

628.112

EPH

p 21



**PERUBAHAN MORFOLOGI
KALI GARANG-BANJIR KANAL BARAT
TANPA BENDUNG SIMONGAN
(PENDEKATAN MODEL SIMULASI BRI-STARS)**

TESIS

**Diajukan dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan
Program Magister Teknik Sipil**

Oleh :

**SUTARTO EDHISONO
NIM. L4A000036**

**PROGRAM PASCA SARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2004**

LEMBAR PENGESAHAN

PERUBAHAN MORFOLOGI KALI GARANG-BANJIR KANAL BARAT TANPA BENDUNG SIMONGAN (PENDEKATAN MODEL SIMULASI BRI-STARS)

Diajukan dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan
Program Magister Teknik Sipil

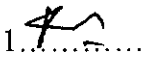


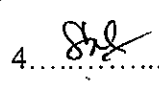
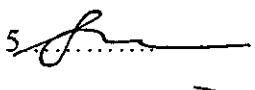
Oleh :

SUTARTO EDHISONO
NIM. L4A000036

Dipertahankan di depan Tim Penguji pada tanggal:
19 Februari 2004

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk
Memperoleh gelar Magister Teknik Sipil

Tim Penguji:

- | | | |
|---------------|------------------------------|--|
| 1. Ketua | : Dr.Ir.R.J. Kodoatie,M.Eng. | 1.  |
| 2. Sekretaris | : Ir. Syafrudin, CES.,MT. | 2.  |
| 3. Anggota 1 | : Dr.Ir. Suripin,M.Eng. | 3.  |
| 4. Anggota 2 | : Ir. Salamun,MT. | 4.  |
| 5. Anggota 3 | : Ir. Sugiyanto,M.Eng. | 5.  |

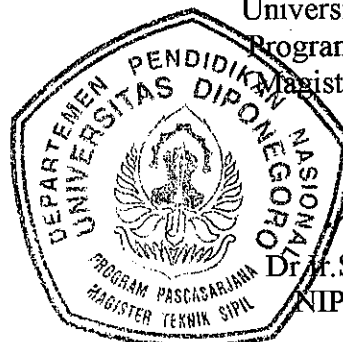
Semarang, 19 Februari 2004


Universitas Diponegoro

Program Pasca Sarjana

Magister Teknik Sipil

Ketua,




Dr. Ir. Suripin, M.Eng

NIP.131668511

ABSTRACT

The Simongan Weir is a weir which was built by the Government of the Netherlands Indie in the beginning of the 20th century. The weir is layed at the end of the Garang River, which functioned to regulate the river flow to the Semarang River and to the West Flood Way. In accordance to the changing of the land use on the upper part of the Garang River, changing of the flood flow and sedimentation are occurred on this river which tends increase the flood discharge and the water level that may cause disasters. In order to reduce the flood water level, it is planned to change the Simongan Weir which formely a 'fixed weir' to a 'movable weir' which called barrage, by cutting the crest of the fixed weir in 3.7 meters height. Because of the cutting of the weir body, it will influence to the morphology of the river, the Garang River in the upper part and the West Flood Way in the lower part of the Simongan Weir. This research contains simulations of the changing of the river morphology of the Garang River and the West Flood Way without the Simongan Weir. Simulation used *the BRI-STARS* soft ware (*BRIDGE Stream Tube Model for Alluvial River Simulation*), which this simulation model generalitiated a semi two dimensionals flow of water and its sediment that capable to compute erosion and sedimentation in sub-critical, super critical flows and combination of both flow conditions.

Input of the simulation model in this research used main data, which consisted of sediment fraction, twelve years reliable discharge hydrograph, Manning's coefficient, and river cross sections data. Simulation was started from 20 time steps for trial in 2 (two) conditions, i.e. : existing (sediment data 1992) and prediction (sediment data 1997). Stage 2 was simulation to predict a stable slope. Condition of the stable slope prediction used river profile 1997 and sediment data of the year 2003. Hydrograph of the stable slope prediction simulation used reliable discharges from 1990 - 2001. Manning's coefficient which used was 0.028 (SMEC, 2000). Simulation result indicated, that the river bed slope found its stability process which indicated a horizontal slope ($I = 0.000$) and $Fr < 1$ at the time step 9000th. The stability was occurred in an average slope 0.00055. The morphology of the Garang River was changed because of the deletion of the Weir from its river system. The dominant changing in upper part was erosion, in the middle was transition between erosion and sedimentation, and in lower part, sedimentation process was tended, occurred although was not as big as in the middle part of the longitudinal profile of the river.

ABSTRAKSI

Bendung Simongan merupakan bendung tetap yang dibangun Pemerintah Hindia Belanda diawal abad ke 20 yang terletak ujung Kali Garang yang berfungsi untuk mengatur aliran sungai tersebut ke Kali Semarang dan Banjir Kanal Barat. Seiring dengan perkembangan perubahan tata guna lahan dihilu Kali Garang, terjadi perubahan aliran banjir Kali Garang dan sedimentasi pada sungai tersebut yang cenderung meningkatkan debit banjir dan muka airnya yang dapat menimbulkan bencana. Dalam usaha untuk menurunkan muka air banjir, direncanakan Bendung Simongan ini akan diganti dari yang semula bendung tetap (*weir*) menjadi bendung gerak (*barrage*), dengan memotong mercu bendung tetap setinggi 3,7 meter. Akibat pemotongan mercu ini akan berpengaruh pada morfologi sungai, pada Kali Garang yang terletak dihilu dari Bendung Simongan dan Banjir Kanal Barat (BKB) di bagian hilirnya. Penelitian ini berisi tentang simulasi perubahan morfologi Kali Garang- Banjir Kanal Barat tanpa Bendung Simongan. Simulasi menggunakan perangkat lunak *BRI-STARS* (*BRIDGE Stream Tube model for Alluvial River Simulation*), dimana simulasi model ini menggeneralisasi aliran semi-dua dimensi untuk air dan sedimennya yang mampu untuk menghitung penggerusan dan pengendapan dalam aliran sub-kritis, super kritis dan kombinasi dari kedua kondisi aliran tersebut.

Input model simulasi pada penelitian ini menggunakan data-data utama berupa data fraksi sedimen, hidrograf Debit andalan dua belas tahun, koefisien manning, dan data penampang melintang sungai. Simulasi dimulai pada 20 time step untuk uji coba dalam dua kondisi yaitu eksisting (data sedimen tahun 1992) dan kondisi prediksi (data sedimen tahun 1997). Tahap kedua merupakan simulasi untuk prediksi slope stabil. Kondisi prediksi slope stabil menggunakan data penampang sungai 1997 dan data sedimen tahun 2003. Hidrograf simulasi prediksi slope stabil yang digunakan adalah debit andalan tahun 1990-2001. Koefisien manning yang digunakan besarnya 0,028 (*SMEC*, 2000). Hasil simulasi menunjukkan pada time step ke 9000 slope dasar sungai mengalami proses kestabilan dengan indikator slope datar ($I = 0,000$) dan $Fr < 1$. Kestabilan terjadi pada kemiringan rata-rata 0,00055. Morfologi Kali Garang mengalami perubahan akibat dihilangkannya Bendung pada sistem sungainya. Perubahan dominan di hulu adalah erosi, ditengah adalah transisi antara erosi dan sedimentasi dan di hilir cenderung terjadi sedimentasi meskipun tidak sebesar di bagian tengah penampang memanjang sungai.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena hanya atas berkat rahmat dan karunia-Nya, laporan Tesis ini dapat terselesaikan dengan baik. Laporan Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan penyelesaian pendidikan Program Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro.

Kami mengucapkan terima kasih kepada yang terhormat :

1. Dr. Ir. Suripin, M.Eng. selaku Ketua Program Magister Teknik Sipil Undip dan juga sebagai dosen pembahas yang telah memberikan pembahasan dan nasihat dengan penuh kesabaran sehingga tesis ini layak dan memenuhi standar
2. Dr.Ir. R.J. Kodoatie,M.Eng. dan Ir. Syafrudin,CES,MT. sebagai dosen pembimbing tesis yang telah membimbing dan mengarahkan, sehingga tesis ini dapat disampaikan secara proporsional
3. Ir. Salamun,MT. sebagai dosen pembahas yang telah memberikan masukan dan dorongan untuk kesempurnaan Tesis ini
4. Ir. Sugiyanto,M.Eng. sebagai dosen penguji yang telah memberikan koreksi berharga di akhir penyusunan Tesis ini
5. Ir. Suseno Darsono,MSc. yang telah mengirimkan paket program BRI-STARS untuk penyelesaian tesis dan juga artikel-artikel jurnal dari Colorado – USA untuk memperkaya pustaka dalam penyusunan tesis ini
6. Para Dosen Pengajar yang telah memberikan bimbingan selama perkuliahan di Magister Teknik Sipil Undip.
7. Seluruh Karyawan Program Magister Teknik Sipil Undip yang telah mendukung kegiatan penyusunan tesis ini
8. Istri dan anak-anak yang memberikan dukungan semangat
9. Serta pihak-pihak yang tidak dapat saya sebut satu persatu.

Semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi kemajuan pendidikan teknik sipil. Sekian.

Semarang, 19 Februari 2004



SUTARTO EDHISONO

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMBANG,NOTASI DAN SINGKATAN	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1. 1. Latar Belakang	1
1. 2. Tujuan Penelitian.....	3
1. 3. Manfaat Penelitian.....	3
1. 4. Batasan Permasalahan	3
1. 5. Hipotesis Penelitian.....	4
1. 6. Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2. 1. Morfologi Kali Garang.....	5
2. 2. Stream Tube Model untuk Agradasi dan Degradasi	6
2. 3. Tabung Stream	8
2. 4. Model Simulasi BRI-STARS	9
2.4.1. Perhitungan Pengempangan	12
2.4.2. Perhitungan Tabung Stream	12
2.4.3. Perhitungan Penelusuran Sedimen	13
2.4.4. Persamaan Transportasi Sedimen.....	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27
3. 1 Alur Pikir Penelitian.....	27
3. 2. Langkah-langkah Penelitian	28
3.2.1. Pengumpulan data	28
3.2.2. Pengolahan data.....	28
3.2.3. Analisis data.	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4. 1. Data-Data Penelitian.....	30
4.1.1. Data Topografi Kali Garang.....	31
4.1.2. Data Potongan Melintang dan Memanjang Kali Garang	31
4.1.3. Data Material Bed Load Kali Garang.....	32
4.1.4. Data Debit Simulasi Kali Garang.....	34
4.2. Simulasi Model Kondisi Eksisting Kali Garang	36
4.2.1. Input Model Simulasi Eksisting	36
4.2.2. Hasil Simulasi Eksisting Morfologi Kali Garang.....	37

4. 3. Simulasi Model Prediksi Kali Garang.....	40
4.3.1. Input Model Simulasi Prediksi.....	40
4.3.2. Hasil Simulasi Prediksi Morfologi Kali Garang	41
4. 4. Simulasi Prediksi Keseimbangan Dasar Sungai Kali Garang Tanpa Bendung	45
4.4.1. Input Model Simulasi Prediksi Keseimbangan Slope	45
4.4.2. Hasil Model Simulasi Prediksi Keseimbangan Slope	47
4. 5. Analisis Perubahan Morfologi Kali Garang.....	53
4. 6. Validasi Hasil Simulasi	61
4. 7. Kestabilan Numerik di Hilir Penampang Memanjang	63
BAB V KESIMPULAN , SARAN DAN REKOMENDASI.....	64
5. 1. Kesimpulan.....	64
5. 2. Saran-Saran	64
5. 3. Rekomendasi	65
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 4.2. Data Analisis Butiran Sedimen <i>WEST CHANNEL</i> Semarang 1992	32
Tabel 4.3. Komposisi Jenis Partikel Sedimen Kali Garang	33
Tabel 4.4. Data Debit Andalan Simulasi Prediksi Keseimbangan Slope Kali Garang Tahun 1990-2001	46
Tabel 4.5. Slope Prediksi Ideal dan Simulasi Model Dasar Sungai Kali Garang	52
Tabel 4.6. Perbandingan Perubahan Morfologi Kali Garang (di Hulu Bendung Simongan) Model Simulasi Bri-Stars Pada 20 Time Step	53
Tabel 4.7. Perubahan Morfologi Kali Garang-BKB Tanpa Bendung Beberapa <i>Cross- Section</i> pada Kondisi Slope Stabil.....	58
Tabel 4.8. Validasi Total Bed Load Terhadap Hasil Simulasi Bri-Stars pada Model Kali Garang	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Lokasi Objek Penelitian	2
Gambar 2. 1. Sket Definisi <i>Streamline</i>	6
Gambar 2. 2 Tampak Atas Daerah Studi dengan Menggunakan <i>Stream Tubes</i>	9
Gambar 2. 3 Bagan Alir dari Model Komputer untuk Tabung.....	11
Gambar 2. 4 Hidrograf Perkiraan Debit <i>Unsteady</i>	12
Gambar 2. 5 Definisi dari variabel perhitungan.....	14
Gambar 2. 6 Prosedur Perhitungan Komposisi Dasar.....	15
Gambar 2. 7 Gerusan Lokal Pada Pilar dan Ukuran Sedimen Sebagai Fungsi.....	23
Gambar 2.8. Pola Aliran pada Pilar Silindris (<i>Raudkivi</i>)	24
Gambar 2.9. Kedalaman gerusan vs. Kecepatan (Melville, 1984).....	25
Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian.	27
Gambar 4.2. Debit Bulanan Rerata Kali Garang Tahun 1992 dan 1997.....	34
Gambar 4.3. Debit Andalan Simulasi Prediksi Dasar Sungai Stabil.....	35
Gambar 4.4. Profil Memanjang Kali Garang Hasil Simulasi Kondisi Eksisting	37
Gambar 4. 5. Perubahan Elevasi Dasar Sungai Penampang Memanjang Sungai Simulasi Kondisi Eksisting Kali Garang 1992.....	38
Gambar 4.6. Karakteristik Aliran Sepanjang Penampang Sungai Hulu Bendung Hasil Simulasi Kali Garang Kondisi Eksisting 1992.....	38
Gambar 4.7. Perubahan Luas Penampang Basah Hasil Simulasi Kondisi Eksisting.....	39
Gambar 4.8. Profil Memanjang Kali Garang Hasil Simulasi Kondisi Prediksi	41
Gambar 4.9. Perubahan Elevasi Dasar Sungai Penampang Memanjang Sungai Simulasi Kondisi Prediksi Kali Garang 1997.....	42
Gambar 4.10. Perubahan Elevasi Dasar Sungai 1992-1997 Hasil Model Simulasi (20 <i>Time Step</i>).....	42
Gambar 4.11. Karakteristik Aliran Sepanjang Penampang Sungai Hulu Bendung Hasil Simulasi Kali Garang Kondisi Prediksi 1997	43
Gambar 4.12. Perubahan Luas Penampang Basah Hasil Simulasi Kondisi Eksisting	44
Gambar 4.13. Perubahan Elevasi Dasar Sungai Simulasi Prediksi Slope Stabil Terhadap Kondisi Awal.....	48
Gambar 4.14. Perubahan Jenis Aliran Simulasi Prediksi Slope Stabil	49
Gambar 4. 15. Kecepatan Rata-Rata Aliran Hasil Simulasi Simulasi Prediksi Slope Stabil (Perbandingan Kondisi Awal $\text{Time Step} = 400$ dengan Kondisi Stabil $\text{Time Step} = 9000$).....	50
Gambar 4.16. Prediksi Slope Stabil Hasil Simulasi	51
Gambar 4.17. Slope Stabil Prediksi Idealisasi	51
Gambar 4.18. Profil Muka Air dan Perubahan Dasar Sungai Kali Garang Kondisi Prediksi , $\text{Time Step} 20$	54
Gambar 4.19. Profil Muka Air dan Perubahan Dasar Sungai Kali Garang Kondisi Prediksi , $\text{Time Step} 240$	55
Gambar 4.20. Profil Muka Air dan Perubahan Dasar Sungai Kali Garang Kondisi Eksisting , $\text{Time Step} 20$	56
Gambar 4. 21. Perubahan Topografi Simulasi Prediksi Slope Stabil.....	57

DAFTAR LAMBANG, NOTASI DAN SINGKATAN

v	Kecepatan
u, v dan w	Komponen kecepatan dalam arah x, y dan z .
q	Debit per unit lebar
t	Waktu
V_s	Komponen kecepatan sepanjang <i>streamline</i> ;
P	Tekanan
γ	Berat spesifik
γg	Percepatan gravitasi
S	Jarak sepanjang <i>streamline</i> ;
h	Tinggi tekan.
fn	Gaya normal terhadap <i>streamline</i>
V_n	Komponen kecepatan normal terhadap <i>streamline</i>
n	Arah normal terhadap <i>streamline</i> , angka kekasaran manning
r	Jari-jari lengkung <i>streamline</i> .
Q_s	Debit sedimen
q_s	Inflow sedimen lateral.
P	Penampang basah
Z	elevasi dasar di atas datum tertentu
i	indeks potongan melintang.
ΔZ_i	Perubahan elevasi dasar
C_{PPM}	Konsentrasi material dasar dalam berat (PPM)
C_{sv}	Konsentrasi sedimen melayang dalam volume termasuk wash
load	
d	Ukuran material dasar rata-rata
S	Kemiringan energi
V	Kecepatan aliran rata-rata
V_*	Kecepatan geser
ν	Viskositas kinematik dari air
ω	Kecepatan jatuh dari partikel sedimen
D	Kedalaman aliran rata-rata
f	Faktor kekasaran
sg	Specific gravity dari sedimen, harga rata-ratanya 2,6
τ_0	Shear stress dari dasar
Φ	Fungsi transport tak berdimensi
θ	Shear stress yang tak berdimensi.

Cv	Konsentrasi sedimen dalam volume
Dgr	Ukuran sedimen
Fgr	Mobilitas material sedimen
Ggr	Debit sedimen
Cw	Konsentrasi sedimen dalam berat
CA, A, n, dan m	Koefisien.
F_{gr}	Angka mobilitas sedimen:
Ψ	Kekasaran relatif
qbv	Unit debit bed load dalam volume,
ks	Koefisien Strickler (1923)
d90	Ukuran butiran 90%
Rb	Jari-jari hidrolis dari dasar dalam meter

Singkatan

BKB	Banjir Kanal Barat
PDAM	Perusahaan Daerah Air Minum
BRI-STAR	<i>Bridge Stream Tube Model for Alluvial River Simulation</i>
DPS	Daerah pengaliran sungai
DAS	Daerah Aliran Sungai
JICA	<i>Japan International Cooperation Agency</i>
STA	Stasiun
AWLR	<i>Automatic Water Level Recorder</i>

DAFTAR LAMPIRAN

L 4-1	Peta Topografi Kali Garang
L 4-2	Potongan Melintang Kali Garang
L 4-3	Potongan Memanjang Kali Garang
L 4-4	Hasil Pemeriksaan Laboratorium Mekanika Tanah Sampel Material Bed Load Kali Garang
L 4-5	Data Hidrograf dan Debit Tahunan Kali Garang (Tahun 1992 dan 1997)
L 4-6	Data Koordinat Titik Potongan Melintang Kali Garang (dalam Satuan metrik dan feet)
L 4-7	Hasil Pengolahan Data Potongan Melintang dan Memanjang Kali Garang (Input Geometrik Model Simulasi)
L 4-8	Output Simulasi Model Kondisi Eksisting (1992)
L 4-9	Output Simulasi Model Kondisi Prediksi (1997)
Tabel L-4.1	Perhitungan Validasi 1
Tabel L-4.2	Perhitungan Validasi 2
L 4-10	Input Model Prediksi Slope Stabil
L 4-11	Output Model Simulasi Prediksi Slope Stabil
L 4-12	Data Olahan Analisis Perubahan Morfologi Kali Garang
L 4-13	Uji Kestabilan Numerik
L 4-14	Perbedaan Penampang Memanjang Hasil Simulasi dan Idealisasi

BAB I

PENDAHULUAN

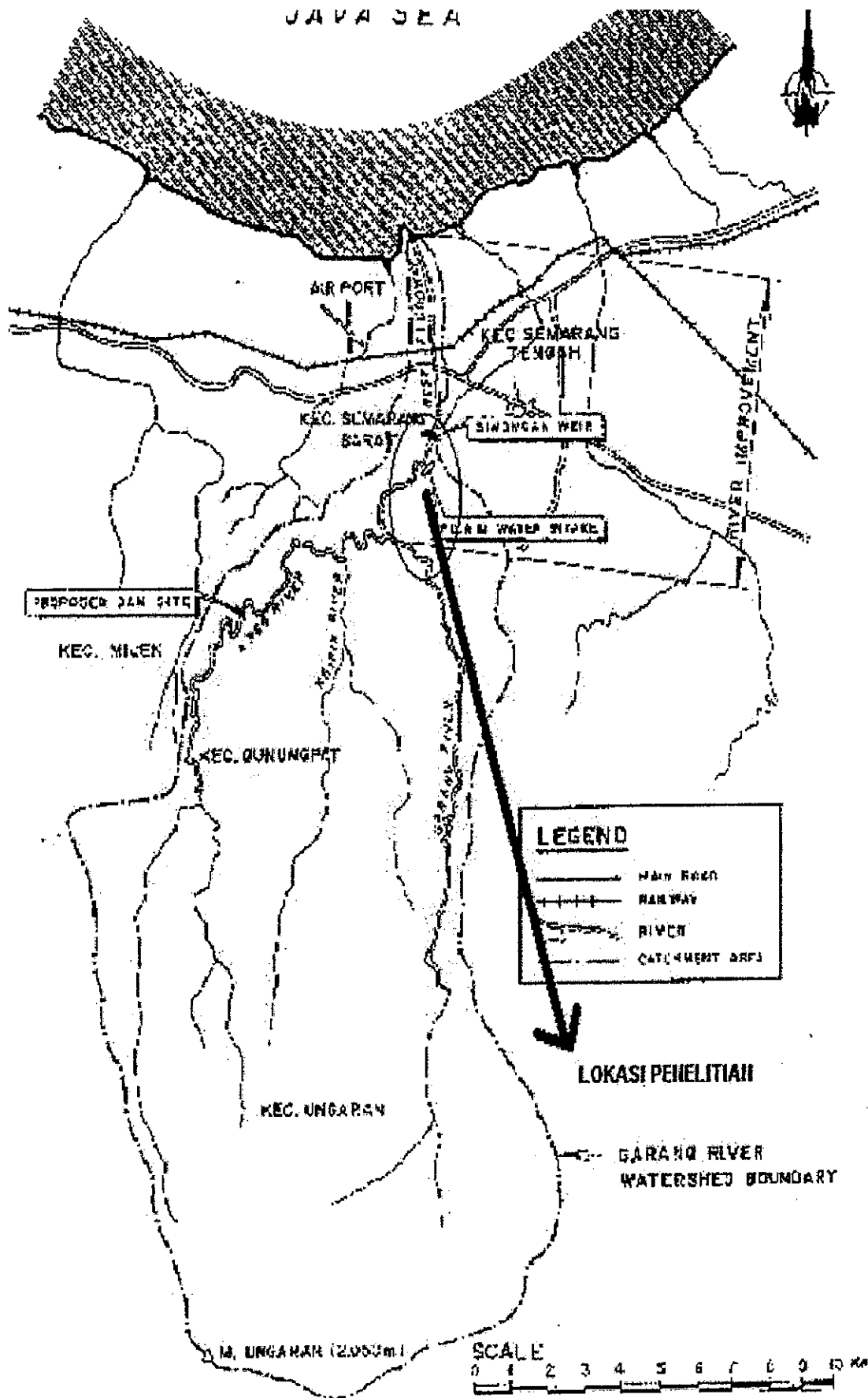
1. 1. Latar Belakang

Bendung Simongan merupakan bangunan air yang dibuat di Kali Garang berupa bendung tetap yang berfungsi untuk menangkap air sungai tersebut guna keperluan penggelontoran kota Semarang dengan melalui alur sungai asli, yaitu Kali Semarang yang terletak disebelah kanan bendung dan pengambilan disisi kiri bendung yang juga berfungsi sebagai saluran penggelontor.

