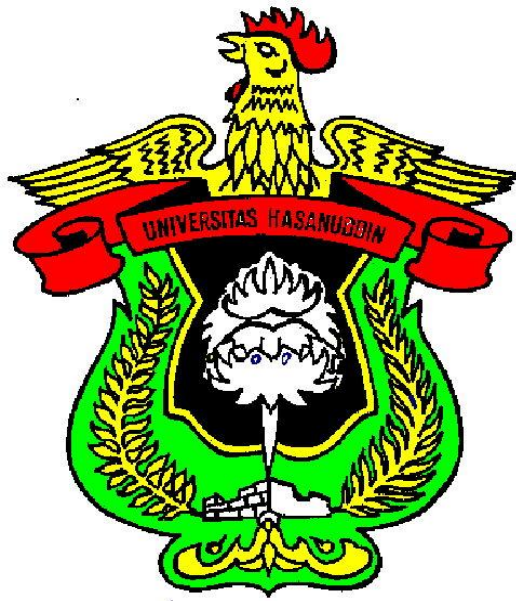


**TUGAS AKHIR**

**STUDI LAJU SEDIMENTASI WADUK BILI-BILI PASCA  
PENGEMBANGAN BANGUNAN PENAHAN SEDIMEN**



**OLEH:**

**SITI RISKIYANTI HAKIM**

**D 111 08 110**

**JURUSAN SIPIL  
FAKULTAS TENIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
2015**

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Puji syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan inayahNya sehingga tugas akhir kami yang berjudul: *Studi Laju Sedimentasi Waduk Bili-Bili Pasca Pengembangan Bangunan Penahan Sedimen* dapat terlaksana dengan baik.

Harapan kami hasil penelitian ini dapat memberikan gambaran tentang sedimentasi pada kondisi waduk yang nantinya dapat bermanfaat untuk keperluan teknik. Kami sangat menyadari akan banyaknya kekurangan dalam penelitian kami. Oleh karena itu dengan segala kerendahan hati kami siap menerima berbagai masukan berupa saran dan kritik yang konstruktif demi penyempurnaan tugas akhir ini.

Pada kesempatan ini pula kami ingin menyampaikan terima kasih yang setinggi-tingginya kepada:

1. Dr. Ing Ir. Wahyu H. Piarah, MS, ME sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Dr.Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT sebagai Ketua Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Dr. Eng. Ir. H. Farouk Maricar, MT sebagai dosen Pembimbing Pertama.
4. Riswal K, ST. MT sebagai dosen Pembimbing Kedua.
5. Seluruh Dosen Pengajar Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

6. Seluruh Staf Akademik Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Teman - teman Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan dukungan moril dan materil sehingga tugas ini dapat terselesaikan.

Dan teristimewa ucapan terima kasih ini kami persembahkan kepada Orang Tua dan saudara-saudara kami sebagai wujud dari rasa hormat dan cinta sepanjang masa yang telah banyak memberikan dorongan moril dan materil sampai pada akhir perkuliahan kami, sekali lagi terima kasih.

Mudah-mudahan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan terutama bagi kami selaku penyusun. Sebagai penutup kami mengharapkan saran dan kritik dari para pembaca untuk kesempurnaan tugas akhir ini.

Wassalam.

Makassar,

Penulis

# DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>i</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>ii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN.....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR NOTASI.....</b>	<b>vii</b>
<b>BAB I            PENDAHULUAN</b>	
A. Latar Belakang.....	I-1
B. Rumusan Masalah.....	I-3
C. Tujuan Penelitian.....	I-3
D. Batasan Masalah.....	I-3
E. Sistematika Penulisan.....	I-4
<b>BAB II            TINJAUAN PUSTAKA</b>	
A. Erosi dan Sedimentasi.....	II-1
1. Proses Terjadinya Erosi dan Sedimentasi.....	II-1

2.	Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Sedimen.....	II-7
3.	Mekanisme Pengangkutan Sedimen.....	II-9
4.	Upaya Pengendalian Erosi dan Sedimentasi.....	II-14
B.	Bangunan Pengendali Sedimen.....	II-15
1.	Bangunan Penahan Sedimen.....	II-19
2.	Bendung Konsolidasi.....	II-21
3.	Kantong Lahar.....	II-23
C.	Analisis Perhitungan Laju Sedimentasi.....	II-25
1.	Analisis berdasarkan Suripin.....	II-25
2.	Analisis dengan Metode Sesaat.....	II-26
3.	Analisis menurut Chezy.....	II-27
D.	Analisis Perhitungan Volume Tampungan.....	II-28
E.	Pengukuran Sedimen.....	II-29
1.	Berdasarkan Echosounding.....	II-29
2.	Berdasarkan Tachimetry dan Bathimetry.....	II-30

### **BAB III      METODOLOGI PENELITIAN**

- A.    Gambaran Umum..... III-1
- B.    Metode Pengumpulan Data..... III-3
- C.    Analisis Sedimentasi.....III-3
- D.    Bangunan Pengendali Sedimen  
      di DAS Jeneberang.....III-4
- E.    Perencanaan Bangunan Sedimen  
      Sebelum dan Setelah Bencana.....III-5
- F.    Diagram Alir/Flowchart Penelitian.....III-7

### **BAB IV      HASIL DAN PEMBAHASAN**

- A.    Hasil Volume Sedimentasi.....IV-1
- B.    Analisis Volume Tampunguan Waduk.....IV-1
- C.    Estimasi Analisis Laju Sedimentasi.....IV-5

### **BAB V      PENUTUP**

- A.    Kesimpulan.....V-1
- B.    Saran..... V-2

### **DAFTAR PUSTAKA**

### **LAMPIRAN**

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Elevasi, luas dan volume waduk tahun 2008.....	IV - 2
Tabel 4.2 Elevasi, luas dan volume waduk tahun 2010.....	IV - 3
Tabel 4.3 Elevasi, luas dan volume waduk tahun 2012.....	IV - 4
Tabel 4.4 Data hasil laboratorium konsentrasi sedimen.....	IV - 5
Tabel 4.5 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 1999.....	IV - 6
Tabel 4.6 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2000.....	IV - 7
Tabel 4.7 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2001.....	IV - 8
Tabel 4.8 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2002.....	IV - 9
Tabel 4.9 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2003.....	IV - 10
Tabel 4.10 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2004.....	IV - 11
Tabel 4.11 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2005.....	IV - 12
Tabel 4.12 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2006.....	IV - 13
Tabel 4.13 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2007.....	IV - 14
Tabel 4.14 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2008.....	IV - 15
Tabel 4.15 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2010.....	IV - 15
Tabel 4.16 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2011.....	IV - 16
Tabel 4.17 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2012.....	IV - 17
Tabel 4.18 Perubahan volume dan laju sedimentasi.....	IV - 19

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Longsor Kaldera Gunung Bawakaraeng.....	I - 2
Gambar 2.1 Proses erosi hingga pengendapan sedimentasi .....	II - 3
Gambar 2.2 Erosi yang terjadi akibat aliran sungai yang deras .....	II - 4
Gambar 2.3 Pengendapan sedimentasi di Sabo Dam .....	II - 7
Gambar 2.4 (a) Gerakan butiran pasir dalam aliran air .....	II - 10
Gambar 2.4 (b) Proses limpasan hujan di daerah pegunungan.....	II - 10
Gambar 2.6 Progres gerakan sedimen dan perpindahan daerah pengendapan karena terjadinya perubahan muka air .....	II - 12
Gambar 2.7 Skema angkutan sedimen ( <i>Sedimen Transport</i> ).....	II - 14
Gambar 2.8 Sketsa memanjang sabo dam.....	II - 16
Gambar 2.9 Sketsa memanjang bending.....	II - 16
Gambar 2.10 Sabo Dam Bili-bili.....	II - 19
Gambar 2.11 <i>Check Dam</i> Bili-bili.....	II - 20
Gambar 2.12 <i>Consolidation Dam</i> Bili-bili.....	II - 22
Gambar 2.13 <i>Sand Pocket</i> Bili-bili.....	II - 24
Gambar 2.14 Pengukuran tachimetry dengan GPS .....	II - 30
Gambar 3.1 Peta DAS Waduk Bili-bili.....	III - 1
Gambar 3.2 (a) Tampak samping Bendungan Bili-bili.....	III - 3
Gambar 3.2 (b) Pintu masuk Bendungan Bili-bili.....	III - 3
Gambar 3.3 Infrastruktur di Daerah Air Sungai Jeneberang hingga Waduk Bili-bili.....	III - 6
Gambar 3.4 Flowchart Penelitian.....	III - 7



Gambar 4.1 Grafik hubungan elevasi, luas dan volume waduk	
tahun 2008.....	IV - 2
Gambar 4.2 Grafik hubungan elevasi, luas dan volume waduk	
tahun 2010.....	IV - 3
Gambar 4.2 Grafik hubungan elevasi, luas dan volume waduk	
tahun 2012.....	IV - 4
Gambar 4.4 Grafik data hasil laboratorium konsentrasi sedimen.....	IV - 5
Gambar 4.5 Grafik laju sedimentasi tahun 1999.....	IV - 6
Gambar 4.6 Grafik laju sedimentasi tahun 2000.....	IV - 7
Gambar 4.7 Grafik laju sedimentasi tahun 2001.....	IV - 8
Gambar 4.8 Grafik laju sedimentasi tahun 2002.....	IV - 9
Gambar 4.9 Grafik laju sedimentasi tahun 2003.....	IV - 10
Gambar 4.10 Grafik laju sedimentasi tahun 2004.....	IV - 11
Gambar 4.11 Grafik laju sedimentasi tahun 2005.....	IV - 12
Gambar 4.12 Grafik laju sedimentasi tahun 2006.....	IV - 13
Gambar 4.13 Grafik laju sedimentasi tahun 2007.....	IV - 14
Gambar 4.14 Grafik laju sedimentasi tahun 2008.....	IV - 15
Gambar 4.15 Grafik laju sedimentasi tahun 2010.....	IV - 16
Gambar 4.16 Grafik laju sedimentasi tahun 2011.....	IV - 17
Gambar 4.17 Grafik laju sedimentasi tahun 2012.....	IV - 18
Gambar 4.18 Grafik laju sedimentasi dengan periode 10 tahun.....	IV - 18
Gambar 4.19 Grafik volume dan perubahan laju sedimentasi.....	IV - 19

## **DAFTAR LAMPIRAN**

- Tabel L.1 Laju sedimentasi periode 14 tahun
- Tabel L.2 Perbandingan luas dan volume waduk kondisi awal dan volume  
tampungan tahun 2008, 2010, 2012
- Tabel L.3 Kelas bahaya erosi
- Tabel L.4 Data hasil analitis kualitas air
- Lampiran 1 Foto dokumentasi Sabo Dam
- Lampiran 2 Foto dokumentasi BM dan CP
- Lampiran 3 Elevasi muka air Waduk Bili-Bili

## DAFTAR NOTASI

$Q_s$	= Debit sedimen harian (ton/hari)
$Q_w$	= Debit aliran harian ( $m^3/det$ )
$C_s / C$	= Konsentrasi sediment layang (mg/l)
$C_i$	= Konsentrasi sedimen pada saat $t_i$ (mg/l)
$Q_{wi}$	= Besar aliran pada saat $t_i$ ( $m^3/detik$ )
$\Delta t_i$	= Interval waktu pengukuran (jam)
$n$	= Jumlah pengukuran
$Q$	= Debit ( $m^3/dtk$ )
$C$	= Koefisien Chezy
$B$	= Lebar sungai (m)
$H$	= Kedalaman rata-rata (m)
$I$	= Kemiringan permukaan air sungai
$Vol$	= Volume sedimen ( $m^3$ )
$A_1$	= Luas bawah (m)
$A_2$	= Luas atas (m)
$H$	= Tinggi atau beda elevasi luas atas dan luas bawah (m)
$B$	= Lebar sungai (m)
$h_m^2$	= Tinggi efektif main dam (m)
$I_o$	= Kemiringan dasar sungai yang ada (m)
$I_s$	= Kemiringan dasar sungai stabil (m)

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **A. LATAR BELAKANG**

Sungai adalah lokasi yang paling baik untuk mengamati pengaruh alamiah dari angkutan sedimen. Sungai memperlihatkan variasi perubahan dalam morfologinya dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Pada beberapa lokasi, variasi pada komposisi sedimen memanjang dan melintang sungai memperlihatkan variasi gradasi yang dapat berupa pasir halus, pasir kasar, kerikil, maupun batuan. Hal ini menunjukkan bahwa proses angkutan sedimen bergantung pada gradasi, yang meliputi variasi ukuran, kepadatan, bentuk, dan kebulatan butiran. Ukuran butiran dan variasi gradasi tidak hanya penting bagi perubahan morfologi sungai secara alamiah, tetapi mempunyai pengaruh yang besar dalam perancangan bangunan sungai.

