di prototipe. Kesebangunan yang dimaksud adalah berupa sebangun geometrik, sebangun kinematik dan sebangun dinamik (*Nur Yuwono, 1996*).

Hubungan antara model dan prototipe diturunkan dengan skala, untuk masing-masing parameter mempunyai skala tersendiri dan besarnya tidak sama. Skala dapat didefinisikan sebagai rasio antara nilai yang ada di prototipe dengan nilai parameter tersebut pada model.

Dalam desain suatu bangunan yang besar, khususnya bangunan air, pembuatan model sangat diperlukan, hal ini disebabkan:

- ❖ Dalam perencanaan biasanya dibuat asumsi untuk menyederhanakan masalah, tetapi dalam prakteknya tidak semua asumsi sesuai dengan perkiraan awal. Permodelan dapat mengkaji sejauh mana penyimpangan yang terjadi dan solusi alternatif yang dapat diambil.
- ❖ Tidak semua masalah hidraulik dapat dengan mudah dipecahkan secara matematis, sehingga pembuatan model diharapkan dapat mempermudah memecahkan masalah.
- ❖ Pelaksanaan prototipe biasanya mahal, untuk menghindari kesalahan dalam pelaksanaan dan mengkaji perilaku hidraulik sebelum pelaksanaan konstruksi pembuatan model fisik sangat penting, juga guna menghemat biaya.

- ❖ Mencari kemungkinan terjadinya suatu gangguan yang mungkin terjadi dalam pengoperasian prototif.
- ❖ Mengkoreksi dimensi yang ada, yang tidak mungkin dilakukan dalam perencanaan pekerjaan, sehingga dapat menghindari terjadinya erosi.

Dalam hal perencanaan model hidraulik perlu dipertimbangkan beberapa hal antara lain: (Nur Yuswanto, 1991),

- ❖ Hubungan antara skala parameter (hukum skala dan kriteria sebangun)
- ❖ Tujuan model (untuk menentukan kriteria sebangun yang akan dipakai dalam penentuan skala)
- ❖ Kriteria/keseksamaan terhadap parameter fenomena yang ada diprototif (perlu diperhitungkan skala efek)
- ❖ Fasilitas dilaboratorium (Pompa, alat ukur, ruangan dan lainnya)

2. Kesebangunan (*Similaritas*)

Perpindahan besaran yang ada pada prototif kedalam besaran yang ada pada model, harus diperhatikan terhadap kesebangunan (*similitude*) antara model dengan prototif.

- ❖ Kesebangunan model fisik meliputi :
 - Kesebangun geometrik
 - Kesebangun kinematik
 - Kesebangun dinamik

❖ Kesebangunan Geometrik

Sebangun geometrik adalah suatu kesebangunan dimana bentuk yang ada di model sama dengan bentuk prototipe tetapi ukuran bisa berbeda. Perbandingan antara semua ukuran panjang antara model dan prototipe adalah sama. Ada dua macam kesebangunan geometrik, yaitu sebangun geometrik sempurna (tanpa *distorsi*) dan sebangun geometrik dengan distorsi (*distorted*). Pada sebangun geometrik sempurna skala panjang arah horisontal (skala panjang) dan skala panjang arah vertikal (skala tinggi) adalah sama, sedangkan pada *distorted* model skala panjang dan skala tinggi tidak sama. Jika memungkinkan sebaiknya skala dibuat tanpa distorsi, namun jika terpaksa, maka skala dapat dibuat distorsi. Sebangun geometrik dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$n_L = \frac{L_p}{L_m} \quad (27)$$