Bagian hilir dari Bendung Simongan ini adalah saluran pengelak banjir untuk wilayah Semarang Bagian Barat yang dikenal dengan nama Banjir Kanal Barat (BKB). Adapun Bendung Simongan dengan BKB-nya adalah bangunan peninggalan Belanda yang dibangun pada awal abad ke 20.

Pengoperasian dari bendung ini adalah sebagai penangkap air pada musim kemarau dengan membuka kedua intake kanan dan kiri, dan sebagai penerus banjir ke BKB dengan menutup kedua pintu intake kanan dan kiri. Karena bendung berupa bendung tetap, maka pada saat banjir terjadi kenaikan muka air yang limpas ditubuh bendung dan pengempangan di bagian hulunya (backwater). Akan tetapi dengan berubahnya tata guna tanah diatas Bendung Simongan, mengakibatkan peningkatan debit banjir sehingga bangunan bendung tersebut tidak sesuai lagi dengan kondisi sungai sekarang. Hal ini terlihat pada kejadian banjir pada bulan Januari tahun 1990, dimana pada saat itu air banjir melimpas dihilu bendung dan mengakibatkan jebolnya tanggul di beberapa tempat dan mengakibatkan banjir didaerah sekitar Simongan bahkan sampai menyebabkan 90 korban jiwa.

Di bagian hulu Bendung Simongan sejarak \pm 1 km terdapat intake PDAM Semarang. Agar bencana serupa tidak terulang, direncanakan untuk merubah Bendung Simongan dari bendung tetap menjadi bendung gerak, dengan maksud untuk menurunkan muka air sungai pada saat banjir. Bendung Simongan ini juga berfungsi sebagai barrier untuk mencegah masuknya air asin kebagian hulu dari bendung. Perubahan bendung tetap menjadi bendung gerak akan merubah morfologi Kali Garang maupun BKB (Banjir Kanal Barat). Lokasi Objek penelitian seperti dijelaskan **Gambar 1.1** berikut ini.



Gambar 1.1 Lokasi Objek Penelitian

1. 2. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

Mengamati perubahan morfologi Kali Garang dan BKB untuk simulasi tanpa Bendung Gerak Simongan.

Mencari Keseimbangan Dasar Sungai Kali Garang Tanpa Bendung Simongan.

1. 3. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi sebagai berikut :

1. Memberikan gambaran hal-hal yang akan terjadi pada alur sungai Kali Garang dan Banjir Kanal Barat pasca Bendung Gerak Simongan, menyangkut perubahan alur sungai, kemiringan dasar sungai, pola erosi dan sedimentasi. Dimana pada penelitian ini akan ditekankan pada pola erosi.
2. Memberikan warning pada bangunan-bangunan penting di hulu bendung yang terpengaruh, sehingga dapat diantisipasi sebelumnya.

1. 4. Batasan Permasalahan

Penelitian ini dibatasi beberapa hal sebagai berikut:

1. Aliran diasumsikan steady untuk perhitungan analitis, namun untuk simulasi model alirannya adalah unsteady menggunakan piranti lunak BRI-STAR.
2. Tinjauan erosi hanya di bagian badan sungai tidak meliputi wilayah DAS-nya.
3. Salinitas pada Banjir Kanal Barat tidak diteliti, dengan asumsi tidak terjadi perubahan dari kondisi sebelumnya.
4. Penelitian ini dibatasi untuk mencari keseimbangan dasar sungai Kali Garang di hulu
5. Bendung Simongan. Bagian Hilir tidak termasuk dalam analisis.

1. 5. Hipotesis Penelitian

Berdasarkan dugaan sementara, perubahan bendung tetap menjadi bendung gerak mengakibatkan degradasi dasar saluran yang relatif cepat dan pada suatu ketika akan mengalami keseimbangan kemiringan saluran. Hal ini didasari dari hukum kontinuitas.

1. 6. Sistematika Penulisan

Penyusunan tesis mengikuti Buku Pedoman Penulisan dan Penyusunan Tesis Magister Teknik Sipil Program Pascasarjana Universitas Diponegoro. Bab I: Pendahuluan meliputi Latar Belakang, Tujuan Penelitian, Manfaat Penelitian, Batasan Masalah, Hipotesis Penelitian, dan Sistematika Penulisan, Bab II: adalah Tinjauan Pustaka, Bab III: Metode Penelitian meliputi Alur Pikir Penelitian dan Langkah-Langkah Penelitian. Bab IV: Hasil dan Pembahasan, Bab V: Kesimpulan, Saran-Saran dan Rekomendasi. Daftar Pustaka dan Lampiran-lampiran merupakan bagian akhir dari Tesis ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2. 1. Morfologi Kali Garang

Pengerusan dasar sungai di hulu bendung akan terjadi karena pengeprasan mercu bendung tetap menjadi ambang dasar perletakan pintu bendung gerak yang lebih rendah dari elevasi mercu bendung semula dengan penurunan 3,7 meter. Elevasi mercu semula EL+ 5.200, menjadi EL+ 1.500 (JICA, 2000).

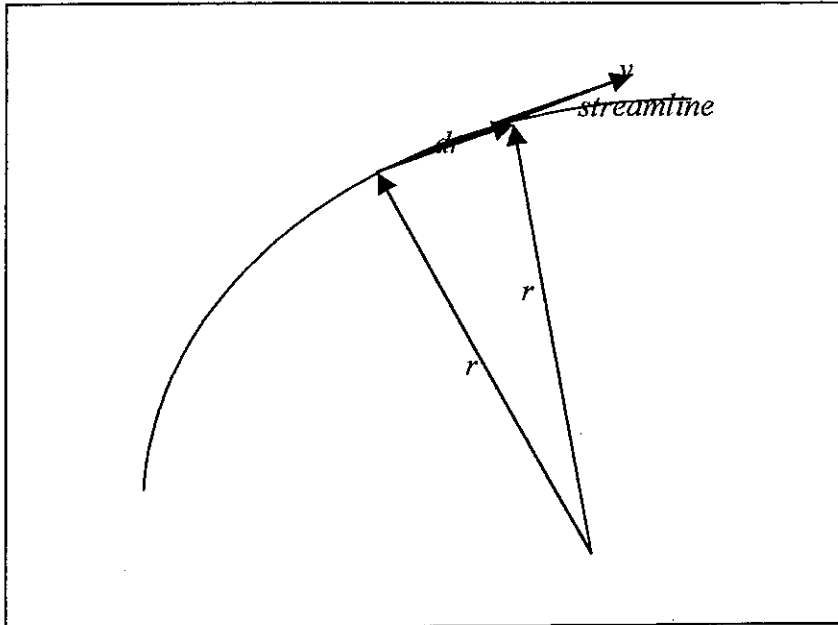
Sebagai akibatnya dasar sungai bagian hulu bendung (Kali Garang) akan tergerus, sehingga dasar sungai akan turun dan sungai akan menemukan keseimbangannya yang baru (mencapai equilibrium) dengan elevasi dasar sungai bagian paling hilir dari Kali Garang adalah elevasi ambang pintu bendung gerak (mercu bendung yang dikepras).

Disamping itu pada saat pengoperasian bendung gerak, maka transportasi sedimen yang berasal dari daerah pengaliran sungai (DPS) bendung tidak mengalami pembendungan.

Transportasi sedimen baik yang berasal dari dasar sungai bagian hulu bendung maupun DAS bendung akan mengendap sepanjang Banjir Kanal Barat (BKB). Proses sedimentasi ini akan bergerak dari bendung ke hilir ke arah muara yang akhirnya akan mencapai keseimbangannya. Bila hal ini sudah terjadi maka pengendapan akan terjadi di laut (Laut Jawa).

2.2. Stream Tube Model untuk Agradasi dan Degradasi

Streamlines adalah suatu garis dimana pada setiap keadaan, vektor kecepatan adalah tangen. Konsep aliran ini diilustrasikan pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2. 1. Sket Definisi *Streamline*

Oleh karena v dan dr paralel, maka hasil perpotongannya adalah nol. Ekspansi dari hasil perpotongan dari persamaan streamline, adalah :

$$\frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w} \dots\dots\dots(1)$$

dimana u , v dan w adalah komponen kecepatan dalam arah x,y dan z . Dengan pertimbangan aliran dua dimensi, ekspresi dari streamline menjadi:

$$\frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} \dots\dots\dots(2)$$

Dalam beberapa situasi pola aliran streamline menunjukkan kedekatan pada garis lapangan dalam sistem kemiripan geometris. Apabila ini terjadi, teknik analisis dari cabang pengetahuan matematik sebagai teori aliran potensial dapat dipakai untuk menguraikan situasi aliran. Teori aliran potensial mengasumsikan kuantitas sehubungan dengan

sehubungan rotasi adalah nol. Dalam hal demikian, pola streamline dan persamaan Bernoulli dapat dipakai untuk menghitung variasi kecepatan dan tekanan meliputi lapangan aliran.

Sesuai dengan matematika dari teori aliran potensial, persamaan dari *streamlines* berupa suatu persamaan differensial yang bilamana ada fungsi dari $\psi(xy)$ akan menjadi sebagai berikut:

$$d\psi = -udy + vdx \dots\dots\dots(3)$$

Test untuk kepastian ini adalah :

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} \dots\dots\dots(4)$$

dimana kondisi ini diperoleh dengan kontinuitas. Differensial total dari ψ adalah :

$$d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi}{\partial y} dy \dots\dots\dots(5)$$

sehingga, perbandingan antara persamaan (3) dan (4)

$$u = -\frac{\partial \psi}{\partial y} \text{ dan } v = \frac{\partial \psi}{\partial x} \dots\dots\dots(6)$$

Sehingga komponen x dan y dari kecepatan dapat diperoleh dari ψ , diketahui sebagai fungsi *stream*. Dengan mempertimbangkan persamaan (3) dan (4), terlihat bahwa

$$d\psi = 0 \dots\dots\dots(7)$$

Sehingga, *streamlines* adalah garis dari fungsi *stream* yang konstan. Sebagai tambahan dapat terlihat bahwa harga aliran diantara 2 *streamlines* pada suatu potongan adalah perbedaan antara nilai dari fungsi *stream*,

$$q = \int_A^B d\psi = \psi_B - \psi_A \dots\dots\dots(8)$$

dimana q adalah debit per unit lebar. Secara fisik, hal ini bisa dipertimbangkan sebagai definisi dari fungsi *stream*. Sejak debit diantara 2 *streamlines* adalah sama dengan perbedaan diantara keduanya, kecepatan bervariasi dengan jarak *streamline*. Sehingga inspeksi visual dari *streamline* memberikan gambar yang kualitatif, dan definisi dari fungsi *stream* diuraikan sebagai bidang aliran dua dimensi.

Untuk aliran unsteady yang incompressible, persamaan pergerakan sepanjang streamlines adalah :

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + h \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

dimana t adalah waktu; V_s adalah komponen kecepatan sepanjang *streamline*; P adalah tekanan; γ berat spesifik dari air; V adalah kecepatan; g adalah percepatan gravitasi; S jarak sepanjang *streamline*; dan h tinggi tekan. Persamaan pergerakan tegak lurus terhadap *streamline* adalah sebagai berikut :

$$f_n = \frac{1}{g} \frac{\partial V_n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{P}{\gamma} + h \right) = \frac{1}{g} \frac{V^2}{r} \quad \dots\dots\dots (10)$$

dimana f_n adalah gaya normal terhadap *streamline*; V_n adalah komponen kecepatan normal terhadap *streamline*; n adalah arah normal terhadap *streamline*; dan r adalah jari-jari lengkung *streamline*.

Untuk aliran *steady* Persamaan (9) berkurang menjadi

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + h = H_s \quad \dots\dots\dots (11)$$

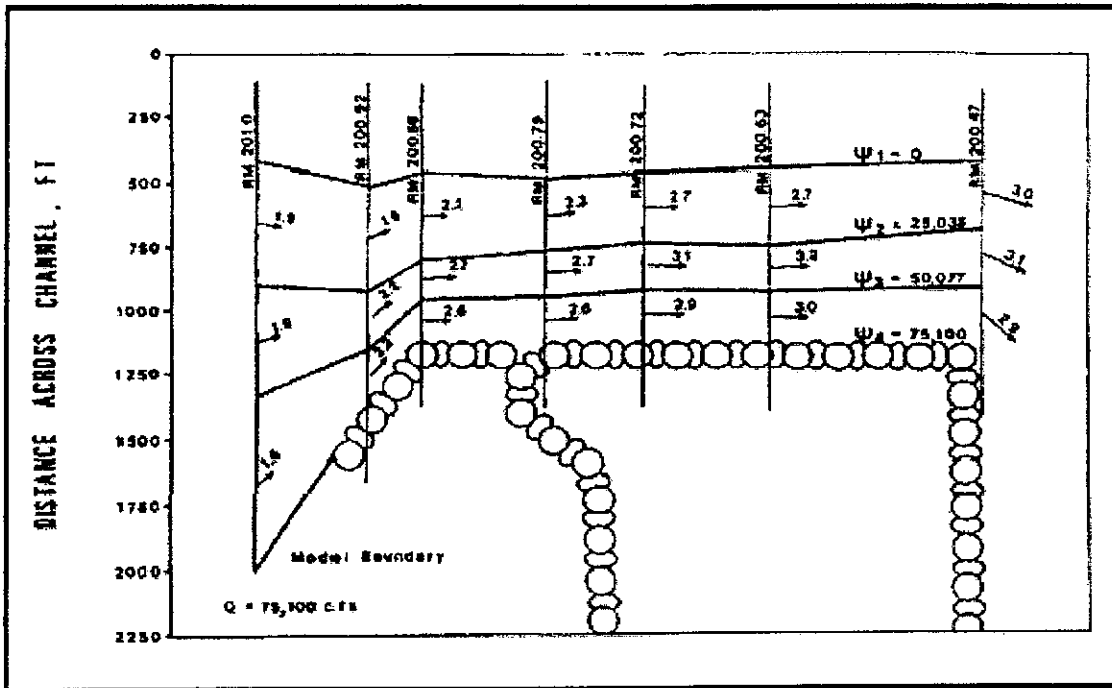
dimana H_s adalah konstan sepanjang *streamline*. Untuk aliran *steady irrasional*, persamaan ini bisa disederhanakan menjadi

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + h = H \quad \dots\dots\dots (12)$$

dimana H adalah konstan sepanjang aliran.

2.3. Tabung Stream

Tabung stream adalah tabung imajiner yang berupa gabungan streamlines. Disebabkan debit diantara streamlines adalah konstan, maka setiap tabung stream membawa debit konstan sepanjang bagiannya.



Gambar 2. 2 Tampak Atas Daerah Studi dengan Menggunakan *Stream Tubes*

Untuk *steady*, aliran *incompressible*, dapat ditulis:

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + h = H_t \dots\dots\dots(13)$$

dimana H_t adalah konstan sepanjang tabung stream. Bilamana diterapkan pada cairan sesungguhnya, tinggi tekan total adalah H_t adalah tidak konstan. Berkenaan dengan geseran dan kehilangan lokal lain, hal ini mengurangi pada arah aliran. Ini adalah asumsi dasar pada perhitungan tabung stream. Konsep dari tabung stream diilustrasikan pada Gambar 2.2. Pada gambar ini , tabung stream terlihat sebagai tampak atas dari cakupan studi.

2. 4. Model Simulasi BRI-STARS

Komponen utama yang pertama dari BRI-STARS adalah berdasar dari suatu model komputer stream tube dengan saluran dengan lebar tetap yang dikembangkan oleh Molinas (1983) untuk mensimulasikan variasi dasar aliran di sungai untuk keadaan dimana data sedimen dan hidraulik terbatas. Penggunaan tabung stream memungkinkan variasi lateral dan longitudinal dari kondisi hidraulik termasuk aktivitas sedimen pada beberapa potongan

melintang sepanjang daerah studi. Obyek dari model ini adalah untuk meneliti problem sedimentasi yang sulit untuk dimana ada interaksi diantara aliran campuran air dan sedimen sungai alluvial. Dalam hal ingin mencapai tujuan ini, profil muka air dan variabel perhitungan hidraulik lainnya untuk superkritis, subkritis, dan kombinasi dari kedua aliran harus dilakukan tanpa gangguan. Perlindungan dasar dan pemecahan lapisan pelindung akan saling melengkapi pada waktu studi yang lebih panjang untuk durasi aliran.

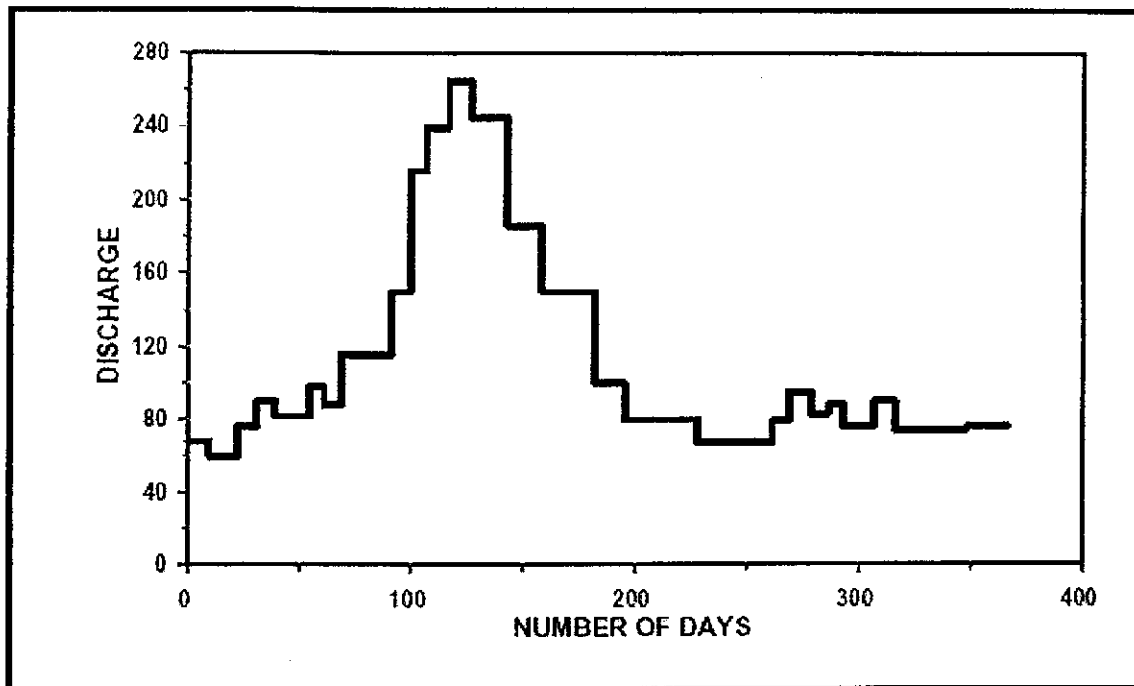
Program komputer tabung stream adalah program semi 2 dimensi dengan dimensi ketiga, kedalaman, termasuk dalam perhitungan. Oleh sebab itu, ada keterbatasan dasar dari program 2 dimensi, aliran sekunder tak dapat disimulasikan. Model komputer menggunakan tabung stream dapat diterapkan pada berbagai macam problem sungai. Ini dapat digunakan sebagai model dasar tetap, untuk menghitung profil muka air untuk subkritis, super-kritis, atau kombinasi dari ke dua kondisi aliran yang mengakibatkan loncatan hidraulik. Penggunaan dari tabung stream memungkinkan variasi kondisi hidraulik dan aktivitas sedimen tidak hanya pada arah longitudinal, akan tetap juga pada arah lateral.

Model komputer tabung stream (*Molinas*, 1983b, 1986; *Molinas*, *Denzel*, dan *Yang*, 1986) untuk penelusuran air dan sedimen adalah terdiri dari 3 komponen utama :

1. Perhitungan pengempangan
2. Perhitungan tabung stream, dan
3. Perhitungan penelusuran sedimen.

Tahapan perhitungan ini dihubungkan menjadi satu rangkaian seperti terlihat pada **Gambar 2.3**.

Pada setiap tahapan waktu, Pertama adalah perhitungan pengempangan dilakukan pada jarak tertentu dari saluran dengan anggapan sebagai tabung tunggal. Kedua, dengan perhitungan elevasi muka air, lokasi lateral dari tabung stream pada setiap potongan melintang yang ditentukan. Dengan setiap tabung stream dianggap sebagai saluran independen, variabel hidraulik sepanjang saluran dihitung. Ketiga, sedimen ditelusuri melalui tiap tabung stream dengan persamaan kontinuitas sedimen. Pada akhir perhitungan ini, komposisi material dasar diperbaiki dan elevasi dasar saluran diperbarui.



Gambar 2. 4 Hidrograf Perkiraan Debit *Unsteady*

2.4.1. Perhitungan Pengempangan

Hidrograf debit air oleh sebab debit konstan terlihat sebagai **Gambar 2.4**. Selama tiap blok waktu debit konstan, perhitungan pengempangan dilakukan tanpa gangguan untuk sub-kritis, super-kritis, atau kombinasi dari kedua kondisi aliran pada loncatan hidraulik. Pendekatan dasar untuk memecahkan persamaan energi adalah dengan metoda tahapan standard (*standard step method*). Persamaan momentum dipakai bilamana dan dimana ada perubahan aliran dari super-kritis ke sub-kritis dengan kemungkinan terjadinya loncatan hidraulik.

