

**STUDI PENGARUH SEDIMENTASI KALI BRANTAS
TERHADAP KAPASITAS DAN USIA RENCANA
WADUK SUTAMI MALANG**

SKRIPSI

**Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Disusun oleh :

**MOHAMMAD CANDRA RAHMANTO
NIM. 9901063057-61**

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2006**

**STUDI PENGARUH SEDIMENTASI KALI BRANTAS
TERHADAP KAPASITAS DAN USIA RENCANA
WADUK SUTAMI MALANG**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

**MOHAMMAD CANDRA RAHMANTO
NIM. 9901063057-61**

DOSEN PEMBIMBING :

Ir. Suroso, Dipl. HE, M. Eng
NIP. 130 531 859

Ir. M. Ruslin Anwar, MSi
NIP. 132 215 079

repository.ub.ac.id

**STUDI PENGARUH SEDIMENTASI KALI BRANTAS
TERHADAP KAPASITAS DAN USIA RENCANA
WADUK SUTAMI MALANG**

Disusun oleh :
MOHAMMAD CANDRA RAHMANTO
NIM. 9901063057-61

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 24 Juni 2006

DOSEN PENGUJI

Ir. Suroso, Dipl. HE, M. Eng
NIP. 130 531 859

Ir. M. Ruslin Anwar, MSi
NIP. 132 215 079

Ir. Pudyono, MT
NIP. 131 098 405

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Sipil

Ir. Achmad Wicaksono, M. Eng, Ph.D
NIP. 132 007 111

PERNYATAAN ORISINILITAS SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Mohammad Candra Rahmanto

NIM : 9901063057 - 61

Jurusan : Teknik Sipil

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang sepengetahuan saya, di dalam naskah SKRIPSI ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah SKRIPSI ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur PLAGIASI, saya bersedia SKRIPSI ini digugurkan dan gelar akademik yang saya peroleh (SARJANA TEKNIK) dibatalkan, serta proses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

(UU No. 20 Tahun 2003 Pasal 25 Ayat 2 dan Pasal 70)

Malang, Juli 2006
Penulis,

Mohammad Candra Rahmanto
9901063057 – 61



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“STUDI PENGARUH SEDIMENTASI KALI BRANTAS TERHADAP KAPASITAS DAN USIA RENCANA WADUK SUTAMI MALANG”**. Skripsi ini disusun untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan studi Strata 1 (S1) di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang.

Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada semua pihak yang telah membantu penyelesaian skripsi ini. Dengan mengucap syukur Alhamdulillah penulis sampaikan rasa terima kasih kepada :

1. Bapak dan ibu yang telah mendoakan dan memberikan semangat untuk menyelesaikan skripsi ini.
2. Kakak dan adik yang telah memberikan semangat untuk menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak Ir. Suroso, Dipl. HE, M. Eng selaku dosen Pembimbing I.
4. Bapak Ir. M. Ruslin Anwar, MSi selaku dosen Pembimbing II.
5. Bapak Ir. Pudyono, MT selaku dosen Penguji.
6. Teman-teman angkatan '99 (Wahyu, Ewin, Soni, Mu'is, Pram, Septa, Uce).

Akhirnya dengan segala kerendahan hati penulis menyadari adanya kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Untuk itu penulis mengharapkan adanya masukan-masukan demi penyempurnaan penulisan selanjutnya. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Malang, Juli 2006

Penulis

ABSTRAKSI

MOHAMMAD CANDRA RAHMANTO, Jurusan Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2006, *Studi Pengaruh Sedimentasi Kali Brantas Terhadap Kapasitas Dan Usia Rencana Waduk Sutami Malang*, Dosen Pembimbing : Ir. Suroso, Dipl. HE, M. Eng. dan Ir. M. Ruslin Anwar, MSi.

Salah satu masalah yang dihadapi dalam pengelolaan waduk adalah masalah sedimentasi. Sedimentasi yang terjadi pada waduk dapat disebabkan akibat erosi yang terjadi pada lahan-lahan kritis yang terdapat pada daerah tangkapan waduk. Lahan-lahan kritis yang terjadi sebagai akibat perubahan tata guna lahan dari lahan yang pada awalnya merupakan kawasan hutan menjadi tanah gundul karena terjadi penebangan pohon secara liar dalam jumlah yang besar dan dalam waktu yang lama. Akibat erosi lahan, tanah sebagai salah satu jenis material sedimen terlepas dari ikatan antar butir, terbawa aliran permukaan, masuk ke dalam sungai dan terbawa oleh aliran air sungai kemudian mengendap di dasar waduk. Jika material sedimen yang terbentuk akibat erosi lahan tersebut masuk ke dalam aliran sungai dalam jumlah yang besar maka akan menyebabkan laju sedimen yang masuk ke dalam waduk menjadi besar bahkan akan melampaui laju sedimen rencana. Akibat sedimen yang mengendap di dasar waduk, kapasitas tampungan dan kapasitas tampungan efektif waduk akan mengalami penyusutan. Demikian juga dengan usia rencana waduk, usia rencana waduk akan mengalami percepatan pengurangan.

Tujuan dilakukan studi pengaruh sedimentasi sungai terhadap kapasitas dan usia rencana waduk adalah untuk mengevaluasi seberapa besar pengaruh sedimentasi sungai yang disebabkan erosi yang terjadi pada lahan-lahan di daerah tangkapan waduk terhadap penyusutan kapasitas tampungan dan kapasitas tampungan efektif waduk serta percepatan pengurangan usia rencana waduk untuk kemudian ditentukan langkah-langkah penanggulangannya supaya usia manfaat waduk dapat tercapai sesuai dengan perencanaannya.

Metode yang digunakan dalam analisa erosi lahan adalah metode USLE (Universal Soil Loss Equation). Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap erosi lahan adalah faktor erosivitas hujan, faktor erodibilitas tanah, faktor panjang dan kemiringan lereng serta faktor pengelolaan dan pengawetan tanah. Dari analisa metode USLE didapatkan nilai erosi lahan yang terjadi sebesar 42.102.900 ton/tahun. Dengan laju sedimen sebesar 2.836.737,15 ton/tahun maka dapat diketahui besar sedimen yang terakumulasi di dasar waduk dengan menggunakan Sediment Delivery Ratio. Sediment Delivery Ratio (SDR) didapat dengan membandingkan antara laju sedimen yang masuk ke waduk dengan erosi lahan yang terjadi. Nilai SDR yang terjadi pada waduk adalah sebesar 6,73 %. Nilai SDR tersebut memberikan indikasi bahwa erosi lahan yang terjadi memberikan pengaruh terhadap akumulasi sedimen yang terjadi di dasar waduk.

Setelah mengetahui adanya pengaruh erosi lahan terhadap akumulasi sedimen yang terjadi di dasar waduk diharapkan dapat ditingkatkan lagi perbaikan tata guna lahan di daerah tangkapan waduk. Perbaikan tata guna lahan dapat menggunakan acuan tata guna lahan pada periode tahun-tahun sebelumnya dimana pada periode tahun tersebut laju sedimen yang terjadi lebih kecil atau hampir mendekati laju sedimen rencana.

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Identifikasi Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Rumusan Masalah	3
1.5 Tujuan Penelitian	4
1.6 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Debit In Flow Tahunan	5
2.2 Efisiensi Tangkapan Waduk	5
2.3 Pengukuran Akumulasi Sedimen Di Waduk	7
2.3.1 Dasar – Dasar Pemetaan	9
2.3.2 Pengambilan Contoh Sedimen	10
2.3.3 Perhitungan Laju Sedimen	11
2.4 Erosi dan Sedimentasi	11
2.5 Pendugaan Besarnya Erosi	13
2.5.1 Faktor Erosivitas	14
2.5.2 Faktor Erodibilitas	15
2.5.3 Faktor Kelerengan	17
2.5.4 Faktor Pengelolaan Tanaman dan Pengawetan Tanah	17

BAB III METODOLOGI

3.1	Deskripsi Wilayah	20
3.2	Cara Penulisan	20
3.2.1	Persiapan	20
3.2.2	Pengumpulan Data	21
3.2.3	Pengolahan Data	21
3.3	Analisis Data	23

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Perhitungan Laju Sedimen Waduk Sengguruh	26
4.1.1	Debit In Flow Tahunan	27
4.1.2	Efisiensi Tangkapan Waduk (<i>Trap Efficiency</i>) Waduk Sengguruh	27
4.2	Analisa Kapasitas Waduk Sutami	28
4.2.1	Perhitungan Koordinat Titik Ukur	30
4.2.2	Penggambaran Profil Jalur Pengukuran	31
4.2.3	Perhitungan Luas Profil Penampang Melintang	32
4.2.4	Perhitungan Volume Tampungan Dan Volume Efektif Waduk	39
4.3	Perhitungan Laju Sedimen Waduk Sutami	44
4.3.1	Debit In Flow Tahunan	46
4.3.2	Efisiensi Tangkapan Waduk (<i>Trap Efficiency</i>) Waduk Sutami	46
4.4	Pendugaan Besarnya Erosi	47
4.4.1	Faktor Erosivitas Hujan	48
4.4.2	Faktor Erodibilitas Tanah	49
4.4.3	Faktor Kelerengan	49
4.4.4	Faktor Pengelolaan Tanaman Dan Pengawetan Tanah	50
4.4.5	Laju Erosi	51
4.5	Analisis Sedimen Waduk Sutami	51
4.5.1	Perbandingan Sedimentasi Waduk Sengguruh Dengan Waduk Sutami	51
4.5.2	Perbandingan Erosi Lahan Dengan Sedimentasi Waduk Sutami	52
4.6	Analisis Distribusi Sedimen	52

4.6.1 Fungsi Pembangkit Listrik	53
4.6.2 Fungsi Pengendali Banjir	54
4.7 Analisis Kapasitas Dan Usia Waduk Sutami	54
4.7.1 Kapasitas Waduk	54
4.7.2 Usia Waduk	55
4.8 Analisis Usia Rencana Waduk	56
4.8.1 Laju Sedimen Waduk	56
4.8.2 Laju Erosi Lahan	57
4.9 Usaha – Usaha Penanganan Dan Pengendalian	60
4.9.1 Usaha Secara Struktural	60
4.9.2 Usaha Secara Non Struktural	60

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan	62
5.2 Saran	63

DAFTAR PUSTAKA



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Klasifikasi Struktur Tanah Dalam Penentuan Kode Rumus	16
Tabel 2.2. Klasifikasi Permeabilitas Tanah Dan Nilai Untuk Rumus	16
Tabel 2.3. Perkiraan Nilai C x P Dari Berbagai Jenis Tata Guna Tanah Di Jawa	18
Tabel 2.4. Harga Sediment Delivery Ratio	19
Tabel 4.1. Gradasi Butiran Dan Berat Jenis Rata-Rata Material Sedimen Waduk Sengguruh	26
Tabel 4.2. Perhitungan luas penampang 1L-1R pada elevasi 272.50 m	32
Tabel 4.3. Perhitungan luas penampang 1L-1R pada elevasi 270.00 m	35
Tabel 4.4. Perhitungan luas penampang 1L-1R pada elevasi 268.00 m	37
Tabel 4.5. Perhitungan volume kali Brantas pada kondisi HWL (elevasi = 272.50 m)	41
Tabel 4.6. Perhitungan volume kali Brantas pada kondisi LWL (elevasi = 246.00 m)	42
Tabel 4.7. Gradasi Butiran Dan Berat Jenis Rata-Rata Material Sedimen Waduk Sutami	45
Tabel 4.8. Tata Guna Lahan Di Area Sekitar Waduk Sutami Periode Tahun 2003 – 2004	50
Tabel 4.9. Distribusi Sedimen Pada Waduk Sutami	52
Tabel 4.10. Volume Tampungan, Volume Efektif dan Volume Sedimen Waduk Sutami	55
Tabel 4.11. Usaha – Usaha Penanggulangan Laju Erosi Lahan	57
Tabel 4.12. Tata Guna Lahan Di Area Sekitar Waduk Sutami Periode Tahun 1994 – 1995 Sampai Dengan Periode Tahun 2003 – 2004	59

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Grafik Efisiensi Tangkapan (<i>Trap Efficiency</i>)	6
Gambar 2.2. Sketsa menghitung kapasitas waduk metode Kontur	8
Gambar 2.3. Sketsa menghitung kapasitas waduk metode Jalur	9
Gambar 2.4. Skema Angkutan Sedimen	13
Gambar 2.5. Sketsa Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Erosi	14
Gambar 4.1. Situasi Waduk Sutami Dan Jalur Pengukuran	29
Gambar 4.2. Sketsa pengukuran jalur penampang melintang	29
Gambar 4.3. Sketsa jalur pengukuran 1L–1R	30
Gambar 4.4. Profil penampang melintang jalur pengukuran	32
Gambar 4.5. Profil melintang 2R dan <i>water intake</i>	54



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I	Data Distribusi Sedimen Waduk Sengguruh
Lampiran II	Data Debit In Flow Waduk Sengguruh
Lampiran III	Data Volume Waduk Sengguruh
Lampiran IV	Data Koordinat dan Elevasi Patok (Beacont Point)
Lampiran V	Data Jarak Rata – Rata Antar Jalur
Lampiran VI	Data Hasil Pengukuran Jalur (Echo Sounding)
Lampiran VII	Hasil Perhitungan Koordinat Titik-Titik Jalur Pengukuran
Lampiran VIII	Gambar Profil Penampang Melintang Waduk Sutami
Lampiran IX	Hasil Perhitungan Luasan Profil Melintang Waduk Sutami
Lampiran X	Hasil Perhitungan Volume Waduk Sutami
Lampiran XI	Data Volume Sedimen Waduk Sutami
Lampiran XII	Data Distribusi Sedimen Waduk Sutami
Lampiran XIII	Gambar Denah Waduk Sutami
Lampiran XIV	Gambar Kontur Dasar Waduk Sutami
Lampiran XV	Hasil Perhitungan Koordinat, Elevasi, dan Jarak Profil Memanjang
Lampiran XVI	Gambar Profil Memanjang Waduk Sutami
Lampiran XVII	Data Curah Hujan Harian Stasiun Karangkates
Lampiran XVIII	Hasil Perhitungan Indeks Erosivitas Hujan Bulanan Stasiun Karangkates
Lampiran XIX	Data Teknis Bendungan Sutami
Lampiran XX	Peta Daerah Aliran Sungai Kali Brantas
Lampiran XXI	Gambar Penampang Melintang Bendungan Sutami
Lampiran XXII	Gambar Penampang Memanjang Bendungan Sutami
Lampiran XXIII	Gambar Penampang Geologi Waduk Sutami
Lampiran XXIV	Peta Sub DAS Brantas, Lesti, Metro, Lahor

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Bendungan Sutami merupakan salah satu bentuk pengembangan wilayah sungai dengan tujuan untuk memanfaatkan sumber daya air. Bendungan Sutami merupakan bendungan serbaguna (*multi purpose*) yaitu sebagai pembangkit listrik tenaga air dan sebagai pengendali banjir untuk sungai Brantas bagian hilir. Bendungan Sutami selesai dibangun pada tahun 1972 dengan usia rencana 100 tahun. Waduk Sutami memiliki luas daerah tangkapan sebesar 2.050 km² dengan kapasitas tampungan waduk sebesar 343.000.000 m³ dan tampungan sedimen rencana sebesar 90.000.000 m³. Selama waktu operasional waduk Sutami telah mengalami pengendapan sedimen dalam jumlah yang sangat besar. Akibat pengendapan sedimen tersebut dasar waduk mengalami pendangkalan. Dengan kondisi seperti ini waduk Sutami telah mengalami penyusutan kapasitas waduk. Akibat berkurangnya kapasitas waduk, tampungan efektif waduk yang dapat dimanfaatkan untuk operasional waduk juga akan berkurang sehingga usia manfaat waduk akan mengalami percepatan pengurangan. Selama waktu operasional waduk, telah dilakukan pengukuran *Echo Sounding* yaitu pengukuran periode tahun 1977, 1982, 1987, 1989, 1992, 1994, 1995, 1997, 2002, 2003. Dari data hasil pengukuran pada periode terakhir (periode tahun 2004) menunjukkan bahwa laju sedimen aktual pada waduk Sutami jauh lebih besar dari laju sedimen teoritisnya. Laporan hasil pengukuran *Echo Sounding* tahun 2004 di waduk Sutami oleh Perum Jasa Tirta I adalah sebagai berikut : kapasitas tampungan waduk total sebesar 176.029.000 m³ dan sedimen total yang telah masuk ke dalam waduk sebesar 166.971.000 m³. Dari hasil pengukuran tersebut dapat diketahui bahwa penyusutan kapasitas tampungan waduk akibat sedimen terjadi lebih cepat dari rencana semula yaitu sebesar 51,32% dengan usia operasional waduk yang baru mencapai 32 tahun sedangkan tampungan sedimen rencana telah terlampaui oleh sedimen aktual yang masuk yaitu sebesar 185,52%.

Dari hasil monitoring terhadap hasil pengukuran di waduk Sutami pada periode sebelumnya, terdapat indikasi bahwa jumlah sedimen yang masuk

ke waduk Sutami meningkat secara drastis pada periode tahun 1992-1994, 1997-2002 dan periode tahun 2002-2003. Untuk menanggulangi masalah tersebut telah dilakukan langkah-langkah penanggulangannya, antara lain :

- Penghijauan kembali lahan-lahan kritis di Daerah Pengaliran Waduk (DPW) untuk mengendalikan erosi sebagai sumber asal sedimen. Usaha ini memberikan hasil yang baik sampai dengan periode tahun 1994-1995 dan periode tahun 1995-1997. Setelah periode tahun 1995-1997 laju sedimen pada waduk Sutami kembali meningkat. Kendala yang dihadapi adalah semakin banyaknya penebangan pohon secara liar.
- Pembuatan *check dam* pada anak-anak sungai kali Brantas dan kali Lesti yang terdapat pada bagian hulu waduk Sengguruh. Banyak *check dam* yang rusak sehingga tidak dapat mengendalikan sedimen yang masuk ke waduk Sengguruh dengan baik.

Pada beberapa tahun terakhir telah dilakukan penghijauan kembali lahan-lahan kritis untuk mengendalikan erosi sebagai sumber asal sedimen. Tetapi akibat laju sedimen yang berlebih pada tahun-tahun sebelumnya mengakibatkan akumulasi sedimen di dasar waduk melampaui kapasitas tampungan rencananya. Fakta yang terjadi adalah walaupun kapasitas tampungan sedimen yang ditetapkan telah terlampaui, hingga saat ini waduk Sutami masih tetap dapat beroperasi. Usia waduk Sutami yang bila ditinjau dari besarnya jumlah sedimen yang masuk terhadap tampungan sedimen rencana mestinya telah berakhir yang disebabkan oleh jumlah sedimen yang masuk telah melampaui kapasitas tampungan rencana ternyata masih menyisakan sisa usia manfaat bagi waduk. Ada dugaan kuat bahwa sedimentasi yang terjadi bersumber dari erosi pada lahan-lahan kritis pada Daerah Pengaliran Waduk (DPW) yang cenderung semakin meluas kemudian terjadi pengangkutan sedimen oleh aliran sungai kali Brantas dan anak-anak sungainya sehingga mengendap pada dasar waduk. Hal ini memungkinkan bahwa keadaan permukaan dasar waduk yang terbentuk oleh akumulasi sedimen yang masuk membentuk suatu permukaan yang tidak merata. Secara teoritis usia manfaat waduk berakhir bila tampungan sedimen telah sangat mengganggu fungsi waduk. Mengingat bahwa waduk Sutami mempunyai fungsi sebagai pembangkit listrik sebagai sumber energi yang sangat dibutuhkan dan sebagai pengendali banjir bagi sungai Brantas bagian hilir, adalah penting untuk mempertahankan agar waduk Sutami tetap dapat beroperasi sesuai dengan tujuan pembangunannya.

1.2 Identifikasi Masalah

Problematika dalam rangka studi tentang sedimentasi di waduk Sutami terhadap kapasitas dan usia rencana waduk ini meliputi permasalahan :

1. Erosi lahan yang terjadi pada Daerah Pengaliran Waduk (DPW) Sutami sebagai sumber sedimen di waduk Sutami.
2. Laju sedimen aktual yang masuk ke waduk Sutami telah melampaui laju sedimen rencana.
3. Kapasitas tampungan efektif waduk Sutami telah mengalami pengurangan akibat akumulasi sedimen yang terjadi di dasar waduk.
4. Usia rencana waduk Sutami telah mengalami percepatan pengurangan usia rencana akibat berkurangnya tampungan efektif waduk.

1.3 Batasan Masalah

Karena luasnya bidang kajian yang dapat dilakukan dalam studi ini, maka ditentukan batasan masalah dalam studi adalah sebagai berikut :

1. Sedimentasi yang terjadi pada waduk Sutami hanya dipengaruhi oleh sedimentasi akibat erosi lahan.
2. Perhitungan kapasitas tampungan waduk Sutami berdasarkan akumulasi sedimen yang terjadi di dasar waduk Sutami.
3. Perhitungan sisa usia rencana waduk Sutami berdasarkan volume tampungan sedimen akibat pola distribusi sedimen yang terjadi di dasar waduk Sutami.
4. Tidak memperhitungkan pengaruh debit *in flow* dari bendungan Lahor.

1.4 Rumusan Masalah

Dalam lingkup batasan masalah ini disusun rumusan masalah sebagai berikut :

1. Berapa besar volume sedimen akibat erosi lahan yang terakumulasi di dasar waduk Sutami.
2. Berapa besar laju sedimen aktual yang masuk ke waduk Sutami.
3. Berapa besar pengurangan tampungan efektif waduk Sutami akibat akumulasi sedimen yang terjadi di dasar waduk Sutami.
4. Berapa lama sisa usia manfaat waduk Sutami akibat berkurangnya tampungan efektif waduk Sutami.