$$n_h = \frac{h_p}{h_m} \quad (28)$$

Dengan : n_L = skala panjang

n_h = skala tinggi

L_p = ukuran panjang prototipe

L_m = ukuran panjang model

h_p = ukuran tinggi pada prototipe

h_m = ukuran tinggi pada model

❖ Kesebangun Kinematik

Sebangun kinematik adalah kesebangunan yang memenuhi kriteria sebangun geometrik dan perbandingan kecepatan dan percepatan aliran di dua titik pada model dan prototipe pada arah yang sama adalah sama besar. Pada model tanpa distorsi, perbandingan kecepatan dan percepatan pada semua arah adalah sama, sedangkan pada model dengan distorsi perbandingan yang sama hanya pada arah tertentu saja, yaitu pada arah vertikal atau horisontal. Oleh sebab itu pada permasalahan yang menyangkut tiga dimensi sebaiknya tidak menggunakan *distorted* model. Skala kecepatan diberi notasi n_u , skala percepatan n_a , dan skala waktu n_T didefinisikan sebagai berikut :

$$n_u = \frac{u_p}{u_m} = \frac{n_L}{n_T} \quad (29)$$

$$n_a = \frac{a_p}{a_m} = \frac{n_L}{n_T^2} \quad (30)$$

$$n_Q = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{n_L^3}{n_T} \quad (31)$$

$$n_T = \frac{T_p}{T_m} \quad (32)$$

❖ Kesebangunan Dinamik

Jika prototipe dan model sebangun geometrik dan kinematik, gaya-gaya yang bersangkutan pada model dan prototipe untuk seluruh pengaliran mempunyai perbandingan yang sama dan bekerja pada arah yang sama, maka dikatakan sebagai sebangun dinamik.

Sebangun dinamik dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$n_F = \frac{F_p}{F_m} \quad (33)$$

Dimana: n_F = skala gaya

F_p = ukuran gaya pada prototipe

F_m = ukuran gaya pada model

3. Model Terdistorsi

Untuk pekerjaan-pekerjaan yang besar seperti sungai maupun bendungan pembuatan model dapat dilakukan dengan besaran yang tidak benar dengan prototipnya. Hal ini agar ruang dan biaya yang diinginkan menjadi lebih kecil. Tetapi dapat menyebabkan diperolehnya kedalaman air hanya beberapa milimeter saja, demikian juga untuk kekasaran permukaan sehingga dapat menyebabkan kondisi terbuka tidak akan tercapai. Selain itu akan menyulitkan dalam pencatatan hasil percobaan karena besarnya terlalu kecil. Untuk itu dengan menggunakan skala tradisional, yaitu model dimana skala dimensi vertikal tidak sama dengan skala dimensi horizontal.

Dalam pembuatan model terdistorsi dikenal apa yang dinamakan faktor distorsi atau laju distorsi " n " yang menyatakan hubungan antara skala horizontal terhadap skala vertikal.

Tabel 2. Perbandingan model terdistorsi dan tak terdistorsi.

NO	Orientasi fisik	Satuan	Tak ter distorsi	Terdistorsi
1	Panjang	m	η_L	L_H
2	Lebar	m	η_L	L_H
3	Tinggi/kedalaman	m	η_L	L_V
4	Luas	m^2	η_L^2	L_h, L_v atau L_H^2
5	Volume	m^3	η_L^3	$L_H^2 \cdot L_V$
6	Waktu	dt	$\eta_L^{1/2}$	$(L_H n)^{1/2} = (L_H^2 / L_V)^{1/2}$
7	Frekwensi	Hz	$\eta_L^{-1/2}$	$(L_H n)^{-1/2} = (L_H^2 / L_V)^{-1/2}$
8	Kecepatan	m/dt	$\eta_L^{1/2}$	$(L_H/n) = L_V$
9	Percepatan	m/dt^2	η_L^0	$1/n = L_V / L_H$
10	Debit	m^3/d	$\eta_L^{2,5}$	$(L_H^{2,5} / n^{1,5}) = L_H / L_V^{1,5}$
11	Gaya	N	η_L^3	-
12	Tekanan	N/m^2	η_L	$L_H/n = L_V$
13	Berat spesifik	N/m^3	η_L	$1/n = L_V / L_H$
14	Bilangan Reynolds		$\eta_L^{1,5}$	$(L_H/n)^{1,5} = L_V^{1,5}$

Keterangan: L_H = skala horizontal, dan L_V = skala Vertikal

Q. Skala Wentworth

Skala *Wentworth* digunakan untuk klasifikasi material partikel anggregat (*Udden 1914, Wentworth 1992*). Skala ini dipilih karena pembagian menampilkan pencerminan distribusi alami partikel sedimen.