2.4.2. Perhitungan Tabung Stream

Pada model, debit total pada saluran di-distribusikan sama dengan jumlah tabung stream yang telah dipilih sebelumnya. Pada setiap tabung stream, debit air dipertahankan konstan. Tidak ada inflow lateral pada tabung stream dari tabung sebelah diperkenankan. Berkenaan dengan asumsi pada stasiun yang diambil, elevasi muka air pada saluran dipertahankan konstan. Pada keadaan ini , pada lokasi debit yang sama, dan sehingga

lokasi tabung stream lateral, berhubungan pada saluran pembawa yang sama. Untuk mengerjakan ini, potongan melintang saluran dibagi menjadi 10 dengan lebar yang sama. Pengangkutan dari tiap tabung stream ditentukan dengan membagi jumlah total tabung stream yang telah dipilih sebelumnya. Lokasi dari tiap tabung stream dapat ditentukan kemudian.

2.4.3. Perhitungan Penelusuran Sedimen

Perhitungan penelusuran sedimen pada tiap tabung stream digambarkan dengan persamaan kontinuitas sedimen yang diberikan sebagai berikut :

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + n \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{\partial A_s}{\partial t} - q_s = 0 \quad \dots\dots\dots(14)$$

dimana n adalah volume sedimen pada suatu unit volume lapisan dasar atau 1 minus porositas. Pada program ini, n diset sama dengan yang nilai yang umum dipakai yaitu 0,6. Ad adalah volume sedimen melayang pada potongan melintang per unit lebar. Qs adalah volume debit sedimen, dan qs adalah inflow sedimen lateral. Perhatikan Gambar 2.5 dan Gambar 2.6.

Pada program komputer ini, pergantian volume sedimen melayang rata-rata di set sama dengan 0 sejak quantitas adalah suatu fungsi dari lokasi dan kecepatan aliran dan sejak perubahan kecepatan selama tahapan waktu dianggap sama dengan 0 (nol). Dengan kesamaan, tidak ada parameter dari fungsi transportasi sedimen diperkenankan untuk mengganti selama satuan waktu.

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t} = 0 \quad \text{atau} \quad \frac{\partial Q_s}{\partial x} = \frac{dQ_s}{dx} \quad \dots\dots\dots(15)$$

Kemudian persamaan kontinuitas sedimen menjadi :

$$n \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{dQ_s}{dx} = 0 \quad \dots\dots\dots(16)$$

Persamaan kontinuitas sedimen diubah sebagai berikut :

$$n \frac{\partial A_d}{\partial t} = \frac{n(2P_i + P_{i+1} + P_{i-1}) \Delta Z_i}{4 \Delta t} \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$\frac{dQ_s}{dx} = \frac{Q_{si} - Q_{si-1}}{\frac{\Delta x_i + \Delta x_{i-1}}{2}} \dots\dots\dots(18)$$

dimana:

P adalah penampang basah;

Z adalah elevasi dasar diatas datum tertentu;

i adalah indeks potongan melintang.

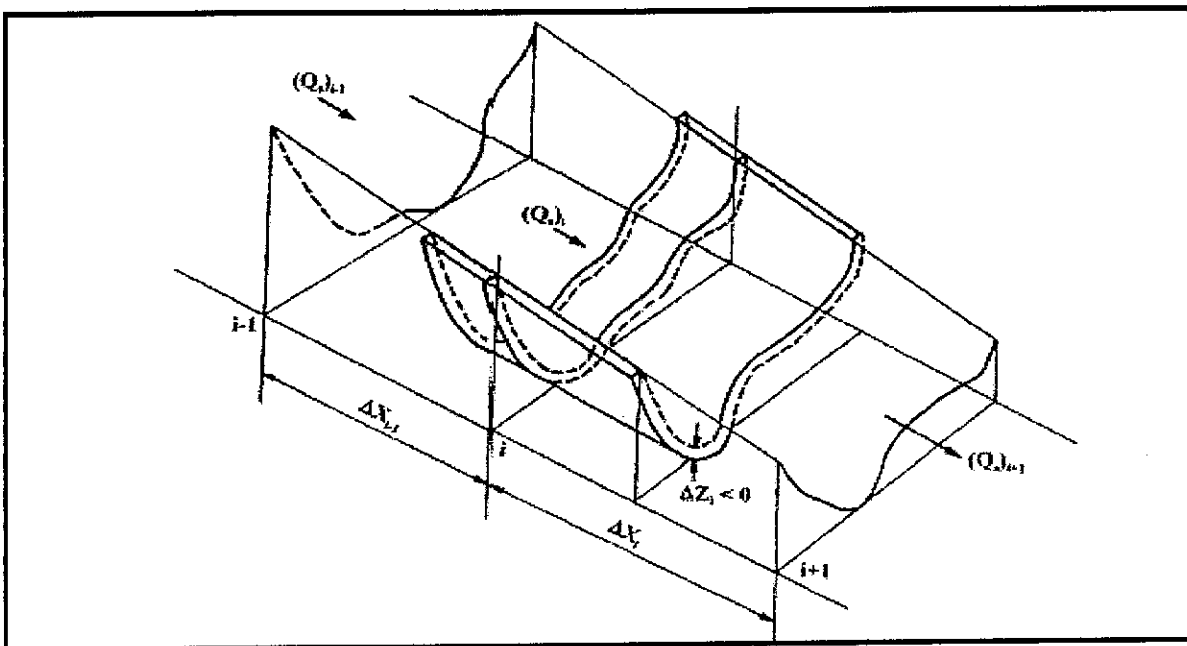
Perubahan elevasi dasar, ΔZ_i , dapat diperoleh dari persamaan kontinuitas sedimen Pers.(16) , (17) dan (18), yaitu :

$$\Delta Z_i = \frac{8\Delta t(Q_{si-1} - Q_{si})}{n(2P_i + P_{i-1} + P_{i+1})(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} \dots\dots\dots(19)$$

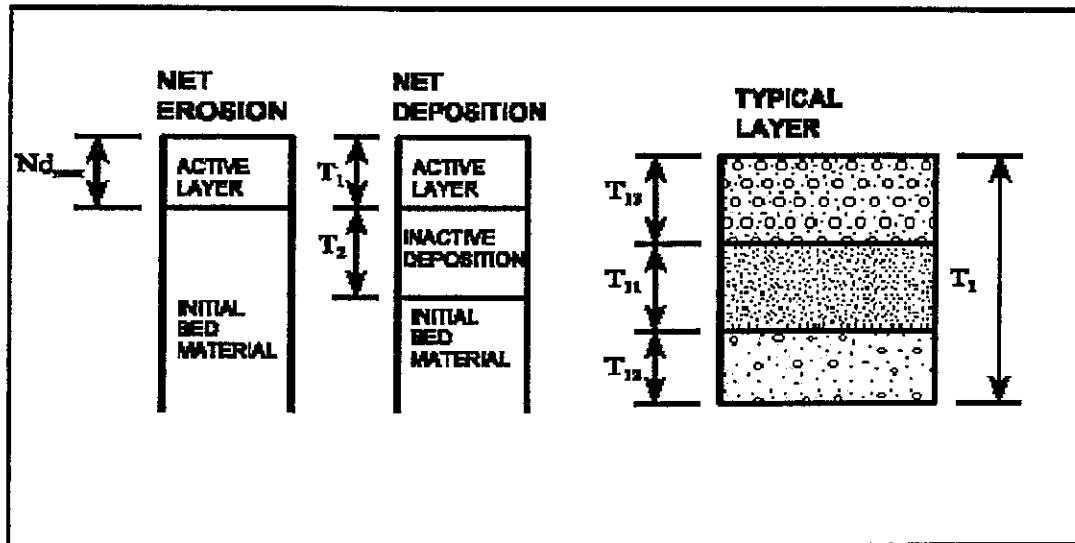
Perubahan total dari elevasi dasar pada stasiun i diperoleh dari :

$$\Delta Z_i = \sum_{k=1}^{NSIZE} \Delta Z_{ik} \dots\dots\dots(20)$$

dimana NSIZE adalah jumlah ukuran pecahan sedimen. Total perubahan elevasi dasar ditambahkan pada elevasi dasar lama dan potongan melintang baru pada stasiun i akan digunakan pada iterasi waktu yang ditentukan kemudian.



Gambar 2. 5 Definisi dari variabel perhitungan



Gambar 2. 6 Prosedur Perhitungan Komposisi Dasar

Bagan alir seperti terlihat pada Gambar 2.3 memperlihatkan proses yang diikuti pada perhitungan perubahan elevasi dasar. Sejak lokasi dari tabung *stream* memotong saluran berganti sesuai dengan waktu dan debit, perubahan dari elevasi dasar sebagai distribusi dari ukuran sedimen pada seksi tertentu untuk tabung *stream* yang lain adalah diterjemahkan menjadi perubahan dari elevasi dasar pada tiap titik melintang saluran.

2.4.4. Persamaan Transportasi Sedimen

Sedimen disungai alam terjadi dengan bentuk campuran yang tidak seragam. Berdasar pada pertimbangan umum, perhitungan transportasi sedimen material dasar yang termasuk dalam BRI-STARS adalah :

- Persamaan pasir halus: Yang, Molinas, dan Wu (1996).
- Persamaan pasir : Engelund Hansen (1972), Ackers and White (1972), Yang (1973).
- Persamaan Gravel : Meyer-Peter dan Muller (1948), Yang (1984)
- Persamaan yang disuplai: Persamaan regresi.
- Persamaan Muatan Material Dasar

a. Persamaan Sedimen Halus

Kapasitas transport dari sedimen aluvial oleh aliran air adalah proposional dengan ukuran sedimen. Sehingga, angka transport dari sungai untuk sedimen ukuran halus pada umumnya adalah sangat tinggi. Diper-hitungkannya efek dari konsentrasi sedimen yang tinggi pada kecepatan jatuh, kekentalan, dan kepadatan dalam aliran sedimen yang berat, persamaan pasir Yang, 1979 dimodifikaasi oleh Yang, Molinas, dan Wu (1996) sebagai berikut :

$$\log(C_{PPM}) = 3,710 - 0,157 \log\left(\frac{\omega_m d}{\nu_m}\right) - 1,097 \log\left(\frac{V_*}{\omega_m}\right) + \left[1,432 + 0,246 \log\left(\frac{\omega_m d}{\nu_m}\right) + 0,123 \log\left(\frac{V_*}{\omega_m}\right)\right] \log\left(\frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \frac{VS}{\omega_m}\right) \dots\dots\dots (21)$$

besarnya $\omega_m = \omega(1 - C_{sv})^k$, $\nu_m = \nu(\gamma / \gamma_m) e^{5,06 C_{sv}}$, $\gamma_m = \gamma + (\gamma_s - \gamma)C_{sv}$

dimana :

C_{PPM} = konsentrasi material dasar dalam berat (PPM)

C_{sv} = konsentrasi sedimen melayang dalam volume, termasuk wash load

d = ukuran material dasar rata-rata

k = pangkat dimana bervariasi dengan angka Reynold partikel (2 – 8)

S = kemiringan energi

V = kecepatan aliran rata-rata

V_* = kecepatan geser

γ dan γ_s = berat spesifik dari air dan sedimen,

ν = viskositas kinematik dari air

ω = kecepatan jatuh dari partikel sedimen d

Koefisien untuk persamaan sedimen halus ditentukan dengan analisis regresi dari data Sungai Kuning dengan diameter rata-rata berkisar dari 0,013 mm sampai 0,091 mm, dan

konsentrasi sedimen melayang dari 0,05 sampai 477 kg/m³ (50 PPM sampai 368.000 PPM)

b. Persamaan Pasir

1. Persamaan *Engelund - Hansen*

Engelund dan Hansen (1972) menggunakan konsep tenaga aliran *Bagnold* dan prinsip yang serupa untuk memperoleh persamaan transportasi sedimen :

$$f' \Phi = 0,1 \theta^{5/2} \dots\dots\dots(22)$$

dimana

$$\Phi = \frac{q_t}{\gamma_s \sqrt{[g(s_g - 1)d^3]}} \dots\dots\dots(23)$$

$$\theta = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d} \dots\dots\dots(24)$$

$$f' = \frac{2gDS}{V^2} \dots\dots\dots(25)$$

dimana d adalah diameter tengahan butiran yang jatuh dari material dasar, D adalah kedalaman aliran rata-rata, f' adalah faktor kekasaran, g adalah percepatan gravitasi, q_t adalah unit debit sedimen dasar dalam berat, s_g specific gravity dari sedimen, τ_0 adalah shear stress dari dasar, Φ adalah fungsi transport tak berdimensi, θ adalah shear stress yang tak berdimensi.

Substitusi dari (23) – (25) ke (22) diperoleh

$$C_v = 0,005 \frac{VD^{1/2}S^{3/2}}{(s_g - 1)^2 g^{1/2} d} \dots\dots\dots(26)$$

dimana C_v konsentrasi sedimen dalam volume. Rumus *Engelund dan Hansen* dikembangkan dengan menggunakan data saluran dari *Guy, Simons dan Richardson (1966)*. Rumus ini bisa digunakan untuk regime aliran hulu dengan ukuran partikel lebih besar dari 0,15 mm.

2. Persamaan Ackers dan White

Ackers dan White (1973) mengembangkan fungsi debit sedimen secara umum dalam kelompok tak berdimensi tiga: Dgr (ukuran sedimen), Fgr (mobilitas), dan Ggr (debit sedimen). Berdasar pada konsep tenaga stream *Bagnold*, ada hubungan konsentrasi dari beban material dasar sebagai fungsi dari angka mobilitas Fgr :

$$C_w = C_A s_g \frac{d}{D} \left(\frac{V}{V_*} \right)^n \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \dots\dots\dots(27)$$

dimana Cw adalah konsentrasi sedimen dalam berat, CA, A, n, dan m adalah koefisien.

Angka mobilitas sedimen diuraikan dengan parameter :

$$F_{gr} = \frac{V_*^n}{\sqrt{[gd(s_g - 1)]}} \left[\frac{V}{\sqrt{32} \log\left(\frac{10D}{d}\right)} \right]^{1-n} \dots\dots\dots(28)$$

Diperoleh diameter butiran tak berdimensi sebagai

$$d_{gr} = d \left[\frac{g(s_g - 1)}{v^2} \right]^{1/3} \dots\dots\dots(29)$$

dimana d adalah diameter butiran. Untuk campuran sedimen tak seragam, Ackers dan White menganjurkan bahwa d35 digunakan untuk menggantikan d.

Nilai dari n, A, m, dan CA diperoleh dengan menggunakan 925 set data *flume*. Untuk ukuran tengahan dari dgr, berkisar antara 1 sampai 60 (sedimen 0,04 mm sampai dengan 2,5 mm), nilai tersebut adalah :

$$\left. \begin{aligned} n &= 1,0 - 0,56 \log(d_{gr}) \\ A &= \frac{0,23}{\sqrt{d_{gr}}} + 0,14 \\ m &= \frac{9,66}{d_{gr}} + 1,34 \\ \log(C_A) &= 2,86 \log(d_{gr}) - [\log(d_{gr})]^2 - 3,53 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(30)$$

Nilai dari n, A, m, dan CA dari untuk ukuran coarse berkisar dengan dgr lebih besar dari 60 diberikan sebagai :

$$n = 0,0; A = 0,17; m = 1,5; CA = 0,025. \quad (31)$$

3. Persamaan Pasir Yang

Yang (1973) menganjurkan bahwa konsentrasi material dasar adalah berhubungan dengan tenaga stream unit, yang dinyatakan sebagai produk dari kecepatan dan kemiringan. Yang dan Molinas (1982) menunjukkan hubungan antara konsentrasi dan tenaga stream unit yang dapat diambil dari teori dasar aliran turbulen.

Persamaan Yang tak ber-unit (Yang, 1973) untuk pasir adalah :

$$\log(C_{PPM}) = 5,435 - 286 \log\left(\frac{\omega d}{\nu}\right) - 0,457 \log\left(\frac{V_*}{\omega}\right) + \left[1,799 - 0,409 \log\left(\frac{\omega d}{\nu}\right) - 0,314 \log\left(\frac{V_*}{\omega}\right)\right] \log\left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega}\right) \dots\dots\dots(32)$$

dimana kecepatan kritis tak berdimensi V_{cr} / ω dalam gerakan incipient dapat dinyatakan sebagai :

$$\frac{V_{cr}}{\omega} = \begin{cases} \frac{2,5}{\log\left(\frac{V_* d}{\nu}\right) - 0,06} & \text{untuk } 1,2 < \frac{V_* d}{\nu} < 70 \\ 2,05 & \text{untuk } \frac{V_* d}{\nu} \geq 70 \end{cases} \dots\dots\dots(33)$$

Persamaan Yang tidak berdimensi. Koefisien untuk persamaan pasir ditentukan dengan analisis regresi untuk 463 set dari data flume diameter tengahan berkisar dari 0,15 mm sampai 1,71 mm.

4. Persamaan Molinas dan Wu

Molinas dan Wu (1966) menemukan tenaga stream yang universal, yang diperoleh dari tenaga stream unit tak berdimensi dan hukum universal dari distribusi kecepatan, sebagai berikut :

$$\Psi = \frac{V^3}{(S_g - 1)gD\omega_{50} \left[\log \left(\frac{D}{d_{50}} \right) \right]^2} \dots\dots\dots(34)$$

Berdasar pada konsep tenaga stream universal, Molinas dan Wu memperoleh persamaan muatan material dasar :

$$C_{PPM} = \frac{1430(0,86 + \sqrt{\Psi})\Psi^{1,5}}{0,016 + \Psi} \dots\dots\dots(35)$$

Dengan hubungan antara konsentrasi sedimen dengan kedalaman air dan kekasaran relatif melalui Ψ , persamaan ini memperhitungkan dengan wajar efek dari kedalaman pada transportasi sedimen. Koefisien dari persamaan ditentukan berdasar pada 513 set dari data sungai alam yang berkisar 0,091 mm sampai 1,15 mm dari diameter tengahan dari material dasar, dan dari 0,25 m sampai 62,3 m untuk kedalaman aliran.

c. Persamaan Gravel

1. Persamaan Meyer-Peter dan Müller

Meyer-Peter dan Müller (1958) mengembangkan suatu persamaan empiris untuk debit muatan dasar di sungai alam. Bentuk umum dari persamaan dalam unit metrik adalah sbb.:

$$\gamma \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} R_b SW = 0,047 \gamma'_s d_m + 0,25 p^{1/3} q_{bw}^{2/3} \dots\dots\dots(36)$$

dimana

$$q'_{bw} = \gamma_s q_{bv}, \quad \gamma'_s = \gamma_s - \gamma, \quad k_r = 26 / d_{90}^{1/6}, \quad d_m = \sum p_{bk} d_k \dots\dots\dots(37)$$

dimana:

q_{bv} = unit debit bed load dalam volume,

k_s = koefisien Strickler (1923) dari kekasaran dasar, ekuivalen dengan 1 dibagi dengan koefisien kekasaran Manning

d₉₀ = ukuran butiran dimana 90% adalah lebih halus dalam berat kering,

R_b = jari-jari hidrolis dari dasar dalam meter

Satuan dari ρ adalah t.detik/m⁴; dan γ, γ_s dan γ_s' adalah dalam t/m³.

Persamaan (42) dapat ditulis sbb. , sebagaimana ditulis oleh Chien (1954)

$$\Phi = 8(\theta' - 0,047)^{3/2} \dots\dots\dots (38)$$

dimana :

$$\theta' = \gamma R_b S / \gamma_s' d (k_s / k_r)^2 = \theta (k_s / k_r)^2$$

Eksperimen yang dikembangkan oleh *Meyer-Peter* dan *Muller* dibuat di-laboratorium dengan lebar *flume* berkisar 0,15 m dan 2 m, kedalaman antara 0,01 m sampai 1,20 m, diameter efektif sedimen antara 6,4 sampai 30 mm, dan spesifik gravity dari sedimen dari 1,25 sampai 4. Rumus ini karenanya cocok untuk diterapkan pada sedimen coarse dengan sedikit *suspended load*. Karena *suspended load* umumnya hanya dalam bagian yang sangat kecil pada transportasi sedimen dengan dasar batuan, karenanya muatan dasar diperlakukan sebagai muatan material dasar total.

2. Persamaan Gravel Yang

Yang (1984), mengacu pada analisis tak berdimensi yang sama dan metoda regresi dipakai untuk memperoleh persamaan pasir (*Yang*,1973), diperoleh suatu persamaan untuk menghitung konsentrasi material dasar untuk saluran dasar batuan (gravel).

Persamaan *Yang* untuk tenaga stream dengan unit tak berdimensi untuk gravel adalah :

$$\log(C_{PPM}) = 6,681 - 0,633 \log\left(\frac{\omega d}{v}\right) - 4,816 \log\left(\frac{V_*}{\omega}\right) + \left[2,784 - 0,305 \log\left(\frac{\omega d}{v}\right) - 0,282 \log\left(\frac{V_*}{\omega}\right) \right] \log\left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega}\right) \dots\dots\dots (39)$$

Kecepatan kritis tak berdimensi V_{cr} / ω pada gerakan insipien dapat juga dihitung dengan persamaan (39).

Koefisien dari persamaan regresi ditentukan dengan analisis perkalian regresi dari 166 set dari data *flume* dengan diameter tengahan berkisar dari 2,46 mm sampai 7,01 mm.

d. Persamaan untuk Pengguna

Ada anggapan praktis yang mengatakan bahwa laju dari transportasi sedimen atau nilai dari konsentrasi sedimen adalah besar hubungannya dengan variabel utama yang nyata seperti debit air, kecepatan, gradien energi, gaya geser, tenaga arus, unit tenaga arus, kekasaran relatif, bilangan *Froude*, dan sebagainya.

Bentuk dasar dari persamaan untuk pengguna dari BRI-STARS dapat di-gambarkan sbb.

:

$$Q_{s,k} = C_1 V^{C_2} S_f^{C_3} D^{C_4} d_k^{C_5} Q^{C_6} \dots\dots\dots(40)$$

dimana $Q_{s,k}$ adalah muatan sedimen untuk ukuran fraksi k dalam berat, Q adalah debit air, dan C1 – C6 adalah koefisien yang diberikan pada pengguna.