Sungai yang cenderung curam dan akibat besarnya debit curah hujan mengakibatkan terjadi kenaikan muka air sungai dengan cepat dan secara signifikan menggerus dasar sungai. Sedimen di suatu sungai merupakan fenomena yang menarik banyak para peneliti dibidang hidraulik, dinamika fluida, lingkungan dan hidrologi.

Adanya perlakuan terhadap sungai dengan kepentingan untuk memenuhi berbagai kebutuhan manusia, menyebabkan terjadinya perubahan pola aliran. Hal ini mengakibatkan terjadinya perubahan alur sungai baik dalam arah horizontal maupun vertikal. Perubahan pola aliran akan menyertakan juga perubahan gaya-gaya dan perubahan angkutan sedimen di sungai. Bangunan melintang sungai

seperti bendung, sabo dam, *sand pocket*, serta bendungan merupakan beberapa bangunan yang berpengaruh terhadap perubahan perilaku sungai.

Gunung Sorongan yang berada pada dinding Kaldera Gunung Bawakaraeng (2004), mengakibatkan Sungai Jeneberang yang tadinya berair bersih dan jernih berubah menjadi keruh dan berlumpur sehingga merusak ekosistem yang berada di sekitar sungai tersebut.



Gambar 1.1 Longsor Kaldera Gunung Bawakaraeng

Kenaikan persentase sedimen di bangunan sedimen sepanjang Sungai Jeneberang seperti sabo dam meningkat pesat dan berpengaruh terhadap kapasitas Waduk Bili-bili. Volume runtuh diperkirakan sebesar 201 juta m<sup>3</sup>. Selain itu, longsoran tersebut menggerus dan merusak bangunan sabo dam dan *sand pocket* yang ada. Untuk menangani masalah longsoran tersebut, maka dilakukan perbaikan dan penambahan bangunan pengendali sedimen terdiri dari *sabo dam*, *check dam*, *consolidation dam*, dan *sand pocket*. Oleh karena itu, dilakukan studi pengembangan bangunan pengendali dan penahan sedimen Sungai Jeneberang.

Dari uraian di atas, maka penulis mengangkat sebuah tugas akhir dengan judul “**Studi Laju Sedimentasi Waduk Bili-Bili Pasca Pengembangan Bangunan Penahan Sedimen**”.

#### **B. RUMUSAN MASALAH**

1. Besarnya jumlah sedimen dan kecepatan arus sungai yang terjadi mengakibatkan timbulnya pendangkalan di waduk, utamanya bangunan penahan sedimen. Hal utama yang perlu diteliti ialah seberapa besar debit sedimen yang masuk di Waduk Bili-bili.
2. Bagaimana laju sedimentasi setelah adanya pembangunan pengendali sedimen?

#### **C. TUJUAN PENELITIAN**

Adapun tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui volume endapan di Dam.
2. Untuk memahami laju sedimentasi di Waduk Bili-bili pasca pengembangan bangunan pengendali sedimen di hulu Sungai Jeneberang.

#### **D. BATASAN MASALAH**

Mengacu pada permasalahan yang didapatkan pada penelitian ini, maka secara detail pembahasan dibatasi pada hal-hal sebagai berikut :

1. Perhitungan volume endapan sedimen di Waduk Bili-bili.
2. Perhitungan laju sedimentasi bangunan pengendali di Sungai Jeneberang.

## **E. SISTEMATIKA PENULISAN**

Berikut ini akan diberikan uraian singkat mengenai tiap-tiap bab yang menggambarkan keseluruhan dari tulisan ini. Terdiri dari 5 (lima) bab, yaitu :

### **BAB I PENDAHULUAN**

Merupakan bab pendahuluan dari tulisan ini, yang berisi latar belakang studi, rumusan masalah, tujuan dari penelitian, batasan masalah yang diangkat serta gambaran singkat dari tiap-tiap bab yang ada di dalam tulisan ini.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Dalam bab ini akan diberikan uraian secara teoritis tentang erosi dan sedimentasi, pengangkutan sedimen, analisis laju sedimentasi dan volume endapan serta cara pengukuran sedimen.

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Menguraikan metode penelitian yang meliputi gambaran umum Waduk Bili-bili, metode penelitian, analisis sedimentasi, dan gambaran bangunan sedimen di Sungai Jeneberang.

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Menjelaskan hasil penelitian dan pembahasan mengenai hasil analisis data laju sedimentasi dan volume sedimen.

### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini merupakan penutup dari keseluruhan penulisan yang berisi kesimpulan yang didapatkan dari studi yang dilakukan dan saran untuk bahan referensi pelaksanaan studi selanjutnya atau yang serupa.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **A. Erosi dan Sedimentasi**

Sedimen adalah material hasil proses erosi, baik berupa erosi permukaan, erosi parit, atau jenis erosi tanah lainnya yang mengendap di bagian bawah kaki bukit, di daerah genangan banjir, saluran air, sungai, dan waduk. Sedangkan sedimentasi adalah proses mengendapnya material fragmental oleh air sebagai akibat dari adanya erosi.

Secara umum dikatakan bahwa erosi dan sedimentasi merupakan proses terlepasnya butiran tanah dari induknya di suatu tempat dan terangkutnya material tersebut oleh gerakan angin atau air kemudian diikuti dengan pengendapan material yang terangkut di tempat yang lain. Bahaya erosi banyak terjadi di daerah-daerah lahan kering terutama yang memiliki kemiringan lereng sekitar 15 % atau lebih. Tanah kering yang rentan terhadap erosi terutama adalah tanah podsolik merah kuning yang mempunyai areal terluas di Indonesia, kemudian disusul oleh tanah latosol yang kemiringan lereng agak curam sampai curam, terutama tanah-tanah yang tidak tertutup tanaman.

#### **1. Proses Terjadinya Erosi dan Sedimen**

Proses erosi secara alami yaitu proses pelapukan batuan atau bahan induk tanah secara geologi dan alamiah. Erosi alami merupakan proses keseimbangan alam yang artinya kecepatan kerusakan tanah masih lebih kecil dari proses pembentukan tanah. Sedangkan DAS yang masuk dalam wilayah perkotaan



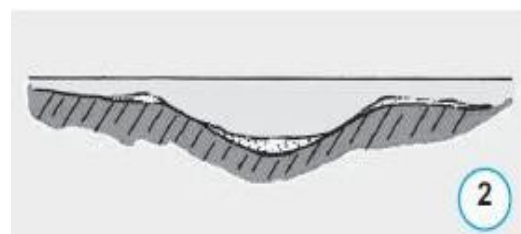
mengalami erosi yang cukup besar dan dalam waktu yang cukup cepat. Hal ini dikarenakan, perubahan tata guna lahan yang disebabkan oleh meningkatnya kegiatan manusia di wilayah DAS tersebut. Meningkatnya kegiatan manusia dalam mengelola dan meningkatkan produktivitas tanah telah menyebabkan terjadinya pemecahan agregat-agregat tanah karena pengangkatan dan pemindahan tanah pada saat pengolahan tanah. Hal tersebut menyebabkan meningkatnya laju erosi tanah yang disebut erosi dipercepat.

Penyebab utama terjadinya erosi di daerah tropis seperti Indonesia adalah air. Hal ini disebabkan oleh daerah tropis memiliki kelembaban dan rata-rata curah hujan per tahun yang cukup tinggi. Proses erosi tanah yang disebabkan oleh air meliputi 3 tahap, yaitu :

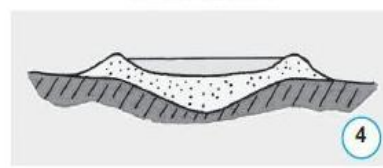
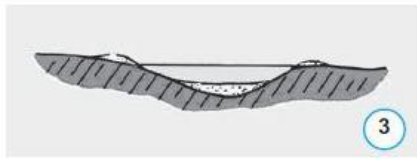
- a. Pelepasan butiran tanah atau partikel tanah dari bongkah agregat tanah.
- b. Pemindahan atau pengangkutan butiran tanah oleh media pengangkut, yaitu air.
- c. Pengendapan butiran tanah dimana butiran tanah tidak dapat diangkut lagi oleh media pengangkut.



*Sungai keadaan normal.*



*Saat sungai banjir.*



Banjir mereda meninggalkan endapan di kanan kiri sungai Endapan semakin tinggi membentuk tanggul alam

### Gambar 2.1 Proses erosi hingga pengendapan sedimentasi

(Sumber : Perbaikan dan Pengaturan Sungai, Suyono Sudarsono dan Masateru Tominaga, 2008)

Sebagai wilayah tropis, proses erosi tanah lebih banyak disebabkan oleh air. Berdasarkan bentuknya erosi dibedakan menjadi 4 tipe, yaitu:

- a. Erosi lempeng (*sheet erosion*), yaitu butiran-butiran diangkut lewat permukaan atas tanah oleh selapis tipis limpasan permukaan, yang dihasilkan oleh intensitas hujan yang merupakan kelebihan dari infiltrasi.
- b. Pembentukan polongan (*gully*), yaitu erosi lempeng terpusat pada polongan tersebut. Kecepatan airnya jauh lebih besar dibandingkan dengan kecepatan limpasan permukaan. Polongan tersebut cenderung menjadi lebih dalam, yang menyebabkan terjadinya longsoran-longsorannya. Polongan tersebut tumbuh ke arah hulu. Ini dinamakan erosi ke arah belakang (*backward erosion*).
- c. Longsorannya massa tanah yang terletak di atas batuan keras atau lapisan tanah liat. Longsorannya ini terjadi setelah adanya curah hujan panjang, yang lapisannya tanahnya menjadi jenuh oleh air tanah.
- d. Erosi tebing sungai, terutama terjadi pada saat banjir, yaitu tebing tersebut mengalami penggerusan air yang dapat menyebabkan longsorannya tebing-tebing pada belokan sungai.

Longsor



Gambar 2.2 Erosi yang terjadi akibat aliran sungai yang deras

Sebagai akibat dari adanya erosi, sedimentasi memberikan beberapa dampak, yaitu :

- a. Di sungai, pengendapan sedimen di dasar sungai yang menyebabkan naiknya dasar sungai, kemudian mengakibatkan tingginya muka air sehingga berakibat sering terjadi banjir.
- b. Di saluran, jika saluran irigasi dialiri air yang penuh sedimen, maka akan terjadi pengendapan sedimen di saluran. Tentu akan diperlukan biaya yang cukup besar untuk pengerukan sedimen tersebut dan pada keadaan tertentu pelaksanaan pengerukan menyebabkan terhentinya operasi saluran.
- c. Di waduk, pengendapan sedimen di waduk akan mengurangi volume efektif waduk yang berdampak terhadap berkurangnya umur rencana waduk.
- d. Di bendung atau pintu-pintu air.
- e. Pengendapan sedimen mengakibatkan pintu air kesulitan dalam

mengoperasikan pintunya, mengganggu aliran air yang lewat melalui bendung atau pintu air, dan akan terjadi bahaya penggerusan terhadap bagian hilir bangunan jika beban sedimen di sungai berkurang karena telah mengendap di bagian hulu bendung, sehingga dapat mengakibatkan terangkutnya material alas sungai.