1.5 Tujuan Penelitian

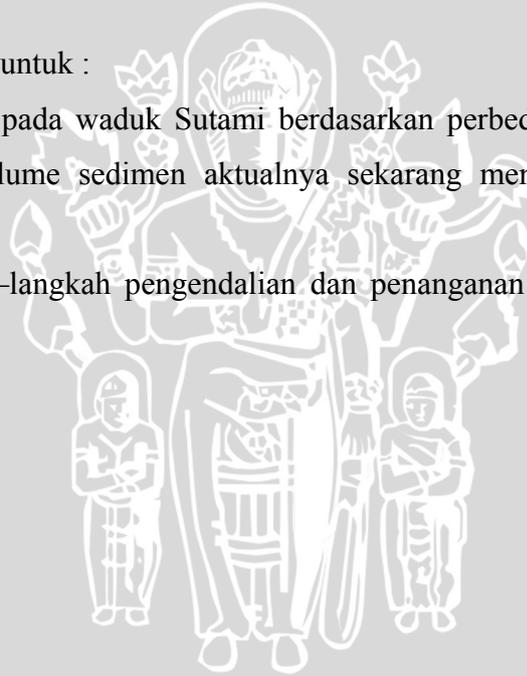
Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Menentukan pengaruh erosi lahan terhadap sedimentasi yang terjadi di waduk Sutami.
2. Menentukan laju sedimen aktual yang masuk ke waduk akibat pengaruh erosi lahan.
3. Menentukan kapasitas tampungan efektif waduk Sutami berdasarkan pengukuran periode terakhir.
4. Memprediksi sisa usia manfaat waduk Sutami berdasarkan kondisi aktual pada pengukuran periode terakhir.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat untuk :

1. Mengetahui keadaan pada waduk Sutami berdasarkan perbedaan volume sedimen rencana terhadap volume sedimen aktualnya sekarang mengapa waduk Sutami masih berfungsi.
2. Menentukan langkah-langkah pengendalian dan penanganan masalah sedimentasi pada waduk Sutami.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Debit In Flow Tahunan

Perhitungan debit *in flow* tahunan digunakan untuk menentukan besarnya daya tangkapan waduk terhadap sedimen yang akan masuk ke dalam waduk. Debit tahunan ini didapat dari rata-rata dari beberapa periode debit tahunan yang masuk ke dalam waduk. Penentuan besarnya debit *in flow* tahunan dapat dihitung (Soewarno, 1991) dengan menggunakan persamaan :

$$QH = \sum_{1}^{24} \frac{q_1 + q_2 + \dots + q_{24}}{24} \tag{2-1}$$

Dimana : QH = debit rata-rata harian (m³/dt)

q₁ = debit jam ke-1

q₂ = debit jam ke-2

q₂₄ = debit jam ke-24

$$QM = \sum_{1}^n \frac{QH}{n} \tag{2-2}$$

Dimana : QM = debit harian rata-rata dalam satu bulan (m³/dt)

QH = debit harian (m³/dt)

n = jumlah hari dalam satu bulan

$$QY = \frac{1}{12} \times \left(\sum_{1}^{12} QM \right) \tag{2-3}$$

Dimana : QY = debit rata-rata harian dalam satu tahun (m³/dt)

QM = debit rata-rata harian dalam satu bulan (m³/dt)

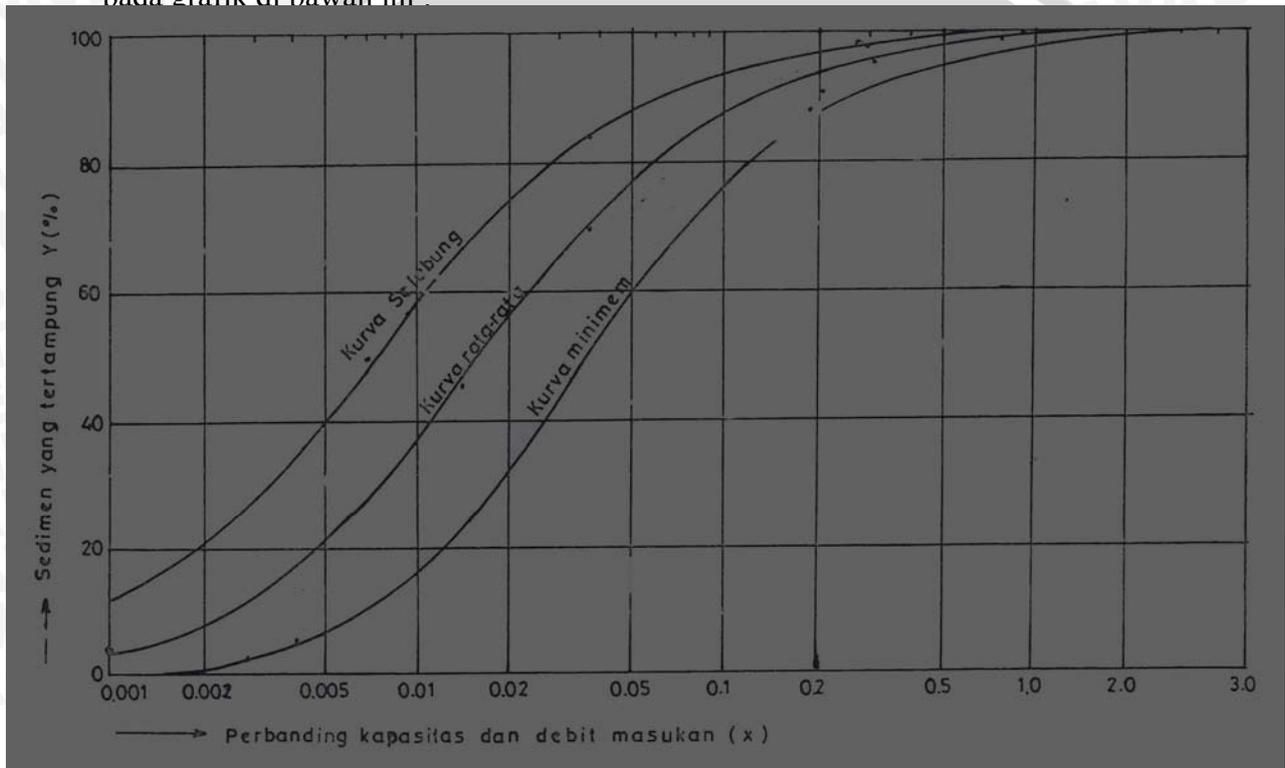
2.2 Efisiensi Tangkapan Waduk

Sedimen yang masuk ke waduk tidak seluruhnya terendap, ada sebagian yang diteruskan keluar. Sedimen yang berhenti di waduk dapat dihitung berdasarkan perhitungan *trap efficiency*. *Trap Efficiency* dari waduk dapat didefinisikan sebagai



rasio dari jumlah sedimen terendap terhadap total masukan sedimen. Efisiensi tangkapan waduk (*trap efficiency*) ini terutama sekali tergantung dari kecepatan jatuh partikel sedimen rata-rata aliran yang masuk pada waduk.

Suatu perkiraan dan efisiensi tampungan waduk dalam menangkap sedimen telah dibuat oleh Brune (1953) yang menghubungkan prosentase sedimen yang tertangkap terhadap rasio kapasitas waduk dan aliran masuk tahunan. Hubungan tersebut terlihat pada grafik di bawah ini :



Sumber : Linsley dkk, 1986 : 355

Gambar 2.1. Grafik efisiensi tangkapan

Perhitungan *trap efficiency* yang digunakan adalah Metode Gunnar Brune, dengan perbandingan antara kapasitas tampungan waduk (C) dengan *in flow* aliran tahunan (I) atau dapat dituliskan dengan persamaan (C/I)

$$ET = 100.0,19^{0,19 \wedge \log C/I} \tag{2 - 4}$$

Selain itu didalam mempermudah pembacaan grafik pada penentuan efisiensi tangkapan waduk digunakan rumus :

$$Y = 100.(1 - 1/1+ a.X)^n \tag{2 - 5}$$

Dimana : $X = C/I =$ diambil kurva rata-rata ($a = 100$ dan $n = 1,5$)
 $Y =$ efisiensi tangkapan waduk (*trap efficiency*)

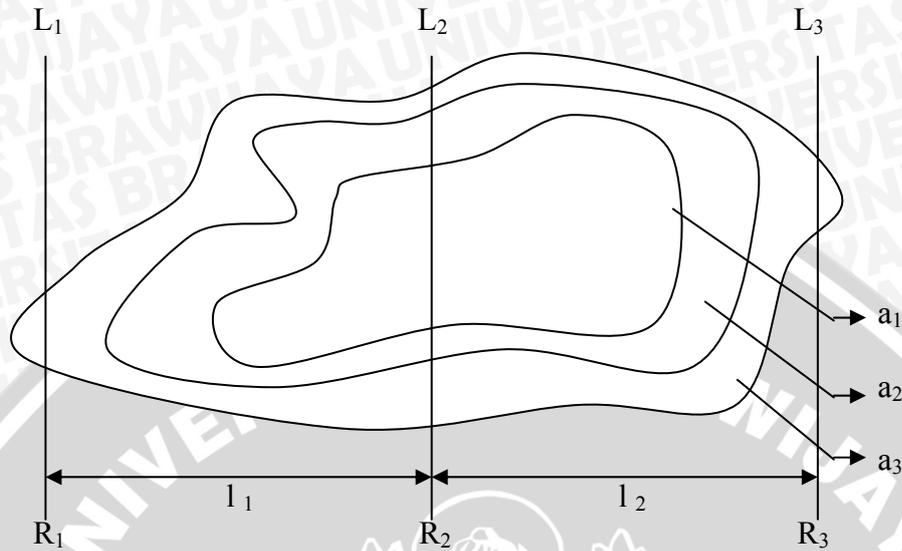
2.3 Pengukuran Akumulasi Sedimen Di Waduk

Total volume endapan musiman atau tahunan terhadap dasar waduk yang dilewati sungai dapat ditentukan dengan cara melaksanakan pemetaan topografi waduk secara berkala, pengukuran dilakukan pada penampang–penampang melintang waduk yang telah ditetapkan. Besaran sedimen yang masuk dan terendap di dasar waduk dihitung dengan cara membandingkan kapasitas waduk yang diukur dari dua waktu yang berlainan.

Pengukuran kapasitas waduk dapat dilaksanakan dengan cara langsung, yaitu dengan cara pemeruman (*Echo Sounding*). Prosedur pengukuran dengan metode kontur (*Contour Method*) dan atau jalur (*Range Method*). Pemilihan metode yang dipakai tergantung dari kuantitas dan distribusi sedimen, ketersediaan peta dasar, tujuan *survey* dan ketelitian yang diinginkan. Kontur menggunakan prosedur pemetaan topografi, jalur dilaksanakan dengan membuat profil melintang, pada pelaksanaannya alat duga *rope* digunakan untuk pengukuran kedalaman air waduk dan alat pemetaan topografi *teodolit* dan *waterpass* digunakan untuk bagian daratannya (daerah genangan kering)

Metode kontur digunakan terutama sebelum waduk diisi air. Peta kontur dihasilkan akan menggambarkan kondisi sebelum penggenangan dan metode jalur digunakan setelah penggenangan dan harus dilaksanakan secara teratur untuk menentukan tebal endapan sedimen disetiap jalur. Data yang digunakan antara lain peta dasar, lokasi jalur pemetaan, penomoran jalur pemetaan dan patok tetap (*Bench Mark* atau *Beacon Point*).

- Metode Kontur



Gambar 2.2. Sketsa menghitung kapasitas waduk metode kontur

Setelah diperoleh data kedalaman dan jarak tiap-tiap jalur sesuai dengan patok tetap selanjutnya dapat dibuat peta kontur kedalaman waduk dengan cara interpolasi. Dengan berdasarkan peta kontur ini maka dapat dilakukan perhitungan luas setiap penampang melintang dengan interval elevasi 2,0 m mulai dari elevasi tinggi muka air banjir, selanjutnya dihitung volume total penampang berdasarkan jarak rata-rata setiap penampang melintang yang bersangkutan. Volume air waduk saat pengukuran dibandingkan dengan volume air waduk dari pengukuran sebelumnya maka akan dapat diketahui tebalnya akumulasi sedimen sungai yang terendap di dalam waduk. Perbandingan volume tersebut harus dihitung berdasarkan tinggi muka air yang sama.

Cara pengukuran kapasitas dapat menggunakan topografi, bila akan dihitung volume waduk pada elevasi tertentu dapat digunakan rumus trapesium (Soewarno, 1991) sebagai berikut :

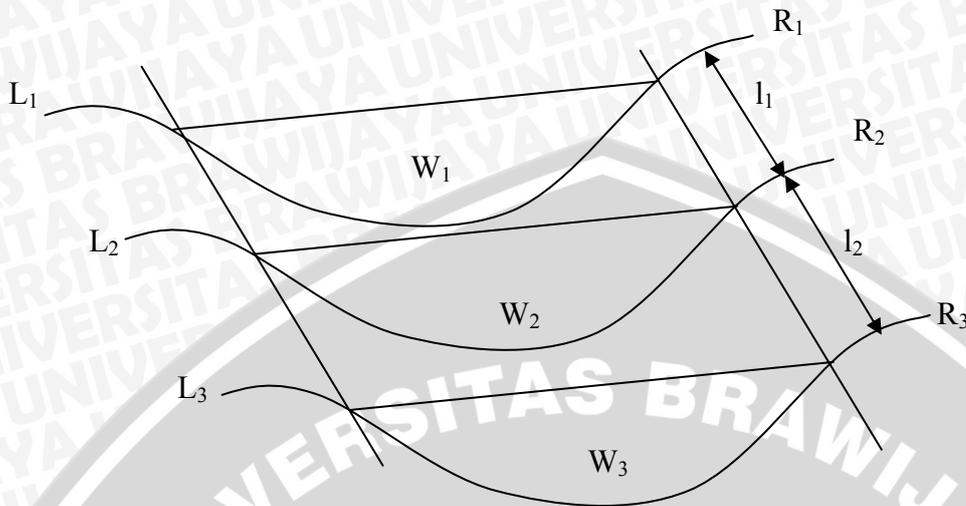
$$Vd = \frac{1}{2}.h.(a_1 + a_2 + a_3) \tag{2 - 6}$$

Dimana : Vd = volume trapesium metode topografi (m^3)

h = perbedaan elevasi antara kontur a_1 dan a_2 (m)

a_1, a_2, a_3 = luas daerah yang dibatasi oleh kontur (m^2)

- Metode Jalur



Gambar 2.3. Sketsa menghitung kapasitas waduk metode Jalur

Untuk menghitung volume dapat pula digunakan metode jalur (*range method*), berdasarkan persamaan (Soewarno, 1991) :

$$V_{du} = \frac{1}{2} \cdot [I_1 \cdot W_1 + (I_1 + I_2) \cdot W_2 + I_2 \cdot W_3] \quad (2 - 7)$$

Dimana : V_{du} = volume metode jalur (m^3)

I_1, I_2 = jarak antar jalur (m)

W_1, W_2, W_3 = luas penampang pada elevasi tertentu (m^2)

2.3.1 Dasar - Dasar Pemetaan

Dalam pemetaan umum digunakan sistem koordinat, dengan sumbu-sumbu bidang horisontal sejajar dengan garis lintang dan garis bujur bumi. Setiap titik koordinat harus diketahui elevasinya, angka-angka koordinat dan elevasi didasarkan pada suatu titik ikat (*Bench Mark*) teretntu yang telah ditetapkan sebelumnya. Rumus-rumus dasar perhitungan koordinat (Brinker dan Wolf, 1987) adalah sebagai berikut :

$$X_2 = X_1 + d \cdot \sin \alpha \quad (2 - 8)$$

$$Y_2 = Y_1 + d \cdot \cos \alpha \quad (2 - 9)$$

Dimana : X_2, Y_2 = titik-titik koordinat yang dihitung

d = jarak (m)

α = sudut azimuth (terhadap arah utara searah jarum jam)

Dengan diketahui titik-titik koordinat dan elevasi maka dapat dibuat gambar kontur dan dihitung luasnya.

Luas adalah jumlah areal yang terproyeksi pada bidang horisontal dan dikelilingi oleh garis batas. Suatu luas dapat dihitung dengan bermacam cara yang sering dipakai baik di lapangan atau di studio, antara lain : plot kertas grafik, planimeter atau dengan perhitungan koordinat titik-titik garis batas. Menghitung luas dengan cara koordinat (Brinker dan Wolf, 1987) :

$$\text{Luas segi banyak} = \frac{1}{2} \cdot \sum (X_1 \cdot Y_2 - X_2 \cdot Y_1) \quad (2 - 10)$$

Dimana : X_1, Y_1 = titik-titik koordinat awal

X_2, Y_2 = titik-titik koordinat kedua (seterusnya)

2.3.2 Pengambilan Contoh Sedimen

Kegiatan lain bersamaan dengan pengukuran adalah pengambilan contoh endapan sedimen didalam waduk untuk menentukan ukuran partikel dan berat spesifik partikel endapan. Alat yang digunakan *Gravity Core Sampler* atau *Piston Core Sampler*.

Sample sedimen yang diambil dari dasar waduk dilakukan analisa laboratorium untuk mendapatkan ukuran butir partikel sedimen dan berat spesifiknya. Data hasil pengujian laboratorium terhadap sedimen dan berat spesifiknya. Data hasil pengujian dari laboratorium terhadap sedimen dan material endapan sedimen ini diperlukan untuk menghitung besarnya volume endapan pada waduk yang dinyatakan dalam satuan berat (ton/tahun).

Penentuan ukuran butir partikel sedimen, dengan melakukan prosedur pengujian di laboratorium dan perhitungan persentase lolos rata-rata (% lolos) dari masing-masing ukuran diameter butir partikel dapat dihitung dengan persamaan (Soewarno, 1991) berikut :

$$\% \text{ lolos} = 100\% - \frac{\text{berat contoh hasil ayakan} \times 100\%}{\text{berat contoh total}} \quad (2 - 11)$$

Penentuan berat jenis (*Spesifik Gravity*) partikel sedimen dapat dilakukan dengan mengukur berat dan volume secara langsung. Pada umumnya berat dapat diukur dengan mudah dan teliti, oleh karena itu penentuan berat jenis akan tergantung pada ketelitian pengukuran volume. Apabila ukuran partikel sedimen cukup besar (20 - 30 mm), volume dapat ditentukan dari perbedaan volume yang dipindahkan sesudah dan sebelum

pencelupan partikel tersebut ke dalam gelas ukur yang diisi air. Akan tetapi jika ukuran partikel sedimen halus, penentuan volume dapat menggunakan *piknometer*.

$$GS = \frac{m}{(pa + m) - ps} \quad (2 - 12)$$

Dimana : GS = berat jenis (tanpa satuan)

m = berat contoh kering (gram)

pa = berat piknometer dan air (gram)

ps = berat piknometer + air + contoh (gram)

(pm + m) - ps = volume contoh = volume air yang dipindahkan

2.3.3 Perhitungan Laju Sedimen

Hal yang tidak mungkin dihindari adalah bahwa masuknya aliran sungai ke dalam waduk membawa angkutan sedimen dan mengendap sehingga menyebabkan pendangkalan waduk. Pengaruh waduk terhadap aliran sungai asli adalah terhadap kecepatan aliran akan lebih lambat dan kemiringan permukaan air akan lebih kecil. Gejala tersebut menyebabkan daya angkut sungai terhadap sedimen menjadi berkurang dan cenderung mengendap di dalam waduk. Dengan demikian waduk dapat dipandang sebagai suatu media untuk mengukur angkutan sedimen total dari sungai-sungai yang alirannya masuk waduk.

Akumulasi sedimen sungai yang terendap di dalam waduk akan mengurangi kapasitas waduk. Apabila dapat diketahui volume dari berkurangnya kapasitas waduk dalam jangka waktu tertentu maka laju sedimentasi waduk setiap tahunnya dapat dihitung.

$$\text{Laju sedimen} = \text{berat jenis} \times \frac{\text{volume saat ini} - \text{volume sebelumnya}}{\text{jumlah tahun}} \quad (2 - 13)$$

Dalam menentukan laju sedimen waduk perlu diperhatikan debit sedimen yang masuk waduk dan berat spesifik dari endapan sedimen.

2.4 Erosi dan Sedimentasi

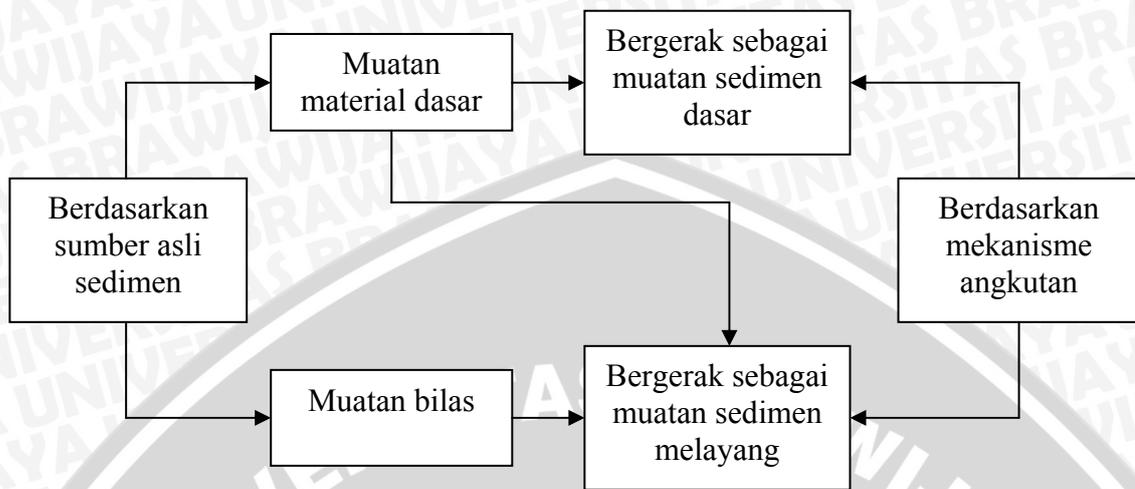
Proses sedimentasi meliputi erosi, transportasi, pengendapan dan pemadatan dari sedimentasi itu sendiri. Proses tersebut berjalan sangat kompleks, dimulai dari jatuhnya air hujan yang menghasilkan energi kinetik yang merupakan permulaan dari proses

erosi. Begitu tanah menjadi partikel halus, lalu menggelinding bersama aliran, sebagian akan tertinggal di atas tanah sedangkan bagian lainnya masuk ke sungai terbawa aliran menjadi angkutan sedimen.

Faktor-faktor terpenting yang mempengaruhi erosi tanah adalah curah hujan, tumbuh-tumbuhan yang menutupi permukaan tanah, jenis tanah dan kemiringan tanah. Karena peranan penting dari dampak tetesan air hujan, maka tumbuhan memberikan perlindungan yang penting terhadap erosi, yaitu dengan menyerap energi jatuhnya air hujan dan biasanya mengurangi ukuran-ukuran dari butir-butir air hujan yang mencapai tanah. Tumbuh-tumbuhan dapat juga memberikan perlindungan mekanis pada tanah terhadap erosi.

Bentuk, ukuran dan beratnya partikel tanah tersebut akan menentukan jumlah besarnya angkutan sedimen. Kemampuan tanah itu untuk terkikis tidak hanya tergantung pada ukuran-ukuran partikelnya tetapi juga pada sifat fisik bahan organik dan anorganik yang terikat bersama-sama partikel tersebut. Apabila partikel tanah tersebut terkikis dari permukaan bumi atau dari dasar dan tebing sungai maka endapan yang dihasilkan akan bergerak atau berpindah secara kontinyu menurut arah aliran yang membawanya menjadi angkutan sedimen yang dapat dihitung produksi sedimennya dari suatu daerah pengaliran sungai.