5) Gerusan Jembatan dan Abutment

Jika ada gangguan yang menghalangi arus, maka pola aliran sekitar gangguan akan berubah. Karena kapasitas transport adalah fungsi dari karakteristik aliran, maka pola kapasitas transport juga mengalami perubahan. Pada daerah dimana kapasitas transport tidak sama dengan besar material yang disuplai, maka gerusan atau pengendapan akan terjadi.

Gerusan dapat dikatakan sebagai perbesaran dari bagian aliran dengan memindahkan campuran material melalui gerakan dari aliran.

Total gerusan pada sungai terdiri dari 3 komponen, yang secara umum adalah sbb.:

Gerusan umum, dikarenakan perubahan yang panjang dari elevasi dasar sungai (agradasi atau degradasi), yang akan terjadi apakah ada perubahan penampang atau tidak.

Gerusan kontraksi, adalah hasil kontraksi dari arus air, yang disebabkan oleh karena kondisi alam atau buatan seperti jembatan dengan approach-nya

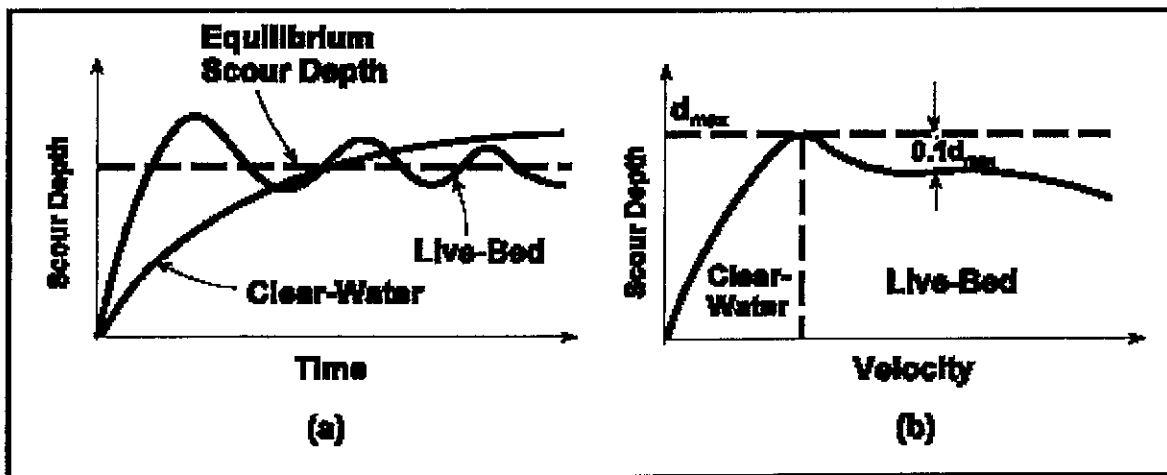
Gerusan lokal, adalah konsekuensi dari adanya pilar atau abutment, yang memperbesar aliran vortek yang memindahkan material disekitarnya.

Laursen (1952) menyatakan bahwa karakteristik umum yang mendasar dari analisis untuk gerusan lokal adalah :

1. Besar gerusan akan sama dengan perbedaan antara kapasitas transportasi keluar dari daerah gerusan dengan besar suplai material

2. Besar gerusan akan berkurang bila bidang aliran diperbesar
3. Ada batas untuk akan tergerus
4. Batas ini akan dicapai secara asimptotis.

Gambar 2.7 menunjukkan secara diagramatis dari terjadinya kedalaman gerusan dengan waktu dan hubungan antara kedalaman gerusan dengan kecepatan datang. Kedalaman maksimum gerusan $\pm 30\%$ lebih besar dari batas kedalaman gerusan bilamana dasar bagian hulu saluran adalah berupa dunes. Bilamana dasar bagian hulu diklasifikasikan sebagai dasar rata, maka kedalaman maksimum gerusan adalah sama dengan kedalaman equilibrium.

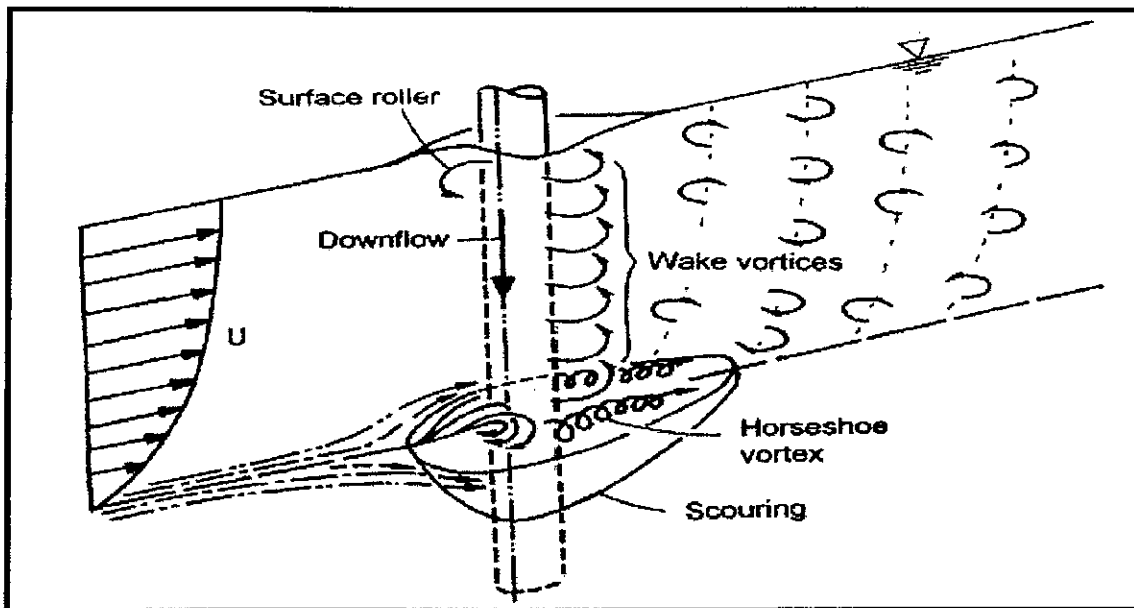


Gambar 2.7 Gerusan Lokal Pada Pilar dan Ukuran Sedimen Sebagai Fungsi dari Waktu Dan Kecepatan Datang (Raudkivi dan Sutherland,1981)

a. Gerusan lokal pada pilar jembatan

Kedadaan aliran yang dominan didekat pilar adalah terbentuknya aliran berputar yang besar, atau terbentuknya vortek disekeliling pilar. Vortek ini adalah mekanisme dasar penyebab dari gerusan lokal pada pilar. Kekuatan dari vortek bervariasi yang secara signifikan berhubungan dengan bentuk pilar dan kecepatan datang. Pilar yang streamline akan menghasilkan pusaran yang lemah, sebaliknya bentuk yang kaku menghasilkan pusaran yang kuat.

Gambar 2.8 menunjukkan pola aliran pada pilar silindris.

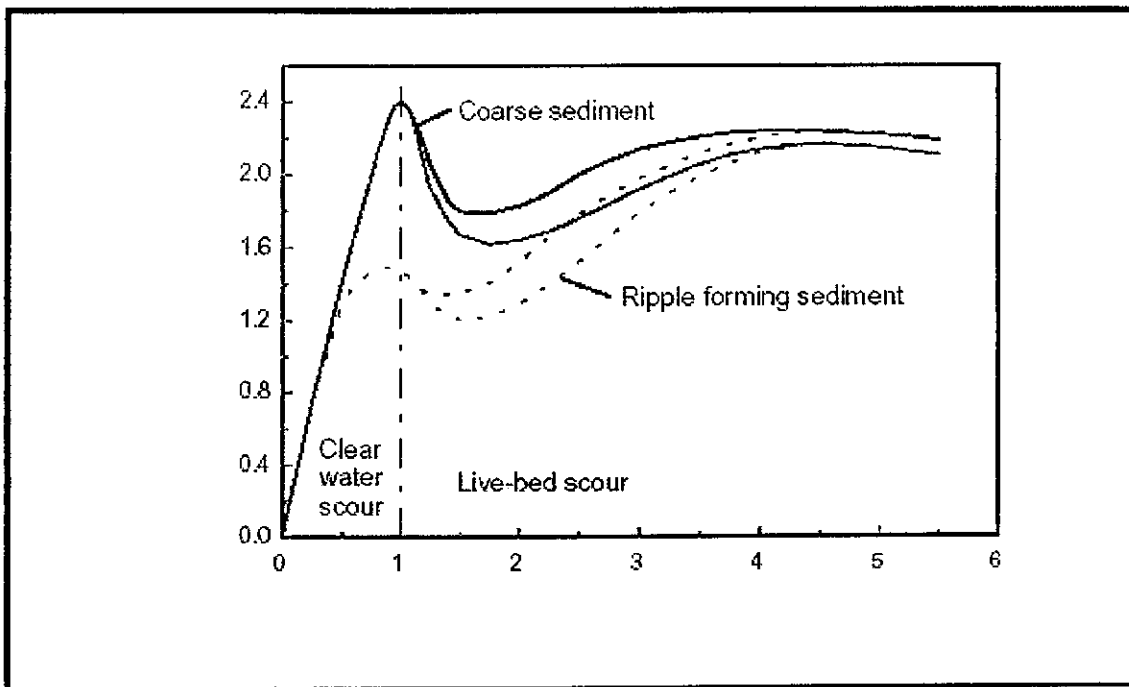


Gambar 2.8. Pola Aliran pada Pilar Silindris (*Raudkivi*)

Pengaruh dari parameter

- Kedalaman aliran

Studi terdahulu menyatakan hubungan antara kedalaman dari gerusan dengan lebar pilar (y/b). Pada pengamatan lapangan dan beberapa eksperimen mengatakan bahwa untuk $y/b > 3$, pengaruh parameter ini dapat diabaikan. Perhatikan Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Kedalaman gerusan vs. Kecepatan (Melville, 1984)

- Ukuran pilar
- Kecepatan
- Ukuran sedimen
- Gradasi sedimen
- Bentuk pilar
- Sudut hantaman
- Density material dasar
- Durasi aliran

b. Data hidraulik

Data hidraulik yang diperlukan untuk running dari komputer adalah :

1. Data geometri saluran

Program komputer menentukan jarak diantara 2 potongan melintang. Potongan melintang saluran adalah input dengan memasukkan pasangan koordinat X dan Y dari tiap titik data potongan melintang, dimulai dari sisi kiri saluran memandang kearah hilir.

2. Data kekasaran saluran dan koefisien kehilangan

Mengacu pada geometri saluran, angka kekasaran harus ditentukan. Pilihan yang ada adalah : Manning, Darcy-Weisbach, dan Chezy. Angka kekasaran harus ditentukan dimulai dari titik terjauh mulai dari bagian hulu dan bergerak kearah hilir.

3. Debit pemasukan berkaitan dengan ketinggian

4. Debit yang sesuai dengan ketinggian muka air profil sungai harus disediakan melalui data tabung stream. Data dapat berupa :

a. Hidrograf debit dan rating curve elevasi debit

b. Tabel debit harian dan Rating Curve pada titik kontrol

c. Nilai Elevasi-Debit pada titik kontrol

5. Data sedimen

Pada bagian ini, data input untuk komputasi kapasitas transportasi sedimen berhubungan dengan perbedaan aliran dan tampilan kondisi geometri saluran. Persamaan transportasi sedimen yang tersedia untuk diterapkan hanya untuk ukuran partikel 0,0625 mm (pasir) dan yang lebih besar.

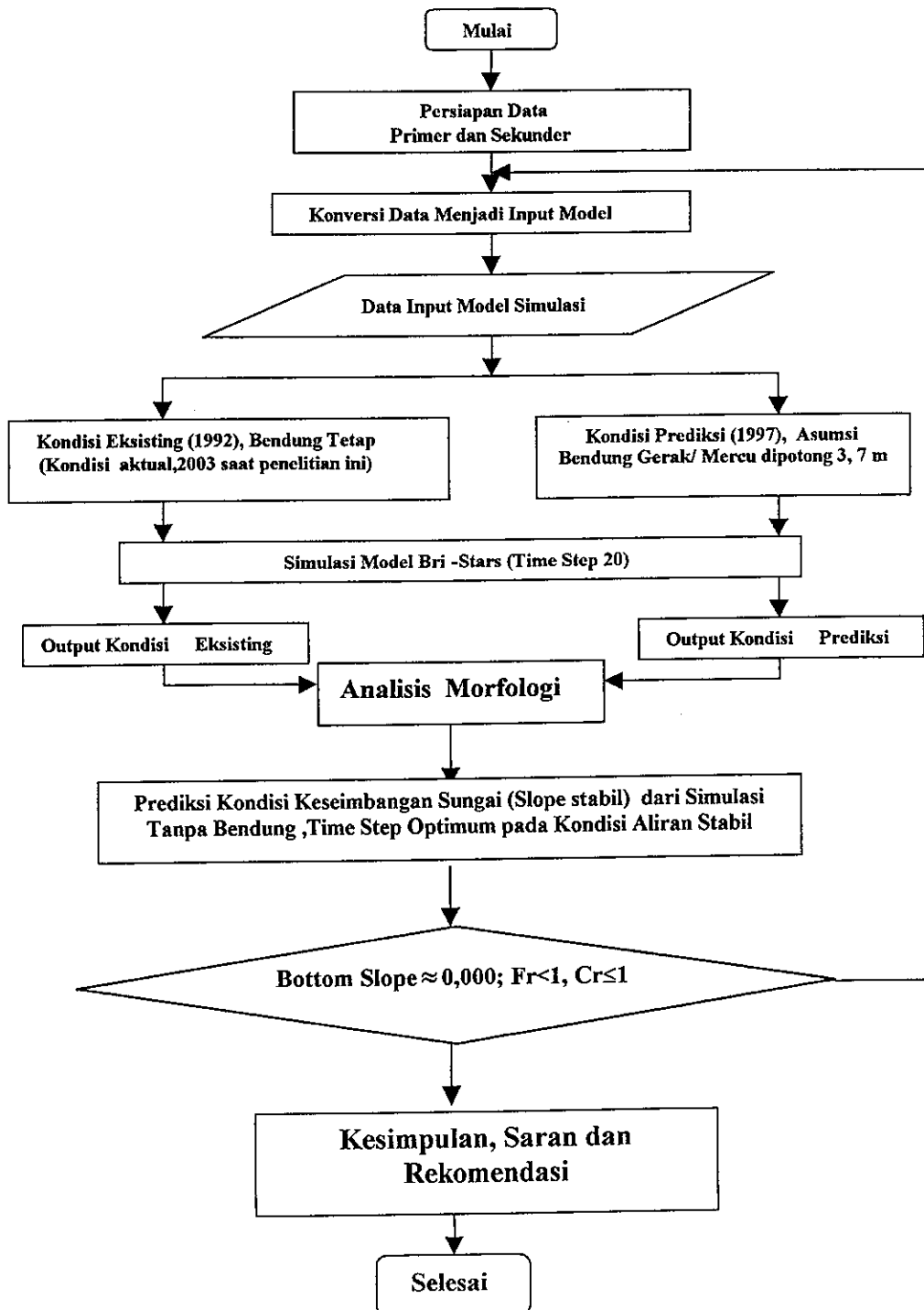
Dasar dari simulasi dari metoda ini utamanya adalah ditentukan oleh data pengamatan dari lapangan, dalam suatu kejadian. Kemudian di-run dengan menggunakan parameter-parameter yang ada, dan kemudian dicocokkan dengan keadaan lapangan setelah waktu tertentu. Kalibrasi dari model diperlukan sehingga diperoleh hasil yang sesuai.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alur Pikir Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilaksanakan sesuai diagram alir (Gambar 3.1) berikut :



Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian.

3. 2. Langkah-langkah Penelitian.

3.2.1. Pengumpulan data

Data yang dibutuhkan adalah data sekunder yang meliputi :

- Peta topografi di Lokasi Objek Penelitian
- Gambar potongan memanjang dan melintang sungai
- Data material *bed load*
- Data tanah di rencana lokasi bendung gerak Simongan

Semua data yang diperlukan adalah berupa data sekunder yang diperoleh dari instansi terkait, kecuali data material bed load berupa data primer yang diambil dari 3 (tiga) titik dihilu Bendung Simongan.

Sumber data diperoleh dari instansi Pemerintah maupun swasta, seperti :

- Dinas Pengembangan Sumber Daya Air Jawa Tengah
- PIPWS Jratunseluna
- PDAM Semarang
- Dinas PU Kota Semarang
- Dinas Bina Marga Jawa Tengah
- Bapedalda Jawa Tengah
- Perpustakaan Magister Teknik Sipil Undip
- Jurnal dan Pustaka lainnya yang berkaitan langsung dengan penelitian ini.

3.2.2. Pengolahan data.

Pengolahan data pada penelitian ini meliputi :

- Konversi data menjadi input model
- Kemiringan dasar sungai
- Analisa material sedimen
- Penampang basah sungai.
- Kondisi dasar sungai flat dan aliran stabil

3.2.3. Analisis data.

Analisis data pada penelitian ini meliputi :

- a. Perubahan morfologi Kali Garang
- b. Perubahan keseimbangan aliran dan dasar sungai tanpa bendung tetap simongan
- c. Karakteristik morfologi tanpa bendung tetap simongan dan prediksinya pada kurun waktu tertentu.
- d. Metoda yang digunakan untuk memprediksi adalah BRI-STARS.

Hasil analisis data berupa ekspos prediksi perubahan morfologi sungai tanpa bendung Simongan.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4. 1. Data-Data Penelitian

Model simulasi Bri-Stars pada Tesis ini memerlukan beberapa data pokok antara lain:

1. Data Topografi Kali Garang. Berupa data kontur tanah di sepanjang alur Kali Kreo sampai dengan Banjir Kanal Barat yang melewati Kali Garang sebagai objek penelitian. Data Topografi yang digunakan pada penelitian ini mempunyai skala 1:2000. Terdiri dari 5 bagian peta memanjang seperti pada **Lampiran 4-1**
2. Data Potongan Melintang dan Memanjang Kali Garang. Skala Gambar Potongan melintang adalah 1:100. Sedangkan Potongan memanjangnya untuk skala vertikal 1:100 sedangkan skala horisontalnya 1:10.000. Dari **Lampiran 4-2** dan **Lampiran 4-3** dapat diperoleh informasi untuk simulasi model berupa koordinat titik penampang (absis dan ordinat) serta titik stasiun (STA) yang berupa jarak penampang melintang pada STA tertentu terhadap muara/ mulut sungai dan dibaca dari titik paling hulu. Titik terjauh dari muara merupakan bagian paling hulu begitu pula sebaliknya titik terdekat dengan muara adalah titik paling hilir.
3. Data Material Bed Load Kali Garang Tahun 2003. Data ini diperoleh dari pengukuran langsung di lokasi penelitian. Data material bedload diuji di laboratorium Mekanika Tanah-Teknik Sipil Undip yang terdiri dari data analisis butiran (*Grain Size*) berupa grafik dan tabel, data berat isi kering dan berat isi basah partikel sedimen. Seluruh data tersebut disajikan pada **Lampiran 4-4**
4. Data Hidrograf dan Debit Tahunan Kali Garang Tahun 1992 dan 1997. Data ini menyajikan catatan debit harian maksimum Kali Garang di stasiun Panjangan (Hulu Bendung Simongan, di desa Panjangan). Bersumber dari Bagpro Hidrologi Dinas PSDA Jawa Tengah. Selengkapnya dapat dilihat pada **Lampiran 4-5**.
5. Data penelitian penunjang yang pernah dilakukan terhadap objek Kali Garang. Data ini diambil untuk periode tahun 1990 sampai dengan 2000. Misalnya data koefisien *Manning* di lokasi penelitian (*SMEC,1996*)

4.1.1. Data Topografi Kali Garang

Data Topografi yang digunakan merupakan data sekunder yang bersumber dari JICA (Japan International Cooperation Agency) Tahun 1997. Data Topografi yang terakomodasi berkaitan dengan objek penelitian yaitu Kali Garang dimulai dari titik hulunya adalah Kali Kreo, di Kelurahan Gunungpati, Semarang. Bagian Hilirnya adalah muara Kali Garang. Topografi di lokasi penelitian di hulunya berupa perbukitan sampai kurang lebih mendekati bendung Simongan. Setelah bendung Simongan termasuk daerah dengan topografi dataran rendah hingga pantai. Peta Topografi yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai skala 1: 2000.

Data Topografi dijadikan acuan untuk menganalisa kondisi morfologi sungai secara umum dari objek penelitian ini, yaitu Kali Garang.

4.1.2. Data Potongan Melintang dan Memanjang Kali Garang

Potongan melintang dan memanjang digunakan sebagai data input model simulasi dan sekaligus validasi model untuk variabel hidraulik dan koreksi penempatan penampang saat simulasi, agar titik hulu dan hilirnya tidak terbalik karena akan mempengaruhi hasil simulasi secara umum. Berdasarkan data sumber yang diperoleh (JICA,1997) potongan melintang sungai di objek penelitian terdiri dari 19 segmen. Sedangkan untuk potongan memanjang sungainya ada dua macam yaitu potongan memanjang untuk bagian hulu sampai bendung simongan dan bagian hilir dari bendung Simongan sampai dengan muara sungai.

Lokasi 19 Segmen sesuai dengan sistem penamaan *cross-section* pada Peta Topografinya (Lampiran 4-1). Tiap segmen kemudian dibaca titik koordinat x dan y-nya dengan cara menarik garis vertikal pada setiap perubahan ekstrik garis penampangnya. Koordinat yang digunakan dalam model mengikuti aturan pembacaan y-x , artinya dibaca elevasi kedalaman titik penampang melintang dahulu kemudian jarak mendatarnya terhadap titik awalnya (0,0). Semua titik awal penampang untuk koordinat X= 0 selalu dimulai pada titik elevasi pertama sumbu Y-nya.

Stasiun pada tiap penampang digunakan jarak penampang terhadap muara sungai/ mulut sungai. Hal ini mengikuti cara pembacaan model simulasi yang digunakan pada penelitian ini. Sehingga dengan melihat STA tiap segmen kita bisa mendeteksi titik hulu pertamanya adalah yang terjauh dari mulut sungai dan titik hilir terakhirnya adalah yang terdekat dengan mulut sungai. Berdasarkan data penampang melintang sungai (**Lampiran 4-2**) titik paling hulunya adalah *section WF-177* (9124 meter dari mulut sungai) dan titik paling hilirnya adalah *section WF-5* (600 meter dari mulut sungai).

Oleh karena ada kesulitan teknis perangkat model simulasi, maka satuan tiap variable digunakan satuan Inggris yaitu feet. Khusus untuk penampang melintang disajikan dalam dua bentuk satuan yaitu *Metric* (meter) dan *English* (feet) seperti pada **Lampiran 4-6**.