Berikut adalah ukuran yang terdapat pada skala *Wentworth* :

1. Gravel, terbagi atas 4 bagian yakni : Bolders/ Bongkahan (> 256 mm), Cobble/ Berangkal ($64 - 256$ mm), Pebble/ Kerakal ($4 - 64$ mm), dan Grit/ Granule/ Butiran ($2 - 4$ mm).
2. Sand, Pasir Sangat Kasar ($1-2$ mm), Pasir Kasar ($1/2 - 1$ mm), Pasir sedang ($1/4 - 1/2$ mm), Pasir Halus ($1/8 - 1/4$ mm), dan Pasir Sangat Halus ($1/16 - 1/8$ mm).
3. Mud, Terbagi atas 2 : Silt/Lanua ($1/256-1/16$ mm) dan Clay/Lempung ($< 1/256$ mm).

R. Bilangan Tak Berdimensi

Bilangan tak berdimensi digunakan untuk menyatakan hubungan antar parameter serta dipakai untuk menggambarkan hasil-hasil penelitian. Untuk menentukan bilangan tak berdimensi tersebut dapat dilakukan dengan analisis dimensi. Beberapa cara/metode yang umum digunakan untuk analisis dimensi yaitu Metode *Basic Echelon*, *Buckingham*, *Rayleigh*, *Stepwise* dan *Langhaar* (Nur Yuwono, 1996).

Untuk penelitian ini digunakan metode *Langhaar* karena variabel yang berpengaruh relatif sedikit serta metode ini tersusun sistemik. Dimana jika fenomena/ kejadian hidraulik dapat dijelaskan dengan parameter Π dengan $i = 1, 2, 3, \dots, n$ dan jika parameter tersebut tersusun oleh m elemen pokok, maka prodik bilangan tak berdimensi yang dapat diturunkan sejumlah $(n-m)$. Untuk keperluan teknik hidraulik

biasanya ada 3 elemen pokok yaitu: massa (M), panjang (L) dan waktu (T).

$$\Pi_j = P_1^{k_1} P_2^{k_2} P_3^{k_3} \dots P_n^{k_n} \quad (34)$$

dimana Π_j = produk bilangan tak berdimensi dengan $j = 1, 2, 3$

Jika P_i mempunyai dimensi $M^{\alpha_i} L^{\beta_i} T^{\tau_i}$ maka dimensi dapat ditulis sebagai berikut :

$$\Pi = (M^{\alpha_1} L^{\beta_1} T^{\tau_1})^{k_1} \times (M^{\alpha_2} L^{\beta_2} T^{\tau_2})^{k_2} \times \dots \times (M^{\alpha_n} L^{\beta_n} T^{\tau_n})^{k_n} \quad (35)$$

$$\Pi = (M^{(\alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2 + \dots + \alpha_n k_n)}) \times L^{(\beta_1 k_1 + \beta_2 k_2 + \dots + \beta_n k_n)} \times T^{(\tau_1 k_1 + \tau_2 k_2 + \dots + \tau_n k_n)} \quad (36)$$

Π merupakan bilangan tak berdimensi jika :