Karena sedimen merupakan kelanjutan dari proses erosi maka faktor-faktor yang mempengaruhi erosi sedimen juga merupakan faktor yang mempengaruhi sedimen di lahan, tetapi sedimen di sungai masih dipengaruhi pula oleh karakteristik hidrolis sungai, penampang sedimen dan kegiatan gunung berapi. Jumlah sedimen yang terangkut aliran sungai ditentukan oleh rantai erosi pengangkutan sedimen, muka pengangkutan sedimen dan produksi sedimen dipengaruhi oleh keadaan topografi, sifat tanah penutup tanah, laju dan jumlah limpasan permukaan, juga sumber sedimen, sistem pengangkutan, tekstur tanah dan sifat daerah aliran sungai, luas topografi, bentuk dan kemiringan tanah.



Gambar 2.4. Skema angkutan sedimen

2.5 Pendugaan Besarnya Erosi

Ada beberapa cara dalam melakukan pendugaan besarnya erosi baik secara langsung maupun tidak langsung. Beberapa peneliti menduga besarnya erosi yang terjadi di suatu tempat dengan cara menampung aliran permukaan pada setiap saat turunnya hujan. Selanjutnya berdasarkan curah hujan dilakukan penafsiran terhadap erosi yang sesungguhnya yang terjadi di daerah tersebut. Disamping itu ada yang melakukan pendugaan besarnya erosi dengan mengukur besarnya muatan suspensi yang terbawa aliran sungai di daerah tersebut pada saat terjadinya hujan.

Besarnya erosi Daerah Pengaliran Sungai (DPS) dapat ditentukan dengan rumus-rumus empiris yang dikembangkan berdasarkan kondisi fisiografi dan klimatologi dari DPS yang bersangkutan. Cara yang telah banyak dilakukan adalah berdasarkan rumus USLE (*Universal Soil Loss Equation*). Laju erosi yang terjadi menurut rumus kehilangan tanah *universal* (WISHMEYER dan SMITH, 1960) :

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2 - 14)$$

- Dimana :
- E = laju erosi tahunan (ton/ha/tahun)
 - R = faktor erosivitas hujan
 - K = faktor erodibilitas tanah
 - L = faktor panjang lereng (m)

S = faktor kemiringan lereng (%)

C = faktor pengelolaan tanaman

P = faktor konservasi tanah

Bila tidak menggunakan faktor C dan P maka hasilnya adalah erosi potensial.



Gambar 2.5. Sketsa faktor-faktor yang mempengaruhi erosi

2.5.1 Faktor Erosivitas

Faktor erosivitas hujan dievaluasi dari kemampuan curah hujan menimbulkan erosi pada tanah yang tidak terlindungi. Kehilangan tanah dari plat tanah yang diberakan mempunyai korelasi yang tinggi dengan karakteristik hujan, yaitu energi curah hujan maksimum selama 30 menit.

Besarnya curah hujan, intensitas hujan dan penyebaran hujan menentukan kekuatan dispersi hujan terhadap tanah, jumlah dan kekuatan aliran permukaan serta erosi. Sedangkan sifat-sifat hujan yang berpengaruh terhadap erosi adalah jumlah, intensitas dan energi kinetik yang ditimbulkan.

Energi kinetik dihitung menurut persamaan :

$$EK = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2 - 15)$$

Dimana : EK = energi kinetik (joule)

m = massa butir hujan (kg)

v = kecepatan jatuh hujan (m/dt)

Smith dan Weischmeier mengemukakan persamaan untuk mendapatkan energi hujan :

$$E = 210,3 + 89 \log I \quad (2 - 16)$$

Dimana : E = energi kinetik hujan (ton-meter/ha.cm hujan)

I = intensitas hujan (cm/jam)

$$EI30 = E \cdot I30 \cdot 10^{-20} \quad (2-17)$$

Dimana : EI30 = indeks erosivitas hujan

E = total energi kinetik hujan (joule/m²)

I30 = intensitas hujan maksimum selama 30 menit

Metode lain dikembangkan oleh Bols (1978) berdasarkan penelitiannya di beberapa tempat di Indonesia yaitu :

$$EI30 \text{ harian} = \frac{2,467 \cdot Rh^2}{(0,0727 \cdot Rh + 0,725)} \quad (2-18)$$

$$EI30 \text{ bulan} = 6,199 \cdot (Rb^{1,211}) \cdot (N^{-0,474}) \cdot (Rm^{0,526}) \quad (2-19)$$

Dimana : Rh = curah hujan harian (cm)

Rb = curah hujan bulanan (cm)

N = jumlah hari hujan

Rm = curah hujan maksimum harian dalam sebulan

Hari hujan didefinisikan sebagai hari dimana ada hujan sebesar 0,5 mm atau lebih (Sosrodarsono dan Takeda, 1978). Untuk menentukan nilai indeks erosivitas hujan tahunan R digunakan rumus :

$$R = \sum_{n=1}^{12} (EI30) \cdot n \quad (2-20)$$

Dimana : n = periode bulan yang bersangkutan

2.5.2 Faktor Erodibilitas

Indeks erodibilitas tanah disebut juga indeks kepekaan erosi tanah yang didefinisikan sebagai laju kehilangan tanah tahunan dalam satuan berat per luas satuan luas tanah per nilai indeks erosivitas hujan, pada tanah yang diberakan, tanpa vegetasi sama sekali, pada lereng dengan kemiringan 9 % dan panjang lereng 22 meter.

Penentuan nilai erodibilitas tanah dapat menggunakan analisa laboratorium, berdasarkan sifat-sifat fisik tanah. Parameter-parameter untuk menduga nilai K adalah :

- persen debu (2 – 5 mikron) + persen pasir sangat halus (5 – 100 mikron)
- persen pasir
- persen bahan organik

- struktur tanah
- permeabilitas tanah

Selanjutnya parameter-parameter tersebut dimasukkan dalam sebuah *nomograf* (DPMA, 1982). Untuk memudahkan perhitungan *nomograf* tersebut telah dibuatkan rumusnya sebagai berikut (VIS, 1987) :

$$K = [2,713.M^{1,14} \cdot (10^{-4}) \cdot (12-a) + 3,25 \cdot (b-2) + 2,5 \cdot (c-3)] / 100 \quad (2-21)$$

Dimana : K = faktor erodibilitas tanah

M = parameter ukuran butir

a = persentase bahan organik

b = kode struktur tanah

c = kode permeabilitas profil

Parameter ukuran butir (M) dapat ditentukan dari rumus :

$$M = (\% \text{debu} + \text{pasir sangat halus}) \cdot (100 - \% \text{liat}) \cdot (0,002 - 0,005 \text{ mm}) \cdot (0,05 - 0,1 \text{ mm}) \cdot (< 0,002 \text{ mm}) \quad (2-22)$$

Persentase bahan organik ditentukan dari laboratorium. Kode struktur tanah dan kode permeabilitas ditentukan berdasarkan standart USDA. Tabel 2.1 menunjukkan kode struktur tanah dan Tabel 2.2 menunjukkan kode permeabilitas tanah.

Tabel 2.1. Klasifikasi struktur tanah dalam penentuan Kode Rumus / nomogram USDA

Type struktur tanah	Ukuran (mm)	Kode rumus / nomogram
Granular sangat halus	kurang 1 mm	1
Granular halus	1 - 2 mm	2
Granular sedang kasar	2 - 10 mm	3
Berkubus, lempeng atau massif	-	4

Sumber : R.Vis, 1987

Tabel 2.2. Klasifikasi permeabilitas tanah berdasarkan sistem USDA dan nilai untuk rumus / nomogram

Nilai permeabilitas (cm/jam)	Kelas	Keterangan
Kurang - 0,20	6	Sangat lambat
0,21 - 1,59	5	Lambat
1,60 - 15,0	4	Lambat - sedang
15,1 - 16,0	3	Sedang
16,1 - 50,0	2	Sedang - cepat
50,0 - lebih	1	Cepat

Sumber : R.Vis, 1987

2.5.3 Faktor Kelerengan

Dua parameter yang berpengaruh pada faktor kelerengan, yaitu panjang lereng dan persen kemiringan lereng. Faktor panjang lereng (L) dan kemiringan (S) merupakan nilai perbandingan dengan nilai kehilangan tanah dari lahan dengan panjang lereng 22 meter dan memiliki kemiringan 9 persen. Dalam menghitung nilai LS, Weischmeier (1971) memberikan rumus :

$$LS = L^{0.5}/100.(1,38 + 0,965.S + 0,138.S^2) \quad (2 - 23)$$

Dimana : L = panjang lereng (m)
S = kemiringan lereng (%)

Panjang lereng diukur dari peta topografi dengan pengertian bahwa erosi terjadi karena adanya aliran permukaan (*overland flow*), dimana panjang lereng tersebut merupakan panjang lereng dari *overland flow* ke titik air yang masuk kedalam saluran pengumpul. Sehingga untuk menentukan panjang lereng *overland flow* menggunakan rumus yang disajikan oleh Eyles (1968), sebagai berikut :

$$L = \frac{1}{2}.D \quad (2 - 24)$$

Dimana : D = kerapatan drainase sebenarnya

Untuk menghitung kerapatan drainase (d) suatu DPS, menggunakan persamaan :

$$d = Ls/A \quad (2 - 25)$$

Dimana : Ls = panjang seluruh alur sungai (km)
A = luas DPS (km²)

Kerapatan drainase sebenarnya (D), dihitung dengan persamaan :

$$D = 1,35.d + 0,26.s + 2,8 \quad (2 - 26)$$

Dimana : d = kerapatan drainase
s = kemiringan lereng

2.5.4 Faktor Pengelolaan Tanaman Dan Pengawetan Tanah

Faktor pengelolaan tanaman (C) adalah perbandingan antara kehilangan tanah dari lahan yang diusahakan untuk penanaman dengan sistem pengolahan, terhadap kehilangan apabila lahan tersebut diolah secara terus menerus tetapi tanpa ditanami. Faktor tindakan manusia dalam pengawetan tanah (P) adalah perbandingan antara besarnya erosi tanah yang hilang pada lahan dengan tindakan pengawetan tertentu,

terhadap besarnya erosi tanah apabila pada lahan tersebut tanpa tindakan pengawetan tanah. Perkiraan faktor CP dapat dilihat pada Tabel 2.3

Tabel 2.3. Perkiraan nilai C x P dari berbagai jenis tata guna tanah di Jawa

Jenis Penggunaan Tanah	Nilai C x P
Hutan tak terganggu	0,001
Hutan tanpa undergrowth	0,003
Hutan tanpa undergrowth dan seresah	0,005
Semak tak terganggu	0,010
Semak sebagai rumput	0,100
Kebun campuran	0,020
Kebonan	0,070
Kebun pekarangan	0,200
Perkebunan penutupan tanah sempurna	0,010
Perkebunan penutupan tanah sebagian	0,070
Perumputan penutupan tanah sempurna	0,010
Perumputan ditumbuhi alang-alang	0,020
Perumputan pembakaran alang-alang setahun sekali	0,060
Perumputan jenis serau (<i>citronella grass</i>)	0,650
Tanaman pertanian umbi-umbi bakar	0,630
Tanaman biji-bijian	0,510
Tanaman kacang-kacangan	0,360
Tanaman campuran	0,430
Tanaman padi irigasi	0,020
Perladangan 1 tahun tanam 1 tahun bera	0,280
Perladangan 1 tahun tanam 1 bera	0,190

Sumber : (DPMA, 1982, bahan dari : Ambar S dan A Syafruddin (1979) dan LPT Bogor)

Berdasarkan hasil perhitungan persamaan 2.1 maka dibuat klasifikasi tingkat bahaya erosi sebagai berikut :

- erosi sangat berat : lebih dari 330 ton/ha/tahun
- erosi berat : 125 - 330 ton/ha/tahun
- erosi sedang : 50 - 125 ton/ha/tahun
- erosi kecil : 12,5 - 50 ton/ha/tahun
- erosi sangat kecil : kurang dari 12,5 ton/ha/tahun

Besarnya erosi tanah (ton/ha/tahun) atau (mm/tahun) sudah barang tentu sebagian akan tertinggal di dalam DPS sebagian lagi akan masuk ke dalam sungai terbawa oleh aliran sungai. Apabila sungai tersebut dibangun waduk, maka akan dapat diperkirakan akumulasi volume sedimennya setiap tahun. Tidak semua besarnya erosi akan terbawa

aliran sungai oleh karena itu harus ditentukan harga *Sediment Delivery Ratio* (SDR) yaitu :

$$\text{SDR} = \frac{\text{Sedimen yang terangkut}}{\text{Besarnya erosi}} \quad (2 - 27)$$

Besarnya harga SDR tergantung daripada luas DPS, kemiringan dan faktor-faktor lain yang mempengaruhi erosi DPS dan pengangkutan sedimen di alur sungai. Untuk DPS yang datanya kurang dapat digunakan harga SDR pada Tabel 2.4

Tabel 2.4. Harga *Sediment Delivery Ratio* (SDR)

Luas DPS	SDR (%)
0,1	53
0,5	39
1,0	35
5,0	27
10,0	24
50,0	15
100,0	13
200,0	11
500,0	8,5
26000,0	4,9

Sumber : DPMA,1982 (bahan dari tabel USLE, Past, Present and Future SSSA Special Publication Number 8, 3-18-1979)

BAB III

METODOLOGI

3.1 Deskripsi Wilayah

Waduk Sutami merupakan salah satu waduk yang membendung kali Brantas di bagian hulu. Waduk ini terletak \pm 14 km dari waduk Sengguruh yang terletak di bagian *up stream*. Waduk Sutami berada pada ketinggian 272 m di atas permukaan air laut. Waduk Sutami merupakan waduk tahunan dimana waktu pengisian dan pengosongan waduk selama 1 tahun dan memiliki luas Daerah Aliran Sungai (DAS) sebesar 2.050 km². Kondisi lahan disekitar daerah aliran sungai sebagian besar merupakan hutan jati, sawah, tanaman polowijo, lahan kering serta bangunan dan pekarangan. Waduk ini mempunyai fungsi yang sangat penting, yaitu sebagai pembangkit listrik tenaga air dan sebagai pengendali banjir sungai Brantas bagian hilir.

3.2 Cara Penulisan

3.2.1 Persiapan

Dalam pembahasan skripsi ini, digunakan metode studi literatur yang didukung data-data dari Perum Jasa Tirta I Malang. Adapun proses pengerjaan adalah sebagai berikut :

- Interview

Untuk mendapatkan gambaran konkret tentang permasalahan di lapangan dan hal-hal yang menyangkut usaha-usaha penanganan di lapangan yang telah dan sedang dilakukan dari pihak-pihak yang kompeten.

- Studi literatur

Untuk mendapatkan informasi-informasi lain guna melengkapi data-data yang diperlukan dalam melakukan analisa penyelesaian masalah. Literatur yang dijadikan sebagai fokus perhatian adalah laporan tentang erosi lahan dan sedimentasi di lokasi yang sama dengan lokasi studi ini.

3.2.2 Pengumpulan data

Data–data yang diperlukan terutama berhubungan dengan perhitungan kapasitas waduk, sedimentasi pada dasar waduk, erosi lahan pada daerah pengaliran dan kondisi daerah pengaliran waduk Sutami serta laju sedimen dan efisiensi tangkapan waduk Sengguruh.

Data–data tersebut antara lain :

- data-data waduk Sengguruh, meliputi : kapasitas waduk, hasil uji laboratorium contoh sedimen di lapangan dan debit *in flow*.
- hasil pengukuran *echo sounding* di waduk Sutami, meliputi : koordinat, jarak dan elevasi titik–titik pengukuran.
- data sedimen di waduk Sutami, yaitu hasil uji laboratorium contoh sedimen di lapangan.
- data–data waduk Sutami, meliputi : kapasitas waduk, volume efektif, volume sedimen dari periode pengukuran sebelumnya dan data–data teknis waduk.
- karakteristik daerah pengaliran waduk Sutami yang meliputi curah hujan, hasil uji laboratorium tanah, peta topografi dan tata guna lahan.

3.2.3 Pengolahan Data

- Perhitungan laju sedimen waduk Sengguruh

Dari selisih hasil perhitungan antara volume tampungan periode sebelumnya dengan periode terakhir pengukuran dan hasil uji laboratorium sedimen untuk mendapatkan laju sedimen waduk.

- Perhitungan efisiensi tangkapan waduk Sengguruh

Sedimen yang terjadi pada waduk Sengguruh tidak semuanya akan terakumulasi di dasar waduk. Sebagian akan mengendap pada dasar waduk sebagian akan terbawa keluar dari waduk menjadi material sedimen waduk Sutami. Dari hasil perhitungan efisiensi tangkapan waduk kemudian dilakukan evaluasi sedimen waduk Sengguruh terhadap volume sedimen yang terjadi pada waduk Sutami.

- Perhitungan koordinat titik ukur

Data hasil pengukuran di lapangan selanjutnya digunakan untuk perhitungan koordinat titik–titik ukur pada setiap jalur pengukuran. Untuk mendapatkan koordinat titik–titik ukur, terlebih dahulu dihitung sudut *azimuth* setiap jalur pengukuran.

- Penggambaran profil jalur pengukuran

Dari hasil perhitungan koordinat titik-titik ukur selanjutnya digunakan untuk penggambaran profil penampang melintang setiap jalur pengukuran.

- Perhitungan luas profil penampang melintang

Dari penggambaran profil penampang melintang setiap jalur pengukuran dapat dihitung luas profil penampang melintang setiap jalur pengukuran.

- Perhitungan volume tampungan dan volume efektif waduk Sutami

Selanjutnya dihitung volume antar penampang melintang, volume tampungan waduk adalah kumulatif perhitungan volume pada elevasi muka air maksimum. Volume efektif waduk merupakan volume air yang masih dapat dimanfaatkan untuk operasional waduk yang diperoleh dari selisih antara volume waduk pada muka air tertinggi dengan volume air pada muka air terendah.

- Perhitungan laju sedimen waduk Sutami

Dari selisih hasil perhitungan antara volume tampungan periode sebelumnya dengan periode terakhir pengukuran dan hasil uji laboratorium sedimen untuk mendapatkan laju sedimen waduk.

- Perhitungan efisiensi tangkapan waduk Sutami

Sedimen yang terjadi pada waduk Sutami tidak semuanya akan terakumulasi di dasar waduk. Sebagian akan mengendap pada dasar waduk sebagian akan terbawa keluar dari waduk menjadi material sedimen waduk Wlingi yang terdapat pada bagian hilir waduk Sutami.

- Perhitungan faktor erosivitas hujan

Dari data curah hujan harian selama 5 tahun, mulai tahun 2000 sampai dengan tahun 2004 untuk menghitung indeks erosivitas hujan bulanan. Dari indeks erosivitas hujan bulanan kemudian dihitung indeks erosivitas hujan tahunan rata-rata selama 5 tahun.

- Perhitungan faktor erodibilitas tanah

Dari hasil pengujian tanah di laboratorium didapatkan persentase debu, persentase pasir sangat halus, persentase liat, persentase bahan organik, type struktur tanah dan nilai permeabilitas tanah. Hasil uji laboratorium tersebut digunakan untuk menghitung parameter ukuran butir, kemudian setelah didapat parameter ukuran butir dihitung nilai faktor erodibilitas tanah.

- Perhitungan faktor kelerengan

Dua parameter penting dalam menghitung faktor kelerengan adalah panjang lereng dan persentase kemiringan lereng. Data-data panjang seluruh alur sungai, luas DPS dan persentase kemiringan lereng digunakan untuk menghitung kerapatan drainase, kerapatan drainase sebenarnya dan panjang lereng. Hasil perhitungan tersebut digunakan untuk menghitung faktor kelerengan.

- Perhitungan faktor pengelolaan tanaman dan pengawetan tanah

Dipengaruhi oleh tindakan manusia dalam pengaturan tata guna lahan yaitu pengelolaan tanaman pada lahan dan pengawetan tanah. Setiap jenis tanaman pada lahan akan memberikan pengaruh yang berbeda-beda terhadap erosi lahan.

- Perhitungan besarnya erosi lahan daerah aliran waduk Sutami

Menghitung laju erosi lahan yang terjadi di daerah aliran waduk selanjutnya digunakan untuk menghitung besarnya erosi total yang terjadi.

3.3 Analisis Data

- Analisis sedimentasi waduk Sengguruh dengan waduk Sutami

Dari hasil perhitungan efisiensi tangkapan waduk Sengguruh akan dibandingkan volume sedimen yang terakumulasi di waduk Sengguruh dengan dengan volume sedimen yang menjadi material sedimen dan terakumulasi di waduk Sutami.

- Analisis erosi lahan dengan sedimen waduk Sutami

Dari hasil perhitungan laju sedimen dibandingkan dengan erosi total yang terjadi di lahan untuk kemudian dilakukan evaluasi erosi yang terjadi pada daerah aliran waduk.

- Analisis distribusi sedimen

Hasil penggambaran potongan melintang waduk dibandingkan dengan elevasi water intake dan elevasi spillway kemudian dilakukan evaluasi apakah elevasi dasar waduk yang terbentuk dari endapan sedimen telah mengganggu fungsi water intake dan spillway serta evaluasi kecenderungan akumulasi sedimen di dasar waduk.

- Analisis kapasitas dan usia waduk Sutami

Dari hasil perhitungan di atas dapat diketahui penyusutan kapasitas dan volume efektif waduk serta peninjauan dan penganalisaan usia rencana waduk berdasarkan volume tampungan mati pada waduk.

- Analisis usia rencana waduk Sutami

Dari hasil analisa kapasitas dan usia waduk Sutami dapat dianalisa laju sedimen yang dapat masuk ke dalam waduk selama sisa usia manfaat waduk dan dapat dianalisa laju erosi lahan untuk dilakukan perbaikan tata guna lahan berdasarkan referensi tata guna lahan pada periode tahun sebelumnya dimana pada periode tahun tersebut laju sedimen yang masuk ke dalam waduk mendekati laju sedimen yang dapat masuk ke dalam waduk selama sisa usia manfaat waduk sehingga laju sedimen yang dapat masuk ke dalam waduk terpenuhi dan usia rencana waduk dapat tercapai.