Hasil pengolahan dari data-data potongan melintang dan memanjang dalam input model simulasi ditunjukkan pada **Lampiran 4-7**, ditunjukkan dengan kode-kode input **NS, ST, ND, RE, RH** dan **XS**.

4.1.3. Data Material Bed Load Kali Garang

Ada dua macam data yang digunakan dalam tesis ini, yaitu data sekunder sebagai acuan kondisi eksisting model simulasi dan data primer dari pengukuran di lapangan yang terdiri dari tiga titik.

Data Sekunder yang digunakan adalah data penelitian yang pernah dilakukan oleh Dr.Ir. Suripin pada tahun 1992 terhadap Material Sedimen di sekitar Kali Garang. Data analisis butiran sedimen disajikan pada **Tabel 4.1** berikut:

Tabel 4.1. Data Analisis Butiran Sedimen WEST CHANNEL Semarang 1992

Diameter (Ø)	STA.05*		STA.03		STA.01	
	1	2	1	2	1	2
-3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5
-1	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	3.5
0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	5.0
1	1.5	1.5	1.0	1.0	2.0	7.0
2	12.0	45.0	2.5	3.5	5.5	12.5
3	31.5	66.0	11.0	15.0	10.0	22.5
4	21.0	77.5	16.0	31.0	14.0	36.5
5	11.5	89.5	25.5	56.5	22.5	59.0
6	12.0	99.0	28.5	85.0	16.0	75.0
7	9.5	100.0	9.0	94.0	5.5	80.5
8	1.0	100.0	5.0	99.0	6.5	87.0
9	0.0	100.0	1.0	100.0	5.0	92.0
10	0.0	100.0	0.0	100.0	5.0	97.0
11	0.0	100.0	0.0	100.0	3.0	100.0

Sumber: Suripin, 1992 *) Digunakan untuk input SG (*Sedimen Gradasion*) simulasi model
Keterangan: 1: frekuensi berat dalam %, 2: frekuensi kumulatif berat dalam %

Sedangkan data primer diambil dari tiga titik sampel sedimen yaitu di lokasi sebagai berikut:

1. Titik S1 di dekat lokasi Jalan Tol Manyaran
2. Titik S2 di dekat lokasi *AWLR* (kurang lebih 200 meter dari Jalan Tol)
3. Titik S3 di dekat intake PDAM Semarang

Hasil analisa butiran (*Grain Size Analysis*) dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah, Jurusan Teknik Sipil-Undip. Hasil Lengkap analisis laboratorium data ini disajikan pada **Lampiran 4-4**.

Berdasarkan hasil analisa laboratorium terhadap jenis butiran sedimen diperoleh kesimpulan seperti dijelaskan pada **Tabel 4.2** berikut.

Tabel 4.2. Komposisi Jenis Partikel Sedimen Kali Garang

Titik Sampel	% Gravel	% Silt	% Sand	% Clay
S1	0,9	27,6	71,5	0,0
S2	29,4	0,0	70,6	0,0
S3	0,0	80,8	19,2	0,0

Sumber: Hasil Uji Lab. Mekanika Tanah, Jurusan Teknik Sipil Undip, Oktober, 2003

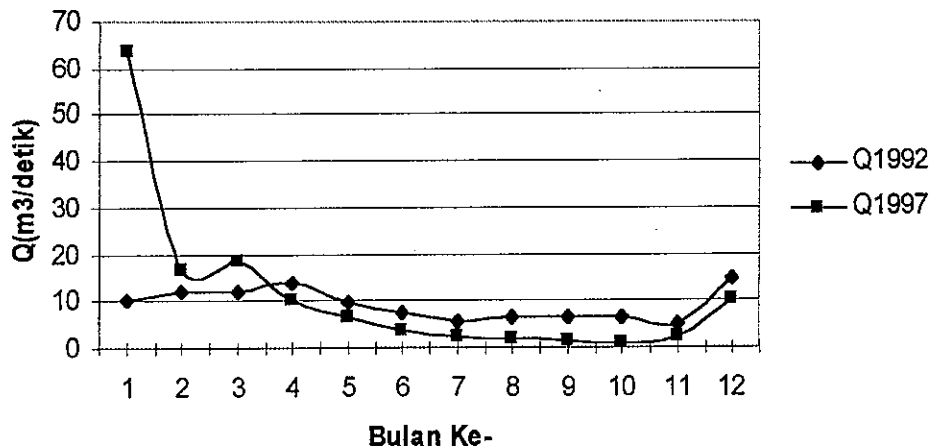
Tabel 4.2 menunjukkan bahwa dari ketiga sample material sedimen, cenderung memiliki sifat kepasiran. Sampel S1 dan S2 memiliki gradasi pasir lebih dari 70 %. Sehingga simulasi model menggunakan formula khusus untuk jenis sedimen bergradasi pasir. Dipilih Formula *Molinas* dan *Wu* (1996) dalam simulasi tesis ini sebab berdasarkan jenis sungainya termasuk sungai alamiah dan tipe sedimennya adalah sedimen pasir. Selain itu formula tersebut memiliki kemiripan dengan formula *Yang* (1933) yaitu direkomendasikan untuk fraksi sedimen pasir atau yang lebih besar ukuran butirannya (*Molinas* dan *Wu*, 1996).

Selain jenis sedimennya, fraksi material sedimen yang digunakan dalam simulasi penelitian ini dipakai 8 fraksi sedimen dari Sampel Sedimen S2. Hal ini alasannya karena fraksi sedimen yang setipe dengan data sekundernya adalah 8 fraksi. Maka logikanya jika data kondisi eksisting mempunyai 8 fraksi sedimen (data sekunder), maka untuk memperoleh kondisi yang analog pada simulasi prediksinya dipakai 8 fraksi sedimen.

Data-data berkaitan dengan sedimen pada kode input model simulasi menggunakan symbol SO, QS, SF, SG dan SD. Penjelasan umum tentang kode input dapat dilihat pada **Lampiran 1-1**.

4.1.4. Data Debit Simulasi Kali Garang

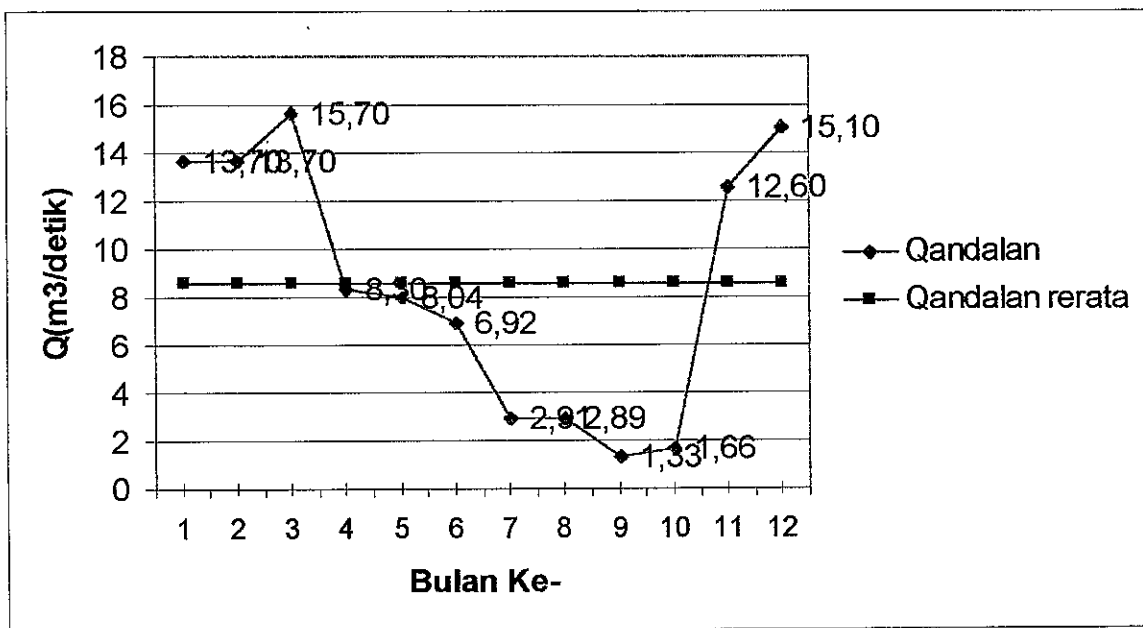
Data debit untuk objek simulasi yang diperoleh adalah data debit harian pada tahun 1992 dan 1997. Data tersebut dipilih sebagaimana data simulasi untuk kondisi eksisting (tahun 1992) dan kondisi prediksi (tahun 1997). Data debit yang dipakai untuk simulasi merupakan data debit harian setahun. Khusus untuk mengetahui awal perubahan morfologi digunakan istilah kondisi eksisting dan prediksi yang masing-masing menggunakan time step sebanyak 20 pada simulasi model Bri-Stars. Running model simulasi pada time step 20, debit simulasinya menggunakan hidrograf kumulatif rata-rata. Alasannya karena khusus untuk debit yang relatif sangat kecil kira-kira antara 10-25 m³/detik perubahan awal morfologi tidak cukup signifikan terjadi. Debit yang sangat kecil tidak mempengaruhi model bahkan pada beberapa simulasi uji coba model simulasi *stagnan* atau *jump*. Oleh karena terbatasnya sumber data debit tahunan yang terukur di bendung Simongan, maka digunakan data dari titik selain di bendung. Data yang berhasil diperoleh dari STA Panjangan. Dengan mengasumsikan muka air referensinya dari analog debit yang melimpas di bendung Simongan. Data debit selengkapnya disajikan pada **Lampiran 4-6**. Sebagai ilustrasi disajikan **Gambar 4.1** Data Debit Bulanan Rerata di Kali Garang Tahun 1992 dan 1997.



Gambar 4.1. Debit Bulanan Rerata Kali Garang Tahun 1992 dan 1997
(Publikasi Data Debit Sungai Jawa Tengah, Bagpro Hidrologi, Dinas PSDA Jateng)

Input data debit pada penelitian ini mempunyai kode input SQ. Namun yang selalu berkaitan dengan kode ini adalah kode QQ dan SS.

Khusus untuk data debit simulasi untuk periode iterasi yang lebih panjang, digunakan data debit andalan Kali Garang di STA Panjangan selama periode 12 tahun yaitu data tahun 1990 sampai 2001. Debit andalan adalah data debit rerata di bulan tertentu yang terlampaui 20% dari bulan tersebut. Data debit rerata bulanan yang digunakan adalah 20% dari N-data (N=12, menunjukkan jumlah tahun data). Sehingga diperoleh data debit andalan seperti ditunjukkan Gambar 4.2 berikut ini.



Gambar 4.2. Debit Andalan Simulasi Prediksi Dasar Sungai Stabil

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa debit andalan antara bulan ke-6 sampai 9 terjadi aliran yang sangat kecil sehingga simulasi menjadi tidak signifikan lagi. Maka untuk simulasi prediksi slope stabilnya digunakan debit andalan rata-rata dalam periode data 12 tahun.

4.2. Simulasi Model Kondisi Eksisting Kali Garang

4.2.1. Input Model Simulasi Eksisting

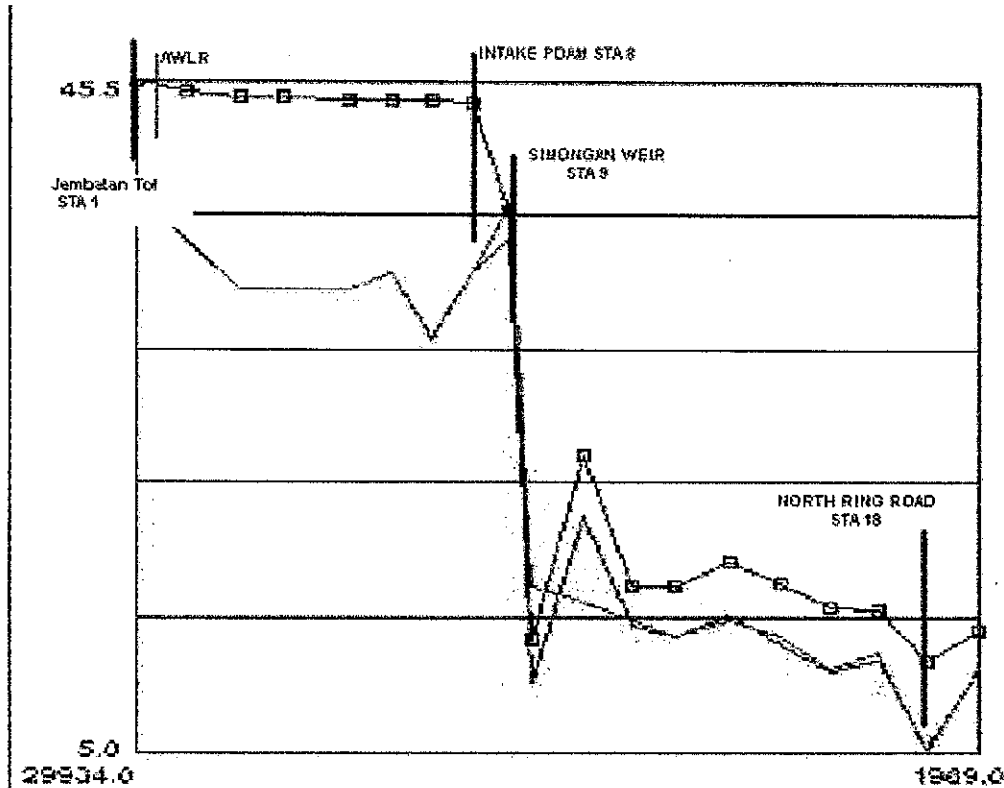
Input Model Simulasi pada kondisi awal diberi istilah pada penelitian ini adalah Kondisi Eksisting. Komponen utama yang dijadikan input model antara lain:

1. Penampang Melintang Sungai yang terdiri dari 19 Segmen (**Lampiran 4-2**), data tahun 1997. Diolah dengan cara membuat sumbu koordinat kartesius kuadran I, artinya semua titik koordinatnya harus positif karena merupakan syarat model yang digunakan. Titik $X=0$ merupakan titik koor penampang paling kiri dengan analog posisi dipandang dari hulu aliran. Titik Y merupakan kedalaman titik penampang sungai dengan referensi/ datum sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Apabila datum ada yang bernilai negatif maka *grade* elevasi tanah dinaikkan dari segmen 1 sampai segmen 19. Khusus pada segmen bendung (Segmen Nomor 9, STA 5350 meter dari mulut sungai) elevasi dasar penampang (absis koordinatnya) menggunakan referensi elevasi bendung simongan, dengan asumsi jenis materialnya adalah sama dengan penampang di hulunya yaitu tanah.
2. Data hidrograf debit dominan yang digunakan adalah data debit tahunan Kali Garang yang diperoleh dari kumulasi data debit bulanan reratanya tahun 1992. Diskritisasi berdasarkan data elevasi dan debitnya dipakai nilai 109,14 m³/detik atau 3854 ft³/detik pada elevasi 12,1 meter atau 39,7 ft dan 51 m³/detik atau 1801 ft³/detik pada elevasi 11,00 meter atau 36,1 ft. (Publikasi Data Debit Sungai Jateng, 1992)
3. Data Material Sedimen Tahun 1992. Data yang diakomodasi sebagai input adalah prosentase berat tiap saringan. Oleh karena susunan saringan yang digunakan mempunyai perbedaan, namun jenis materialnya adalah sama atau hampir sama yaitu jenis sedimen dengan kecenderungan sifat pasir, maka yang digunakan adalah elemen fraksinya dengan mengasumsikan saringannya adalah setipe dengan pengukuran langsung (Data Primer Material Sedimen Tesis ini). Selain itu karena tidak diperolehnya data sejenis dari beberapa sumber yang berkompeten dengan objek penelitian maka analog data perlu dilakukan pada penelitian ini. Fraksi sedimen yang dimasukkan adalah 8 fraksi, ditunjukkan kode SF.
4. Time Step yang digunakan pada simulasi kondisi ini adalah 20.
5. Koefisien Kekasaran Manning yang digunakan $n=0,028$ untuk kondisi aktual Kali Garang (SMEC,1996)
6. Data lain sifatnya kontrol untuk outputnya.

4.2.2. Hasil Simulasi Eksisting Morfologi Kali Garang

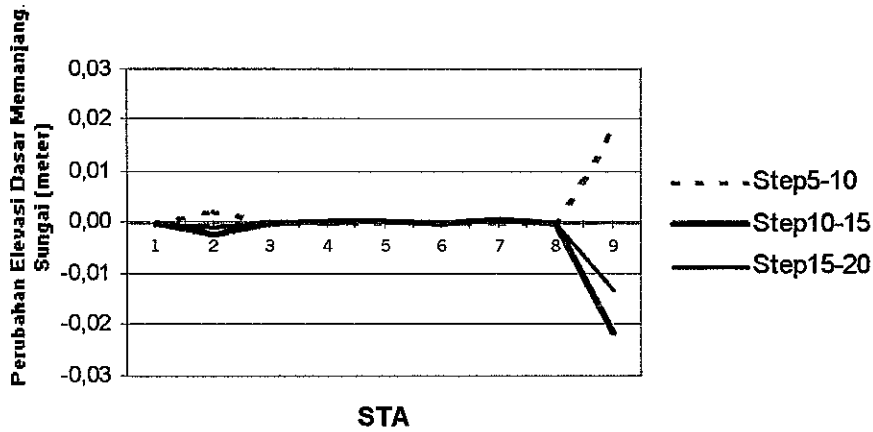
Berdasarkan hasil running model simulasi Bri-Stars pada kondisi eksisting diperoleh keadaan sebagai berikut:

1. Profil memanjang sungai kondisi eksisting disajikan pada **Gambar 4.3**. Hasil Simulasi Visual secara Lengkap Disajikan disajikan pada **Lampiran L 4-8, L 4-8a,b dan c**



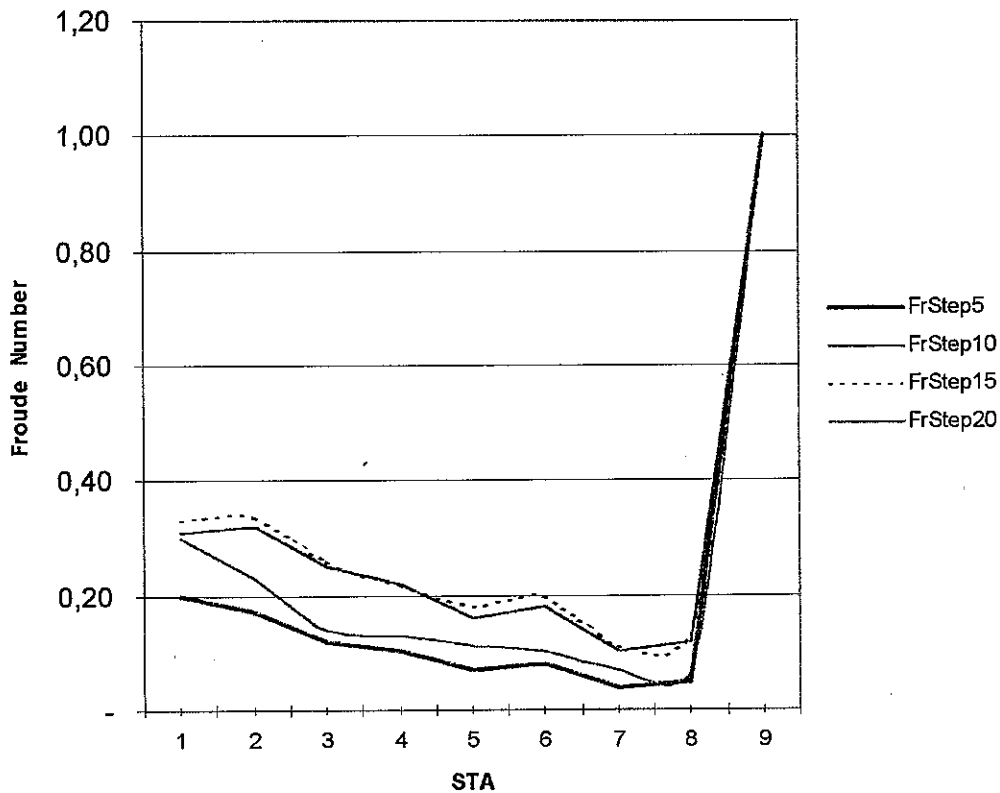
Gambar 4.3. Profil Memanjang Kali Garang Hasil Simulasi Kondisi Eksisting

2. Elevasi dasar sungai mengalami perubahan agradasi maksimal 0,02 meter dan degradasi relatif sangat kecil atau dapat diabaikan. Perubahan yang dimaksud berdasarkan antara time step. Secara visual disajikan pada **Gambar 4.4**.



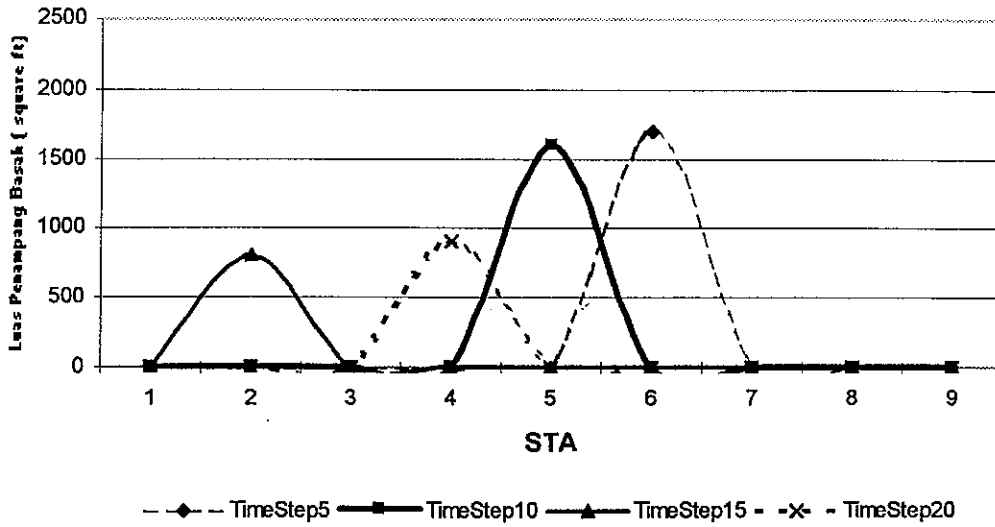
Gambar 4. 4. Perubahan Elevasi Dasar Sungai Penampang Memanjang Sungai Simulasi Kondisi Eksisting Kali Garang 1992

3. Jenis aliran di hulu bendung (STA 1 sampai 9) pada kondisi ini adalah sub kritis, hal ini ditunjukkan dari Froude Number (Fr)-nya di bawah 1 ($Fr < 1$). Secara visual hal ini ditunjukkan pada **Gambar 4.5**. Dari Gambar tersebut menunjukkan bahwa kondisi aliran menjadi kritis saat menuju ke STA 9 atau bendung Simongan. Kondisi tersebut disebabkan oleh adanya terjunan tubuh bendung.