Dalam aliran sungai yang terdapat sedimentasi, tingkat sedimentasi bisa diakibatkan oleh beberapa faktor alam, dan juga keadaan morfologi dari sungai tersebut. Tingkat sedimentasi dari segi morfologi memiliki beberapa faktor, salah satunya keadaan dinding sungai, adanya jembatan, dan adanya pelengseran pada bagian-bagian bawah sungai yang tentu dari keadaan morfologi tersebut mempengaruhi tingkat sedimentasi. Selain itu, ada juga faktor alam yang mempengaruhi dalam proses sedimentasi. Kecepatan aliran sungai, debit aliran, dan juga ketinggian sungai bisa mengakibatkan proses sedimentasi bisa semakin besar terjadi. Karena itu bisa dimungkinkan kalau faktor-faktor tersebut tidak terprediksi, banjir bisa terjadi.

Tingkat dimana kapasitas waduk berkurang oleh sedimen tergantung pada jumlah sedimen yang masuk, presentase dari masukan ini yang tertangkap, dan kerapatan sedimen yang mengendap. Jumlah masukan sedimen dapat dihitung dengan mengacu pada data hasil tahunan rata-rata per luas satuan daerah aliran yang di daerah yang sama.

Menurut Bennet, 1939 (dalam Yuniyanto,1994), berdasarkan proses terjadinya erosi tanah dan proses sedimentasi, maka proses terjadinya sedimentasi dapat dibedakan menjadi dua bagian yaitu :

- a. Proses sedimentasi secara geologis, yaitu proses erosi tanah dan sedimentasi yang berjalan secara normal atau berlangsung secara geologi, artinya proses pengendapan yang berlangsung masih dalam batas-batas yang diperkenankan atau dalam keseimbangan alam dari proses degradasi dan aggradasi pada permukaan kulit bumi akibat pelapukan.
- b. Proses sedimentasi dipercepat, yaitu proses terjadinya sedimentasi yang menyimpang dari proses secara geologi dan berlangsung dalam waktu yang cepat, bersifat merusak atau merugikan dan dapat mengganggu keseimbangan alam atau kelestarian lingkungan hidup. Kejadian tersebut biasanya disebabkan oleh kegiatan manusia dalam mengolah tanah. Cara mengolah tanah yang salah dapat menyebabkan erosi tanah dan sedimentasi yang tinggi.

Sedimen biasanya digambarkan sebagai partikel padat yang digerakkan oleh fluida sedimen yang terjadi pada sungai dapat disebabkan akibat erosi yang terjadi pada lahan-lahan kritis yang terdapat pada daerah tangkapan DAS. Jika material sedimen yang terbentuk akibat erosi lahan tersebut masuk ke dalam DAS dalam jumlah yang besar, maka akan menyebabkan laju sedimen yang masuk ke dalam DAS menjadi besar bahkan akan melampaui laju sedimen rencana. Akibat sedimen yang mengendap di dasar akan berpengaruh pada kapasitas tampungan air.



Gambar 2.3 Pengendapan sedimentasi di Sabo Dam

Sedimen kasar biasanya mengendap di suatu delta di sebelah hulu waduk. Sedimen halus yang masih berada dalam suspensi dapat terbawa sampai bendungan dan akhirnya dapat mengendap pada bagian yang terdalam dari waduk. Bila air yang masuk lebih rapat daripada air permukaan pada waduk, maka air itu akan menyelam di bawah permukaan sebagai suatu aliran densitas (*density current*) atau aliran keruh (*turbidity current*) dan membawa muatannya ke bendungan meskipun sedimennya mungkin tidak terlihat pada permukaan waduk.

## 2. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Sedimentasi

Proses terjadinya sedimentasi merupakan bagian dari proses erosi tanah. Timbulnya bahan sedimen adalah sebagai akibat dari erosi tanah yang terjadi. Proses erosi dan sedimentasi di Indonesia yang lebih berperan adalah faktor air, sedangkan faktor angin relatif kecil. Proses hidrologis langsung atau tidak langsung mempunyai kaitan dengan terjadinya erosi transport sedimen dan deposisi sedimen di DAS, perubahan tata guna lahan dan praktek pengelolaan

DAS juga mempengaruhi terjadinya erosi, sedimen dan gilirannya akan mempengaruhi kualitas air (Chay Asdak, 1995).

Menurut Langbein (Kironoto, 2003) faktor-faktor yang mempengaruhi sedimentasi yang masuk ke DAS yaitu iklim, tanah, topografi, tanaman, kegiatan manusia, karakteristik hidrolika sungai, karakteristik penampung sedimen, check dam, dan waduk serta kegiatan gunung berapi.

Sedimentasi yang disebabkan oleh kegiatan manusia seyogyanya tidak diabaikan begitu saja yang diantaranya adalah penggundulan hutan, bercocok tanah di atas lereng-lereng pegunungan yang curam dan pembangunan jaringan jalan di daerah pegunungan. Pada semua keadaan tersebut ketahanan butiran tanah terhadap titik-titik air yang menyimpannya dan terhadap aliran permukaan sangat menurun, sehingga keseimbangan mekanis dari lereng-lereng tersebut akan terganggu, menyebabkan timbulnya erosi lereng, keruntuhan lereng atau tanah longsor. Selanjutnya sedimen yang dihasilkannya akan turun dari lereng-lereng tersebut dan tertimbun di dasar lembah-lembah dan akan menjadi penyebab timbulnya sedimen luruh (*debris flow*).

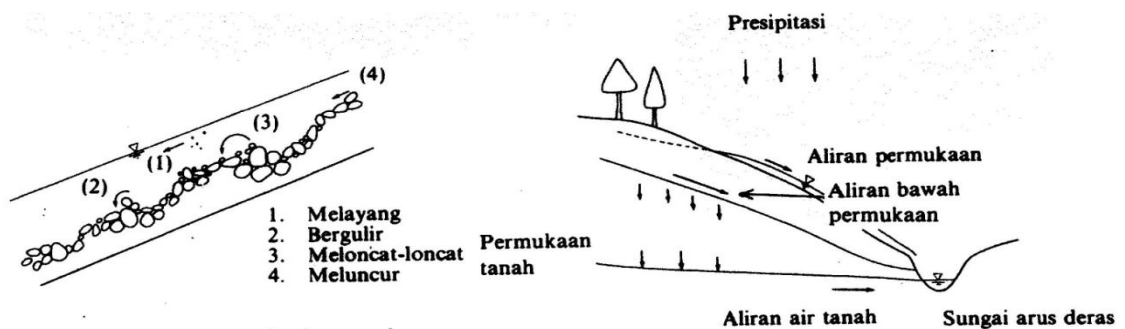
Namun demikian pengetahuan mengenai faktor tersebut tidak menjamin ketepatan perkiraan volume sedimen yang masuk ke DAS. Dari faktor yang telah diterangkan di atas yang paling berpengaruh terhadap besarnya sedimen di DAS adalah iklim atau curah hujan tahunan.

### **3. Mekanisme Pergerakan Sedimen**

Sungai adalah jalur aliran air di atas permukaan bumi yang selain mengalirkan air, juga mengangkut sedimen yang terkandung dalam air sungai

tersebut. Gerakan butiran tanah atau butiran pasir secara individual akibat tertimpa titik-titik hujan atau terdorong aliran air dalam alur-alur kecil disebut gerakan fluvial (*fluvial movement*). Gaya-gaya yang menyebabkan Bergeraknya butiran-butiran kerikil yang terdapat di atas permukaan dasar sungai terdiri dari komponen gaya-gaya gravitasi yang sejajar dengan dasar sungai dan gaya geser serta gaya angkat yang dihasilkan oleh kekuatan aliran air sungai.

Karena muatan dasar senantiasa bergerak, maka permukaan dasar sungai kadang naik (*agradasi*), tetapi kadang-kadang turun (*degradasi*) dan naik-turunnya dasar sungai disebut alterasi dasar sungai (*river bed alternation*). Muatan melayang tidak berpengaruh pada alterasi dasar sungai, tetapi dapat mengendap di dasar waduk-waduk atau muara-muara sungai, yang menimbulkan pendangkalan waduk atau muara sungai tersebut dan menyebabkan timbulnya berbagai masalah. Penghasil sedimen terbesar adalah erosi permukaan lereng pegunungan, erosi sungai (dasar dan tebing alur sungai) dan bahan-bahan hasil letusan gunung berapi yang masih aktif.



2.4 (a)

2.4 (b)

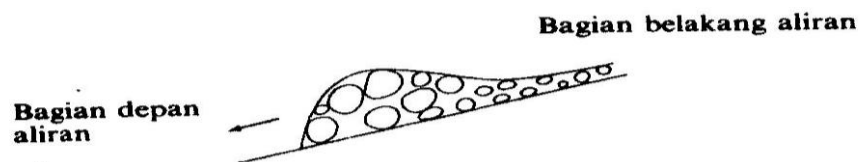
Gambar 2.4 (a) Gerakan butiran pasir dalam aliran air.

2.4 (b) Proses limpasan hujan di daerah pegunungan



( Sumber : Perbaikan dan Pengaturan Sungai, Suyono Sudarsono dan Masateru Tominaga, 2008)

Gerakan massa sedimen adalah gerakan air bercampur massa sedimen dengan konsentrasi yang sangat tinggi, di hulu sungai arus deras, di daerah lereng-lereng pegunungan atau gunung berapi. Gerakan sedimen ini disebut sedimen luruh yang biasanya dapat terjadi di dalam alur sungai arus deras (*torrent*) yang kemiringan dari 15°.



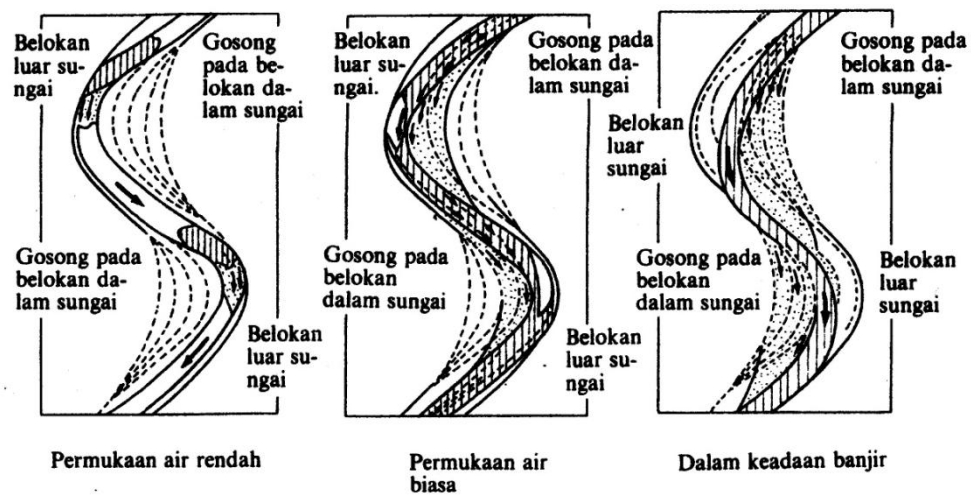
Gambar 2.5 Bentuk banjir lahar yang mengandung batu-batu (batu-batu besar berkonsentrasi di bagian depan dan kerikil ukuran kecil terdapat di bagian belakang aliran)

( Sumber : Perbaikan dan Pengaturan Sungai, Suyono Sudarsono dan Masateru Tominaga, 2008)

Bahan utama sedimen luruh biasanya terdiri pasir atau lumpur bercampur kerikil dan batu-batu dari berbagai proporsi dan ukuran. Ukuran batu-batu yang terdapat pada sedimen luruh sangat bervariasi mulai dari beberapa cm sampai m. Sedimen luruh yang bahannya berasal dari pelapukan batuan yang sebagian besar berupa pasir disebut pasir luruh (*sand flow*) dan yang sebagian besar berupa lumpur disebut lumpur luruh (*mud flow*). Selain itu sedimen luruh yang bahannya berasal dari endapan hasil letusan gunung berapi disebut banjir lahar dingin atau hanya dengan sebutan banjir lahar.