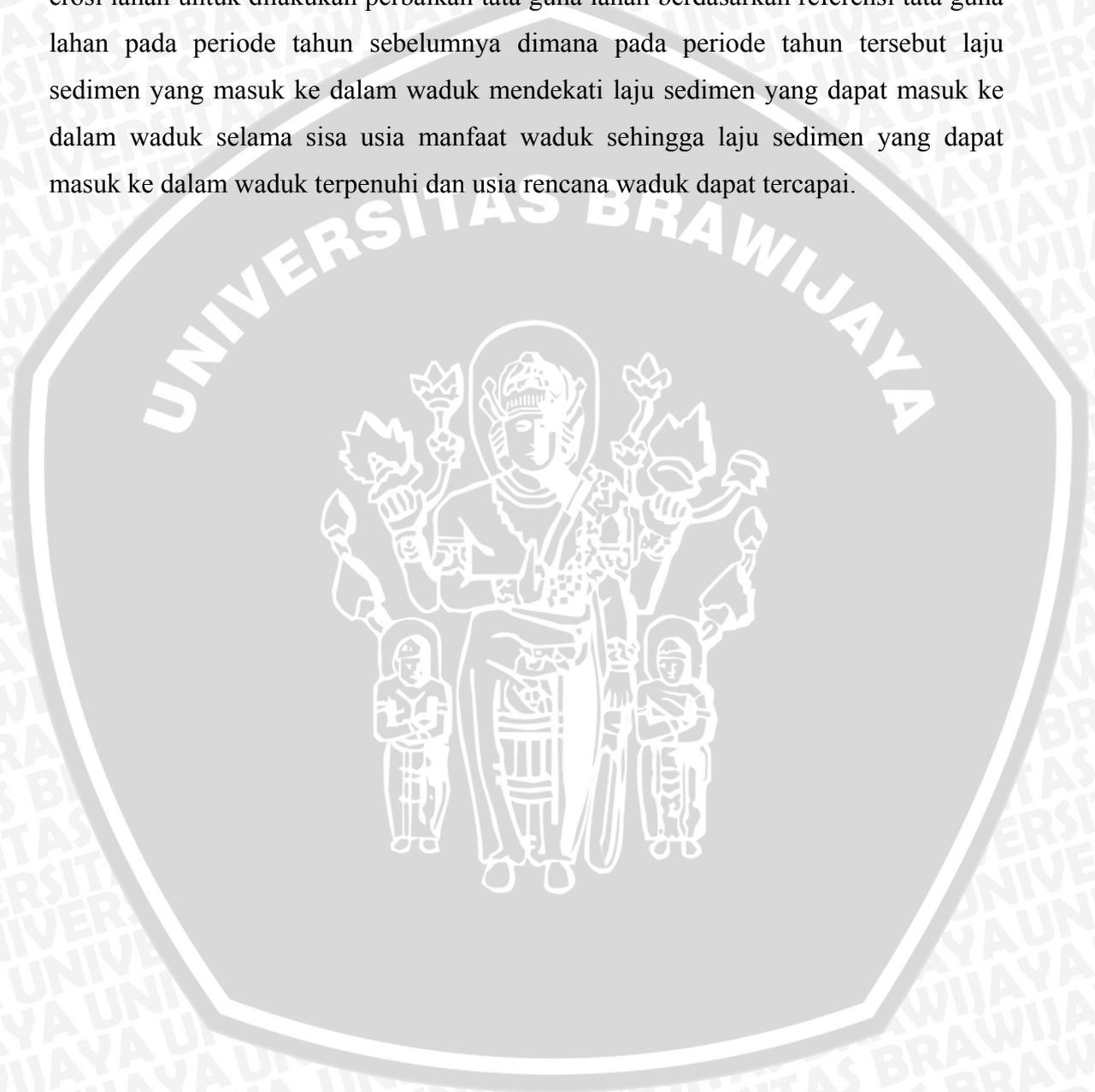
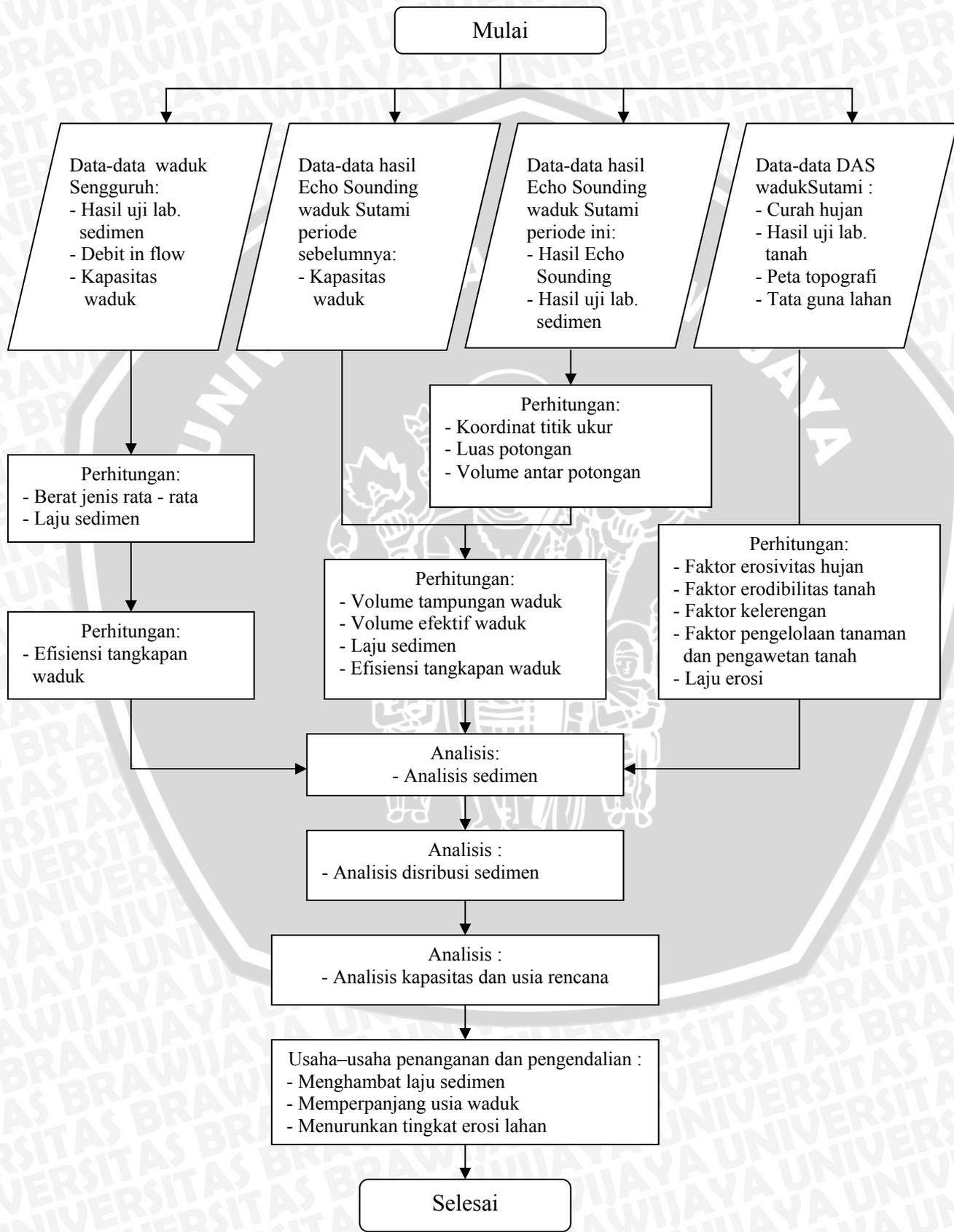


DIAGRAM ALIR PENYELESAIAN SKRIPSI



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Laju Sedimen Waduk Sengguruh

Besar volume sedimen tambahan dihitung dari selisih antara volume tampungan waduk pada pengukuran periode tahun 2004 dengan volume tampungan waduk pengukuran periode tahun 2002. Perhitungan volume sedimen total dan volume sedimen tambahan adalah :

Pengukuran periode tahun 1988 : volume tampungan waduk = 23.000.000 m³

Pengukuran periode tahun 2002 : volume tampungan waduk = 3.181.000 m³

Pengukuran periode tahun 2004 : volume tampungan waduk = 2.319.000 m³

Maka besar volume sedimen total = 23.000.000 – 2.319.000 = 20.681.000 m³ dan besar volume sedimen tambahan = 3.181.000 – 2.319.000 = 862.000 m³.

Hasil pengujian gradasi butiran dan berat jenis material sedimen dasar waduk Sengguruh di laboratorium untuk kali Brantas dan kali Lesti dapat dilihat pada lampiran I, sedangkan untuk perhitungan gradasi butiran dan berat jenis rata-rata material sedimen ditunjukkan pada Tabel 4.1

Tabel 4.1. Perhitungan gradasi butiran dan berat jenis rata-rata material sedimen dasar waduk Sengguruh

Daerah Aliran Masuk	Pasir Sedang 0,074 - 0,50 mm (%)	Pasir Halus 0,005 - 0,074 mm (%)	Lempung < 0,005 mm (%)	Berat Jenis
Kali Brantas	62,66	27,16	10,16	2,7689
Kali Lesti	21	65,66	13,33	2,7121
Rata – rata	41,83	46,41	11,74	2,7405

Sumber : Hasil perhitungan

Selama tahun 2002 sampai dengan tahun 2004, volume sedimen tambahan adalah sebesar 862.000 m³ dan berat jenis rata-rata adalah 2,7405. Dari hasil perhitungan tersebut dapat dihitung besarnya laju sedimen dengan menggunakan rumus (2–13) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Laju sedimen} &= \text{berat jenis} \times \frac{\text{volume saat ini} - \text{volume sebelumnya}}{\text{jumlah tahun}} \\
 &= 2,7405 \times \frac{862.000}{2} \\
 &= 1.181.155,50 \text{ ton/tahun}
 \end{aligned}$$

Nilai tersebut ekuivalen dengan laju sedimen sebesar 431.000 m³/tahun.

4.1.1 Debit In Flow Tahunan Waduk Sengguruh

Perhitungan debit *in flow* tahunan digunakan untuk menentukan besarnya efisiensi tangkapan waduk (*trap efficiency*). Debit *in flow* tahunan ini didapat dari rata-rata debit *in flow* tahunan periode 2003 dan 2004 yang masuk ke dalam waduk Sengguruh. Besarnya debit dalam satu tahun dapat dilihat pada lampiran II-1 dan II-2. Dari hasil perhitungan pada lampiran II-5 diperoleh besarnya debit *in flow* tahunan rata-rata adalah 44,83 m³/dt. Dengan menggunakan rumus (2-3) dapat dihitung besarnya debit *in flow* tahunan adalah :

$$\begin{aligned}
 \text{Debit } in \text{ flow } \text{ tahunan} &= 44,83 \text{ m}^3/\text{dt} \\
 &= 44,83 \text{ m}^3/\text{dt} \times 60 \times 60 \times 24 \times 360 \\
 &= 1.394.392.320 \text{ m}^3/\text{tahun}
 \end{aligned}$$

Dengan melihat hasil di atas maka akan didapat besarnya debit *in flow* tahunan rata-rata waduk Sengguruh adalah sebesar 1.394.392.320 m³/tahun.

4.1.2 Efisiensi Tangkapan Waduk (*Trap Efficiency*) Waduk Sengguruh

Waduk Sengguruh yang berada pada bagian *up stream* waduk Sutami tentunya juga mengalami pengendapan sedimen pada dasar waduknya. Aliran air yang masuk ke dalam waduk membawa material sedimen kemudian terjadi pengendapan dan terakumulasi di dasar waduk sebagian lagi akan terbawa keluar dari waduk. Besarnya *trap efficiency* dihitung dengan menggunakan persamaan dari Gunnar Brune dengan mengeksploitasi hasil rata-rata perbandingan antara kapasitas tampungan dengan *in flow* tahunan. Dengan menggunakan rumus (2-5), dapat dihitung besarnya efisiensi tangkapan waduk Sengguruh sebagai berikut :

Diketahui :

$$\text{Volume tampungan waduk Sengguruh pada elevasi 292.50m} = 2.319.000 \text{ m}^3$$

In flow aliran tahunan waduk Sengguruh = 1.394.392.320 m³/tahun

Dari grafik *trap efficiency* diambil kurva rata-rata dengan nilai $a = 100$ dan $n = 1,5$

Laju sedimen waduk Sengguruh = 431.000 m³/tahun.

$$X = \frac{C}{I}$$

$$= \frac{2.319.000}{1.394.392.320}$$

$$= 0,00166$$

$$Y = 100 \times \left(1 - \frac{1}{1 + a \times X}\right)^n$$

$$= 100 \times \left(1 - \frac{1}{1 + 100 \times 0,00166}\right)^{1,5}$$

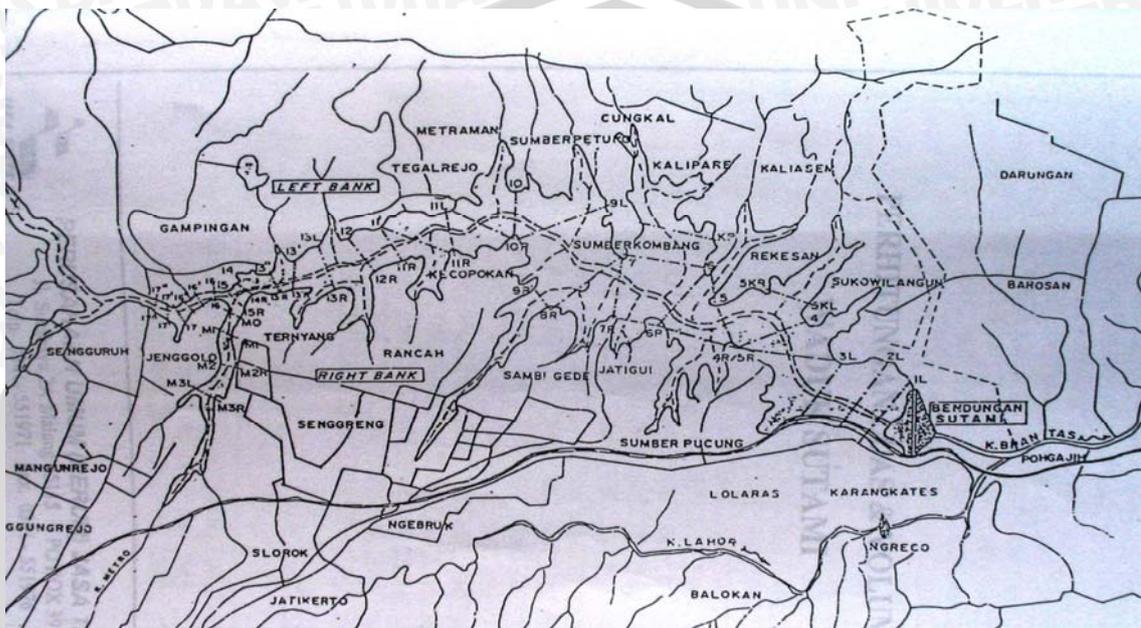
$$= 5,371 \%$$

Sehingga besarnya nilai efisiensi tangkapan waduk Sengguruh pada tampungan waduk sebesar 2.319.000 m³ adalah 5,371 %. Berarti 94,629 % sedimen yang berasal dari waduk Sengguruh menjadi material sedimen pada aliran *down stream* waduk Sengguruh sampai waduk Sutami. Nilai *trap efficiency* waduk Sengguruh sangat kecil yang disebabkan karena kapasitas tampungan aktual waduk Sengguruh mengalami pengurangan kapasitas dengan volume yang sangat besar. Dengan kapasitas tampungan total rencana sebesar 23.000.000 m³ dan usia rencana 50 tahun, saat ini waduk Sengguruh mempunyai kapasitas tampungan aktual sebesar 2.319.000 m³ dengan usia operasional 18 tahun. Dengan kondisi kapasitas waduk yang kecil, maka air akan tertampung pada waduk yang relatif pendek dan sedimen melayang akan terlimpas dan tanpa banyak yang terendap. Volume sedimen per tahun didapat dari perkalian antara laju sedimen yang terjadi di DAS terhadap efisiensi tangkapan waduk. Dengan laju sedimen waduk Sengguruh sebesar 431.000 m³/tahun, maka volume sedimen per tahun yang tertampung di dalam waduk Sengguruh adalah sebesar 23.149,01 m³/tahun dan volume sedimen per tahun yang terakumulasi pada aliran *down stream* waduk Sengguruh sampai waduk Sutami adalah sebesar 407.850,99 m³/tahun.

4.2 Analisis Kapasitas Waduk Sutami

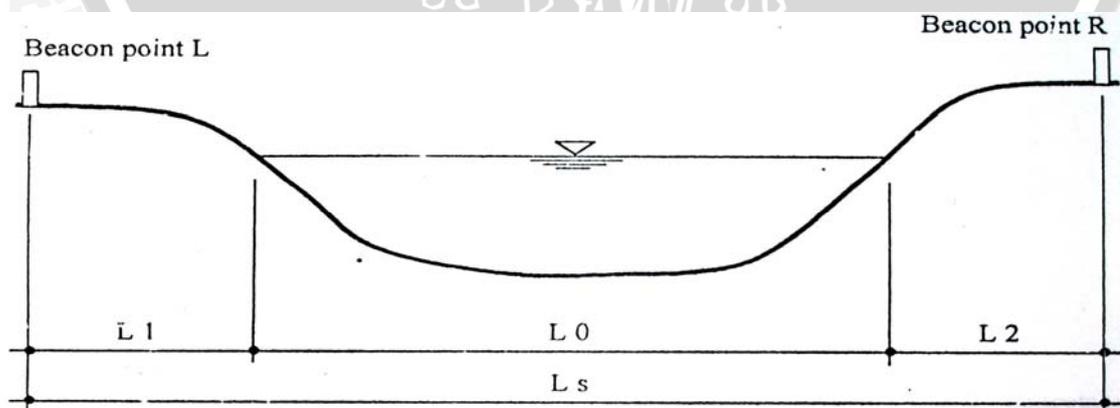
Pengukuran *echo sounding* di waduk Sutami dilaksanakan di 2 bagian yaitu bagian kali Brantas dan bagian kali Metro. Searah memanjang sungai ditentukan jalur-

jalur pengukuran penampang melintangnya dengan jarak antar jalur berkisar antara 100 meter sampai dengan 800 meter. Pada setiap jalur penampang melintang waduk dilakukan pengukuran di beberapa titik permukaan tanah yang berada di atas permukaan air maupun permukaan tanah yang berada di bawah permukaan air.



Gambar 4.1. Situasi waduk Sutami dan jalur pengukuran *echo sounding*

Pengukuran permukaan tanah pada setiap jalur pengukuran dilaksanakan dengan kombinasi *Echo Sounding* untuk permukaan tanah yang berada di bawah permukaan air dan *Total Station* untuk permukaan tanah yang berada di atas permukaan air. Ditetapkan patok sebagai *Beacon Point* dengan penomoran sesuai dengan nomor jalurnya.



Gambar 4.2. Sketsa jalur pengukuran penampang melintang waduk

- Dimana :
- L_s = jarak keseluruhan dari *cross section*
 - L_1, L_2 = jarak pada daerah di atas permukaan air (daratan) diukur dengan menggunakan *EDM*
 - L_0 = jarak pada daerah di bawah permukaan air diukur dengan menggunakan *Echo Sounder*

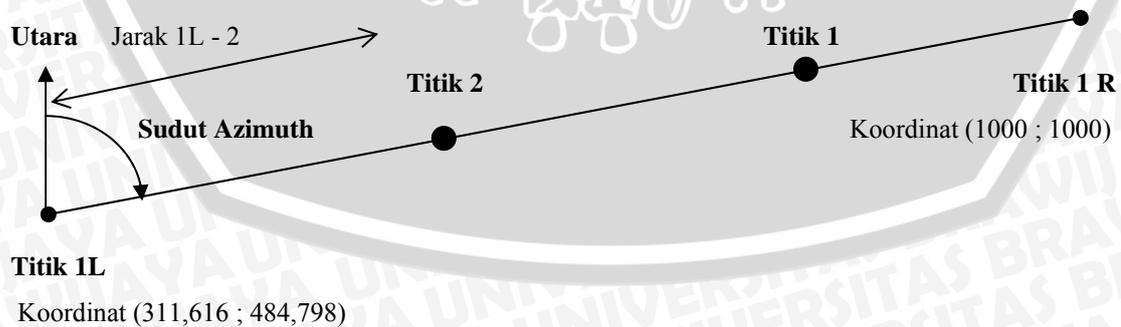
Dalam studi ini dipakai data sekunder yang merupakan hasil pengukuran di lapangan. Data-data tersebut antara lain :

- koordinat dan elevasi *Beacont Point* serta jarak bentang penampang melintang.
- jarak dan elevasi titik-titik ukur setiap jalur.
- jarak rata-rata antar profil pengukuran.

4.2.1 Perhitungan Koordinat Titik Ukur

Agar dapat digambarkan peta topografi dasar waduk maka titik-titik ukur pada jalur pengukuran harus dihitung koordinatnya. Data koordinat titik awal pada setiap jalur pengukuran merupakan acuan untuk menghitung koordinat titik ukur lainnya pada jalur tersebut dengan memakai rumus (2-8) dan (2-9) setelah terlebih dahulu menghitung sudut azimuthnya dengan memakai rumus *tangen*.

Contoh perhitungan seperti pada Gambar 4.3 untuk lokasi kali Brantas dengan jalur pengukuran 1L – 1R. Data-data yang dipakai adalah data koordinat *Beacont Point* serta jarak titik-titik ukur.