Gambar 4.5. Karakteristik Aliran Sepanjang Penampang Sungai Hulu Bendung Hasil Simulasi Kali Garang Kondisi Eksisting 1992

4. Perubahan luas penampang basah pada simulasi kondisi eksisting berdasarkan time step terhadap kondisi awal bentuk penampangnya mengalami perubahan rata-rata sebesar 92,8 %. Hal tersebut ditunjukkan pada **Gambar 4.6**.



Gambar 4.6. Perubahan Luas Penampang Basah Hasil Simulasi Kondisi Eksisting

Hasil keluaran simulasi model pada kondisi eksisting secara lengkap disajikan pada **Lampiran 4-8**.

4. 3. Simulasi Model Prediksi Kali Garang

4.3.1. Input Model Simulasi Prediksi

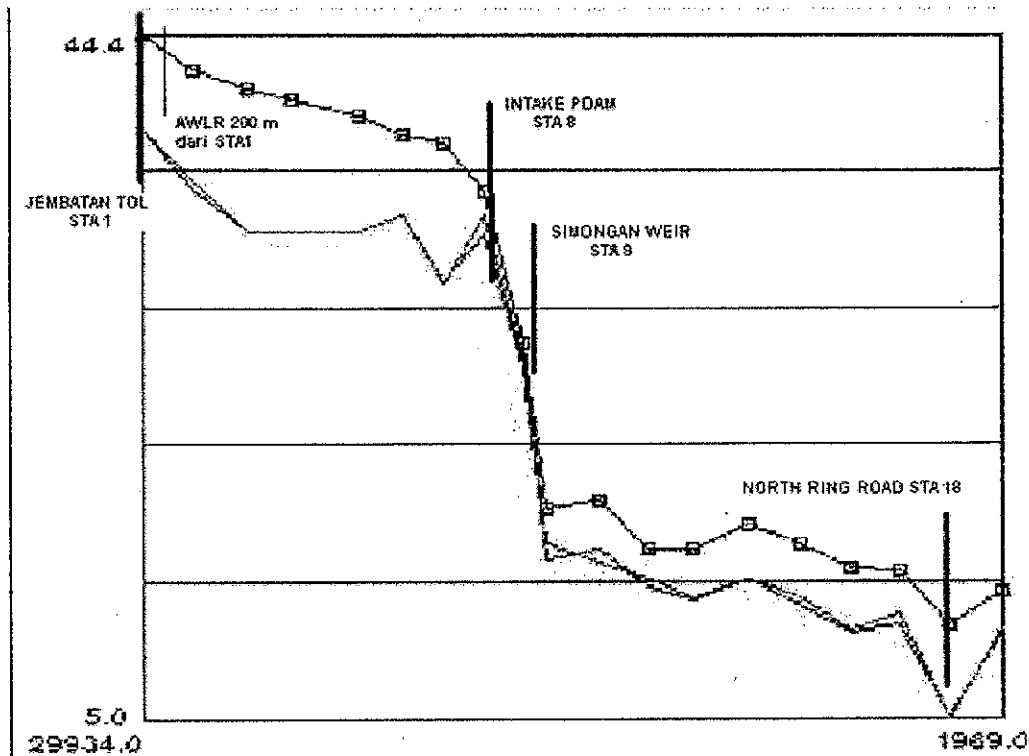
Input Model Simulasi pada kondisi akhir diberi istilah pada penelitian ini adalah Kondisi Prediksi. Komponen utama yang dijadikan input model antara lain:

1. Penampang Melintang Sungai yang terdiri dari 19 Segmen (**Lampiran 4-2**), data tahun 1997. Diolah dengan cara membuat sumbu koordinat kartesius kuadran I, artinya semua titik koordinatnya harus positif karena merupakan syarat model yang digunakan. Titik $X=0$ merupakan titik koor penampang paling kiri dengan analog posisi dipandang dari hulu aliran. Titik Y merupakan kedalaman titik penampang sungai dengan referensi/ datum sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Apabila datum ada yang bernilai negatif maka *grade* elevasi tanah dinaikkan dari segmen 1 sampai segmen 19. Khusus pada segmen bendung (Segmen Nomor 9, STA 5350 meter dari mulut sungai) elevasi dasar penampang (absis koordinatnya) menggunakan referensi elevasi bendung simongan dikurangi 3,7 meter (*JICA*, 2000), dengan asumsi jenis materialnya adalah sama dengan penampang di hulunya yaitu tanah.
2. Data hidrograf debit dominan yang digunakan adalah data debit tahunan Kali Garang yang diperoleh dari kumulasi data debit bulanan reratanya tahun 1997. Diskritisasi berdasarkan data elevasi dan debitnya dipakai 138,19 m³/detik atau 4880 ft³/detik pada elevasi 12,44 meter atau 40,8 ft dan 51 m³/detik atau 1801 ft³/detik pada elevasi 11,00 meter atau 36,1 ft. (Publikasi Data Debit Sungai Jateng, 1997)
3. Data Material Sedimen Tahun 2003. Data yang diakomodasi sebagai input adalah prosentase berat tiap saringan. Fraksi sedimennya sama dengan kondisi eksisting yaitu 8 Fraksi. Fraksi sedimen yang dimasukkan adalah 8 Fraksi, ditunjukkan kode SF.
4. Time Step yang digunakan pada simulasi kondisi ini adalah 20.
5. Koefisien Kekasaran Manning yang digunakan $n=0,028$ untuk kondisi aktual Kali Garang (*SMEC*,1996)
6. Data lain sifatnya kontrol untuk outputnya.

4.3.2. Hasil Simulasi Prediksi Morfologi Kali Garang

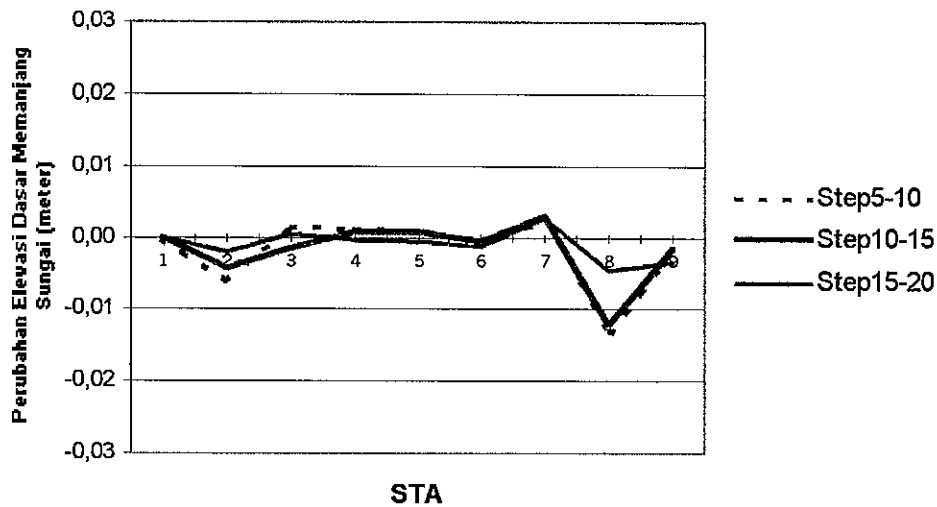
Berdasarkan hasil running model simulasi Bri-Stars pada kondisi prediksi diperoleh keadaan sebagai berikut:

1. Profil memanjang sungai kondisi prediksi disajikan pada **Gambar 4.7**. Hasil Simulasi Visual secara Lengkap Disajikan disajikan pada **Lampiran L 4-9, L 4-9a,b dan c**



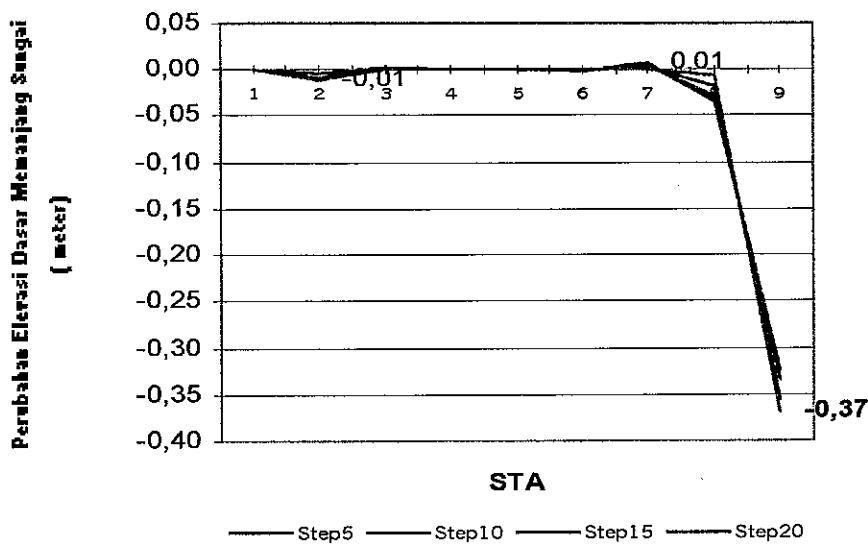
Gambar 4.7. Profil Memanjang Kali Garang Hasil Simulasi Kondisi Prediksi

2. Elevasi dasar sungai mengalami perubahan degradasi maksimal 0,01 meter dan agradasi yang relatif kecil atau dapat diabaikan. Perubahan yang dimaksud berdasarkan time step antara-nya. Secara visual disajikan pada **Gambar 4.8**



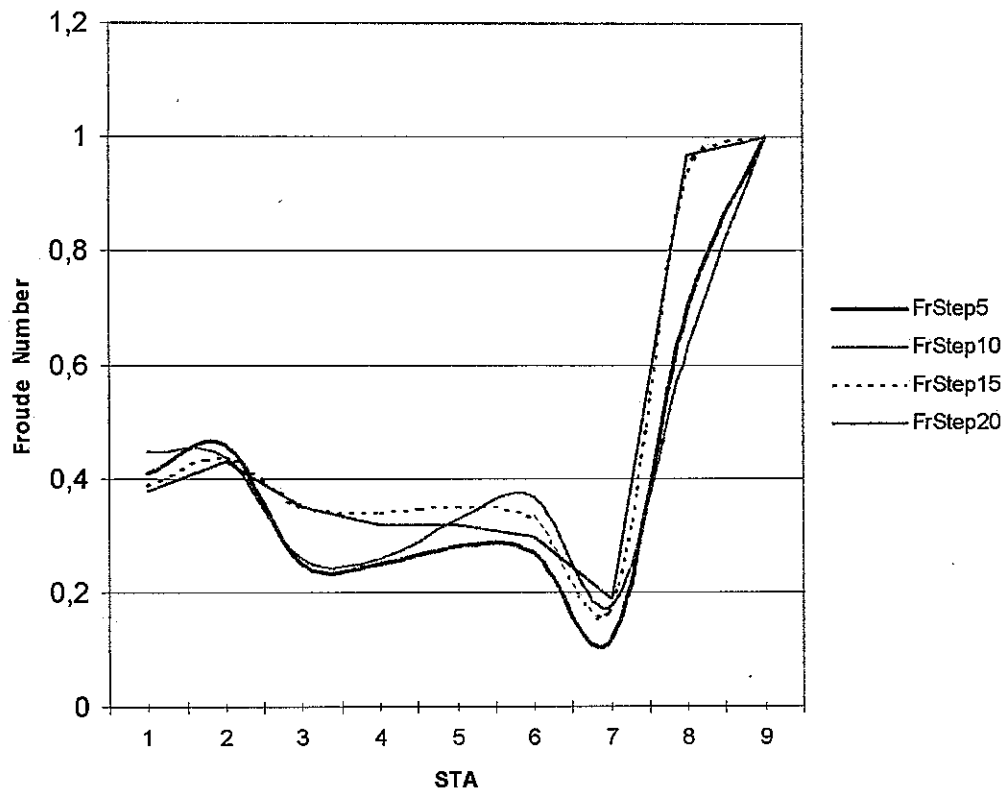
Gambar 4.8. Perubahan Elevasi Dasar Sungai Penampang Memanjang Sungai Simulasi Kondisi Prediksi Kali Garang 1997

Namun apabila kita bandingkan dengan perbedaan kondisi eksisting (simulasi tahun 1992) dengan kondisi prediksi (simulasi tahun 1997), maka perbedaannya cukup signifikan. Secara visual kondisi yang dimaksud seperti disajikan pada **Gambar 4.9**. Dari Gambar tersebut menunjukkan aggradasi terbesar yang terjadi adalah 0,01 meter dan degradasi dasar sungai terbesar adalah 0,37 meter.



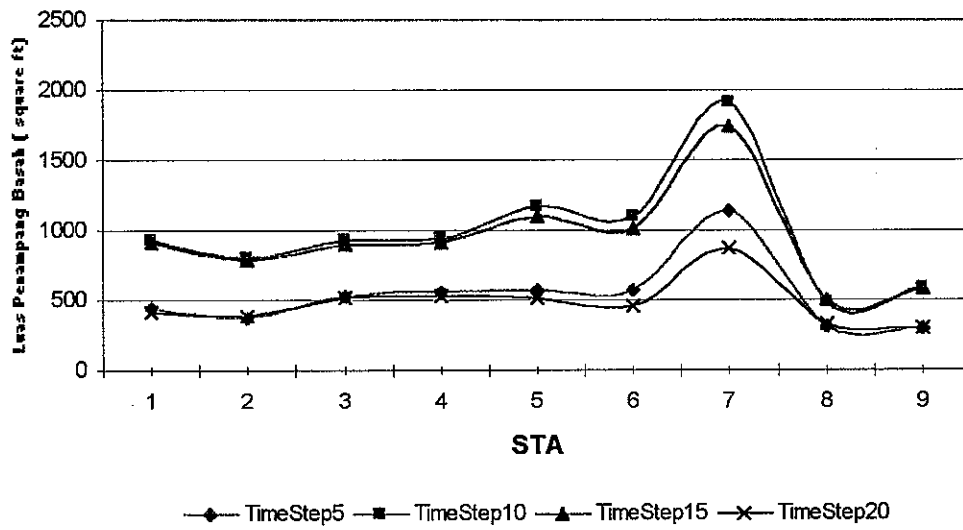
Gambar 4.9. Perubahan Elevasi Dasar Sungai 1992-1997 Hasil Model Simulasi (20 Time Step)

3. Jenis aliran di hulu (STA 1 sampai 9) bendung pada kondisi ini adalah sub kritis, hal ini ditunjukkan dari Froude Number (Fr)-nya di bawah 1 ($Fr < 1$). Secara visual hal ini ditunjukkan pada **Gambar 4.10**.



Gambar 4.10. Karakteristik Aliran Sepanjang Penampang Sungai Hulu Bendung Hasil Simulasi Kali Garang Kondisi Prediksi 1997

4. Perubahan luas penampang basah pada simulasi kondisi eksisting berdasarkan time step terhadap kondisi awal bentuk penampangnya mengalami perubahan rata-rata sebesar 113,48 %. Hal tersebut ditunjukkan pada **Gambar 4.11**.



Gambar 4.11. Perubahan Luas Penampang Basah Hasil Simulasi Kondisi Eksisting

Secara umum terjadi perubahan luas penampang basah seluruh STA hulu bendung simongan. Peningkatan yang cukup signifikan terjadi pada STA 7 dan menurun drastis saat menuju STA8 dan STA 9. Hal ini dikarenakan perbedaan elevasi bendung ke hilir relatif lebih landai dibandingkan kondisi eksistingnya.

Hasil keluaran simulasi model pada kondisi prediksi secara lengkap disajikan pada **Lampiran 4-9**.

4. 4. Simulasi Prediksi Keseimbangan Dasar Sungai Kali Garang Tanpa Bendung

4.4.1. Input Model Simulasi Prediksi Keseimbangan Slope

Input Model Simulasi pada kondisi prediksi keseimbangan dasar saluran dan aliran Kali Garang diberi istilah pada penelitian ini adalah Kondisi Prediksi Keseimbangan Slope. Komponen utama yang dijadikan input model antara lain:

1. Penampang Melintang Sungai yang terdiri dari 19 Segmen (**Lampiran 4-2**), data tahun 1997. Diolah dengan cara membuat sumbu koordinat kartesius kuadran I, artinya semua titik koordinatnya harus positif karena merupakan syarat model yang digunakan. Titik $X=0$ merupakan titik koor penampang paling kiri dengan analog posisi dipandang dari hulu aliran. Titik Y merupakan kedalaman titik penampang sungai dengan referensi/ datum sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Apabila datum ada yang bernilai negatif maka *grade* elevasi tanah dinaikkan dari segmen 1 sampai segmen 19. Khusus pada segmen bendung (Segmen Nomor 9, **STA 5350** meter dari mulut sungai) elevasi dasar penampang (absis koordinatnya) menggunakan referensi elevasi bendung simongan dikurangi 3,7 meter (**JICA, 2000**), dengan asumsi jenis materialnya adalah sama dengan penampang di hulunya yaitu tanah.
2. Data debit yang digunakan adalah data debit andalan Kali Garang. **Tabel 4.3** berikut adalah data debit andalan Kali Garang secara umum. Sebagai input simulasi model prediksi keseimbangan slope untuk keadaan sungai tanpa Bendung Simongan digunakan nilai rerata debit andalannya..

Tabel 4.3. Data Debit Andalan Simulasi Prediksi Keseimbangan Slope Kali Garang Tahun 1990-2001

Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Juli	Ags	Sept	Okt	Nov	Des
7,82	10,70	11,40	9,28	5,25	8,18	5,18	1,99	2,73	6,36	11,30	18,90
9,97	14,99	12,07	13,79	9,62	7,18	5,34	6,27	6,50	6,49	5,11	14,76
13,70	13,70	15,70	8,30	8,04	6,92	2,91	2,89	1,33	1,66	12,60	15,10
15,00	28,10	21,50	10,90	7,18	5,22	2,78	3,07	3,01	5,52	10,70	16,40
15,10	12,40	27,20	16,30	7,23	3,88	2,98	2,26	1,61	3,03	3,51	4,49
18,00	28,40	14,00	13,80	15,30	10,40	6,54	4,34	3,82	3,24	20,20	12,80
18,50	22,20	17,20	18,70	6,32	3,30	2,73	1,44	1,36	1,29	5,75	9,57
19,10	20,40	24,30	20,80	11,00	9,67	8,71	4,06	3,66	5,03	4,98	15,00
27,50	39,00	22,70	21,10	5,26	6,07	2,76	3,29	3,07	2,71	2,27	4,17
28,10	18,40	18,70	17,40	6,44	4,95	2,82	2,11	2,47	4,12	13,40	13,90
40,20	14,80	12,70	7,77	7,07	5,22	3,55	3,05	2,15	1,67	2,63	13,50
63,65	16,70	18,32	9,94	6,64	3,65	2,24	2,06	1,33	1,11	2,33	10,28

Sumber:

Pengolahan Data dan Analisis (S. Edhisono,2004), Debit Andalan yang diblok, Qrerata Andalan = 8,07 m³/detik

3. Data Material Sedimen Tahun 2003. Data yang diakomodasi sebagai input adalah prosentase berat tiap saringan. Fraksi sedimennya sama dengan kondisi pada simulasi time step 20, yaitu 8 Fraksi. Fraksi sedimen yang dimasukkan adalah 8 Fraksi, ditunjukkan kode SF.
4. Time Step yang digunakan pada simulasi kondisi ini adalah bertahap dari 20, 100, 200, hingga mencapai hasil yang optimal sesuai metodologi penelitian.
5. Koefisien Kekasaran Manning yang digunakan $n=0,028$ untuk kondisi aktual Kali Garang (SMEC,1996)
6. Data lain sifatnya kontrol untuk outputnya.

Input Model Prediksi Slope Stabil selengkapnya dapat dilihat pada **Lampiran 4-10**

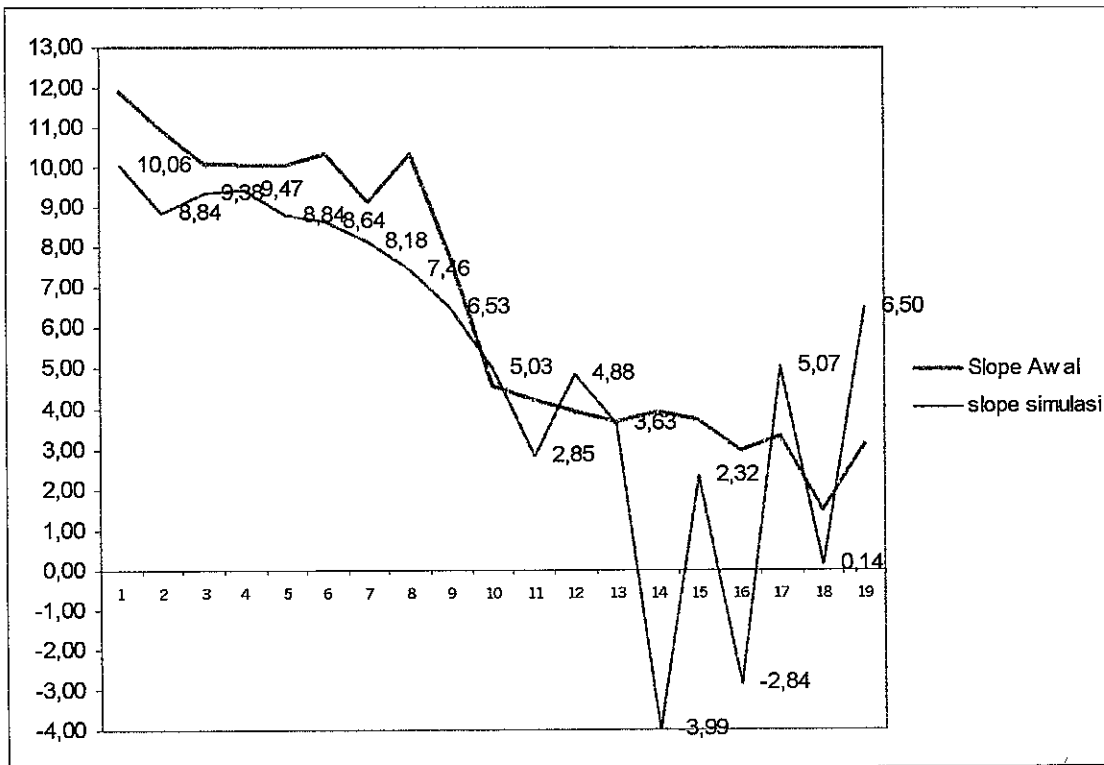
4.4.2. Hasil Model Simulasi Prediksi Keseimbangan Slope

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan secara bertahap maka diperoleh kondisi batas simulasi maksimum untuk analisa adalah pada Time Step 9000. Oleh sebab itu input simulasi dan hasilnya yang disajikan untuk analisa lebih detail adalah pada kisaran Time Step tersebut. Berdasarkan Alur Pikir Metodologi penelitian, maka batasan prediksi keseimbangan slope adalah ketika slope dasar saluran adalah sama dengan nol. Sulitnya menemukan keseimbangan dasar yang ideal menyebabkan adanya tinjauan lain sebagai pembanding yaitu Froude Number. Froude Number menunjukkan parameter jenis alirannya. Asumsi bahwa aliran stabil adalah aliran sub kritis, maka kemiringan dasar saluran (*Slope*) yang landai sekalipun tetapi alirannya kritis ($Fr = 1$) atau bahkan super kritis ($Fr > 1$), maka keadaan itu dianggap belum memenuhi syarat keseimbangannya. Berikut ini adalah parameter-parameter hasil simulasi untuk Model Kali Garang pada Time Step Maksimum 9000. Output Model Simulasi Prediksi Slope Stabil selengkapnya dapat dilihat pada **Lampiran 4-11**.