Kalau suplai sedimen, besar dari kemampuan transpor maka akan terjadi aggradasi. Sedangkan kalau suplai sedimen, lebih kecil dari kemampuan transpor

akan terjadi degradasi. Kemampuan transpor sendiri dipengaruhi oleh debit, kecepatan aliran rata-rata, kemiringan (*slope*), tegangan geser dan karakteristik sedimen. Agar tidak terjadi agradasi dan degradasi harus diciptakan kondisi seimbang dalam suatu sungai. Kondisi seimbang akan terjadi apabila suplai sedimen (dominan dari DAS) sama dengan kapasitas transport sedimen sistem sungai.



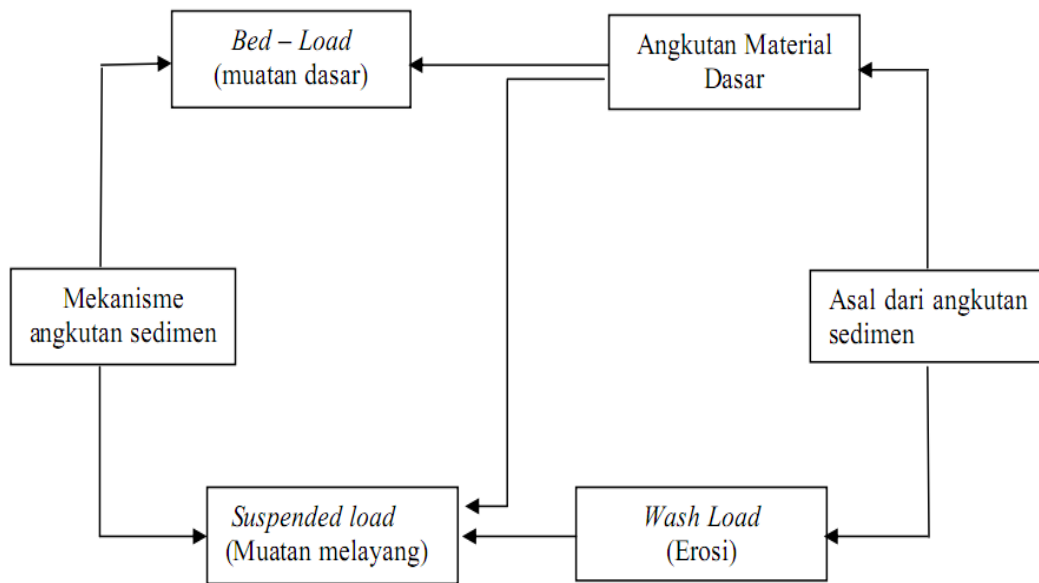
Gambar 2.6 Progres gerakan sedimen dan perpindahan daerah pengendapan karena terjadinya perubahan muka air  
(Sumber : Perbaikan dan Pengaturan Sungai, Suyono Sudarsono dan Masateru Tominaga, 2008)

Mekanisme pengangkutan butir-butir tanah yang dibawa dalam air yang mengalir dapat digolongkan menjadi beberapa bagian, sebagai berikut :

- Wash Load Transport* atau angkutan sedimen cuci, yaitu bahan *wash load* berasal dari pelapukan lapisan permukaan tanah yang menjadi lepas berupa debu-debu halus selama musim kering. Debu halus ini selanjutnya dibawa masuk ke sungai baik oleh angin maupun oleh air hujan yang turun

pertama pada musim hujan, sehingga jumlah sedimen pada awal musim hujan lebih banyak dibandingkan dengan keadaan yang lain.

- b. *Suspended Load Transport* atau angkutan sedimen layang, yaitu butir-butir tanah bergerak melayang dalam aliran air. Gerakan butir-butir tanah ini terus menerus dikompresir oleh gerak turbulensi aliran sehingga butir-butir tanah bergerak melayang di atas saluran. Bahan *suspended load* terjadi dari pasir halus yang bergerak akibat pengaruh turbulensi aliran, debit, dan kecepatan aliran. Semakin besar debit, maka semakin besar pula angkutan *suspended load*.
- c. *Saltation Load Transport* atau angkutan sedimen loncat, yaitu pergerakan butir-butir tanah yang bergerak dalam aliran air antara pergerakan *suspended load* dan *bed load*. Butir-butir tanah bergerak secara terus menerus meloncat-loncat (*skip*) dan melambung (*bounce*) sepanjang saluran tanpa menyentuh dasar saluran.
- d. *Bed Load Transport* atau angkutan sedimen dasar, yaitu merupakan angkutan butir-butir tanah berupa pasir kasar (*coarse sand*) yang bergerak secara menggelinding (*rolling*), mendorong dan menggeser (*pushing and sliding*) terus menerus pada dasar aliran yang pergerakannya dipengaruhi oleh adanya gaya seret (*drag force*). Gerakan ini kadang-kadang dapat sampai jarak tertentu dengan ditandai bercampurnya butiran partikel tersebut bergerak ke arah hilir. (Soewarno, 1991)



Gambar 2.7 Skema angkutan sedimen (*Sedimen Transport*)  
( Sumber : Laporan pengukuran sedimentasi PSDA Semarang, 2004)

#### 4. Upaya Pengendalian Erosi dan Sedimentasi

Secara umum, teknik konservasi lahan seperti pengaturan tata guna lahan dan penataan lahan pertanian dengan teras sering dan reboisasi sebagai langkah penanganan erosi dan sedimentasi. Namun teknik konservasi lahan tidak dapat terlihat hasilnya secara signifikan dalam waktu singkat. Teknik tersebut pada lereng-lereng pegunungan yang baru digunduli, sebelum tumbuhnya pohon-pohon yang baru ditanam dapat saja terjadi keruntuhan karena membusuknya akar-akar pepohonan yang lama dan lapisan permukaan tanah menjadi gembur. Hal ini dapat mengurangi optimalisasi penanganan masalah ini, karena laju erosi dan sedimentasi umumnya lebih cepat daripada teknik konservasi lahan.

Dalam hal ini bangunan pengendali sedimen bukan merupakan pilihan utama dalam usaha penanggulangan erosi dan sedimentasi di suatu DAS. Namun pembuatan bangunan pengendali sedimen merupakan langkah penunjang utama

dalam melakukan usaha konservasi lahan, dimana bangunan pengendali sedimen dapat meminimalisasi jumlah sedimen selama proses konservasi lahan berlangsung.

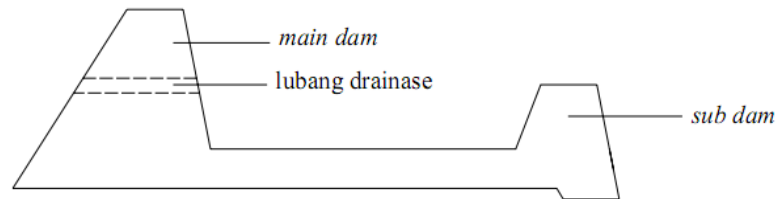
## **B. BANGUNAN PENGENDALI SEDIMEN**

Mencegah terjadinya proses sedimentasi adalah suatu hal yang tidak mungkin dapat dilakukan, karena sedimentasi adalah suatu proses gejala alam yang sangat kompleks di atas permukaan bumi ini. Akan tetapi intensitas proses sedimentasi tersebut secara teknis dapat diperlambat mencapai tingkat yang tidak membahayakan, yaitu tingkat sedimentasi yang seimbang dengan kemampuan daya angkut aliran sungai secara fluvial dan dapat dihindarkan gerakan sedimen secara massa. Guna memperoleh cara-cara untuk memperlambat proses sedimentasi tersebut, diperlukan data mengenai tipe sedimen yang dihasilkan dengan cara terangkutnya, lokasinya, volume, intensitas evolusi dasar sungainya, hujan, debit sungai, sebab-sebab bencana yang pernah terjadi, kondisi terrain, dan lain-lain. Usaha untuk memperlambat proses sedimen ini antara lain dengan mengadakan teknologi teknik sipil untuk mengendalikan gerakannya menuju bagian sungai di sebelah hilirnya.

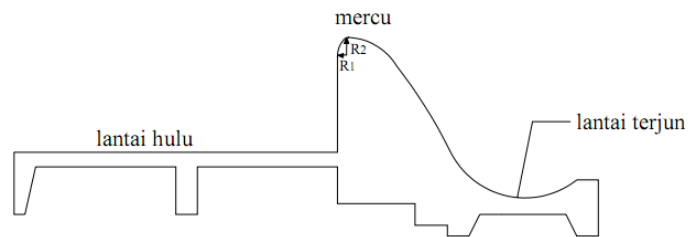
Teknologi sabo mulai dikenalkan di Indonesia sejak kedatangan tenaga ahli sabo dari Jepang, Mr. Tomoaki Yokota, pada tahun 1970. Sabo berasal dari bahasa Jepang yang terdiri dari dua kata yaitu *sa* yang berarti pasir dan *bo* yang berarti pengendalian, dengan demikian secara harfiah sabo mengandung pengertian pengendali pasir. Akan tetapi dalam kenyataannya sabo merupakan suatu sistem penanggulangan bencana alam akibat erosi dan sedimentasi.

Termasuk didalamnya erosi dan sedimentasi yang disebabkan oleh adanya lahar hujan, sedimen luruh, tanah longsor, dan lain-lain.

Bentuk sabo dam memiliki perbedaan dengan bangunan bendung seperti Gambar 2.8 dan Gambar 2.9 di bawah ini.



Gambar 2.8 Sketsa memanjang sabo dam



Gambar 2.9 Sketsa memanjang bendung

( Sumber : <http://eprints.undip.ac.id/33847/5/1797> CHAPTER II.pdf )

Disamping dapat menahan sebagian gerakan sedimen, fungsi utama sabo dam adalah untuk mengatur jumlah sedimen yang bergerak secara fluvial dalam kepekaan yang tinggi, sehingga jumlah sedimen yang meluap ke hilir tidak berlebihan. Dengan demikian besarnya sedimen yang masuk akan seimbang dengan kemampuan daya angkut aliran air sungainya, sehingga sedimentasi pada daerah kipas pengendapan dapat dihindarkan.

Pada sungai-sungai yang diperkirakan tidak akan terjadi banjir lahar, tetapi banyak menghanyutkan sedimen dalam bentuk gerakan fluvial, maka bendung-

bendung pengatur dibangun berderet-deret di sebelah hulu daerah kipas pengendapan. Untuk sungai-sungai yang berpotensi banjir lahar, maka bendung-bendung ini dibangun di antara lokasi sistem pengendalian lahar dan daerah kipas pengendapan.

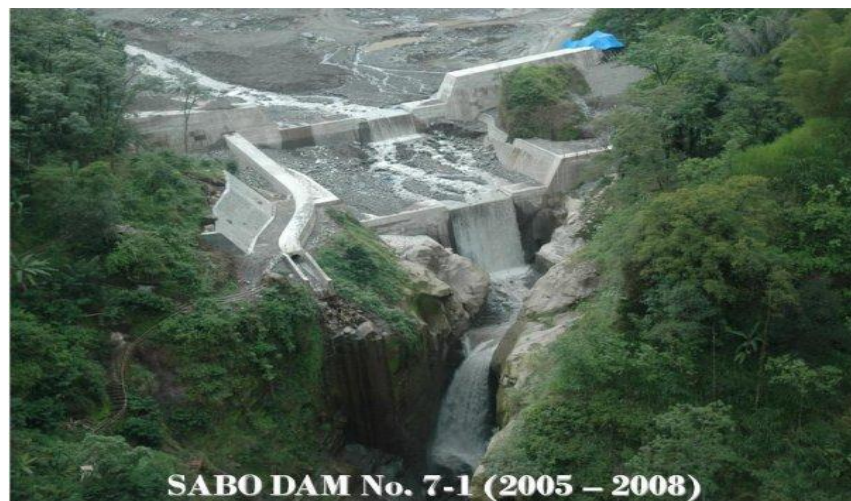
Jika tanah pondasi terdiri dari batuan yang lunak, maka gerusan tersebut dapat dicegah dengan pembuatan bendung anakan (*sub dam*). Kadang-kadang sebuah bendung memerlukan beberapa buah sub-dam, sehingga dapat dicapai kelandaian yang stabil pada dasar alur sungai di hilirnya. Stabilitas dasar alur sungai tersebut dapat diketahui dari ukuran butiran sedimen, debit sungai dan daya angkut sedimen, kemudian barulah jumlah sub-dam dapat ditetapkan. Selanjutnya harus pula diketahui kedalaman gerusan disaat terjadi banjir besar dan menetapkan jumlah sub-dam yang diperlukan, agar dapat dihindarkan terjadinya keruntuhan bendung-bendung secara beruntun.