Gambar 4.3. Sketsa jalur pengukuran 1L – 1R

1. Menghitung sudut *azimuth*

Arah pengukuran dari 1L ke 1R

Diketahui data-data sebagai berikut : koordinat titik 1L (311,616 ; 484,798)

koordinat titik 1R (1000 ; 1000)

jarak titik 1L – 1R = 838,603 m

$$\begin{aligned}\text{Sudut azimuth} &= \tan^{-1} \frac{1000 - 311,616}{1000 - 484,798} \\ &= 53^{\circ}11'16,79''\end{aligned}$$

2. Menghitung koordinat titik-titik ukur sepanjang jalur pengukuran

Untuk titik 1

Diketahui : jarak = 764,06 m

Koordinat : titik X = $1000 + \sin(53^{\circ}11'16,79'')$. 764,06 = 1611,711

titik Y = $1000 + \cos(53^{\circ}11'16,79'')$. 764,06 = 1457,818

Untuk titik 2

Diketahui : jarak = 778,39 m

Koordinat : titik X = $1000 + \sin(53^{\circ}11'16,79'')$. 778,39 = 1623,183

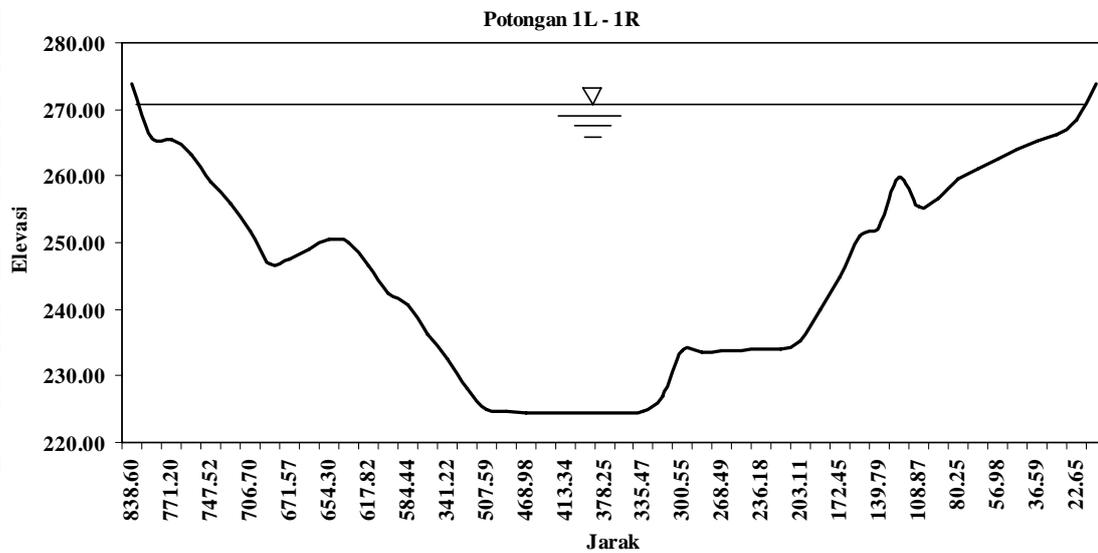
titik Y = $1000 + \cos(53^{\circ}11'16,79'')$. 778,39 = 1466,404

Perhitungan titik 3 sampai dengan titik 1R pada jalur pengukuran 1L – 1R dan jalur-jalur lainnya dapat dilihat pada lampiran VII. Lampiran tersebut berisikan data jarak, koordinat dan elevasi semua titik pengukuran di bagian kali Brantas dan kali Metro dan dipakai untuk menggambarkan peta kontur dasar waduk Sutami.

4.2.2 Penggambaran Profil Jalur Pengukuran

Profil penampang melintang jalur pengukuran dibuat dari data hasil pengukuran pada lampiran VIII dengan memplot data jarak dan elevasi setiap titik pengukuran.

Pada Gambar 4.4 ditunjukkan penampang melintang 1L – 1R yang diplot dari data jarak dan elevasinya sehingga dapat diketahui bentuk penampang melintang yang terbentuk akibat akumulasi endapan sedimen di dasar waduk Sutami.



Gambar 4.4. Profil penampang melintang jalur pengukuran 1L – 1R

Gambar profil penampang melintang untuk semua jalur pengukuran pada kali Brantas, kali Metro dan Kalipare dapat dilihat pada lampiran VIII.

4.2.3 Perhitungan Luas Profil Penampang Melintang

Profil penampang melintang setiap jalur pengukuran mempunyai bentuk segi banyak. Luas penampang melintang setiap jalur pengukuran dihitung dengan cara koordinat dimana jarak titik-titik pengukuran merupakan koordinat sumbu X dan elevasi titik-titik pengukuran merupakan koordinat sumbu Y. Perhitungan luas penampang melintang jalur pengukuran menggunakan rumus (2-10). Contoh hasil perhitungan luas penampang melintang untuk potongan 1L – 1R (gambar 4.4) untuk beberapa elevasi adalah sebagai berikut :

Tabel 4.2. Perhitungan luas penampang 1L - 1R pada elevasi 272.50 m

Penampang 1L – 1R		
No	Jarak (m)	Elevasi (m)
1L	838.60	273.83
	828.75	272.50
1	778.39	265.70
1a	771.20	265.40
2	764.06	263.20
3	747.52	259.10
4	718.97	255.80
5	706.70	251.60

Penampang 1L – 1R		
No	Jarak (m)	Elevasi (m)
6	683.33	246.89
6a	671.57	247.59
7	665.71	249.08
7a	654.30	250.45
8	642.89	250.00
9	617.82	246.59
10	596.32	242.30
11	584.44	240.71
12	563.57	236.30
13	341.22	232.43
14	520.54	228.01
15	507.59	224.93
16	485.80	224.68
17	468.98	224.53
18	436.61	224.33
19	413.34	224.33
20	396.22	224.33
21	378.25	224.43
22	357.23	224.53
23	335.47	224.73
24	318.13	226.82
25	300.55	233.67
26	286.82	233.62
27	268.49	233.72
28	251.21	233.72
29	236.18	233.92
30	219.30	234.02
31	203.11	235.21
32	188.15	239.88
33	172.45	244.75
34	155.40	251.10
35	139.79	252.55
36	122.99	259.75
37	108.87	255.40
38	96.46	256.70
39	80.25	259.50
40	68.46	261.00
41	56.98	262.55
42	45.73	264.10
43	36.59	265.20
44	27.67	266.20
45	22.65	268.50
	5.66	272.50
1R	0.00	273.83

$$\begin{aligned}
\text{Luas potongan} &= \frac{1}{2} \times \sum ((X_1 \times Y_2) - (X_2 \times Y_1)) \\
&= \frac{1}{2} \times \{ \{(828.75 \times 265.70) - (778.39 \times 272.50)\} + \{(778.39 \times 265.40) - \\
&\quad (771.20 \times 265.70)\} + \{(771.20 \times 263.20) - (764.06 \times 265.40)\} + \\
&\quad \{(764.06 \times 259.10) - (747.52 \times 263.20)\} + \{(747.52 \times 255.80) - \\
&\quad (718.97 \times 259.10)\} + \{(718.97 \times 251.60) - (706.70 \times 255.80)\} + \\
&\quad \{(706.70 \times 246.89) - (683.33 \times 251.60)\} + \{(683.33 \times 247.59) - \\
&\quad (671.57 \times 246.89)\} + \{(671.57 \times 249.08) - (665.71 \times 247.59)\} + \\
&\quad \{(665.71 \times 250.45) - (654.30 \times 249.08)\} + \{(654.30 \times 250.00) - \\
&\quad (642.89 \times 250.45)\} + \{(642.89 \times 246.59) - (617.82 \times 250.00)\} + \\
&\quad \{(617.82 \times 242.30) - (596.32 \times 246.59)\} + \{(596.32 \times 240.71) - \\
&\quad (584.44 \times 242.30)\} + \{(584.44 \times 236.30) - (563.57 \times 240.71)\} + \\
&\quad \{(563.57 \times 232.43) - (341.22 \times 236.30)\} + \{(341.22 \times 228.01) - \\
&\quad (520.54 \times 232.43)\} + \{(520.54 \times 224.93) - (507.59 \times 228.01)\} + \\
&\quad \{(507.59 \times 224.68) - (485.80 \times 224.93)\} + \{(485.80 \times 224.53) - \\
&\quad (468.98 \times 224.68)\} + \{(468.98 \times 224.33) - (436.61 \times 224.53)\} + \\
&\quad \{(436.61 \times 224.33) - (413.34 \times 224.33)\} + \{(413.34 \times 224.33) - \\
&\quad (396.22 \times 224.33)\} + \{(396.22 \times 224.43) - (378.25 \times 224.33)\} + \\
&\quad \{(378.25 \times 224.53) - (357.23 \times 224.43)\} + \{(357.23 \times 224.73) - \\
&\quad (335.47 \times 224.53)\} + \{(335.47 \times 226.82) - (318.13 \times 224.73)\} + \\
&\quad \{(318.13 \times 233.67) - (300.55 \times 226.82)\} + \{(300.55 \times 233.62) - \\
&\quad (286.82 \times 233.67)\} + \{(286.82 \times 233.72) - (268.49 \times 233.62)\} + \\
&\quad \{(268.49 \times 233.72) - (251.21 \times 233.72)\} + \{(251.21 \times 233.92) - \\
&\quad (236.18 \times 233.72)\} + \{(236.18 \times 234.02) - (219.30 \times 233.92)\} + \\
&\quad \{(219.30 \times 235.21) - (203.11 \times 234.02)\} + \{(203.11 \times 239.88) - \\
&\quad (188.15 \times 235.21)\} + \{(188.15 \times 244.75) - (172.45 \times 239.88)\} + \\
&\quad \{(172.45 \times 251.10) - (155.40 \times 244.75)\} + \{(155.40 \times 252.55) - \\
&\quad (139.79 \times 251.10)\} + \{(139.79 \times 259.75) - (122.99 \times 252.55)\} + \\
&\quad \{(122.99 \times 255.40) - (108.87 \times 259.75)\} + \{(108.87 \times 256.70) - (96.46 \\
&\quad \times 255.40)\} + \{(96.46 \times 259.50) - (80.25 \times 256.70)\} + \{(80.25 \times \\
&\quad 261.00) - (68.46 \times 259.50)\} + \{(68.46 \times 262.55) - (56.98 \times 261.00)\} + \\
&\quad \{(56.98 \times 264.10) - (45.73 \times 262.55)\} + \{(45.73 \times 265.20) - (36.59 \times \\
&\quad 264.10)\} + \{(36.59 \times 266.20) - (27.67 \times 265.20)\} + \{(27.67 \times 268.50)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - (22.65 \times 266.20) \} + \{ (22.65 \times 272.50) - (5.66 \times 268.50) \} + \{ (5.66 \times \\
 & 272.50) - (828.75 \times 272.50) \}] \\
 & = 23.945,470 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Tabel 4.3. Perhitungan luas penampang 1L - 1R pada elevasi 270.00 m

Penampang 1L - 1R		
No	Jarak (m)	Elevasi (m)
1L	838.60	273.83
	810.23	270.00
1	778.39	265.70
1a	771.20	265.40
2	764.06	263.20
3	747.52	259.10
4	718.97	255.80
5	706.70	251.60
6	683.33	246.89
6a	671.57	247.59
7	665.71	249.08
7a	654.30	250.45
8	642.89	250.00
9	617.82	246.59
10	596.32	242.30
11	584.44	240.71
12	563.57	236.30
13	341.22	232.43
14	520.54	228.01
15	507.59	224.93
16	485.80	224.68
17	468.98	224.53
18	436.61	224.33
19	413.34	224.33
20	396.22	224.33
21	378.25	224.43
22	357.23	224.53
23	335.47	224.73
24	318.13	226.82
25	300.55	233.67
26	286.82	233.62
27	268.49	233.72
28	251.21	233.72
29	236.18	233.92
30	219.30	234.02
31	203.11	235.21
32	188.15	239.88
33	172.45	244.75
34	155.40	251.10
35	139.79	252.55
36	122.99	259.75

Penampang 1L - 1R		
No	Jarak (m)	Elevasi (m)
37	108.87	255.40
38	96.46	256.70
39	80.25	259.50
40	68.46	261.00
41	56.98	262.55
42	45.73	264.10
43	36.59	265.20
44	27.67	266.20
45	22.65	268.50
	16.28	270.00
1R	0.00	273.83

$$\text{Luas potongan} = \frac{1}{2} \times \sum ((X_1 \times Y_2) - (X_2 \times Y_1))$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} \times [\{(810.23 \times 265.70) - (778.39 \times 270.00)\} + \{(778.39 \times 265.40) - \\
&(771.20 \times 265.70)\} + \{(771.20 \times 263.20) - (764.06 \times 265.40)\} + \\
&\{(764.06 \times 259.10) - (747.52 \times 263.20)\} + \{(747.52 \times 255.80) - \\
&(718.97 \times 259.10)\} + \{(718.97 \times 251.60) - (706.70 \times 255.80)\} + \\
&\{(706.70 \times 246.89) - (683.33 \times 251.60)\} + \{(683.33 \times 247.59) - \\
&(671.57 \times 246.89)\} + \{(671.57 \times 249.08) - (665.71 \times 247.59)\} + \\
&\{(665.71 \times 250.45) - (654.30 \times 249.08)\} + \{(654.30 \times 250.00) - \\
&(642.89 \times 250.45)\} + \{(642.89 \times 246.59) - (617.82 \times 250.00)\} + \\
&\{(617.82 \times 242.30) - (596.32 \times 246.59)\} + \{(596.32 \times 240.71) - \\
&(584.44 \times 242.30)\} + \{(584.44 \times 236.30) - (563.57 \times 240.71)\} + \\
&\{(563.57 \times 232.43) - (341.22 \times 236.30)\} + \{(341.22 \times 228.01) - \\
&(520.54 \times 232.43)\} + \{(520.54 \times 224.93) - (507.59 \times 228.01)\} + \\
&\{(507.59 \times 224.68) - (485.80 \times 224.93)\} + \{(485.80 \times 224.53) - \\
&(468.98 \times 224.68)\} + \{(468.98 \times 224.33) - (436.61 \times 224.53)\} + \\
&\{(436.61 \times 224.33) - (413.34 \times 224.33)\} + \{(413.34 \times 224.33) - \\
&(396.22 \times 224.33)\} + \{(396.22 \times 224.43) - (378.25 \times 224.33)\} + \\
&\{(378.25 \times 224.53) - (357.23 \times 224.43)\} + \{(357.23 \times 224.73) - \\
&(335.47 \times 224.53)\} + \{(335.47 \times 226.82) - (318.13 \times 224.73)\} + \\
&\{(318.13 \times 233.67) - (300.55 \times 226.82)\} + \{(300.55 \times 233.62) - \\
&(286.82 \times 233.67)\} + \{(286.82 \times 233.72) - (268.49 \times 233.62)\} + \\
&\{(268.49 \times 233.72) - (251.21 \times 233.72)\} + \{(251.21 \times 233.92) -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \{(236.18 \times 233.72)\} + \{(236.18 \times 234.02) - (219.30 \times 233.92)\} + \\
& \{(219.30 \times 235.21) - (203.11 \times 234.02)\} + \{(203.11 \times 239.88) - \\
& (188.15 \times 235.21)\} + \{(188.15 \times 244.75) - (172.45 \times 239.88)\} + \\
& \{(172.45 \times 251.10) - (155.40 \times 244.75)\} + \{(155.40 \times 252.55) - \\
& (139.79 \times 251.10)\} + \{(139.79 \times 259.75) - (122.99 \times 252.55)\} + \\
& \{(122.99 \times 255.40) - (108.87 \times 259.75)\} + \{(108.87 \times 256.70) - (96.46 \\
& \times 255.40)\} + \{(96.46 \times 259.50) - (80.25 \times 256.70)\} + \{(80.25 \times \\
& 261.00) - (68.46 \times 259.50)\} + \{(68.46 \times 262.55) - (56.98 \times 261.00)\} + \\
& \{(56.98 \times 264.10) - (45.73 \times 262.55)\} + \{(45.73 \times 265.20) - (36.59 \times \\
& 264.10)\} + \{(36.59 \times 266.20) - (27.67 \times 265.20)\} + \{(27.67 \times 268.50) \\
& - (22.65 \times 266.20)\} + \{(22.65 \times 270.00) - (16.28 \times 268.50)\} + \{(16.28 \\
& \times 270.00) - (810.23 \times 270.00)\} \\
& = \frac{1}{2} \times 43.863.440 \text{ m}^2 \\
& = 21.931,720 \text{ m}^2
\end{aligned}$$

Tabel 4.4. Perhitungan luas penampang 1L - 1R pada elevasi 268.00 m

Penampang 1L – 1R		
No	Jarak (m)	Elevasi (m)
1L	838.60	273.83
	795.42	268.00
1	778.39	265.70
1a	771.20	265.40
2	764.06	263.20
3	747.52	259.10
4	718.97	255.80
5	706.70	251.60
6	683.33	246.89
6a	671.57	247.59
7	665.71	249.08
7a	654.30	250.45
8	642.89	250.00
9	617.82	246.59
10	596.32	242.30
11	584.44	240.71
12	563.57	236.30
13	341.22	232.43
14	520.54	228.01
15	507.59	224.93
16	485.80	224.68
17	468.98	224.53
18	436.61	224.33
19	413.34	224.33

Penampang 1L – 1R		
No	Jarak (m)	Elevasi (m)
20	396.22	224.33
21	378.25	224.43
22	357.23	224.53
23	335.47	224.73
24	318.13	226.82
25	300.55	233.67
26	286.82	233.62
27	268.49	233.72
28	251.21	233.72
29	236.18	233.92
30	219.30	234.02
31	203.11	235.21
32	188.15	239.88
33	172.45	244.75
34	155.40	251.10
35	139.79	252.55
36	122.99	259.75
37	108.87	255.40
38	96.46	256.70
39	80.25	259.50
40	68.46	261.00
41	56.98	262.55
42	45.73	264.10
43	36.59	265.20
44	27.67	266.20
	23.15	268.00
45	22.65	268.50
1R	0.00	273.83

$$\text{Luas potongan} = \frac{1}{2} \times \sum ((X_1 \times Y_2) - (X_2 \times Y_1))$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} \times [\{ (795.42 \times 265.70) - (778.39 \times 268.00) \} + \{ (778.39 \times 265.40) - \\
&\quad (771.20 \times 265.70) \} + \{ (771.20 \times 263.20) - (764.06 \times 265.40) \} + \\
&\quad \{ (764.06 \times 259.10) - (747.52 \times 263.20) \} + \{ (747.52 \times 255.80) - \\
&\quad (718.97 \times 259.10) \} + \{ (718.97 \times 251.60) - (706.70 \times 255.80) \} + \\
&\quad \{ (706.70 \times 246.89) - (683.33 \times 251.60) \} + \{ (683.33 \times 247.59) - \\
&\quad (671.57 \times 246.89) \} + \{ (671.57 \times 249.08) - (665.71 \times 247.59) \} + \\
&\quad \{ (665.71 \times 250.45) - (654.30 \times 249.08) \} + \{ (654.30 \times 250.00) - \\
&\quad (642.89 \times 250.45) \} + \{ (642.89 \times 246.59) - (617.82 \times 250.00) \} + \\
&\quad \{ (617.82 \times 242.30) - (596.32 \times 246.59) \} + \{ (596.32 \times 240.71) - \\
&\quad (584.44 \times 242.30) \} + \{ (584.44 \times 236.30) - (563.57 \times 240.71) \} +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \{(563.57 \times 232.43) - (341.22 \times 236.30)\} + \{(341.22 \times 228.01) - \\
& (520.54 \times 232.43)\} + \{(520.54 \times 224.93) - (507.59 \times 228.01)\} + \\
& \{(507.59 \times 224.68) - (485.80 \times 224.93)\} + \{(485.80 \times 224.53) - \\
& (468.98 \times 224.68)\} + \{(468.98 \times 224.33) - (436.61 \times 224.53)\} + \\
& \{(436.61 \times 224.33) - (413.34 \times 224.33)\} + \{(413.34 \times 224.33) - \\
& (396.22 \times 224.33)\} + \{(396.22 \times 224.43) - (378.25 \times 224.33)\} + \\
& \{(378.25 \times 224.53) - (357.23 \times 224.43)\} + \{(357.23 \times 224.73) - \\
& (335.47 \times 224.53)\} + \{(335.47 \times 226.82) - (318.13 \times 224.73)\} + \\
& \{(318.13 \times 233.67) - (300.55 \times 226.82)\} + \{(300.55 \times 233.62) - \\
& (286.82 \times 233.67)\} + \{(286.82 \times 233.72) - (268.49 \times 233.62)\} + \\
& \{(268.49 \times 233.72) - (251.21 \times 233.72)\} + \{(251.21 \times 233.92) - \\
& (236.18 \times 233.72)\} + \{(236.18 \times 234.02) - (219.30 \times 233.92)\} + \\
& \{(219.30 \times 235.21) - (203.11 \times 234.02)\} + \{(203.11 \times 239.88) - \\
& (188.15 \times 235.21)\} + \{(188.15 \times 244.75) - (172.45 \times 239.88)\} + \\
& \{(172.45 \times 251.10) - (155.40 \times 244.75)\} + \{(155.40 \times 252.55) - \\
& (139.79 \times 251.10)\} + \{(139.79 \times 259.75) - (122.99 \times 252.55)\} + \\
& \{(122.99 \times 255.40) - (108.87 \times 259.75)\} + \{(108.87 \times 256.70) - (96.46 \\
& \times 255.40)\} + \{(96.46 \times 259.50) - (80.25 \times 256.70)\} + \{(80.25 \times \\
& 261.00) - (68.46 \times 259.50)\} + \{(68.46 \times 262.55) - (56.98 \times 261.00)\} + \\
& \{(56.98 \times 264.10) - (45.73 \times 262.55)\} + \{(45.73 \times 265.20) - (36.59 \times \\
& 264.10)\} + \{(36.59 \times 266.20) - (27.67 \times 265.20)\} + \{(27.67 \times 268.00) \\
& - (23.15 \times 266.20)\} + \{(23.15 \times 268.50) - (22.65 \times 268.00)\} + \{(22.65 \\
& \times 268.00) - (795.42 \times 268.50)\} \\
& = \frac{1}{2} \times 40.768.440 \text{ m}^2 \\
& = 20.384,220 \text{ m}^2
\end{aligned}$$

Hasil perhitungan luas penampang melintang untuk potongan berikutnya dapat dilihat pada lampiran IX.

4.2.4 Perhitungan Volume Tampungan Dan Volume Efektif Waduk

Volume tampungan potongan melintang waduk dihitung dari luas rata-rata dua profil penampang melintang dikalikan dengan jarak rata-ratanya dengan menggunakan rumus (2-7). Volume dihitung pada setiap elevasi dengan interval 2 m dan 2,5 m.

Contoh perhitungan, lokasi kali Brantas pada elevasi 272.50 sampai dengan elevasi 268.00 untuk besar volume tampungan yang ada antara profil penampang melintang 1L – 1R sampai dengan profil penampang melintang 2L – 2R. Data jarak rata-rata dari lampiran V dan data luasan dari lampiran IX.