Berikut ini adalah hasil simulasi kondisi prediksi keseimbangan slope menggunakan Model Simulasi Bri-Stars:

1. Hasil Simulasi Perubahan Elevasi Dasar Sungai

Hasil Simulasi Model perubahan elevasi dasar sungai Kali Garang menunjukkan perubahan lapisan dasar yang bervariasi. Erosi saluran yang relatif besar terjadi pada beberapa STA hilir seperti di STA 14, 16 dan 18. Penumpukan sedimen terjadi di STA 12, 13, 17 dan 19. Hampir seluruh STA Hulu (STA 1 sampai 9) cenderung tererosi karena beda energi yang relatif besar akibat endapan saat ada Bendung. Hasil simulasi dimaksud peneliti disajikan pada **Gambar 4.12**.

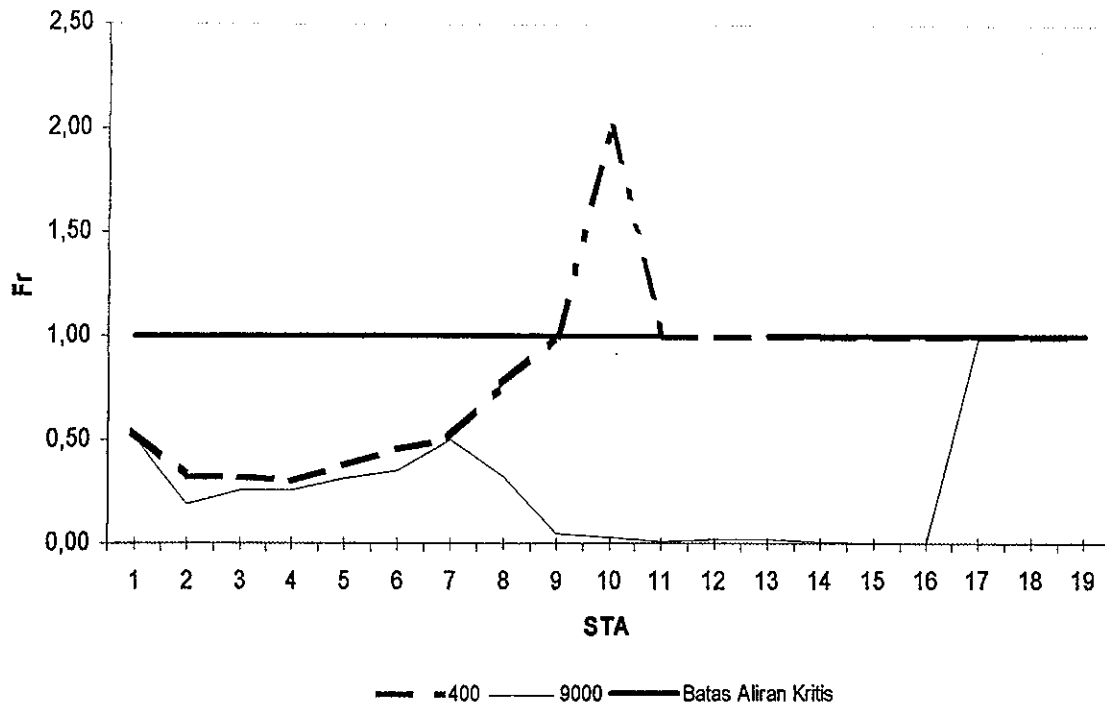


Gambar 4.12. Perubahan Elevasi Dasar Sungai Simulasi Prediksi Slope Stabil Terhadap Kondisi Awal

2. Hasil Simulasi Perubahan Jenis Aliran dan Karakter Kecepatan Rata-Rata

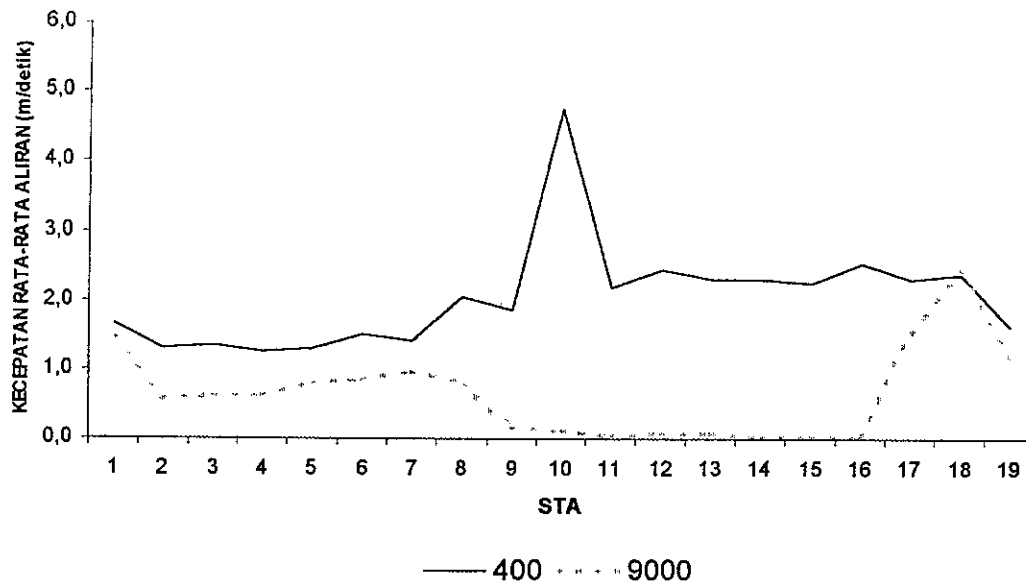
Jenis aliran yang terjadi dari beberapa simulasi prediksi menunjukkan pada simulasi time step 400 pertama terjadi fluktuasi aliran menjadi super kritis sebagai awal proses perubahan morfologi dasar. Hal itu mungkin terjadi karena adanya perbedaan elevasi yang cukup besar di titik elevasi bendung yang diasumsikan dihilangkan. Namun pada time step selanjutnya terjadi perubahan karakteristik jenis aliran menjadi sub kritis. Perubahan Jenis Aliran hasil simulasi dibandingkan kondisi awalnya (Time Step 400) disajikan pada

Gambar 4.13.



Gambar 4.13. Perubahan Jenis Aliran Simulasi Prediksi Slope Stabil

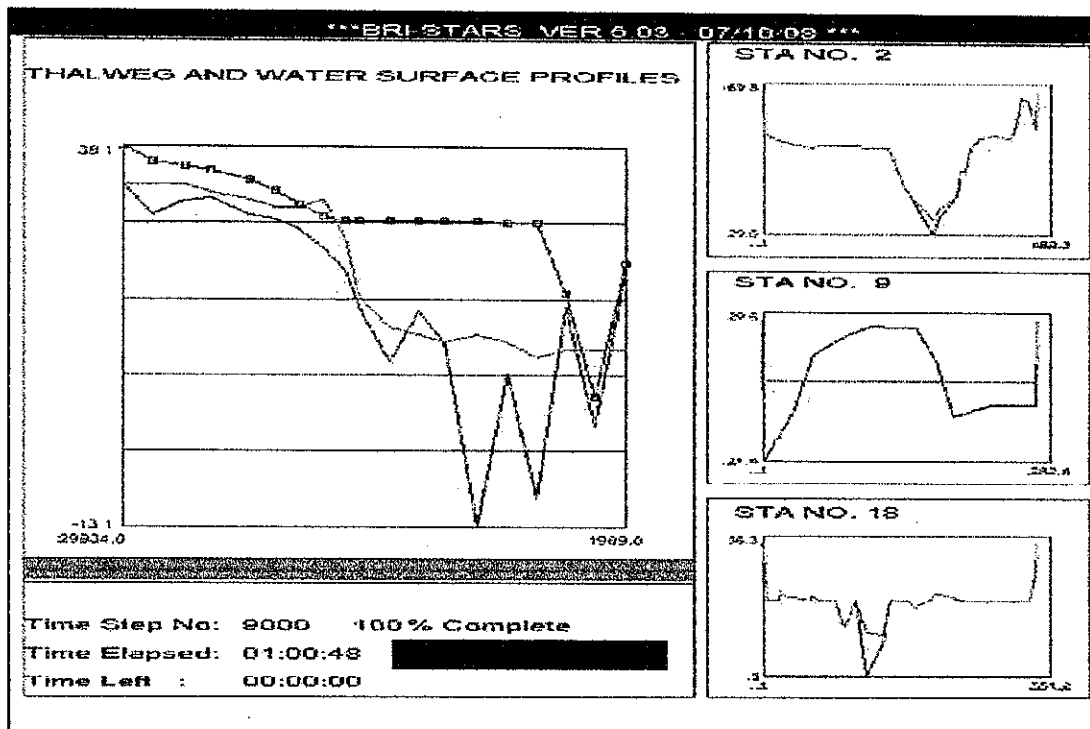
Oleh karena *Froude Number* (Fr) mengandung komponen kecepatan, maka karakter kecepatan rata-ratanya pun memiliki tipe fluktuasi yang hampir sama dengan karakter Jenis aliran, hal tersebut disajikan pada Gambar 4.14.. Flukstuasi kecepatan berbanding lurus dengan vektor kecepatan. Oleh karena itu batas aliran kritis menunjukkan bahwa jika Fr melampaui 1 berarti penampang pada titik penampang tersebut melampaui debit maksimum yang terjadi. Sedangkan untuk $Fr > 1$ merupakan indikasi terjadinya aliran berubah dengan cepat dalam jarak relatif pendek (*rapidly varied flow*) atau disebut juga gejala lokal (*local phenomenon*). Froude Number yang besarnya antara 1 sampai 2 memiliki jenis gejala lokal yaitu loncat air (*hydraulic jump*). Kejadian loncat hidraulik terjadi pada STA 10 time step ke 1600.



Gambar 4. 14. Kecepatan Rata-Rata Aliran Hasil Simulasi Simulasi Prediksi Slope Stabil (Perbandingan Kondisi Awal Time Step =400 dengan Kondisi Stabil Time Step = 9000)

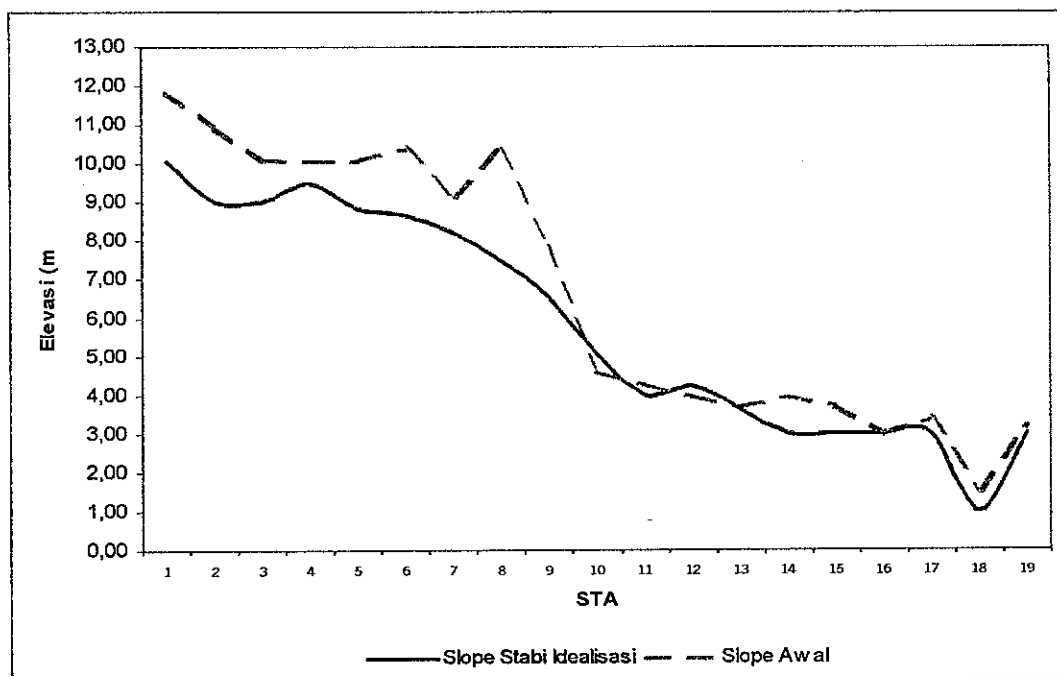
3. Hasil Simulasi Perubahan Slope Dasar Sungai

Slope merupakan perbandingan perbedaan tinggi dari dua titik elevasi terhadap jarak mendatarnya. Oleh karena Model Simulasi tidak dapat menghitung secara otomatis, slope dasar sungai dihitung tersendiri. Hasil simulasi menunjukkan dinamika slope dasar tiap ruas STA bahwa slope rata-rata pada simulasi 400 sampai dengan 9000 sebesar 0,00055. Apabila diamati lebih detail maka slope prediksi terkecil mempunyai ketelitian hingga 1:10.000, sedangkan slope rata-ratanya memiliki ketelitian 1:1.000. Secara visual hasil simulasi slope stabil disajikan pada **Gambar 4.15**.



Gambar 4.15. Prediksi Slope Stabil Hasil Simulasi

Gambar 4.15 menunjukkan melalui simulasi Model diperoleh kondisi yang dianggap stabil. Fenomena gerusan di beberapa titik STA merupakan kondisi yang wajar. Keseimbangan slope secara alami memerlukan waktu yang sangat panjang. Oleh karena penelitian ini merupakan prediksi, maka idealisasi slope dasar sungai diperoleh dari perkiraan dan *Engineering Adjustment*. Sehingga bentuk idealisasinya seperti disajikan **Gambar 4.16**.



Gambar 4.16. Slope Stabil Prediksi Idealisasi

Proses idealisasi selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut ini.

Tabel 4.4. Slope Prediksi Ideal dan Simulasi Model Dasar Sungai Kali Garang

STA	kondisi elevasi dasar sungai (+ meter)				
	E _{Awal}	E _{akhirstabil}	E _{akhirsimulasi}	S _{akhirstabil}	S _{akhirsimulasi}
9124	11,89	10,06	10,06		
8609	10,95	9,00	8,84	0,00206	0,00236
8053	10,09	9,00	9,38	0,00000	-0,00096
7626	10,06	9,47	9,47	-0,00111	-0,00023
6960	10,06	8,84	8,84	0,00096	0,00096
6524	10,36	8,64	8,64	0,00045	0,00045
6126	9,15	8,18	8,18	0,00114	0,00114
5725	10,36	7,46	7,46	0,00181	0,00181
5350	7,84	6,53	6,53	0,00246	0,00246
5100	4,58	5,03	5,03	0,00603	0,00603
4600	4,24	4,00	2,85	0,00205	0,00436
4100	3,95	4,20	4,88	-0,00040	-0,00406
3650	3,68	3,63	3,63	0,00127	0,00276
3100	3,94	3,00	-3,99	0,00115	0,01386
2600	3,73	3,00	2,32	0,00000	-0,01261
2100	3,00	3,00	-2,84	0,00000	0,01032
1600	3,34	3,00	5,07	0,00000	-0,01581
1100	1,50	1,00	0,14	0,00400	0,00986
600	3,12	3,00	6,50	-0,00400	-0,01273
Rerata Slope				0,00099	0,00055

Catatan: Yang Tercetak Tebal adalah idealisasinya.

Sumber: Analisis dan Perhitungan, S. Edhisono, 2004

Berdasarkan hasil simulasi dan perhitungan maka ditentukan slope stabil berdasarkan 2 komponen syarat utama yaitu Slope rata-ratanya mendekati nol dan Alirannya paling stabil berdasarkan Froude Nummernya ($Fr < 1$). Slope stabilnya terjadi pada 0,00055 atau sekitar 6:10000. Namun untuk mengetahui kestabilan Numeriknya dijelaskan pada Sub bab 4.6

4. 5. Analisis Perubahan Morfologi Kali Garang

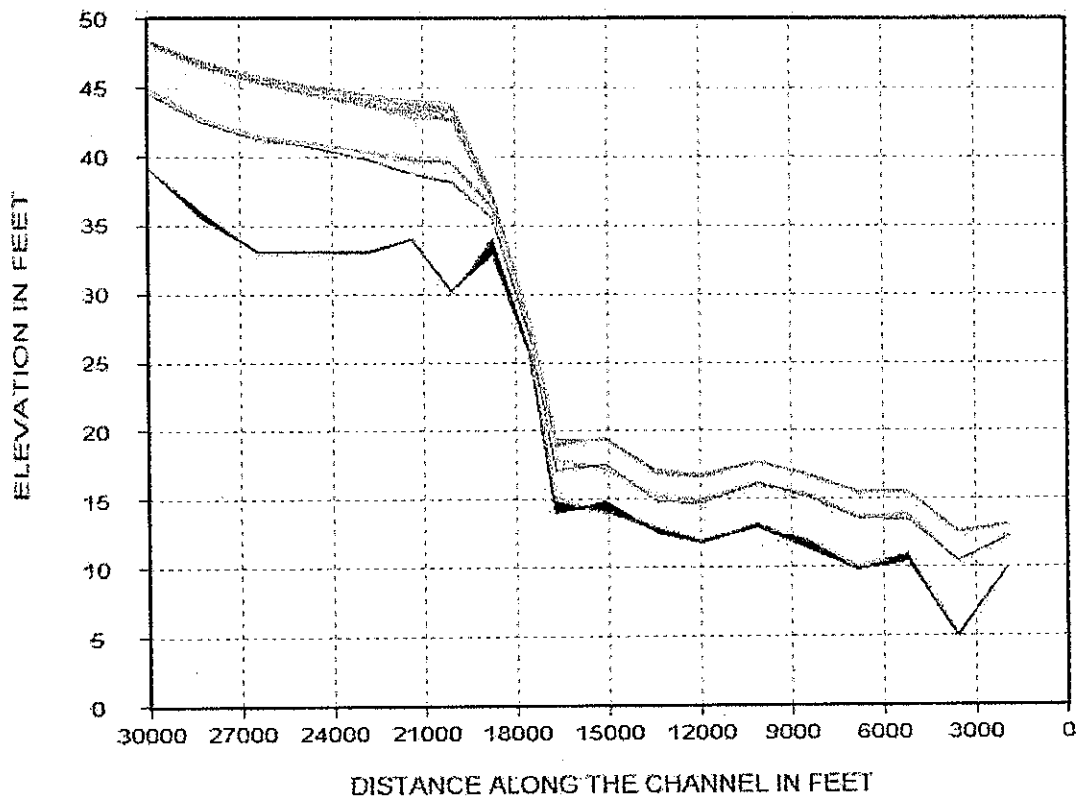
Membandingkan hasil simulasi kondisi eksisting dengan kondisi prediksi pada penelitian ini, maka dapat dijelaskan perubahan morfologi yang cukup signifikan khususnya di bagian hulu Bendung Simongan akibat perubahan dari bendung tetap menjadi tanpa Bendung Simongan , seperti disajikan Tabel 4.3.