Penentuan tempat kedudukan bendung, biasanya didasarkan pada tujuan pembangunannya sebagaimana tertera di bawah ini:

1. Untuk tujuan pencegahan terjadinya sedimentasi yang mendadak dengan jumlah yang sangat besar yang dapat timbul akibat terjadinya tanah longsor, sedimen luruh, banjir lahar dan lain-lain maka tempat kedudukan bendung haruslah diusahakan pada lokasi di sebelah hilir dari daerah sumber sedimen yang labil tersebut, yaitu pada alur sungai yang dalam, agar dasar sungai naik dengan adanya bendung tersebut.
2. Untuk tujuan pencegahan terjadinya penurunan dasar sungai, tempat kedudukan bendung haruslah sebelah hilir dan diusahakan penempatannya

di ruas sungai tersebut. Apabila ruas sungai tersebut cukup panjang, maka diperlukan beberapa buah bendung yang dibangun secara berurutan membentuk terap-terap sedemikian, sehingga pondasi bendung yang lebih hulu dapat tertimbun oleh tumpukan sedimen yang tertahan oleh bendung di hilirnya.

3. Untuk tujuan memperoleh kapasitas tampung yang besar, maka tempat kedudukan bendung diusahakan pada lokasi di sebelah hilir ruas sungai yang lebar sehingga dapat terbentuk semacam kantong. Terkadang bendung ditempatkan pada sungai utama di sebelah hilir muara anak-anak sungai yang biasanya berupa sungai arus deras (*torrent*) sehingga dapat berfungsi sebagai bendung untuk penahan sedimen baik dari sungai utama maupun dari anak-anak sungainya.



Gambar 2.10 Sabo Dam Bili-bili



Jenis pekerjaan sabo dam terbagi atas dua bagian, yaitu :

1. Pekerjaan langsung, yaitu pemantapan lereng bukit sebagai upaya pencegahan terjadinya erosi, antara lain sengkedan, penghutan, bendung pengendali sedimen, dan lain-lain.
2. Pekerjaan tidak langsung, sebagai upaya pengendalian aliran sedimen dan sedimen luruh (*debris flow*), antara lain bendung penahan sedimen, kantong sedimen, normalisasi / kanalisasi alur, tanggul dan lain-lain.

### **1. Bangunan Penahan Sedimen (*Check Dam*)**

*Check dam* atau disebut juga bendung penahan berfungsi untuk memperlambat proses sedimentasi dengan mengendalikan gerakan sedimen menuju bagian sungai sebelah hilirnya.

Adapun fungsi *check dam* antara lain :

- a. Menampung sebagian angkutan sedimen dalam waktu suatu kolam penampung.
- b. Mengatur jumlah sedimen yang bergerak secara fluvial dalam kepekaan yang tinggi, agar jumlah sedimen yang meluap ke hilir tidak berlebihan. Dengan demikian besarnya sedimen yang masuk akan seimbang dengan daya angkut aliran air sungainya, sehingga sedimentasi pada lepas pengendapan terhindarkan.
- c. Membentuk suatu kemiringan dasar alur sungai baru pada alur sungai hulu.

*Check dam* baru akan nampak manfaatnya jika dibangun dalam jumlah yang banyak di alur sungai yang sama.



Gambar 2.11 *Check Dam* Bili-bili  
( Sumber : Konsultan PT. Aria, 2014 )

## 2. Bendung Konsolidasi (*Consolidation Dam*)

Peningkatan agradasi dasar sungai di daerah kipas pengendapan dapat dikendalikan dan dengan demikian alur sungai di daerah ini tidak mudah berpindah-pindah. Guna lebih memantapkan serta mencegah terjadinya degradasi alur sungai di daerah kipas pengendapan ini, maka dibangun bendung-bendung konsolidasi (*consolidation dam*). Jadi bendung konsolidasi tidak berfungsi untuk menahan atau menampung sedimen yang berlebihan.

Apabila elevasi dasar sungai telah dimanfaatkan oleh adanya bendung-bendung konsolidasi, maka degradasi dasar sungai yang diakibatkan oleh gerusan dapat dicegah. Dengan demikian dapat dicegah pula keruntuhan bangunan perkuatan lereng yang ada pada bagian sungai tersebut. Selanjutnya bendung-

bendung konsolidasi dapat pula mengekang pergeseran alur sungai dan dapat mencegah terjadinya gosong pasir.

Tempat kedudukan bendung konsolidasi ditentukan berdasarkan tujuan pembuatannya dengan persyaratan sebagai berikut:

- a. Untuk tujuan pencegahan degradasi dasar sungai, bendung-bendung konsolidasi ditempatkan pada ruas sungai yang dasarnya selalu menurun. Jarak antara masing-masing bendung didasarkan pertimbangan kemiringan sungai yang stabil.
- b. Apabila terdapat anak sungai, mesti dipertimbangkan penempatan bendung-bendung konsolidasi pada lokasi yang terletak di sebelah hilir muara anak sungai tersebut.
- c. Untuk tujuan pencegahan gerusan pada lapisan tanah pondasi suatu bangunan sungai, bendung-bendung konsolidasi ditempatkan di sebelah hilir bangunan tersebut.
- d. Untuk menghindarkan tergerus dan jebolnya tanggul pada sungai-sungai arus deras serta mencegah keruntuhan lereng dan tanah longsor, bendung-bendung konsolidasi ditempatkan langsung pada kaki-kaki tanggul, kaki lereng dan kaki tebing bukit yang akan diamankan.
- e. Apabila pembangunan sederetan bendung-bendung konsolidasi dikombinasikan dengan perkuatan tebing, jarak antara masing-masing bendung yang berdekatan diambil 1,5 - 2,0 kali lebar sungai.



Gambar 2.12 *Consolidation Dam* Bili-bili  
( Sumber : Konsultan PT. Aria, 2014 )

### 3. **Kantong Pasir (*Sand Pocket*)**

Bahan-bahan endapan hasil letusan gunung berapi atau hasil pelapukan batuan lapisan atas permukaan tanah yang oleh pengaruh air hujan bergerak turun dari lereng-lereng gunung berapi atau pegunungan memasuki bagian hulu alur sungai arus deras. Oleh aliran air sungai arus deras ini bahan-bahan endapan ini bergerak turun baik secara massa maupun secara fluvial dengan konsentrasi yang tinggi memasuki bagian sungai di sebelah hilirnya.

Suplai sedimen yang berlebihan akan menimbulkan penyempitan penampang sungai dan kapasitas alirannya akan mengecil. Di waktu banjir, maka aliran banjir yang melalui ruas-ruas yang sempit akan meluap dan menyebabkan terjadinya banjir yang merugikan.

Salah satu usaha yang dilaksanakan dalam rangka mengurangi suplai sedimen ini adalah menampungnya baik untuk selama mungkin atau untuk sementara pada ruangan-ruangan yang dibangun khusus yang disebut kantong lahar. Dalam rangka pengendalian banjir lahar, kantong pasir ini merupakan salah

satu komponen sistem pengendalian banjir lahar. Di saat terjadinya banjir lahar, bahan-bahan yang berukuran besar diharapkan dapat tertahan pada deretan bendung penahan, sedangkan kantong-kantong pasir diharapkan dapat berfungsi menahan dan menampung bahan-bahan berbutir lebih halus (pasir dan kerikil). Dengan demikian suplai sedimen ke bagian hilirnya akan dapat dikurangi, hingga pada tingkat yang seimbang dengan kemampuan daya angkut aliran sungai sampai muaranya.

Selanjutnya pada daerah gunung berapi yang masih aktif, suplai sedimen akan berlangsung secara terus-menerus tanpa berakhir. Dalam keadaan demikian deretan bendung-bendung penahan dan bendung-bendung pengatur tidak akan mampu menampung suplai sedimen yang terus-menerus tanpa berakhir, maka kantong pasir akan sangat berperan guna menahan masuknya sedimen yang berlebihan ke dalam alur sungai, khususnya ke dalam alur sungai-sungai di daerah kipas pengendapan.

Guna meningkatkan fungsi kantong pasir biasanya diusahakan supaya kantong senantiasa dalam keadaan kosong, yaitu menggali endapan yang sudah masuk ke dalamnya. Hasil galiannya biasanya dapat dimanfaatkan sebagai bahan bangunan, yang kualitasnya cukup baik. Pada gunung berapi yang masih aktif dengan periode letusan yang panjang, diperlukan adanya kantong yang cukup besar, jika perlu dengan membebaskan tanah-tanah yang akan digunakan sebagai kantong secara permanen. Pada saat aliran lahar terhenti dan sambil menunggu periode letusan selanjutnya, kantong dapat dimanfaatkan untuk berbagai usaha pertanian.



Gambar 2.13 *Sand Pocket* Bili-bili  
 ( Sumber : Konsultan PT. Aria, 2014 )

**C. ANALISIS PERHITUNGAN LAJU SEDIMENTASI**

**1. Analisis berdasarkan Suripin**

Perhitungan besarnya debit sedimen harian menurut Suripin (2002, terlampir) dihitung dengan rumus :

$$Q_s = 0.0864 C_s Q_w \dots \dots \dots (1)$$

Dimana:

$Q_s$  = Debit sedimen harian (ton/hari)

$Q_w$  = Debit aliran harian ( $m^3/det$ )

$C_s$  = Konsentrasi sedimen layang (mg/l)

0.0864 = Konversi satuan dari kg/sek ke ton/hari

=  $24 \times 30 \times 30$  (ton/hari) dikalikan dengan 30 hari tuk ton/bulan

Konsentrasi sedimen ( $C_s$ ) adalah banyaknya sedimen yang tersuspensi dalam volume air tertentu. Pengukuran dilakukan dengan cara mengambil sampel/ccontoh air dan membawa ke laboratorium untuk dapat diketahui

konsentrasi sedimen dalam satuan ppm (part per million) atau mg/liter. (Supangat, 2014)

## 2. Analisis dengan Metode Sesaat

Berdasarkan angkutan sedimen yang terjadi maka debit angkutan sedimen layang dihitung dengan rumus (Soewarno, 2000):

$$Q_s = 0,0864 C Q_w \dots \dots \dots (2)$$

Dimana:

$Q_s$  = Debit angkutan sedimen (ton/hari)

$C$  = Konsentrasi sedimen (mg/l)

$Q_w$  = Debit sungai ( $m^3$ /detik)

0.0864 = Konversi satuan

Oleh karena  $Q_{wi}$  dan  $C_i$ , kedua-duanya tidak tetap selama periode waktu 24 jam maka besarnya rata-rata debit sedimen hariannya dihitung dengan persamaan:

$$Q_s = \sum_1^n \frac{0,0864 C_i Q_{wi}}{24} \Delta t_i \dots \dots \dots (3)$$

Dimana:

$Q_s$  = Rata-rata debit sedimen harian (ton/hari)

$C_i$  = Konsentrasi sedimen pada saat  $t_i$  (mg/l)

$Q_{wi}$  = Besar aliran pada saat  $t_i$  ( $m^3$ /detik)

$\Delta t_i$  = Interval waktu pengukuran (jam)

$n$  = Jumlah pengukuran

### 3. Analisis menurut Chezy

Menentukan debit sungai umumnya dipergunakan rumus Chezy, sebagai berikut:

$$Q = CBH^{3/2}I^{1/2} \dots \dots \dots (4)$$

Dimana :

Q = Debit (m<sup>3</sup>/dtk)

C = Koefisien Chezy

B = Lebar sungai (m)

H = Kedalaman rata-rata (m)

I = Kemiringan permukaan air sungai

Dalam memperhitungkan luas penampang lintang sungai dengan menggunakan rumus Chezy, untuk beberapa arus sungai kadang-kadang sangat sukar merubah nilai *I* atau *C*. Jadi lebar sungai dan kedalaman air sungai disesuaikan dengan memperhatikan kecepatan aliran air sungai yang diperkenankan (sekitar 1,5 - 2,0 m<sup>3</sup>/dtk), kestabilan alur sungai, dan kondisi topografi. Andaikan kecepatan arus sungai terlalu besar, maka akan terjadi gerusan yang merusak, sebaliknya dengan arus yang terlalu lambat dapat terjadi pengendapan, turbulensi aliran atau intensitas meandernya akan meningkat.