Pada penampang 1L – 1R diketahui :

Elevasi= 272.50 m, luas potongan = 23.945,470 m²

Elevasi= 270.00 m, luas potongan = 21.931,720 m²

Elevasi= 268.00 m, luas potongan = 20.384,220 m²

Pada penampang 2L – 2R diketahui :

Elevasi= 272.50 m, luas potongan = 30.122,090 m²

Elevasi= 270.00 m, luas potongan = 27.873,960 m²

Elevasi= 268.00 m, luas potongan = 26.101,460 m²

Pada penampang 3L – 3R diketahui :

Elevasi= 272.50 m, luas potongan = 26.668,530 m²

Elevasi= 270.00 m, luas potongan = 24.601,030 m²

Elevasi= 268.00 m, luas potongan = 22.995,030 m²

Jarak profil 1L–1R ke profil 2L – 2R = 348,590 m

Jarak profil 2L–2R ke profil 3L – 3R = 728,230 m

Volume tampungan waduk Sutami pada elevasi 272.50 m untuk potongan penampang 1L - 1R sampai dengan potongan penampang 3L – 3R adalah :

$$\begin{aligned} V_{du} &= \frac{1}{2} \times [I_1 \times W_1 + (I_1 + I_2) \times W_2 + I_2 \times W_3] \\ &= \frac{1}{2} \times [348,59 \times 23.945,47 + (348,59 + 728,23) \times 30.122,09 + 728,23 \times 26.668,53] \\ &= \frac{1}{2} \times [8.347.151,387 + 32.436.068,95 + 19.420.823,60] \\ &= \frac{1}{2} \times 60.204.043,94 \\ &= 30.102.021,97 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Volume tampungan waduk Sutami pada elevasi 270.00 m untuk potongan penampang 1L - 1R sampai dengan potongan penampang 3L – 3R adalah :

$$\begin{aligned} V_{du} &= \frac{1}{2} \times [I_1 \times W_1 + (I_1 + I_2) \times W_2 + I_2 \times W_3] \\ &= \frac{1}{2} \times [348,59 \times 21.931,72 + (348,59 + 728,23) \times 27.873,96 + 728,23 \times 24.601,03] \\ &= \frac{1}{2} \times [7.645.178,275 + 30.015.237,61 + 17.915.208,08] \\ &= \frac{1}{2} \times 55.575.623,96 \\ &= 27.787.811,98 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Volume tampungan waduk Sutami pada elevasi 268.00 m untuk potongan penampang 1L - 1R sampai dengan potongan penampang 3L – 3R adalah :

$$\begin{aligned}
 V_{du} &= \frac{1}{2} \times [I_1 \times W_1 + (I_1 + I_2) \times W_2 + I_2 \times W_3] \\
 &= \frac{1}{2} \times [348,59 \times 20.384,22 + (348,59 + 728,23) \times 26.101,46 + 728,23 \times 22.995,03] \\
 &= \frac{1}{2} \times [7.105.735,25 + 28.106.574,16 + 16.745.670,70] \\
 &= \frac{1}{2} \times 51.957.980,11 \\
 &= 25.978.990,05 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan volume tampungan potongan waduk untuk elevasi selanjutnya dan perhitungan total volume tampungan waduk dibuat dalam tabel seperti pada lampiran X.

Besarnya volume tampungan waduk Sutami tahun 2004 dari perhitungan total volume kali Brantas, kali Metro dan Kalipare pada kondisi HWL dengan elevasi 272.50 m dan pada kondisi LWL dengan elevasi 246.00 m dipakai untuk menghitung besarnya volume efektif waduk. Contoh perhitungan volume total untuk kali Brantas pada kondisi HWL dengan elevasi 272.50 m dan kondisi LWL dengan elevasi 246.00 m :

Tabel 4.5. Perhitungan volume kali Brantas pada kondisi HWL (elevasi 272.50 m)

No patok	Jarak antar cross (m)	Luas potongan (m ²)	Volume (m ³)
Dam			
	467.00		
1L - 1R		23,945,470	
	348.59		9,423,705.37
2L - 2R		30,122,090	
	728.23		20,678,316.60
3L - 3R		26,668,530	
	713.65		14,955,128.08
4L - 4R/5R		15,243,130	
	642.47		11,972,010.84
5L - 4R/5R		22,025,570	
	831.92		20,025,042.33
6L - 6R		26,116,180	
	383.27		14,265,537.45
6L - 7R		48,325,010	
	625.91		21,236,600.54
7L/8L - 7R		19,533,310	
	409.08		9,195,688.87
7L/8L - 8R		25,424,590	
	652.57		13,649,898.05
9L - 9R		16,409,690	
	326.50		4,900,539.72
9L - 10R		13,608,930	
	623.07		6,243,011.86

No patok	Jarak antar cross (m)	Luas potongan (m ²)	Volume (m ³)
10L - 10R		6,430,590	
	553.26		4,676,438.45
11L - 10R		10,474,440	
	498.93		3,661,327.95
11L - 11R		4,202,280	
	320.89		1,739,296.00
11'L - 11R		6,638,170	
	320.08		1,795,309.52
11'L - 11'R		4,579,710	
	697.24		2,871,670.10
12L - 12R		3,657,540	
	396.65		1,840,563.10
13L - 13R		5,623,000	
	391.96		1,643,464.76
13'L - 13'R		2,762,880	
	461.65		884,292.88
13''L - 13''R		1,068,130	
	410.98		438,051.25
14L - 14R		1,063,610	
	224.98		197,385.08
15L - 15R		691,080	
	168.52		100,306.47
16L - 16R		499,360	
	181.00		83,724.27
16AL - 16AR		425,770	
	181.01		71,893.55
16'L - 16'R		368,590	
	374.56		146,761.97
16''L - 16''R		415,060	
	232.95		126,868.06
17L - 17R		674,170	
	179.99		87,328.45
17'L - 17'R		296,200	
	267.49		73,459.44
17''L - 17''R		253,050	
Volume total			166,983,621.00

Tabel 4.6. Perhitungan volume kali Brantas pada kondisi LWL (elevasi 246.00 m)

No patok	Jarak antar cross (m)	Luas potongan (m ²)	Volume (m ³)
Dam			
	467.00		
1L - 1R		6,735,100	
	348.59		2,991,261.25
2L - 2R		10,426,960	
	728.23		6,887,959.81

No patok	Jarak antar cross (m)	Luas potongan (m ²)	Volume (m ³)
3L - 3R		8,490,030	
	713.65		4,647,559.99
4L - 4R/5R		4,534,730	
	642.47		3,409,321.66
5L - 4R/5R		6,078,440	
	831.92		4,262,504.34
6L - 6R		4,168,950	
	383.27		2,842,083.11
6L - 7R		10,661,760	
	625.91		3,777,686.06
7L/8L - 7R		1,409,260	
	409.08		507,739.87
7L/8L - 8R		1,073,090	
	652.57		350,133.17
9L - 9R		0.000	
	326.50		0.00
9L - 10R		0.000	
	623.07		0.00
10L - 10R		0.000	
	553.26		0.00
11L - 10R		0.000	
	498.93		0.00
11L - 11R		0.000	
	320.89		0.00
11'L - 11R		0.000	
	320.08		0.00
11'L - 11'R		0.000	
	697.24		0.00
12L - 12R		0.000	
	396.65		0.00
13L - 13R		0.000	
	391.96		0.00
13'L - 13'R		0.000	
	461.65		0.00
13''L - 13''R		0.000	
	410.98		0.00
14L - 14R		0.000	
	224.98		0.00
15L - 15R		0.000	
	168.52		0.00
16L - 16R		0.000	
	181.00		0.00
16AL - 16AR		0.000	
	181.01		0.00
16'L - 16'R		0.000	
	374.56		0.00
16''L - 16''R		0.000	

No patok	Jarak antar cross (m)	Luas potongan (m ²)	Volume (m ³)
	232.95		0.00
17L - 17R		0.000	
	179.99		0.00
17'L - 17'R		0.000	
	267.49		0.00
17"L - 17"R		0.000	
Volume total			29,676,249.27

Perhitungan total volume tampungan waduk selanjutnya untuk kali Brantas, kali Metro dan Kalipare pada berbagai elevasi dapat dilihat pada lampiran X. Dari hasil perhitungan total volume tampungan waduk yang dikutip dari lampiran X dapat diuraikan sebagai berikut :

Pada elevasi 272.50 m :

- volume kali Brantas = 166.983.621,00 m³
- volume kali Metro = 863.014,21 m³
- volume Kalipare = 8.182.364,79 m³
- volume tampungan waduk = 176.029.000,00 m³

Pada elevasi 246.00 m :

- volume kali Brantas = 29.676.249,27 m³
- volume kali Metro = 0,00 m³
- volume Kalipare = 591.435,62 m³
- volume tampungan waduk = 30.267.684,89 m³

Volume tampungan waduk Sutami tahun 2004 adalah sebesar 176.029.000 m³ sedangkan volume tampungan efektifnya adalah 176.029.000 – 30.267.684,89 = 145.761.315,10 m³.

4.3 Perhitungan Laju Sedimen Waduk Sutami

Dari tabel pada lampiran XI terlihat volume sedimen yang masuk ke waduk Sutami meningkat drastis pada periode tahun 1997 – 2002 dan 2002 - 2003. Hal ini disebabkan karena *check dam* yang dibangun telah rusak sehingga tidak dapat berfungsi. Pada periode tahun 2003 - 2004 menurun kembali yang merupakan hasil dari usaha yang telah dilakukan yaitu penghijauan kembali lahan-lahan kering.

Besar volume sedimen tambahan dihitung dari selisih antara volume tampungan waduk pada pengukuran periode tahun 2004 dengan volume tampungan waduk

pengukuran periode tahun 2002. Perhitungan volume sedimen total dan volume sedimen tambahan adalah :

Pengukuran periode tahun 1972 : volume tampungan waduk = 343.000.000,00 m³

Pengukuran periode tahun 2002 : volume tampungan waduk = 178.200.000,00 m³

Pengukuran periode tahun 2004 : volume tampungan waduk = 176.029.000,00 m³

Maka besar volume sedimen total = 343.000.000 – 176.029.000 = 166.971.000 m³ dan besar volume sedimen tambahan = 178.200.000 – 176.029.000 = 2.171.000 m³. Hal ini menunjukkan bahwa volume sedimen tambahan yang masuk ke waduk Sutami pada pengukuran periode tahun 2004 telah mengalami penurunan.

Hasil pengujian gradasi butiran dan berat jenis material sedimen dasar waduk Sutami di laboratorium untuk kali Brantas, kali Metro dan Kalipare dapat dilihat pada lampiran VIII, sedangkan untuk perhitungan gradasi butiran dan berat jenis rata-rata material sedimen ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7. Gradasi butiran dan berat jenis rata-rata material sedimen dasar waduk Sutami

Daerah Aliran Masuk	Pasir Sedang 0,074 - 0,50 mm (%)	Pasir Halus 0,005 - 0,074 mm (%)	Lempung < 0,005 mm (%)	Berat Jenis
Kali Brantas	1	70	29	2,5629
Kali Metro	1	72	27	2,6637
Rata – rata	1	71	28	2,6133

Sumber : Hasil perhitungan

Besar laju sedimen rata-rata dapat dihitung dengan menggunakan rumus (2–13). Selama tahun 2002 sampai dengan tahun 2004, volume sedimen tambahan adalah sebesar 2.171.000 m³ dan berat jenis rata-rata adalah 2,6133, maka dapat dihitung besarnya laju sedimen sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Laju sedimen} &= 2,6133 \times \frac{2.171.000}{2} \\ &= 2.836.737,15 \text{ ton/tahun} \end{aligned}$$

Nilai tersebut ekivalen dengan laju sedimen sebesar 1.085.500 m³/tahun.

4.3.1 Debit In Flow Tahunan Waduk Sutami

Perhitungan debit *in flow* tahunan digunakan untuk menentukan besarnya efisiensi tangkapan waduk (*trap efficiency*). Debit *in flow* tahunan ini didapat dari rata-rata debit *in flow* tahunan periode 2003 dan 2004 yang masuk ke dalam waduk Sutami. Besarnya debit dalam satu tahun dapat dilihat pada lampiran II-3 dan II-4. Dari hasil perhitungan pada lampiran II-6 diperoleh besarnya debit *in flow* tahunan rata-rata adalah $60,10 \text{ m}^3/\text{dt}$. Dengan menggunakan rumus (2-3) dapat dihitung besarnya debit *in flow* tahunan adalah :

$$\begin{aligned} \text{Debit } in \text{ flow } \text{ tahunan} &= 60,10 \text{ m}^3/\text{dt} \\ &= 60,10 \text{ m}^3/\text{dt} \times 60 \times 60 \times 24 \times 360 \\ &= 1.869.350.400 \text{ m}^3/\text{tahun} \end{aligned}$$

Dengan melihat hasil di atas maka akan didapat besarnya debit *in flow* tahunan rata-rata waduk Sutami adalah sebesar $1.869.350.400 \text{ m}^3/\text{tahun}$.

4.3.2 Efisiensi Tangkapan Waduk (*Trap Efficiency*) Waduk Sutami

Waduk Sutami yang berada pada bagian *down stream* waduk Sengguruh tentunya juga mengalami pengendapan sedimen pada dasar waduknya. Aliran air yang masuk ke dalam waduk membawa material sedimen kemudian terjadi pengendapan dan terakumulasi di dasar waduk sebagian lagi akan terbawa keluar dari waduk. Besarnya *trap efficiency* dihitung dengan menggunakan persamaan dari Gunnar Brune dengan mengeksplorasi hasil rata-rata perbandingan antara kapasitas tampungan dengan *in flow* tahunan. Dengan menggunakan rumus (2-5), dapat dihitung besarnya efisiensi tangkapan waduk Sutami sebagai berikut :

Diketahui :

$$\text{Volume tampungan waduk Sutami pada elevasi } 272.50\text{m} = 176.029.000 \text{ m}^3$$

$$\text{In flow aliran tahunan waduk Sutami} = 1.869.350.400 \text{ m}^3/\text{tahun}$$

Dari grafik *trap efficiency* diambil kurva rata-rata dengan nilai $a = 100$ dan $n = 1,5$

$$\text{Laju sedimen waduk Sutami} = 1.085.500 \text{ m}^3/\text{tahun.}$$

$$\begin{aligned} X &= \frac{C}{I} \\ &= \frac{176.029.000}{1.869.350.400} \end{aligned}$$

$$= 0,094$$

$$Y = 100 \times \left(1 - \frac{1}{1 + a \times X}\right)^n$$

$$Y = 100 \times \left(1 - \frac{1}{1 + 100 \times 0,094}\right)^{1,5}$$

$$= 85,92 \%$$

Sehingga besarnya nilai efisiensi tangkapan waduk Sutami pada tampungan waduk sebesar 176.029.000 m³ adalah 85,92 %. Berarti 14,08 % sedimen yang berasal dari waduk Sutami menjadi material sedimen pada aliran *down stream* waduk Sutami sampai waduk Wlingi. Nilai trap efficiency waduk Sutami sangat besar yang disebabkan karena kapasitas tampungan aktual waduk Sutami mengalami pengurangan kapasitas dengan volume yang tidak terlalu besar. Dengan kapasitas tampungan total rencana sebesar 343.000.000 m³ dan usia rencana 100 tahun, saat ini waduk Sutami mempunyai kapasitas tampungan aktual sebesar 176.029.000 m³ dengan usia operasional 32 tahun. Dengan kondisi kapasitas waduk yang besar, maka air akan tertampung pada waduk dalam kurun waktu yang lama sehingga praktis hampir semua sedimen akan terendap di dalam waduk. Volume sedimen per tahun didapat dari perkalian antara laju sedimen yang terjadi di DAS terhadap efisiensi tangkapan waduk. Dengan laju sedimen waduk Sutami sebesar 1.085.500 m³/tahun, maka volume sedimen per tahun yang tertampung di dalam waduk Sutami adalah sebesar 932.661,6 m³/tahun dan volume sedimen per tahun yang terakumulasi pada aliran *down stream* waduk Sutami sampai waduk Wlingi adalah sebesar 152.838,4 m³/tahun.

4.4 Pendugaan Besarnya Erosi

Besarnya erosi Daerah Pengaliran Sungai (DPS) ditentukan berdasarkan rumus USLE (*Universal Soil Loss Equation*). Laju erosi yang terjadi menurut rumus kehilangan tanah *universal* :

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Dimana : E = laju erosi tahunan (ton/ha/tahun)

R = faktor erosivitas hujan

K = faktor erodibilitas tanah

- L = faktor panjang lereng (m)
- S = faktor kemiringan lereng (%)
- C = faktor pengelolaan tanaman
- P = faktor konservasi tanah

4.4.1 Faktor Erosivitas Hujan

Areal yang berada disekitar waduk Sutami hanya diwakili oleh satu stasiun penakar curah hujan, yaitu stasiun Karangates. Stasiun ini memiliki daerah pengaruh dengan radius 30 km. Karena hanya diwakili oleh satu stasiun saja, maka perhitungan curah hujan yang terjadi tidak dipengaruhi oleh stasiun yang lainnya. Dari data curah hujan harian pada lampiran XVII-1, dapat dihitung nilai indeks erosivitas hujan bulanan. Contoh perhitungan nilai indeks erosivitas hujan bulanan yang terjadi pada areal waduk Sutami pada bulan Januari 2004 dengan menggunakan rumus (2-20) sebagai berikut :

Diketahui :

Curah hujan bulanan (Rb) = 293.7 cm

Jumlah hari hujan = 19 hari

Curah hujan maksimum harian dalam sebulan (Rm) = 66 cm

Maka besarnya nilai indeks erosivitas hujan bulanan yang terjadi pada bulan Januari 2004 adalah :

$$\begin{aligned}
 EI_{30 \text{ bulan}} &= 6,199 \times (Rb^{1,211}) \times (N^{-0,474}) \times (Rm^{0,526}) \\
 &= 6,199 \times (293,7^{1,211}) \times (19^{-0,474}) \times (66^{0,526}) \\
 &= 13.548,91
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan indeks erosivitas hujan bulan berikutnya pada tahun yang sama dapat dilihat pada lampiran XVIII-1. Dari perhitungan indeks erosivitas hujan bulanan selama satu tahun, maka dapat dihitung nilai indeks erosivitas hujan tahunan. Perhitungan nilai indeks erosivitas hujan tahunan yang terjadi pada tahun 2004 dapat dilihat pada lampiran XVIII-1. Dari lampiran tersebut didapat nilai indeks erosivitas hujan tahunan (R) tahun 2004 adalah sebesar 152.756,04. Dengan menggunakan rumus (2-7) nilai indeks erosivitas hujan tahunan rata-rata mulai tahun 2000-2004 adalah :

$$R = \frac{85.268,50 + 69.519,66 + 125.835,25 + 157.009,61 + 152.756,04}{5}$$

$$R = 118.077,812 \approx 118.078$$

Sehingga nilai indeks erosivitas hujan di sekitar waduk Sutami adalah 118.078

4.4.2 Faktor Erodibilitas Tanah

Penentuan nilai erodibilitas tanah dapat menggunakan analisa laboratorium atau berdasarkan sifat-sifat fisik tanah. Data-data yang didapat dari laboratorium adalah sebagai berikut :

$$\% \text{ debu} = 7$$

$$\% \text{ pasir sangat halus} = 69$$

$$\% \text{ liat} = 24$$

$$\text{Nilai persentase bahan organik (a)} = 2 \%$$

Type struktur tanah di areal sekitar waduk Sutami (b) adalah granular halus

Nilai permeabilitas tanah (c) adalah 0,21 – 1,59

Dengan menggunakan rumus (2-22) dapat dihitung nilai parameter ukuran butir tanah adalah :

$$\begin{aligned} M &= (\% \text{debu} + \text{pasir sangat halus}) \times (100 - \% \text{liat}) \times (0,002 - 0,005 \text{ mm}) \\ &\quad \times (0,05 - 0,1 \text{ mm}) (< 0,002 \text{ mm}) \\ &= (7 + 69) \times (100 - 24) \times (0,002) \times (0,05) (< 0,002 \text{ mm}) \\ &= 0,577 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan rumus (2-21) nilai erodibilitas tanah di areal sekitar waduk Sutami adalah :

$$\begin{aligned} K &= [2,713 \cdot M^{1,14} \cdot (10^4) \cdot (12 - a) + 3,25 \cdot (b - 2) + 2,5 \cdot (c - 3)] / 100 \\ &= [2,713 \cdot 0,577^{1,14} \cdot (10^4) \cdot (12 - 0,02) + 3,25 \cdot (2 - 2) + 2,5 \cdot (5 - 3)] / 100 \\ &= 0,223 \end{aligned}$$

4.4.3 Faktor Kelerengan

Dua parameter yang berpengaruh pada faktor kelerengan yaitu panjang lereng dan persen kemiringan lereng. Dari data panjang lereng dan persen kemiringan lereng maka dapat dihitung nilai faktor kelerengan adalah sebagai berikut :

Diketahui : panjang lereng = 40 m

$$\text{persentase kemiringan lereng (s)} = 10 \%$$

Dengan menggunakan rumus (2-23) dapat dihitung nilai faktor kelereng (LS) sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 LS &= L^{0,5}/100 \cdot (1,38 + 0,965 \cdot S + 0,138 \cdot S^2) \\
 &= 40^{0,5}/100 \cdot (1,38 + 0,965 \cdot 10 + 0,138 \cdot 10^2) \\
 &= 6,32/100 \cdot (1,38 + 9,65 + 13,8) \\
 &= 0,0632 \cdot 24,83 \\
 &= 1,56
 \end{aligned}$$

4.4.4 Faktor Pengelolaan Tanaman dan Pengawetan Tanah

Tata guna lahan yang ada di sekitar waduk Sutami mempunyai komposisi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.8 berikut ini :

Tabel 4.8. Tata guna lahan di area sekitar waduk Sutami periode tahun 2003 – 2004

Lokasi	Tata guna lahan				
	Hutan (ha)	Sawah (ha)	Tanaman polowijo (ha)	Lahan kering (ha)	Bangunan & pekarangan (ha)
Kali Brantas	175,80	834,60	113	11.496,50	4272,80
Kali Metro	89,60	-	-	-	-
Total	265,40	834,60	113	11.496,50	4272,80

Sumber : Perum Jasa Tirta I

Pada lampiran XI menunjukkan bahwa pada awal operasi sampai tahun 1989 terjadi penurunan volume sedimen. Pada periode tahun 1989-1994 terjadi peningkatan volume sedimen, kemudian menurun kembali pada periode tahun 1994-1995 dan periode tahun 1995-1997. Pada periode tahun 1997-2002 terjadi peningkatan volume sedimen yang disebabkan adanya penebangan hutan secara liar dalam jumlah yang sangat besar. Hal ini menyebabkan kondisi lahan menjadi rusak dan semakin banyak sedimen akibat erosi lahan yang mengendap pada dasar waduk. Periode tahun 2003-2004 terjadi penurunan volume sedimen yang merupakan hasil dari penghijauan kembali yang dilakukan disekitar areal waduk Sutami. Hal ini memberikan indikasi adanya peningkatan perbaikan tata guna lahan. Indikasi tersebut terlihat dari semakin banyaknya tanaman kayu yang ditanam kembali pada lahan yang telah rusak dan lahan kering. Sehingga dapat disimpulkan bahwa akan terjadi perubahan tata guna lahan

terutama dari lahan yang telah rusak dan kering menjadi kawasan hutan. Dari tabel 2.3 (DPMA, 1982) dapat ditentukan bahwa areal lahan disekitar waduk Sutami merupakan hutan tanpa undergrowth dan seresah yang memiliki perkiraan nilai $C \times P$ sebesar 0,005.