Tabel 4.5. Perbandingan Perubahan Morfologi Kali Garang (di Hulu Bendung Simongan) Model Simulasi Bri-Stars Pada 20 Time Step

No	Perbedaan Hasil Model Simulasi	Kondisi Eksisting (Bendung Tetap)	Kondisi Prediksi (Tanpa Bendung)
1	Perubahan Penampang Arah Vertikal	Berkisar 0,01 m (agradasi) dengan degradasi yang relatif kecil atau dapat diabaikan.	Berkisar 0,02 m (degradasi) dengan agradasi yang relatif kecil atau dapat diabaikan.
2	Perubahan Penampang Arah Horisontal	Rata-rata Sekitar 0,0051 meter persegi (agradasi) atau 4,64 % tiap penampang.	Rata-rata Sekitar -0,0061 meter persegi (degradasi) atau 8,94 % tiap penampang. (Indikasi sedimentasi penampang me-ningkat)
3	Perubahan Kecepatan Rata-Rata Hulu Bendung Simongan	0,02 m/s sampai 0,54 m/s. Kecepatan tertinggi terjadi di penampang STA 10 (hilir bendung)	0,05 m/s sampai 0,36 m/s. Kecepatan tertinggi terjadi hampir merata di hilir bendung (STA 10 sampai STA19)
4	Jenis Aliran di Hulu Bendung berdasarkan Froud Number (Fr)	0,04 (sub kritis), 1 (kritis), di STA 10 mencapai 2,45 (super kritis). STA hilirnya cenderung kritis (Fr=1)	0,12 sampai 1,19 tertinggi pada STA 10 tetapi kemudian menurun secara signifikan menuju kritis (Fr=1)

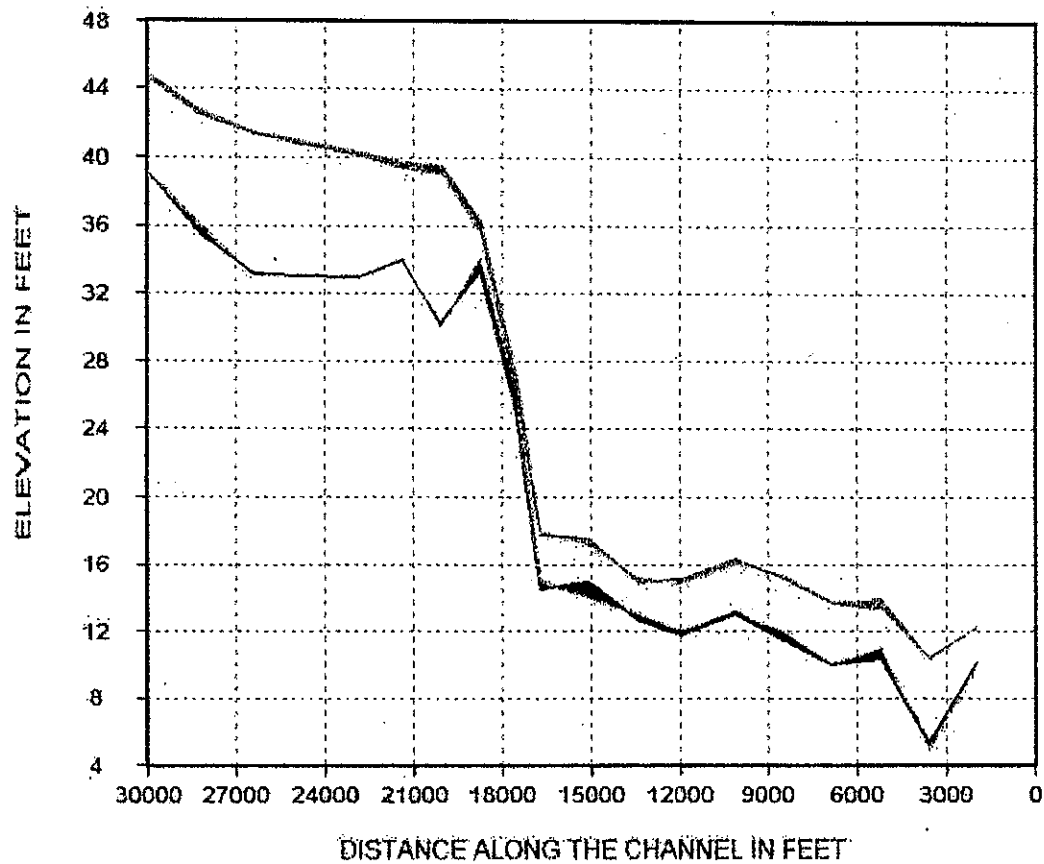
Sumber: Analisis Simulasi Model Bri-Stars (Sutarto E, 2004)

Simulasi Model untuk kondisi prediksi dengan time step yang lebih panjang menunjukkan indikasi perubahan morfologi yang lebih jelas. Sebagai perbandingan perhatikan **Gambar 4.16** dan **Gambar 4.17**. Pada **Gambar 4.16** adalah profil aliran dan perubahan dasar sungai arah memanjang pada kondisi prediksi untuk time step 20. Sedangkan **Gambar 4.17** adalah gambar setipe **Gambar 4.16** tetapi untuk Time Step 240.



Gambar 4.17. Profil Muka Air dan Perubahan Dasar Sungai Kali Garang Kondisi Prediksi , Time Step 20

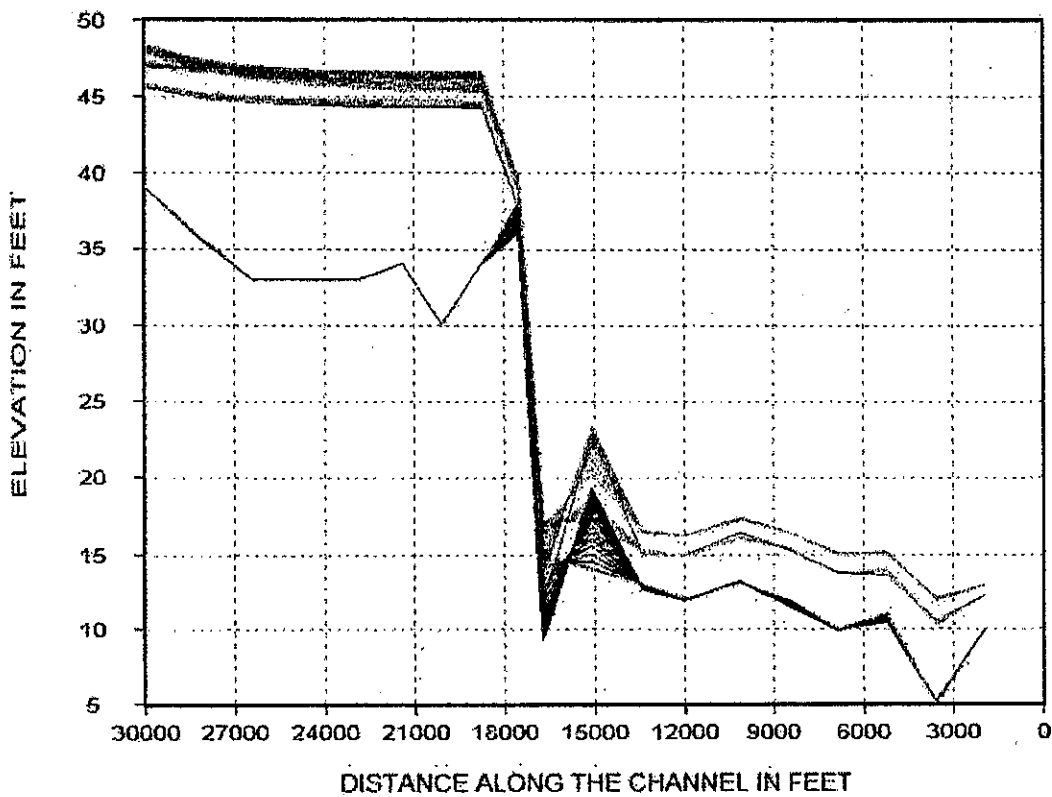
Hasil Simulasi Gambar 4.13 menunjukkan bahwa terjadi perubahan aliran yang relatif cepat. Elevasi muka air awal adalah yang berwarna kehijauan sedangkan muka air kondisi akhir simulasi adalah yang berwarna kebiruan. Proses morfologi dasar sungai digambarkan berwarna kemerahan. Warna yang semakin tebal berarti terjadi proses aggradasi maupun degradasi besarnya dapat diketahui dari keluaran (*output*) simulasi yang berupa angka.



Gambar 4.18. Profil Muka Air dan Perubahan Dasar Sungai Kali Garang Kondisi Prediksi , Time Step 240

Hasil Simulasi **Gambar 4.17** menunjukkan bahwa terjadi perubahan aliran yang relatif mantap (*steady*) dibandingkan kondisi pada time step 20 (**Gambar 4.12**). Proses perubahan morfologi dasar sungai terjadi relatif lebih stabil karena semakin panjang rentang waktunya maka akan menuju slope dasar sungai yang paling ideal bagi aliran yang terjadi. Hal tersebut merupakan parameter penting terjadinya kontinuitas aliran dimana kondisi hulu dan hilir akan mencari keseimbangannya secara bertahap.

Apabila kita bandingkan dengan kondisi eksistingnya (Kondisi Kali Garang 1992), maka tampak jelas perubahan dasar sungai terhadap kondisi prediksinya (Kondisi Kali Garang Tahun 1997). Hal ini dapat dilihat dari profil memanjang sungai **Gambar 4.18** berikut.

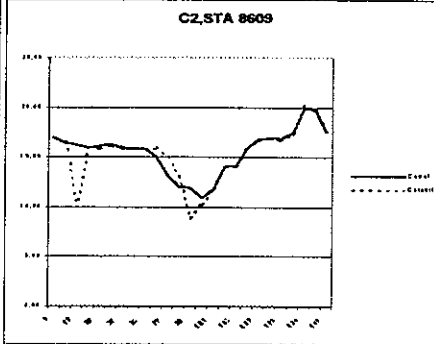
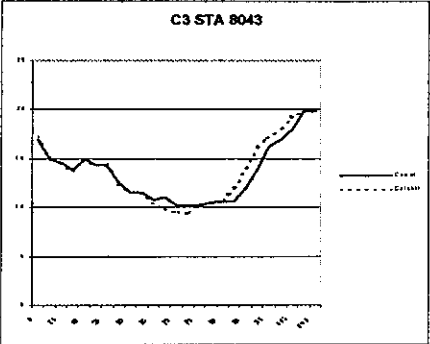


Gambar 4.19. Profil Muka Air dan Perubahan Dasar Sungai Kali Garang Kondisi Eksisting , Time Step 20

Untuk membuktikan dugaan awal perubahan morfologi yang mengakibatkan slope dasar sungainya stabil maka running pada time step yang lebih banyak dilakukan pada simulasi penelitian ini. Keseimbangan Slope untuk simulasi yang lebih panjang diperoleh pada time step maksimum 9000.

Perubahan topografi hasil simulasi prediksi slope stabil menunjukkan bahwa erosi di hulu mengalami keseimbangan dengan terjadinya sedimentasi di hilirnya. Hulu titik bendung simongan terjadi erosi pada kedalaman maksimum 5 feet atau senilai dengan 1,5 meter. Setelah STA bendung terjadi agradasi pada saat slope mulai stabil. Kemudian di beberapa STA di hilirnya terjadi erosi kembali dan di bagian paling hilir profil memanjang kali Garang terjadi agradasi. Hal inilah yang menyebabkan terjadi aliran kritis di beberapa titik STA paling hilir. Hasil Simulasi perubahan topografi secara umum pada time step 9000 disajikan pada Gambar 4.21.

Tabel 4.6. Perubahan Morfologi Kali Garang-BKB Tanpa Bendung Beberapa Cross-Section pada Kondisi Slope Stabil

Cross Section	Gambar	Perubahan Arah- X	Perubahan Arah- Y	Keterangan
2		<p>E max= -0,1488</p> <p>S max= 0,2000</p> <p>Rerata= 0,0056 (S)</p>	<p>E max= -6,1420</p> <p>S max= 1,7350</p> <p>Rerata= -0,2570 (E)</p>	
3		<p>E max= -0,1500</p> <p>S max= 0,135</p> <p>Rerata= -0,0140 (E)</p>	<p>E max= -1,097</p> <p>S max= 2,1540</p> <p>Rerata= 0,234 (S)</p>	

Cross Section	Gambar	Perubahan Arah- X	Perubahan Arah- Y	Keterangan
18	<p style="text-align: center;">C18 STA 1100</p>	<p>E max= -1,0600</p> <p>S max= 0,1500</p> <p>Rerata= -0,0600 (E)</p>	<p>E max= -1,500</p> <p>S max= 3,1000</p> <p>Rerata=0,4800 (E)</p>	
<p>Keterangan: E= Erosi/degradasi , S= Sedimentasi/agradasasi , Satuan dalam Meter</p> <p>Sumber : Analisis dan Perhitungan (S.Edhisono,2004)</p>				

Berdasarkan paparan perubahan morfologi di atas, maka dapat diketahui bahwa morfologi Kali Garang mengalami perubahan akibat asumsi tidak adanya Bendung Simongan. Perubahan morfologi arah vertikal dominan di daerah hulu. Di bagian hilir cenderung mengalami sedimentasi dan penyempitan penampang utama (tidak termasuk bantaran sungainya). Pada penampang tengah (antara hulu dan hilir) mengalami erosi yang relatif besar karena adanya efek *hydraulic jump*. Hal itu sangatlah wajar karena perbedaan elevasi dari hulu Bendung Simongan ke Hilir terdekatnya relatif besar sekitar 4 sampai 5 meter. Namun di beberapa STA setelah itu perubahan morfologinya adalah kebalikan yaitu terjadi sedimentasi kemudian berselang seling erosi.

4. 6. Validasi Hasil Simulasi

Hasil Simulasi Model Bri-Stars perlu dilakukan validasi agar secara kualitatif maupun kuantitatif bisa dipertanggungjawabkan. Berdasarkan alasan ilmiah dan segala keterbatasan teori yang ada, maka validasi simulasi penelitian ini dilakukan dengan cara membandingkan perhitungan manual formula yang digunakan dalam simulasi dengan hasil simulasi model

Simulasi Model Bri-Stars yang cukup kompleks menyebabkan parameter yang harus divalidasi juga relatif kompleks. Maka dari substansi penelitian yang mengarah kepada perubahan morfologi sungai, maka peneliti mengasumsikan bahwa sedimen merupakan inti model perubahan morfologi itu sendiri. Maka validasi yang dilakukan pada penelitian ini dibatasi pada transport sedimennya saja.

Berikut adalah uraian perhitungan validasi formula secara manual dari formula yang digunakan dalam model simulasi yaitu *Molinas dan Wu (1996)*

$$\Psi = \frac{V^3}{(S_g - 1)gD\omega_{50} \left[\log \left(\frac{D}{d_{50}} \right) \right]^2} \dots\dots\dots(40)$$

$$C_{PPM} = \frac{1430(0,86 + \sqrt{\Psi})\Psi^{1,5}}{0,016 + \Psi} \dots\dots\dots(41)$$

Rincian perhitungan Validasi disajikan pada **Lampiran Tabel L-4.1 dan Tabel L-4.2**

Tabel 4.7 berikut ini adalah hasil validasi untuk Formula *Molinas dan Wu(1996)*. Formula yang dipakai khusus untuk tipe *sand* dan *size fraction* dalam *procent finer*

Tabel 4.7. Validasi Total Bed Load Terhadap Hasil Simulasi Bri-Stars pada Model Kali Garang

STA, Time Step	Simulasi	Validasi	Perbedaan Relatif (%)	Froude Number
STA2,5	66,9	9,5	85,9	0,46
STA3,5	20,3	14,7	27,5	0,25
STA4,5	21,4	11,8	44,9	0,25
STA5,5	23,2	19,1	17,8	0,28
STA6,5	23,1	12,4	46,2	0,27
STA2,15	74,0	20,2	72,6	0,44
STA3,15	109,7	25,0	77,2	0,35
STA4,15	118,7	19,5	88,6	0,34
STA5,15	106,3	36,2	66,0	0,35
STA6,15	112	22,0	80,4	0,33
STA7,15	28,6	34,5	20,5	0,18

Sumber: Analisis Data Simulasi, S.Edhisono,2003

Perbedaan relatif yang cukup besar terjadi disebabkan oleh beberapa hal sebagai berikut:

1. Perhitungan analitis mengasumsikan kondisi aliran adalah tunak (*steady*) tetapi simulasi model kondisinya adalah tak tunak (*unsteady*).
2. Beberapa data masukan merupakan data sekunder sehingga factor kesalahan manusia (*human error*) tidak dapat diketahui secara akurat.
3. Tingkat ketelitian dan keterbatasan model, misalnya untuk data yang nilai debit aliran yang sangat kecil ($< 800 \text{ ft}^3/\text{detik}$), jarak titik STA yang relatif sangat dekat tidak dapat dieksekusi. Kondisi yang tidak fleksibel tersebut juga menjadi salah satu faktor akurasi hasil simulasi model.

Namun secara umum simulasi model pada penelitian ini dapat memberikan gambaran yang paling mendekati kondisi nyata dari objek penelitian dengan semua keterbatasannya.

4. 7. Kestabilan Numerik di Hilir Penampang Memanjang

Kestabilan Numerik Simulasi Model diperlukan karena hasil simulasi yang kurang optimal. Uji Kestabilan Numerik dilakukan dengan pendekatan beda hingga (finit different) eksplisit. Sekian banyak metode beda hingga eksplisit yang ada, maka digunakan metode Leap-Frog karena dipandang sesuai untuk kondisi muara sungai. Pada tesis ini tidak dibahas mendalam tentang metode Leap-Frog-nya. Uji kestabilan Numerik dengan metode beda hingga menggunakan alat bantu program jadi dalam bahasa pemrograman Fortran-77. Kestabilan Numerik ditunjukkan dengan Courant Number (Cr) yang nilainya tidak lebih daripada satu ($Cr \leq 1$). Courant Number memiliki formula sebagai berikut:

$$Cr = \frac{dt}{dx} \times (\sqrt{gh} + |U_{max}|) \dots\dots\dots(42)$$

Data-data masukan untuk Uji Kestabilan Numerik menggunakan data keluaran dari simulasi model yang telah di-idealisisasi sehingga angka datanya lebih representatif. Beberapa data yang digunakan adalah tinggi air rata-rata, Kecepatan Maksimum aliran, Kemiringan dasar saluran, Geometri Penampang yang terdiri dari lebar sungai dan bentuk penampangnya digunakan penampang representatif berupa trapesium. Uji kestabilan Numerik yang dilakukan pada metode eksplisit tidak didetailkan per simulasinya hanya menggunakan parameter batas stabilnya saja yaitu $Cr \leq 1$.

Hasil uji kestabilan numerik menunjukkan bahwa pada kemiringan dasar sungai sebesar 0,00055 dengan kecepatan maksimum aliran sebesar 0.71 m/detik , pada kedalaman air rata-rata sebesar 1,56 meter, debit aliran diasumsikan tetap (*steadyflow*) sebesar 8,57 m³/detik, dt = 0,1 detik, dx = 900 m dan asumsi Amplitudo gelombang di muara sebesar A= 2 meter hasilnya adalah Courant Number termasuk kategori stabil. Hasil Uji Kestabilan Numerik disajikan berikut list program, Input dan Outputnya (dalam bahasa FORTRAN 77) pada **Lampiran 4-13**. Perbedaan Hasil Simulasi dan Idealisasi Penampang Memanjang Kali Garang-BKB disajikan pada **Lampiran 4-14**.

BAB V

KESIMPULAN , SARAN DAN REKOMENDASI

5. 1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi model dan analisa peneliti, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Morfologi Kali Garang mengalami perubahan akibat dihilangkannya Bendung pada sistem sungainya. Perubahan dominan di hulu adalah erosi, ditengah adalahtransisi antara erosi dan sedimentasi (berselang-seling) dan di hilir cenderung terjadi sedimentasi meskipun tidak sebesar di bagian tengah penampang memanjang sungai..
2. Rata-rata slope stabil pada time step maksimum (9000 time step) adalah sebesar 0,00055

5. 2. Saran-Saran

1. Untuk kepentingan teknis jangka panjang sebaiknya data morfologi kondisi eksisting dimiliki agar perubahan morfologi sungai bisa dipantau secara lengkap sejak dini.
2. Perubahan alur sungai yang relatif cepat dengan adanya rencana bendung gerak perlu mewaspadai efek erosi di pintu-pintu pengambilan yang masih produktif bagi kegiatan pertanian.
3. Sebaiknya proses alih fungsi dari bendung tetap ke bendung gerak atau tanpa bendung dilakukan bertahap karena efek erosi yang cepat bisa merusak kondisi morfologi khususnya di bagian hulu sungai. Sedangkan efek di bagian hilir adalah penumpukan sedimen yang sangat besar atau erosi yang sangat besar di titik hilir dekat lokasi bendung..

5. 3. Rekomendasi

1. Slope stabil merupakan referensi untuk rekayasa sungai agar konservasi alam tetap terjaga. Keseimbangan yang terjadi dari slope stabil harus diikuti dengan adanya bangunan pengendali sedimen seperti Ground Sill karena perubahan alam sangat tidak terduga (*unpredictable*)
2. Perubahan DAS adalah parameter pendukung selain perilaku morfologi sungai secara hidraulik. Sehingga penelitian lanjutan menjadi lebih mendalam.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim, **Simulation of the effects of streambed-management practices on flood levels in Vermont**, US Geological Survey, May, 2000.
2. Anggrahini, **Hidrolika Saluran Terbuka**, Cetakan Pertama, CV Citra Media, Surabaya, November 1996
3. Brater, Ernest F, **Handbook of Hydraulics- Seventh Edition**, McGraw-Hill, Michigan, 1996
4. Carollo, F.G. et al, **Flow Velocity Measurement in Vegetated Channels**, Journal of Hydraulic Engineering, July 2002 pages 664-673.
5. Goodman, Alvin S., **Principles of Water Resources Planning**, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1984.
6. Guo, Qing-Chao, et al, **Modelling Non-uniform Suspended Sediment Transport in Alluvial Rivers**, Journal of Hydraulic Engineering, September 2002, Pages 839-847.
7. Jansen, PPh. Et al, **Principles of River Engineering**, Pitman, London, 1979.
8. JICA Study Team, **The Detailed Design of Flood Control, Urban Drainage and Water Resources Development in Semarang in the Republic of Indonesia**, JICA – Japan, August 2000.
9. Kodoatie, Robert J., 1999. **Sediment transport relations in Alluvial Channels**, Ph.D. Disertation, Colorado State University, Co., USA, 1999.
10. May, A. Lopez, L. Brown, **Validation of the Hydraulic Open Channel Flow Model HEC-RAS with Observed Data**, National Science Foundation, August 2000.
11. Molinas, Albert, 2000. **User's Manual for BRI-STARS (BRIDGE Stream Tube model for Alluvial River Simulation)**, Publication No. FHWA-RD-99-190, Federal Highway Administration, Virginia, USA.
12. Molinas, Albert, 2000. **User's Primer for BRI-STARS**, Publication No. FHWA-RD-99-191, Federal Highway Administration, Virginia, USA.
13. Perlin, Alexander, et al, **Apparent Roughness in Wave-Current Flow Implication for Coastal Studies**, Journal of Hydraulic Engineering, August 2002, Pages 729-741.
14. Roberson, Cassidy, Chaudhry, 1988. **Hydraulic Engineering**, Houghton Mifflin Company, Boston – USA, 1988.

15. Shabayek, Shazy et al, **Dynamic Model for Subcritical Combining Flows in Channel Junctions**, Journal of Hydraulic Engineering, September 2002, Pages 821-828
16. Sharp,J.J.,1981. **Hydraulic Modelling**, Butterworths, London – England, 1981.
17. Stephen E. Coleman dan Bruce W. Melville, **New Zealand Bridge Scour Experiences**, Journal of Hydraulic Engineering/July 2001, hlm. 535-546
18. Suripin, **Estuarine Hydraulics In Shallow Deltaic Estuary With Reference To Kali Garang Estuary Semarang,Indonesia**, M.Eng Thesis, Memorial University of Newfoundland, Canada, 1992
19. Syafrudin, **Model Numerik Angkutan Ion Khlorida di Perairan Estuari dengan Pembaganan Abbott-Ionescu, Quickest dan Upwind**, Tesis Magister, ITB, 1997.
20. Vreugdenhil, 1994. **Numerical Methods for Shallow-Water Flow**, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht – the Netherlands, 1994.
21. Yang, CT, **Sediment Transport Theory and Practice**, McGraw-Hill Co, International Editions, 1996