### D. ANALISIS PERHITUNGAN VOLUME TAMPUNGAN

Berdasarkan data, BBWS Pompengan Jeneberang menghitung volume tampungan waduk berdasarkan garis kontur, dimulai dari garis kontur paling bawah sampai kontur teratas yang menjadi tampungan air pada kondisi normal maupun banjir. Dengan garis kontur yang berupa poligon tertutup, dengan



software Cad dapat dihitung luasnya. Bila ada pulau atau gundukan maka luasnya dikurangi dengan luas dari kontur yang elevasinya sama dari pulau atau gundukan tersebut. Berdasar daftar elevasi dan luas dapat dihitung volume ruang dengan rumus limas terpancung sebagai berikut.

$$\mathbf{Vol = (A_1 + A_2 + (A_1 \times A_2)^{0,5}) \times H / 3 \dots\dots\dots(5)}$$

Dengan :

Vol adalah volume tampungan (m<sup>3</sup>)

A1 dan A2 adalah luas bawah dan luas atas (km<sup>2</sup>)

H adalah tinggi atau beda elevasi luas atas dan luas bawah (m)

Pengukuran situasi areal waduk dilakukan guna mengetahui volume tampungan waduk dan volume sedimen yang sudah diendapkan di dalam waduk. Areal yang diukur adalah ruang yang disediakan untuk menampung air baik yang kondisinya sedang terendam maupun yang berada di atas air. (Sumber : Laporan Survey, Analisis, dan Evaluasi Sedimentasi Waduk).

Tampungan sedimen dapat juga dihitung dengan menggunakan rumus (Dalam Sugiyanto, 2002), sebagai berikut :

$$\mathbf{V = 1/2 \frac{Bh_m^2}{I_o - I_s} \dots\dots\dots (6)}$$

Dimana :

V = Volume sedimen (m<sup>3</sup>)

B = Lebar sungai (m)

$h_m^2$  = Tinggi efektif main dam (m)

$I_o$  = Kemiringan dasar sungai yang ada (m)

$I_s$  = Kemiringan dasar sungai stabil (m)

## **E. PENGUKURAN SEDIMEN**

### **1. Berdasarkan Echosounding**

Berdasarkan data pengukuran yang telah ada yaitu volume tampungan waduk pada tahun 1994 sampai tahun 2012 kita dapat mencari volume tampungan waduk selama kurun waktu 10 tahun, kemudian dapat dicari nilai sedimentasinya dengan cara merata-rata volume tampungan waduk Bili-bili selama kurun waktu 10 tahun tersebut dibagi dengan luas DAS Bili-bili.

### **2. Berdasarkan Tachimetry dan Bathimetry**

Pengukuran situasi areal waduk dilakukan guna mengetahui volume tampungan waduk dan volume sedimen yang sudah diendapkan di dalam waduk. Areal yang diukur adalah ruang yang disediakan untuk menampung air baik yang kondisinya sedang terendam maupun yang berada di atas air.

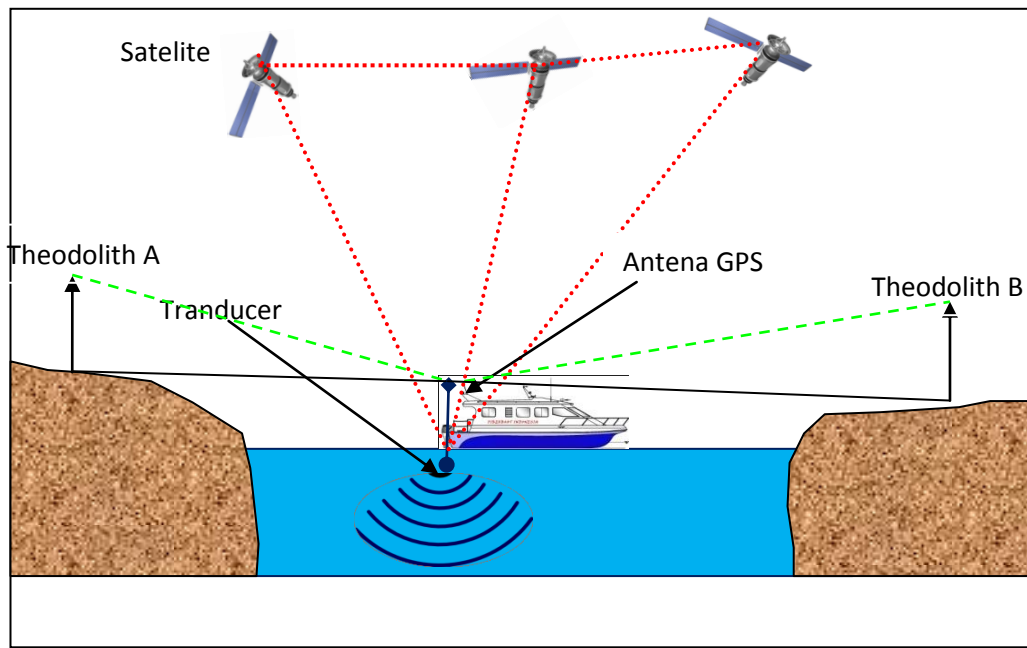
Ada 2 (dua) cara pengukuran yaitu :

- a. Tachimetry untuk yang di atas air.
- b. Bathimetry untuk yang di bawah air.

Dari hasil pengukuran tersebut di plotkan secara grafis sebagai peta situasi yang dilengkapi dengan garis kontur. Dari peta kontur ini dihitung luas dan volume waduk yang berhubungan dengan masing-masing elevasi.

Metode tachimetry menggunakan peralatan dengan teknologi lensa optis dan elektronis digital. Pengukuran titik-titik detail metode tachimetry ini relatif cepat dan mudah karena yang diperoleh dari lapangan adalah pembacaan rambu, sudut horizontal (azimuth magnetis), sudut vertikal (zenith atau inklinasi), dan tinggi alat sehingga memperoleh posisi X, Y, dan ketinggian Z. Pengukuran titik-

titik detail dengan metode Tachimetry untuk pemetaan daerah yang luas dan untuk detail-detail yang bentuknya tidak beraturan seperti Waduk Bili-bili.



Gambar 2.14 Pengukuran tachimetry dengan GPS  
( Sumber : BBWS Pompengan Jeneberang, 2013 )

Pengukuran detail cara tachimetry dimulai dengan penyiapan alat ukur di atas titik ikat dan penempatan rambu di titik-titik bidik atau patok. Setelah alat siap untuk pengukuran, dimulai dengan perekaman data di tempat alat berdiri, pembidikan ke rambu ukur, pengamatan azimuth dan pencatatan data di rambu BT, BA, dan serta sudut miring.

Pengukuran tachimetry dilakukan pada sekeliling areal genangan waduk mulai dari permukaan air waduk sampai ke kemungkinan banjir tertinggi. Untuk mendapatkan kerangka dasar pengukuran detail perlu dilakukan pengukuran poligon yang terikat pada patok-patok BM (patok tetap) dan CP (*Control*

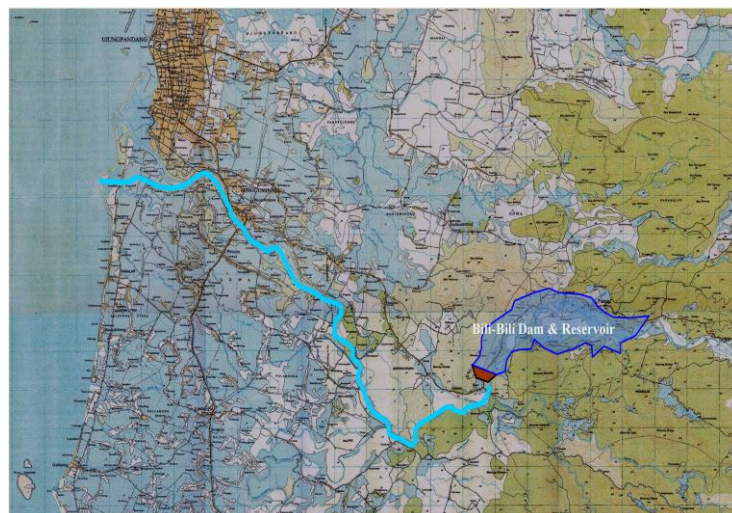
*Point*/patok bantu) sebagai referensi bendungan. Sedangkan untuk mendapatkan bentuk lekuk teluk, tanjung dan pulau-pulau di seluruh area waduk dilakukan pengukuran detail dengan metode tachimetry. Pengukuran tachimetry ini menggunakan alat ukur Theodolith Digital dan rambu ukur. Meskipun diukur dengan alat digital yang dapat menyimpan data hasil ukur, pencatatan manual dan pembuatan sket lekuk teluk, tanjung dan pulau-pulau tetap dilakukan sebagai bahan koreksi atas kesalahan alat.

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### A. GAMBARAN UMUM

Waduk Bili-bili yang merupakan salah satu waduk terbesar di Propinsi Sulawesi Selatan terletak di bagian tengah DAS Jeneberang mulai diresmikan penggunaannya pada bulan November tahun 1997. Waduk ini merupakan waduk serbaguna yang dibangun dengan tujuan untuk pengendalian banjir, pemenuhan kebutuhan air irigasi, suplai air baku dan pembangkit listrik tenaga air. Waduk Bili-bili terletak  $\pm$  30 km sebelah Timur Kota Makassar pada jalan poros Makassar - Malino, tepatnya di Bili-bili Desa Romangloe Kecamatan Parangloe Kabupaten Gowa Provinsi Sulawesi Selatan, dengan luas DPS 860 km<sup>2</sup> dan panjang sungai utama 78,75 km. Perencanaan umur operasi Waduk Bili-bili adalah 50 tahun (JRBDP, 2004). Volume tampungan sedimen sebesar 29 juta m<sup>3</sup>.



Gambar 3.1 Peta DAS Waduk Bili-bili

(Sumber : BBWS Pompengan Jeneberang, 2009)

Bendungan Bili-bili mulai dibangun pada tahun 1994 dan pemasangan instalasi monitoring mulai dipasang pada bulan Agustus 1995. Bendungan Bili-bili mulai diisi pada tanggal 27 November 1997 dengan elevasi awal 50,30 m dan reservoir terisi penuh pada bulan Juni 1998 dengan elevasi air di reservoir Bendungan Bili-bili mulai normal pada akhir tahun 1998.

Waduk serbaguna Bili-bili yang dibangun dengan maksud untuk pengendalian daya rusak, mengoptimalkan pengelolaan dan pemanfaatan sumber daya air yang ada pada bagian hulu DAS Jeneberang. Namun, dalam perkembangan terakhir terjadi penurunan pemanfaatan fungsi layanan waduk akibat adanya perubahan kondisi daerah tangkapan waduk karena adanya erosi akibat perubahan pemanfaatan lahan (Tangkaisari R., 1987) dan juga terjadinya longoran dinding kaldera pada tahun 2004 yang merupakan hulu DAS Jeneberang (LPM UNHAS, 2004).

Kandungan tersuspensi material Sungai Jeneberang sangat tinggi khususnya sesudah hujan. Kandungan bahan tersuspensi yang tertinggi tercatat sebesar 15262 mg/liter pada pengamatan akhir bulan Desember 1988. Hal tersebut ekuivalen dengan nilai sedimen yield sebesar  $1500 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{tahun}$ .