4.4.5 Laju Erosi

Dari nilai faktor-faktor yang mempengaruhi laju erosi yang terjadi pada areal sekitar waduk Sutami, dengan menggunakan rumus (2-14) dapat dihitung laju erosi yang terjadi pada lahan disekitar waduk Sutami adalah sebesar :

$$\begin{aligned} E &= R \times K \times L \times S \times C \times P \\ E &= 118.078 \times 0,223 \times 1,56 \times 0,005 \\ &= 205,38 \text{ ton/ha/tahun} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan diatas didapatkan laju erosi yang terjadi pada lahan disekitar areal waduk Sutami adalah sebesar 205,38 ton/ha/tahun, sehingga besar erosi total yang terjadi :

$$\begin{aligned} \text{Erosi total} &= \text{luas DPS} \times \text{laju erosi} \\ &= 205.000 \times 205,38 \\ &= 42.102.900 \text{ ton / tahun} \end{aligned}$$

4.5 Analisis Sedimen Waduk Sutami

4.5.1 Perbandingan Sedimentasi Waduk Sengguruh Dengan Waduk Sutami

Dari hasil perhitungan efisiensi tangkapan waduk Sengguruh didapatkan besarnya nilai efisiensi tangkapan waduk pada tampang sebesar $2.319.000 \text{ m}^3$ adalah 5,372 % dan laju sedimen sebesar 1.181.155,50 ton / tahun atau $431.000 \text{ m}^3 / \text{tahun}$. Berarti 94,629 % sedimen yang berasal dari waduk Sengguruh menjadi material sedimen pada aliran *down stream* sampai waduk Sutami. Jumlah sedimen yang didapat dari perkalian antara laju erosi yang terjadi di DAS terhadap efisiensi tangkapan waduk. Sehingga besar sedimen yang tertampung di dalam waduk adalah sebesar $23.149,01 \text{ m}^3 / \text{tahun}$ dan besar sedimen yang terjadi pada aliran *down stream* sampai waduk Sutami adalah sebesar $407.850,99 \text{ m}^3 / \text{tahun}$.

4.5.2 Perbandingan Erosi Lahan Dengan Sedimentasi Waduk Sutami

Hasil perhitungan laju sedimen di waduk Sutami bila dibandingkan dengan besar erosi lahan yang terjadi maka dapat dihitung besarnya material erosi lahan yang terangkut dan terakumulasi pada dasar waduk Sutami (SDR), perhitungan dengan rumus (2 – 27) sebagai berikut :

Diketahui : total erosi = 42.102.900 ton / tahun

laju sedimen waduk = 2.836.737,15 ton/tahun

Maka nilai SDR daerah pengaliran waduk = $\frac{2.836.737,15}{42.102.900} \times 100 \% = 6,73 \%$

Berarti 6,73 % dari material erosi lahan yang terjadi pada daerah pengaliran waduk Sutami menjadi material sedimen yang terangkut aliran sungai Kali Brantas dan anak-anak sungainya kemudian terakumulasi pada dasar waduk Sutami. (tidak memperhitungkan erosi pada badan sungai akibat gerusan oleh aliran air sungai).

4.6 Analisis Distribusi Sedimen

Dari Tabel 4.9, selama periode tahun 1972 – 2004 waduk Sutami menerima sedimen sebesar 165.135.146,60 m³. Akumulasi material sedimen yang terbawa oleh aliran sungai Brantas terdistribusi dengan pola seperti terlihat pada gambar profil melintang dasar waduk Sutami (lampiran VIII), kontur dasar waduk Sutami (lampiran XV), dan profil memanjang dasar waduk Sutami (lampiran XVI).

Tabel 4.9. Distribusi sedimen pada waduk Sutami

Lokasi	2002 - 2004		1972 – 2004
	Kapasitas (m ³)	Volume sedimen (m ³)	Total volume sedimen (m ³)
Kali Brantas	175.165.985,8	1.958.120,900	141.925.350
Kali Metro	863.014,2	212.879,100	25.045.650
Total	176.029.000	2.171.000	166.971.000

Sumber : Hasil perhitungan

Peta kontur dasar waduk Sutami memberikan gambaran distribusi sedimen pada dasar waduk Sutami. Pada kali Brantas menunjukkan permukaan dasar waduk mencapai elevasi 224.33 m. Dasar waduk dengan elevasi rendah (\pm 265.00 m) dibagian depan *Spillway* meliputi areal dengan radius 3100 m² dan memanjang kearah kali Brantas

sepanjang 50 m. Dari gambar profil penampang melintang dasar waduk Sutami terlihat bahwa akumulasi sedimen pada dasar waduk lebih banyak terakumulasi pada bagian kanan dan kiri waduk.

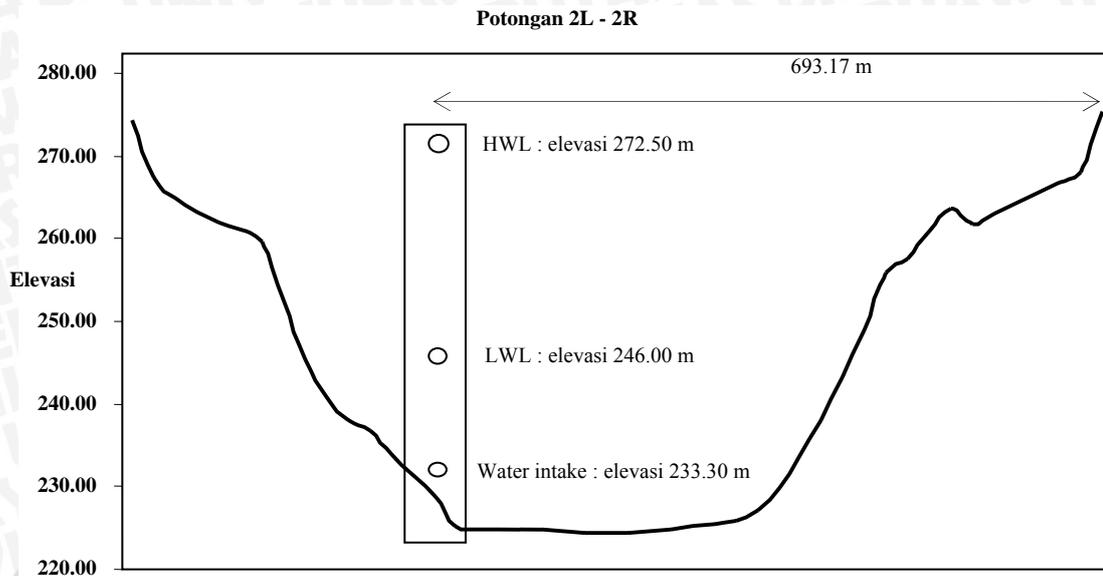
Pola penyebaran sedimen seperti telah diuraikan dibagian depan merupakan salah satu faktor yang menentukan usia waduk. Usia rencana yang ditentukan berdasarkan kapasitas tampungan mati atau volume sedimen masuk telah berakhir dengan terlampauinya volume mati tersebut, namun kenyataan waduk masih tetap berfungsi. Dengan menganalisa peta kontur permukaan dasar waduk Sutami, data-data teknis waduk Sutami dan gambar-gambar profil melintang waduk maka dapat dijelaskan mengapa operasional waduk masih tetap berfungsi sebagai berikut :

4.6.1 Fungsi pembangkit listrik

Saluran *intake* berada pada elevasi 233.30 m, operasi *intake* dibatasi pada elevasi 246.00 m untuk menjaga aliran agar tidak menghisap endapan sedimen disekitar *intake*. *Water intake* terletak pada koordinat \pm (1553,728 ; 1418,913), sebagai acuan koordinat titik 2R adalah (1253,156 ; 794,301). Maka dapat dihitung jarak terhadap *water intake* :

$$\begin{aligned}\text{Jarak titik 2R - water intake} &= \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \\ &= \sqrt{(1553,728 - 1253,156)^2 + (1418,913 - 794,301)^2} \\ &= 693,17 \text{ m}\end{aligned}$$

Pada Gambar 4.5 digambarkan potongan melintang waduk pada daerah sekitar *water intake* yang menunjukkan kondisi permukaan dasar waduk dengan elevasi 224.33 m dan *water intake* masih memiliki ketinggian yang cukup dan aman untuk menyalurkan air ke turbin.



Gambar 4.5 Profil melintang 2R dan *water intake*

4.6.2 Fungsi pengendali banjir

Fungsi *spillway* sebagai saluran pelimpah tidak terganggu karena permukaan dasar waduk terlihat pada elevasi yang lebih rendah dan datar ke arah kali Brantas dengan panjang 50m kemudian terus menurun hingga dasar waduk dibagian depan *spillway*. Elevasi permukaan waduk tertinggi adalah 265.00 m dan terus menurun dasar waduk dibagian depan *spillway*, sedangkan elevasi *spillway* adalah 272.50 m.

4.7 Analisis Kapasitas Dan Usia Waduk

4.7.1 Kapasitas Waduk Sutami

Volume tampungan dan volume efektif waduk Sutami periode tahun 2004 telah diketahui dari hasil perhitungan di atas maka dapat dihitung besar penurunan kapasitas atau volume tampungan yang terjadi dari keadaan awal hingga tahun 2004. Pada Tabel 4.10 dimuat data-data tentang volume tampungan dan volume sedimen pada elevasi HWL (272.50 m) dan LWL (246.00 m) untuk waktu awal operasional (tahun 1972), periode sebelumnya (tahun 2002) dan periode terakhir (tahun 2004).

Tabel 4.10. Volume tampungan, volume efektif dan volume sedimen waduk Sutami

Elevasi (m)	Volume tampungan waduk (m ³)			Volume sedimen total (m ³)	Volume sedimen masuk (m ³)
	1972	2002	2004		
HWL = 272.50	343.000.000	178.200.000	176.029.000	166.971.000	2.171.000
LWL = 246.00	90.000.000	30.963.000	29.456.000	60.544.000	1.507.000
Volume efektif	253.000.000	147.237.000	146.573.000		

Sumber : Hasil Perhitungan

Perhitungan terjadinya penyusutan terhadap kapasitas dan volume efektif waduk dengan menggunakan data-data yang ada pada Tabel 4.10 adalah sebagai berikut :

Volume tampungan waduk = $(176.029.000 : 343.000.000) \times 100 \% = 51,32 \%$

Volume efektif = $(146.573.000 : 253.000.000) \times 100 \% = 57,93 \%$

4.7.2 Usia Waduk Sutami

Laporan hasil pengukuran oleh Perum Jasa Tirta I menyatakan waduk Sutami dalam kondisi aman untuk beroperasi dan dari peninjauan lapangan dipastikan bahwa waduk masih dapat beroperasi sesuai fungsinya. Jumlah akumulasi sedimen tahun 2004 adalah sebesar 166.971.000 m³ dengan usia waduk 32 tahun. Ternyata usia waduk Sutami belum berakhir walaupun volume sedimen aktual telah mencapai 185,52 % dari volume teoritisnya. Mengacu pada hasil penggambaran profil melintang jalur-jalur pengukuran pada waduk (lampiran VIII) dan gambar peta kontur (lampiran XV) diketahui penyebaran sedimen aktual adalah tidak merata. Berarti usia waduk tidak terpengaruh secara langsung oleh besar volume akumulasi sedimen di dasar waduknya karena masih dipengaruhi oleh pola penyebaran sedimen yang terjadi.

Perhitungan usia sisa waduk Sutami dilakukan dengan asumsi bahwa besar volume tampungan mati adalah merupakan fungsi dari elevasi dasar waduk. Elevasi untuk volume tampungan mati adalah pada elevasi 246.00 m, maka dari tabel perhitungan volume (lampiran X) dapat diprediksi usia sisa waduk sebagai berikut :

Tahun 2004, usia operasional waduk adalah 32 tahun

Pada elevasi 246.00 m

$$\text{Volume tampungan kali Brantas} = 29.676.249,27 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume tampungan kali Metro} = 0,00 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume tampungan Kalipare} = \underline{591.435,62 \text{ m}^3}$$

$$\text{Jumlah} = 30.267.684,89 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume tampungan sedimen teoritis} = 90.000.000,00 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Volume tampungan mati telah terisi} &= 90.000.000,00 - 30.267.684,89 \\ &= 59.732.315,11 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Laju sedimen masuk pada tampungan mati} &= \frac{90.000.000,00 - 30.267.684,89}{32} \\ &= 1.866.634,847 \text{ m}^3/\text{tahun} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Maka, sisa usia waduk Sutami} &= \frac{30.267.684,89 \text{ m}^3}{1.866.634,847 \text{ m}^3/\text{tahun}} \\ &= 16,21 \text{ tahun} \end{aligned}$$

Usia waduk berakhir pada : tahun 2004 + 16,21 tahun = tahun 2020 + 2,52 bulan

Ditinjau dari penyebabnya, hutan sebagai sumber erosi menyusut sampai tahun 2002 dan dimungkinkan terus menurun pada tahun-tahun berikutnya yang memberikan kemungkinan usia waduk lebih pendek lagi. Tetapi dari kenyataan di lapangan dimana volume sedimen telah melampaui volume rencana teoritisnya dan waduk masih tetap beroperasi, hal ini memberi kemungkinan tambahan usia waduk beberapa tahun hingga kondisi dasar waduk tidak memungkinkan pengoperasian waduk lebih lanjut. Penyimpangan ini karena pola penyebaran sedimentasi di dasar waduk masih dipengaruhi oleh : topografi dasar waduk, ukuran butiran sedimen dan pola operasi waduk, sehingga distribusi sedimen yang terjadi di waduk Sutami memiliki pola tertentu dan usia sisa waduk tidak dapat diperkirakan secara pasti.

4.8 Analisis Usia Rencana Waduk

4.8.1 Laju sedimen waduk

Untuk memperpanjang umur waduk agar dapat mencapai umur rencana 100 tahun dapat dilakukan dengan usaha memperkecil laju sedimen yang masuk ke dalam waduk Sutami. Kapasitas tampungan sedimen rencana sebesar $90.000.000 \text{ m}^3$ dan laju

sedimen rencana sebesar 900.000 m³/tahun. Selama 32 tahun volume tampungan sedimen rencana telah terisi sebesar 59.732.315,11 m³. Sehingga laju sedimen yang dapat masuk ke dalam waduk Sutami selama sisa umur rencana waduk adalah :

$$\text{Tampungan sedimen rencana} = 90.000.000,00 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume sedimen masuk} = 59.732.315,11 \text{ m}^3$$

$$\text{Sisa tampungan sedimen} = 30.267.684,89 \text{ m}^3$$

$$\text{Umur rencana waduk} = 100 \text{ tahun}$$

$$\text{Umur operasional waduk} = 32 \text{ tahun}$$

$$\text{Sisa umur rencana waduk} = 68 \text{ tahun}$$

Laju sedimen yang dapat masuk ke dalam waduk Sutami agar dapat mencapai umur rencana 100 tahun = $\frac{30.267.684,89 \text{ m}^3}{68 \text{ tahun}} = 445.113,01 \text{ m}^3/\text{tahun}$.

4.8.2 Laju erosi lahan

Permasalahan sedimen pada waduk Sutami tidak dapat dilepaskan dari masalah erosi yang terjadi pada lahan. Laju erosi yang masuk ke dalam waduk Sutami juga dipengaruhi oleh erosi lahan yang terjadi di daerah pengaliran sungainya. Besarnya laju erosi yang masuk ke waduk Sutami selama waktu operasional dapat dilihat pada lampiran XI. Untuk menanggulangi laju erosi yang tidak sesuai dengan rencana, telah dilakukan usaha-usaha penanggulangan yang dapat dilihat pada Tabel 4.11 berikut ini :

Tabel 4.11. Usaha-Usaha penanggulangan laju erosi lahan

Periode	Volume (m ³)	Laju sedimen rata-rata (m ³)	Usaha-usaha penanggulangan
1972 – 1977	81.320.000	16.264.000	-
1977 – 1982	40.390.000	8.078.000	-
1982 – 1987	28.880.000	5.776.000	-
1987 – 1989	20.000	10.000	Pembangunan waduk Sengguruh
1989 – 1992	2.420.000	807.000	Penghijauan
1992 – 1994	4.700.000	2.350.000	Penghijauan
1994 - 1995	680.000	680.000	Penghijauan

Periode	Volume (m ³)	Laju sedimen rata-rata (m ³)	Usaha-usaha penanggulangan
1995 - 1997	1.170.000	585.000	Penghijauan
1997 - 2002	5.220.000	1.044.000	Penghijauan
2002 - 2003	1.155.000	1.155.000	Penghijauan
2003 - 2004	1.016.000	1.016.000	Penghijauan

Sumber : Perum Jasa Tirta I

Dari Tabel 4.11 dapat disimpulkan bahwa setelah selesai pembangunan waduk Sutami pada tahun 1972 sampai dengan tahun 1987 laju sedimen yang masuk ke dalam waduk Sutami sangat besar. Hal ini disebabkan karena sedimen yang berasal dari erosi lahan sepanjang aliran sungai kali Brantas, kali Lesti dan kali Metro langsung masuk ke dalam waduk Sutami. Setelah selesai dibangun bendungan Sengguruh yang terdapat pada bagian *up stream* waduk Sutami pada tahun 1988, laju sedimen yang masuk ke dalam waduk Sutami menjadi sangat kecil. Hal ini disebabkan karena sebagian besar material sedimen yang terbawa oleh aliran kali Brantas dan kali Lesti tertampung pada waduk Sengguruh. Pada tahun 1989 sampai dengan tahun 2004 telah diadakan penghijauan pada lahan-lahan di sekitar daerah aliran sungai kali Brantas dan memberikan hasil yang baik, hal ini ditunjukkan dengan semakin menurunnya laju sedimen yang masuk ke dalam waduk Sutami. Tetapi pada periode tahun 1992-1994, 1997-2002 dan 2002-2003 terjadi peningkatan laju sedimen yang masuk ke dalam waduk Sutami yang disebabkan karena terjadinya penebangan pohon secara liar dalam jumlah yang sangat besar di lahan sekitar daerah aliran sungai kali Brantas. Penebangan pohon secara liar ini secara tidak langsung menyebabkan terjadinya perubahan tata guna lahan.

Besarnya volume sedimen yang masuk ke dalam waduk akibat erosi lahan dapat dikurangi dengan cara perbaikan tata guna lahan kearah peningkatan kualitas tanah lahan. Tata guna lahan yang ada di area waduk Sutami dapat dilihat pada Tabel 4.12 sebagai berikut :

Tabel 4.12. Tata guna lahan di area sekitar waduk Sutami periode tahun 1994 – 1995 sampai dengan periode tahun 2003 - 2004

Periode	Tata guna lahan				
	Hutan (ha)	Sawah (ha)	Tanaman polowijo (ha)	Lahan kering (ha)	Bangunan & pekarangan (ha)
1994 – 1995	490,13	958,30	115,28	5422,94	3115,26
1995 – 1997	522,62	870,98	115,37	4280,14	3385,58
1997 – 2002	241,77	858,28	118,12	11.691,48	3705,20
2002 – 2003	173,20	835,55	112,74	12.037,32	3875,92
2003 – 2004	265,40	834,60	113,00	11.496,50	4272,80

Sumber : Perum Jasa Tirta I

Dari data yang ada pada Tabel 4.12, terlihat bahwa pada periode tahun 2003-2004 proporsi tata guna lahan yang paling luas adalah lahan kering dengan luas 11.496,50 ha. Lahan kering yang ada di sekitar daerah pengaliran sungai kali Brantas sebenarnya merupakan hutan pohon Jati. Dengan semakin meluasnya penebangan pohon Jati secara liar maka semakin lama tata guna lahan mengalami perubahan dari hutan menjadi lahan kering. Apabila terjadi hujan maka butir-butir air hujan akan langsung jatuh mengenai permukaan tanah tanpa ada perlindungan. Sehingga akan semakin banyak butir-butir tanah yang terlepas dari ikatan tanah dan terbawa oleh aliran permukaan menuju sungai, terbawa oleh aliran sungai dan diendapkan di dasar waduk. Berdasarkan usaha-usaha yang telah dilakukan pada periode tahun sebelumnya terutama pada periode tahun 1994-1995 dan periode tahun 1995-1997, usaha penghijauan memberikan hasil yang baik yaitu laju sedimen yang masuk ke dalam waduk Sutami menjadi berkurang. Laju sedimen yang masuk ke dalam waduk Sutami pada periode tahun 1994-1995 sebesar 680.000 m³/tahun, pada periode ini terjadi pengurangan laju sedimen dari 2.350.000 m³/tahun menjadi 680.000 m³/tahun dalam jangka waktu 1 tahun sedangkan pada periode tahun 1995-1997 laju sedimen yang masuk ke dalam waduk Sutami sebesar 585.000 m³/tahun, pada periode ini terjadi pengurangan laju sedimen dari 680.000 m³/tahun menjadi 585.000 m³/tahun dalam jangka waktu 2 tahun. Laju sedimen yang masuk ke dalam waduk Sutami pada periode tahun 1994-1995 dan 1995-1997 hampir mendekati laju sedimen yang dapat masuk ke dalam waduk Sutami selama sisa umur rencana waduk yaitu sebesar 445.113,01 m³/tahun. Sehingga usaha untuk mengurangi

laju erosi yang masuk ke dalam waduk akibat erosi lahan dapat dilakukan dengan penghijauan kembali lahan kering dengan luas daerah penghijauan mendekati luas daerah penghijauan periode tahun 1994-1995 yaitu seluas 490,13 ha atau periode tahun 1995-1997 yaitu seluas 522,62 ha.

4.9 Usaha-Usaha Penanggulangan Erosi Waduk

4.9.1 Usaha Secara Struktural

1. Usaha menghambat laju sedimen

Peningkatan laju sedimen yang masuk ke dalam waduk seperti dicantumkan pada lampiran XI yang menyajikan data kenaikan drastis sedimen yang masuk ke waduk pada periode tahun 1997-2002 dengan laju sedimen sebesar 1.044.000 m³/tahun, kenaikan ini lebih disebabkan oleh telah tidak berfungsinya *check dam* yang dibangun sepanjang Kali Brantas dalam menahan sedimen yang bersumber dari erosi di lahan. Maka pembangunan *check dam* baru diperlukan untuk mengurangi laju sedimen yang masuk ke waduk Sutami.