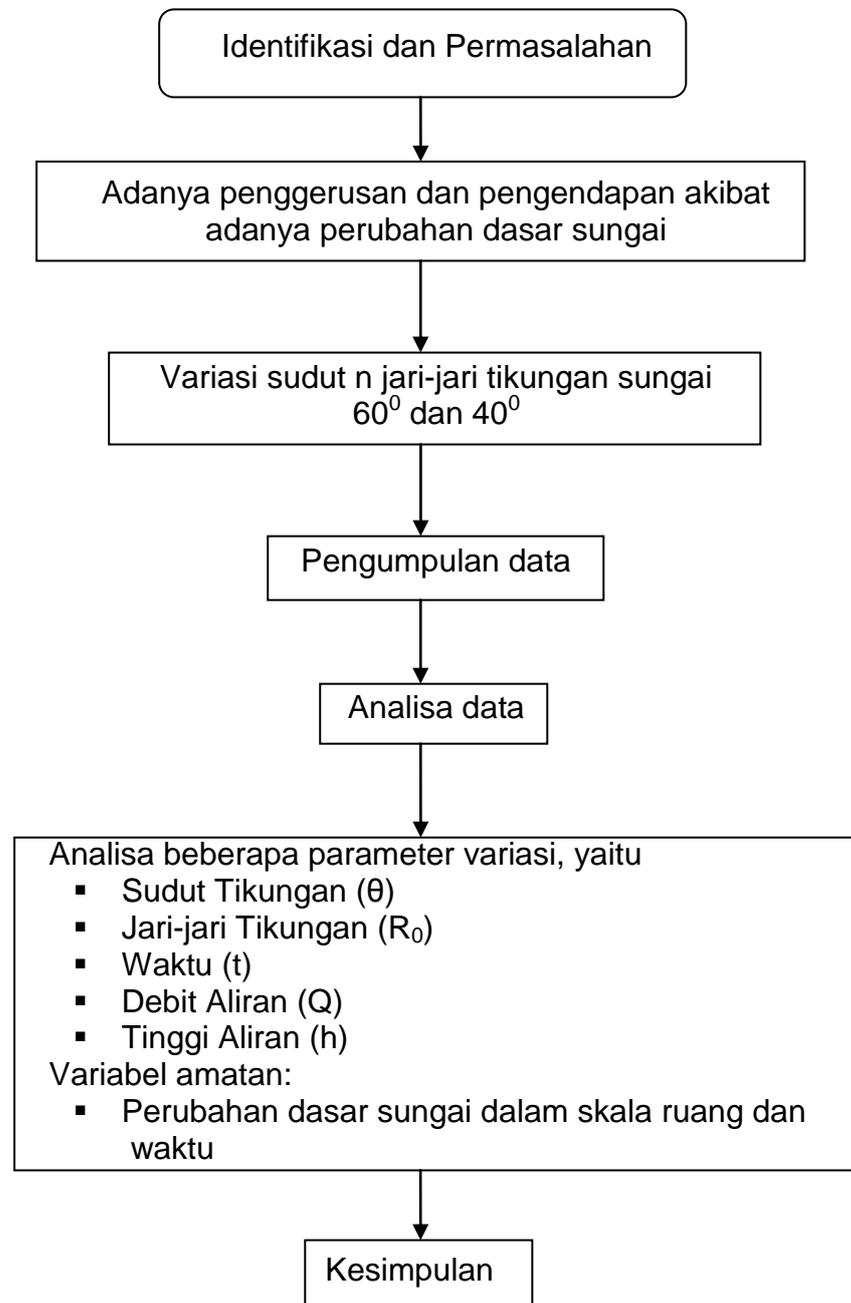
$$\alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2 + \dots + \alpha_n k_n = 0$$

$$\beta_1 k_1 + \beta_2 k_2 + \dots + \beta_n k_n = 0$$

$$\tau_1 k_1 + \tau_2 k_2 + \dots + \tau_n k_n = 0$$

Koefisien α_1 β_1 dan τ_1 dapat diketahui dari parameter P_i yang terkait.

S. KERANGKA PIKIR



Gambar 11. Kerangka Pikir Penelitian