Kenyataan tingginya kandungan material tersuspensi Sungai Jeneberang dan besarnya fluktuasi debit maupun kandungan mineral tersuspensi antara musim hujan dan kemarau, menggambarkan kondisi hidrolis DAS Jeneberang yang kritis. Hasil observasi di lapangan menunjukkan rendahnya ketertutupan lahan dan tinggi kepekaan erosi tanah di kawasan DAS. Keadaan ini akan mempengaruhi tingkat

sedimentasi dan sangat tidak menguntungkan bagi kesinambungan fungsi dan potensial waduk.



Gambar 3.2 (a) Tampak samping Bendungan Bili-bili, (b) Pintu masuk Bendungan Bili-bili

## B. METODE PENGUMPULAN DATA

Metode pengumpulan data yang digunakan dalam studi ini yaitu data sekunder. Data tersebut diperoleh dari catatan-catatan yang telah ada maupun dengan pengukuran langsung di lapangan. Data ini diperoleh dari instansi yang terkait yaitu Balai Besar Wilayah Sungai Pompengan Jeneberang (BBWSPJ).

## C. ANALISIS SEDIMENTASI

Berdasarkan angkutan sedimen yang terjadi maka debit angkutan sedimen layang dihitung dengan rumus (Soewarno, 2000).

$$Q_s = 0,0864 CQ_w \dots \dots \dots (2)$$

Dimana:

$Q_s$  = Debit angkutan sedimen (ton/hari)

C = Konsentrasi sedimen (mg/l)

Qw = Debit sungai ( $m^3$ /detik)

0.0864 = Konversi satuan

Berdasar daftar elevasi dan luas dapat dihitung volume ruang dengan rumus limas terpancung sebagai berikut.

$$\text{Vol} = (A_1 + A_2 + (A_1 \times A_2)^{0,5}) \times H / 3 \dots\dots\dots(5)$$

Dengan :

A1 dan A2 adalah luas bawah dan luas atas

H adalah tinggi atau beda elevasi luas atas dan luas bawah

**D. BANGUNAN PENGENDALI SEDIMEN DI DAS JENEBERANG**

1. Bangunan Sabo Dam 7.1 - Sabo Dam 7.7

Pembuatan Sabo Dam mulai 31 Agustus 2005 - 30 Maret 2012

Terletak pada lokasi yang berdekatan (seri) sehingga memiliki permasalahan kerusakan yang relatif sama yaitu sedimen yang tertampung pada bangunan sudah mencapai puncak mercu sabo dan gerusan pada main dam akibat limpasan sedimen. Selain daripada itu, lebar sungai mengalami penyempitan karena terjadi penumpukan sedimen besar di pinggiran sungai. (Lampiran Gambar Sabo Dam).

2. Bangunan Sabo Dam CD.1 - Sabo Dam CD.4

Pembuatan Sabo Dam mulai 20 November 2007 - 15 Desember 2008

Terletak pada lokasi yang berdekatan (seri) di hilir bangunan Sabo Dam 7 Sungai Jeneberang.



Masalah yang terjadi pada keempat sabo dam ini relative sama dengan bangunan Sabo Dam 7.1 - Sabo Dam 7.7 adalah sedimen yang tertampung sudah mencapai puncak mercu, gerusan pada main dam, dan di sisi kiri dan kanan sungai mengalami penumpukan sedimen.

3. Bangunan Sabo Dam KD.1 - Sabo Dam KD.4

Pembuatan Sabo Dam mulai 21 Agustus 2007 - 26 September 2011

Terletak pada lokasi yang berdekatan (seri) di hilir bangunan Sabo Dam CD Sungai Jeneberang. Permasalahan yang terjadi adalah penuhnya tampungan sedimen, gerusan pada main dam, dan kerusakan pada apron, sayap dan tebing.

4. Bangunan Sabo Dam SP.1 - Sabo Dam SP.5

Terletak pada lokasi berdekatan (seri). Masalah yang terjadi adalah mengalami kerusakan patahan/retak pada bangunan sabo.

**E. PERENCANAAN BANGUNAN SEDIMEN SEBELUM BENCANA DAN SETELAH BENCANA**

Sebelum terjadinya Longsor Kaldera di Gunung Bawakaraeng, Waduk Bili-bili memiliki bangunan sedimentasi sebanyak 7 buah, yaitu Sabo Dam SP-1, Sabo Dam SP-2, Sabo Dam SP-3, Sabo Dam SP-4, Sabo Dam SP-5, Sabo Dam 6 (Salo Malino), dan Sabo Dam 8 (Salo Kausisi).

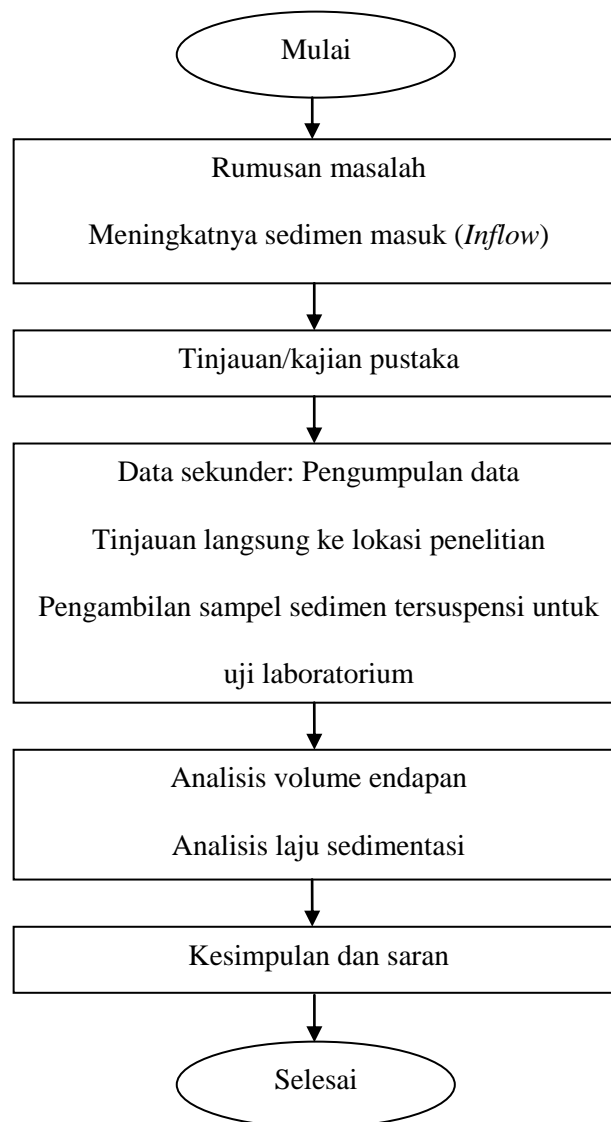
Akibat bencana tersebut, kenaikan sedimentasi meningkat drastis dan menyebabkan kerusakan lingkungan sekitar sungai, bangunan penahan sedimen, bahkan rumah warga.

Untuk menghindari bencana berikutnya, maka direncanakan pembuatan bangunan sedimen dari hulu Sungai Jeneberang yang berada di Gunung Bawakaraeng hingga perbaikan infrastruktur yang telah ada. Bangunan yang direncanakan tersebut adalah Sabo Dam 7.1 - Sabo Dam 7.7, Sabo Dam CD.1 - Sabo Dam CD.4, dan Sabo Dam KD.1 - Sabo Dam KD.4. (Gambar 3.3)



## F. DIAGRAM ALIR / FLOWCHART PENELITIAN

Diagram alir / flowchart penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.4 di bawah ini.



Gambar 3.4 Flowchart penelitian

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **A. Hasil Volume Sedimentasi**

Hasil sedimen setelah runtuhnya dinding kaldera, menghasilkan volume yang signifikan. Dimana tahun 2004-2005 mengalami kenaikan, mengakibatkan bangunan mengalami kerusakan dan terjadinya aliran debris di sepanjang sungai Jeneberang. Sehingga pada tahun 2005, dimulai penambahan bangunan di hilir sungai guna mengendalikan beban sedimen yang mengalir di sepanjang sungai dan mencegah terjadinya aliran debris bencana di hulu.

Berdasarkan sumber yang diperoleh, tidak ada data yang tersedia sebelum keruntuhan sehingga diasumsikan nol. Sebelum keruntuhan Juli 2004, volume sedimentasi diperkirakan dengan perbandingan ketinggian dasar sungai asli dan disurvei penampang di tahun 2004.

#### **B. Analisis Volume Tampungan Waduk**

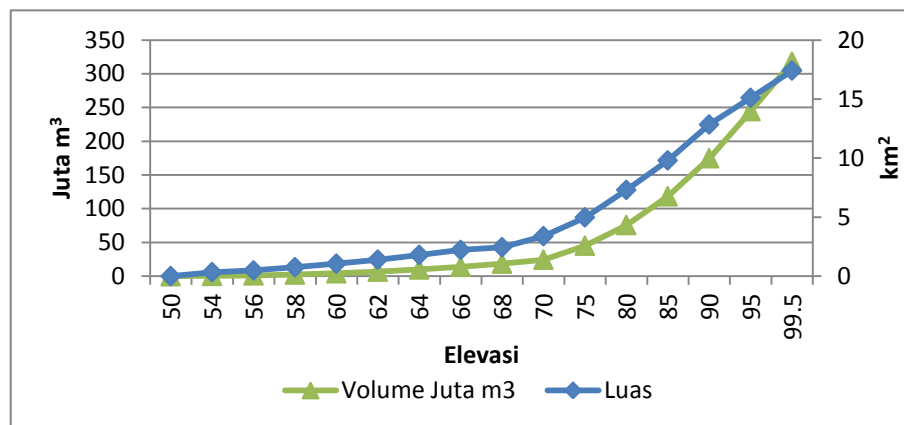
Volume tampungan waduk dihitung berdasarkan garis kontur berupa poligon tertutup dengan software Cad dapat dihitung luas. Setelah didapatkan nilai elevasi dan luas, dapat dihitung volume ruang dengan rumus limas terpancung.

$$\begin{aligned} V_{(2008)} &= [A_1 + A_2 + (A_1 \times A_2)^{0,5}] \times H/3 \\ &= [0.00 + 0.461 + (0.00 \times 0.461)^{0,5}] \times \frac{(54-50)}{3} = 0,615 \text{ juta m}^3 \end{aligned}$$

Berdasarkan analisis di atas, hasil yang diperoleh pada elevasi 54 m (ketinggian 4 m dari elevasi dasar waduk ) adalah 0,615 juta m<sup>3</sup>.

Tabel 4.1 Elevasi, luas dan volume waduk tahun 2008

Elevasi (m)	Luas km <sup>2</sup>	Volume Juta m <sup>3</sup>
50	0	0
54	0.339	0.452
56	0.487	1.274
58	0.759	2.510
60	1.062	4.322
62	1.401	6.777
64	1.803	9.973
66	2.218	13.987
68	2.45	18.653
70	3.388	24.465
75	4.979	45.256
80	7.304	75.778
85	9.803	118.393
90	12.844	174.839
95	15.104	244.633
99.5	17.412	317.733

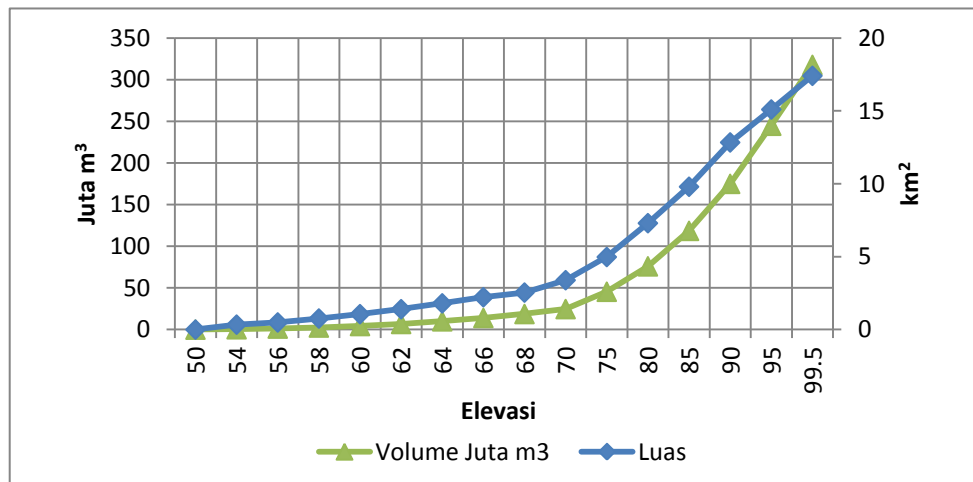


Gambar 4.1 Grafik hubungan elevasi, luas dan volume waduk tahun 2008

Berdasarkan tabel dan grafik di atas, volume pada tahun 2008 di ketinggian elevasi 99,5 m (muka air normal) dengan luas 17,41 km<sup>2</sup> adalah 317,733 juta m<sup>3</sup>.