2. Usaha memperpanjang usia waduk

Untuk menambah usia waduk dapat dilakukan dengan pengerukan dasar waduk, dengan prioritas pekerjaan adalah pada titik-titik dimana dimungkinkan terganggunya aktivitas operasional waduk. Terutama untuk menjaga keamanan daerah sekitar saluran *intake* untuk turbin pembangkit listrik. Pada waduk Sutami pekerjaan pengerukan yang dapat dilakukan dengan target tambahan sebesar 909.773,974 m³/tahun (sesuai fasilitas yang tersedia di lapangan).

4.9.2 Usaha Secara Non Struktural

1. Usaha menurunkan tingkat erosi lahan

Permasalahan sedimen pada waduk Sutami tidak dapat dilepaskan dari masalah erosi yang terjadi pada lahan. Tingkat erosi yang terjadi bila dihubungkan dengan prosentase luas lahan yang ada menunjukkan perlu dicermati kualitas lahan hutannya. Oleh karena itu pengembangan perbaikan tata guna lahan ke arah peningkatan kualitas lahan sangat diperlukan, misalnya dengan penghijauan kembali lahan-lahan yang

kering. Maka konservasi lahan perlu dilakukan untuk menekan tingkat erosi yang terjadi dengan memperhatikan kualitas lahan hutannya selain luas lahan hutan itu sendiri.



BAB V

PENUTUP

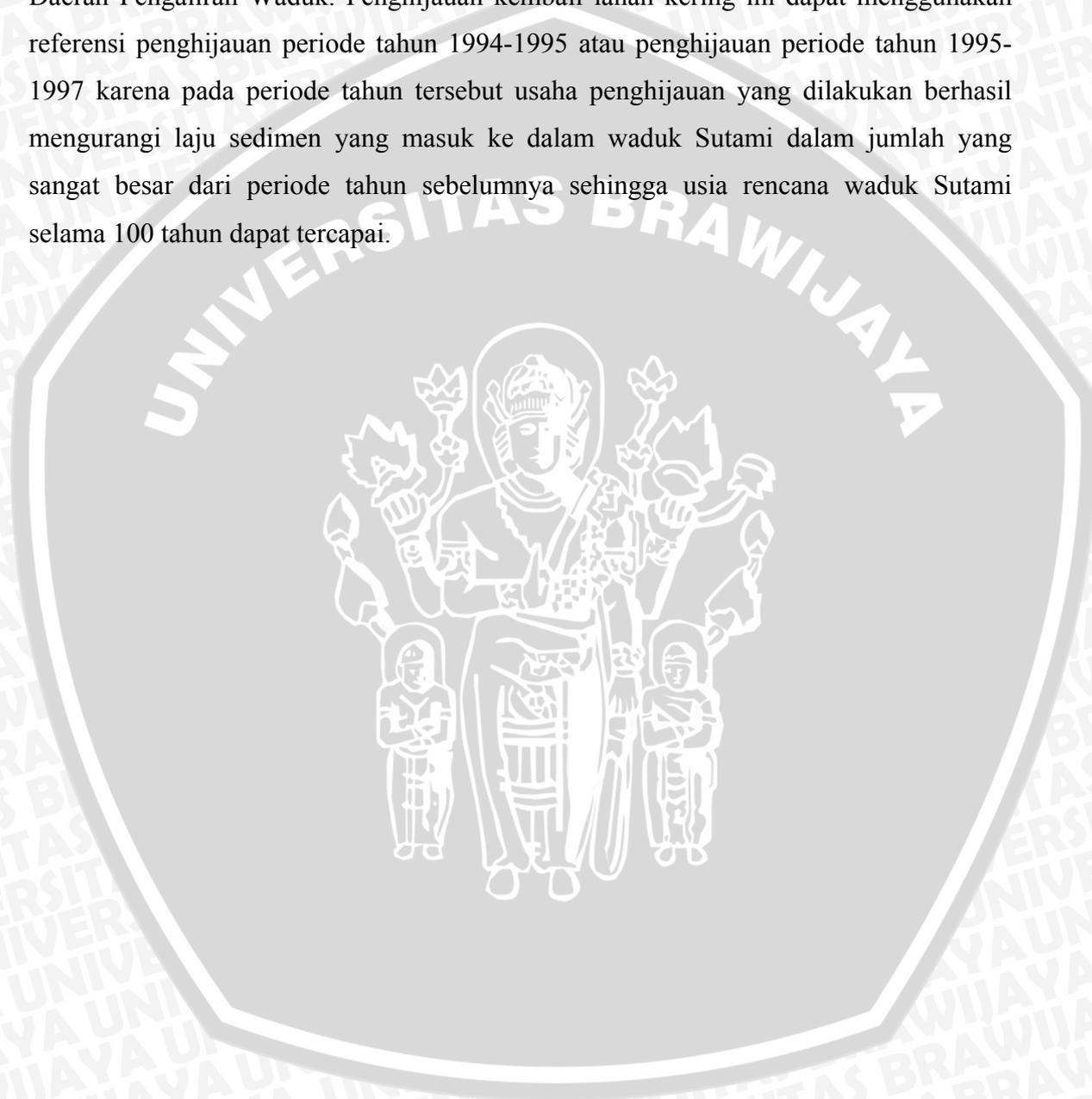
5.1 Kesimpulan

Dari pembahasan yang telah dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan antara lain :

1. Erosi yang terjadi pada lahan-lahan kritis di Daerah Pengaliran Sungai kali Brantas memberikan pengaruh terhadap sedimentasi yang terjadi di waduk Sutami. Material sedimen akibat erosi lahan-lahan kritis tidak seluruhnya terbawa oleh aliran sungai yang kemudian diendapkan di dasar waduk Sutami. Sebesar 6,73 % dari material akibat erosi lahan-lahan kritis yang terbawa oleh aliran sungai Brantas dan anak-anak sungainya yang kemudian diendapkan di dasar waduk Sutami.
2. Laju sedimen aktual yang masuk ke dalam waduk Sutami selama waktu operasional telah melampaui laju sedimen rencana. Dengan laju sedimen rencana sebesar 900.000 m³/tahun dan laju sedimen aktual pada pengukuran periode 2003-2004 sebesar 1.085.500 m³/tahun maka laju sedimen yang dapat masuk ke dalam waduk Sutami selama sisa umur rencana waduk adalah sebesar 445.113,01 m³/tahun.
3. Sedimentasi kali Brantas yang mengendap dan terakumulasi di dasar waduk Sutami telah mengakibatkan penyusutan kapasitas tampungan efektif waduk. Pada awal pengoperasiannya, yaitu tahun 1972 kapasitas tampungan efektif waduk sebesar 253.000.000 m³, sedangkan pada periode pengukuran tahun 2004 kapasitas tampungan efektif waduk sebesar 146.573.000 m³. Sehingga kapasitas tampungan efektif waduk Sutami telah mengalami penyusutan sebesar 57,93 %.
4. Sedimentasi kali Brantas yang mengendap dan terakumulasi di dasar waduk Sutami telah mengakibatkan percepatan pengurangan usia waduk. Waduk Sutami yang memiliki usia rencana 100 tahun yang semestinya berakhir pada tahun 2072, hanya menyisakan sisa usia 16,21 tahun. Sehingga usia waduk Sutami akan berakhir pada tahun 2020 + 2,52 bulan. Usaha untuk memperpanjang usia waduk adalah dengan melakukan pengerukan sedimen di daerah sekitar *water intake* supaya fungsi pembangkit listrik dapat tetap beroperasi.

5.2 Saran

Perlu dilakukan usaha pengurangan laju sedimen yang masuk ke dalam waduk Sutami, yaitu dengan usaha penghijauan kembali lahan kering yang berada di sekitar Daerah Pengaliran Waduk. Penghijauan kembali lahan kering ini dapat menggunakan referensi penghijauan periode tahun 1994-1995 atau penghijauan periode tahun 1995-1997 karena pada periode tahun tersebut usaha penghijauan yang dilakukan berhasil mengurangi laju sedimen yang masuk ke dalam waduk Sutami dalam jumlah yang sangat besar dari periode tahun sebelumnya sehingga usia rencana waduk Sutami selama 100 tahun dapat tercapai.



DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 2001. *Laporan Akhir Pekerjaan Hazard Klasifikasi Dan Rencana Tindak Darurat Bendungan Sengguruh, Karangates, Lahor Dan Wlingi*. Malang: PT. Indra Karya.
- Anonim. 2002. *Buku I Laporan Akhir Pekerjaan Pengukuran Echo Sounding Waduk Sengguruh*. Malang: Perum Jasa Tirta I.
- Anonim. 2002. *Buku I Laporan Akhir Pekerjaan Pengukuran Echo Sounding Waduk Sutami*. Malang: Perum Jasa Tirta I.
- Anonim. 2004: *Buku I Laporan Akhir Pekerjaan Pengukuran Echo Sounding Waduk Sengguruh*. Malang: Perum Jasa Tirta I.
- Anonim. 2004. *Buku I Laporan Akhir Pekerjaan Pengukuran Echo Sounding Waduk Sutami*. Malang: Perum Jasa Tirta I.
- Brinker, Russel C. Wolf, Paul R. 2000. *Dasar-Dasar Pengukuran Tanah (Surveying)*. Jakarta: Erlangga.
- Linsley, Ray K. Kohler, Max A. Paulhus, Joseph LH. 1986. *Hidrologi Untuk Insinyur*. Jakarta: Erlangga.
- Soemarto, CD. 1987. *Hidrologi Teknik*. Surabaya: Usaha Nasional.
- Soewarno. 1991. *Pengukuran Dan Pengolahan Data Aliran Sungai (Hidrometri)*. Bandung: Nova.
- Takasaki, Masayoshi. Sosrodarsono, Suyono. 1983. *Pengukuran Topografi Dan Teknik Pemetaan*. Jakarta: Pradnya Paramita.

Lampiran XIX

Data Teknis Bendungan Sutami

Waduk

Muka air banjir (FWL)	: El. 277.00 m
Muka air normal (HWL)	: El. 272.50 m
Muka air minimum (LWL)	: El. 246.00 m
Luas muka air banjir	: 1.700 Ha
Volume waduk saat banjir	: 390.000.000 m ³
Volume waduk efektif	: 253.000.000 m ³
Volume mati	: 90.000.000 m ³

Bendungan

Tipe	: Urugan batu dengan inti tanah
Tinggi di atas galian	: 97,50 m
Panjang puncak	: 820,00 m
Lebar puncak	: 13,70 m
Elevasi puncak	: El. 279.00 m
Volume tubuh bendung	: 6.156.000 m ³

Pelimpah

Tipe	: Pelimpah tipe <i>Ogee</i> dengan dan tanpa pintu
Banjir rencana	: 2.580 m ³ /detik
Kala ulang banjir	: 5000 tahun
Kapasitas	: 1.600 m ³ /detik
Elevasi mercu	: El. 267.00 m
Panjang mercu bersih	: 50,00 m

Head Race

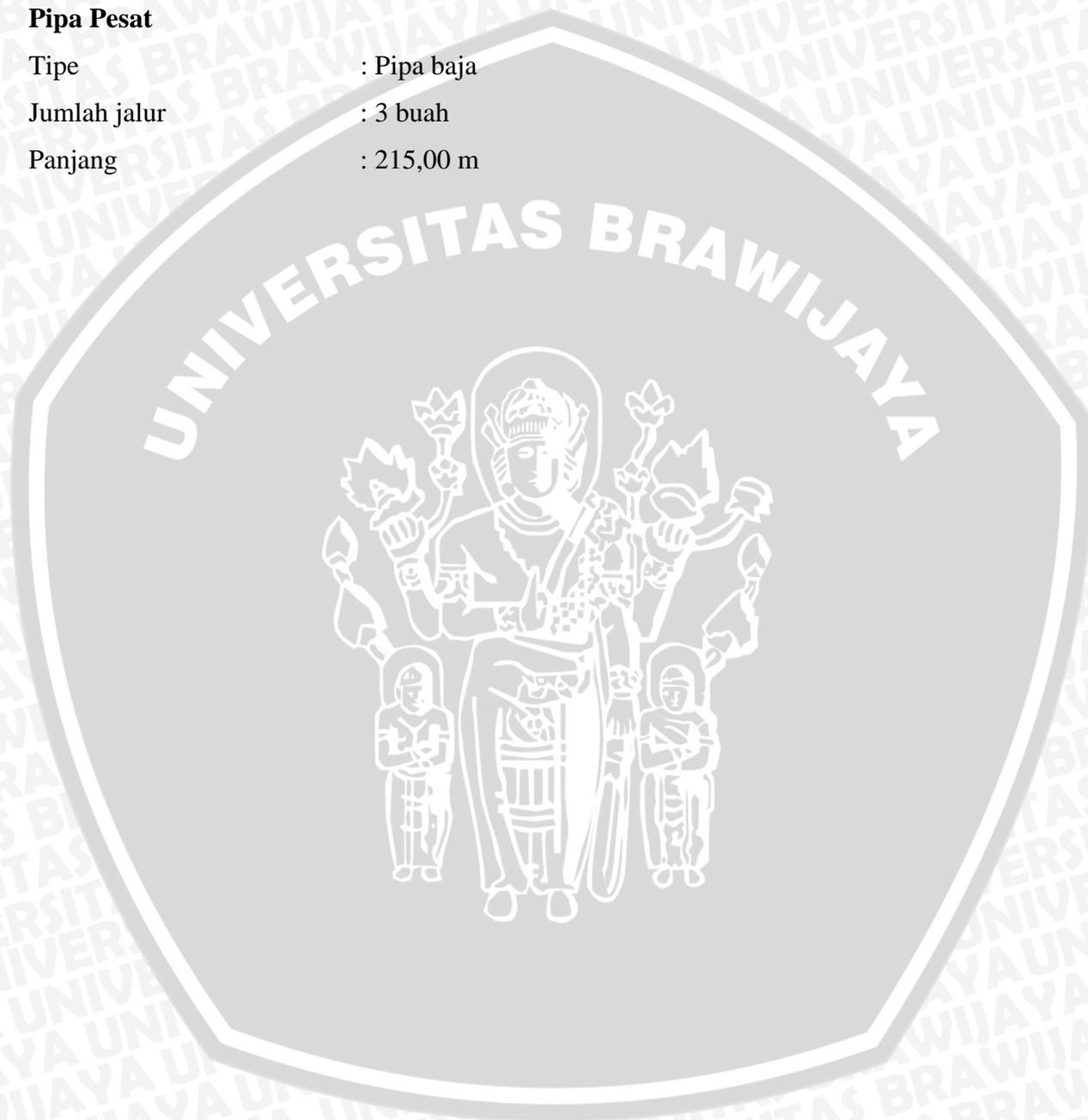
Tipe	: Pipa baja
Bentuk	: Lingkaran
Ukuran	: Ø 3,40 m
Panjang	: 175 m
Jumlah	: 3 buah

Tangki Pendatar

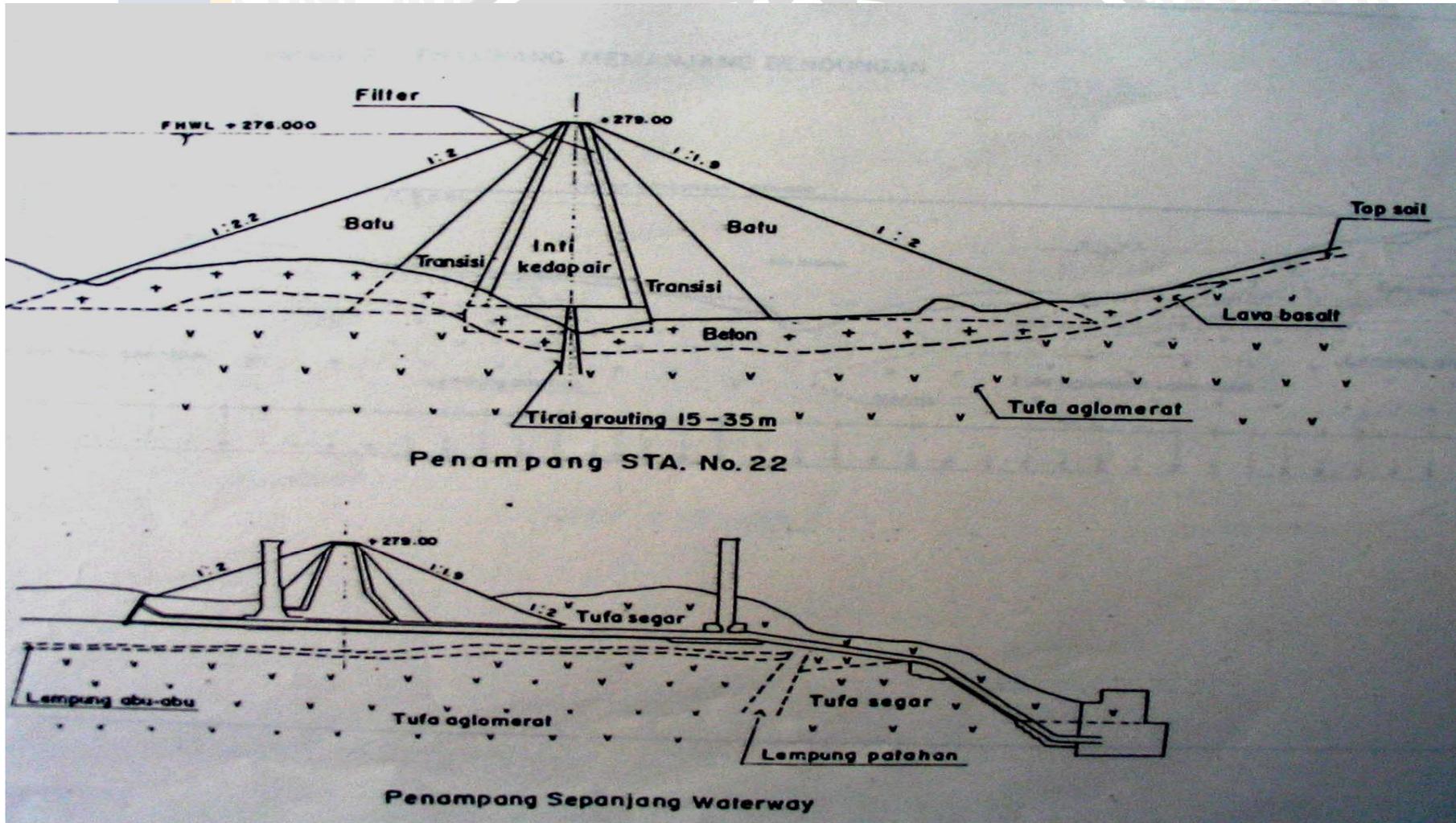
Diameter *shaft* : 7,00 m
Tinggi *shaft* : 50,00 m
Jumlah : 3 buah

Pipa Pesat

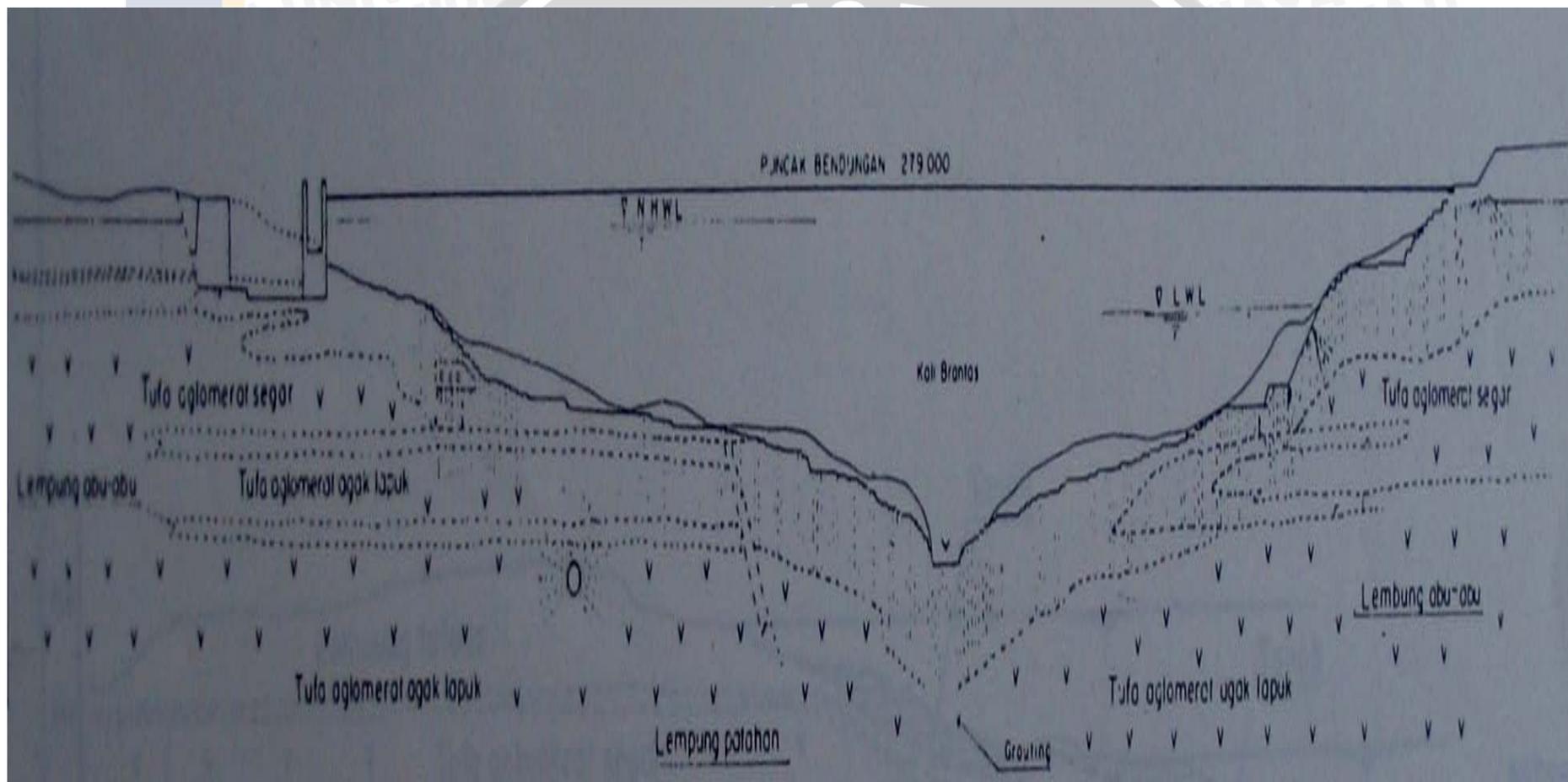
Tipe : Pipa baja
Jumlah jalur : 3 buah
Panjang : 215,00 m



Lampiran XXI
 Penampang Melintang Bendungan Sutami



Lampiran XXII
 Penampang Memanjang Bendungan Sutami



Lampiran XXIII
Penampang Geologi Waduk Sutami