Tabel 4.2 Hubungan elevasi, luas dan volume waduk tahun 2010

Elevasi (m)	Luas km <sup>2</sup>	Volume Juta m <sup>3</sup>
50	0	0.000
54	0.34	0.453
56	0.49	1.279
58	0.76	2.519
60	1.06	4.331
62	1.4	6.783
64	1.8	9.974
66	2.22	13.987
68	2.54	18.743
70	3.39	24.653
75	4.98	45.451
80	7.3	75.967
85	9.8	118.564
90	12.84	174.993
95	15.1	244.767
99.5	17.41	317.852

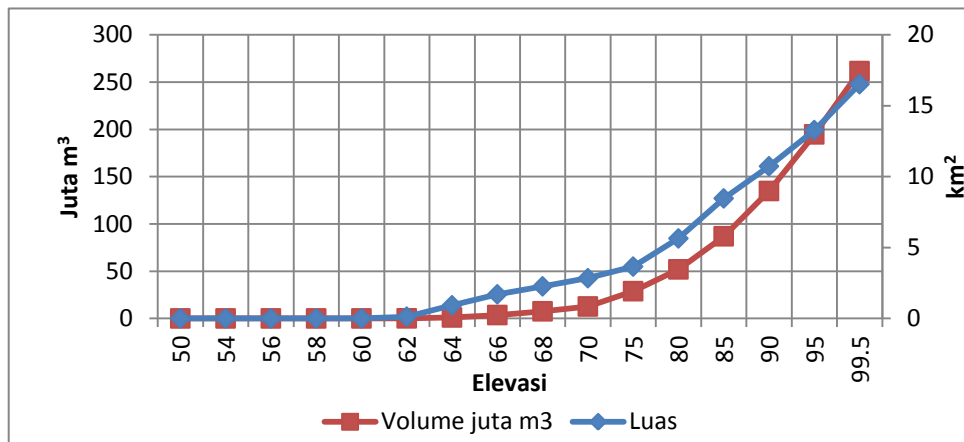


Gambar 4.2 Grafik hubungan elevasi, luas dan volume waduk tahun 2010

Berdasarkan tabel dan grafik di atas, volume pada tahun 2010 di ketinggian elevasi 99,5 m (muka air normal) dengan luas 17,41 km<sup>2</sup> adalah 317,852 juta m<sup>3</sup>.

Tabel 4.3 Hubungan elevasi, luas dan volume waduk tahun 2012

Elevasi (m)	Luas Km <sup>2</sup>	Volume Juta m <sup>3</sup>
50	0	0
54	0	0
56	0	0
58	0	0
60	0	0
62	0.127	0.085
64	0.927	1.016
66	1.702	3.606
68	2.261	7.556
70	2.838	12.644
75	3.656	28.836
80	5.64	51.897
85	8.463	86.917
90	10.73	134.788
95	13.283	194.707
99.5	16.517	261.625



Gambar 4.3 Grafik hubungan elevasi, luas dan volume waduk tahun 2012

Berdasarkan tabel dan grafik di atas, volume pada tahun 2012 di ketinggian elevasi 99,5 m (muka air normal) dengan luas 16,517 km<sup>2</sup> adalah 261,625 juta m<sup>3</sup>.



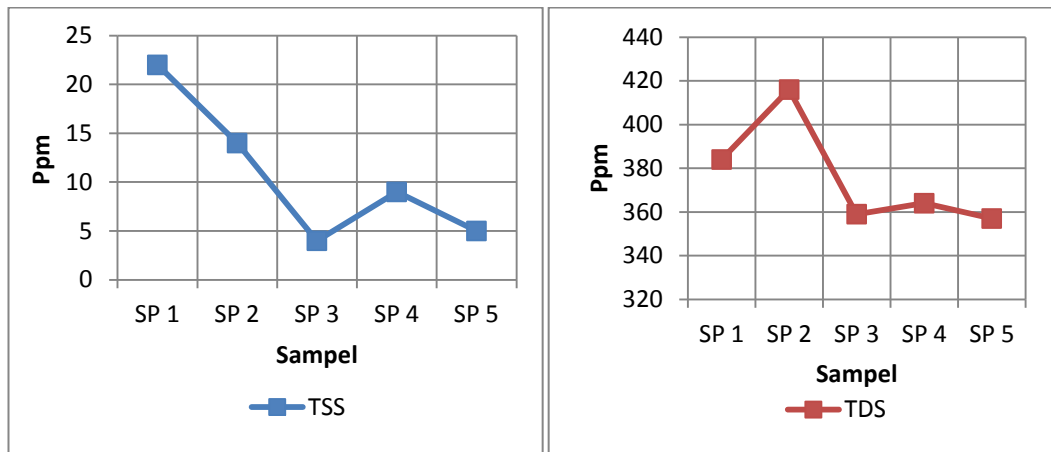
### C. Estimasi Analisis Laju Sedimentasi

Sedimentasi di Waduk Bili-bili menjadi luar biasa karena adanya longsor besar di Gunung Bawakaraeng pada tahun 2004. Laju sedimentasi di waduk dapat dihitung berdasar volume sedimen dari hasil pengukuran. Tetapi data pengukuran yang didapat adalah sesudah terjadi longsor, sedangkan untuk sebelum longsor karena tidak ada data pengukuran maka didekati dengan laju sedimentasi rencana. (Sumber : Laporan Survey, Analisis, dan Evaluasi Sedimentasi Waduk). Untuk menghitung laju sedimentasi berdasarkan rumus (5) Suripin (2002) membutuhkan nilai konsentrasi sedimen dan debit masuk (*inflow discharge*).

Pengambilan sampel di Sungai Jeneberang untuk menentukan nilai dari sedimen tersuspensi dalam perumusan laju sedimentasi (2).

Tabel 4.4 Data hasil laboratorium konsentrasi sedimen

No.	Kode Sampel	Parameter	
		TSS (ppm)	TDS ( ppm)
1	SP 1	22	384
2	SP 2	14	416
3	SP 3	4	359
4	SP 4	9	364
5	SP 5	5	357

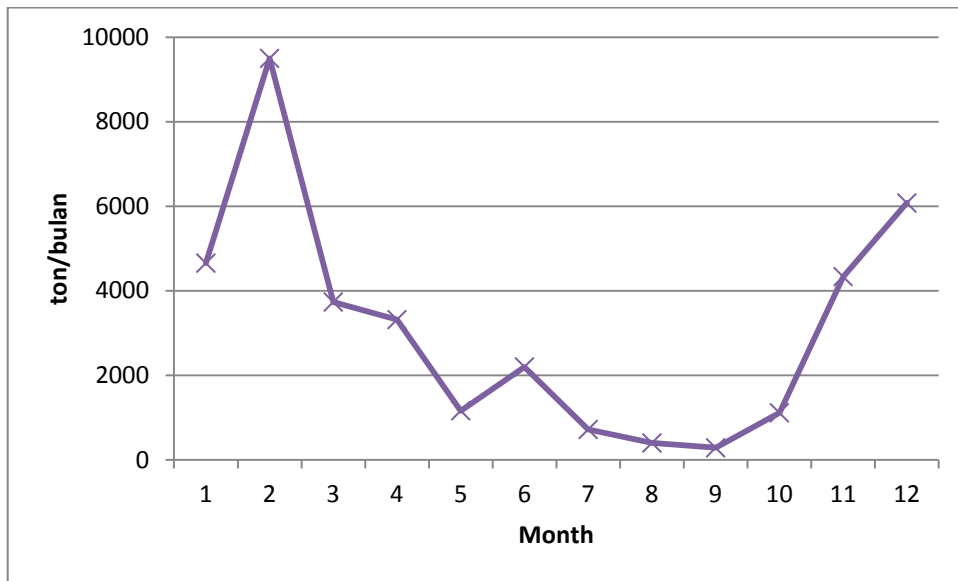


Gambar 4.4 Grafik data hasil laboratorium konsentrasi sedimen

Dari hasil laboratorium, parameter TSS (*Total Suspended Sedimentation*) yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil tertinggi diambil untuk perumusan (2) yaitu kode sampel SP 1 dengan nilai 22 ppm atau 22 mg/l.

Tabel 4.5 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 1999

Month	Elevasi (m)	Inflow discharge $m^3/s$	Laju Sedimentasi ton/bulan
1	94.3	81.62	4654.30
2	98.8	166.56	9497.92
3	99.4	65.49	3734.50
4	99.4	58.19	3318.23
5	99.4	20.40	1163.29
6	99.4	38.57	2199.44
7	99.0	12.63	719.97
8	96.9	7.03	400.69
9	95.0	5.02	286.15
10	94.2	19.55	1115.09
11	95.2	76.03	4335.72
12	98.3	106.59	6077.96
$\Sigma$		657.67	16298.30

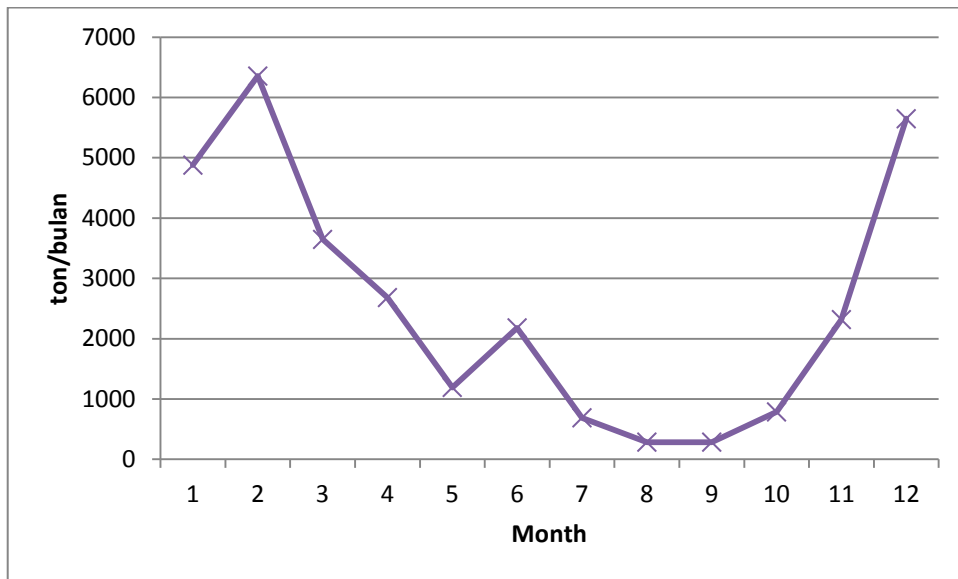


Gambar 4.5 Grafik laju sedimentasi tahun 1999

Pada data di atas, kenaikan laju sedimentasi pada akhir tahun 1999 yaitu bulan November sebesar 14,54 %. Puncak kenaikan tertinggi 9497,92 ton/bulan pada bulan Februari tahun 1999 dengan total laju sedimentasi adalah 16298,30 ton/tahun.

Tabel 4.6 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2000

Month	Elevasi (m)	Inflow Discharge m <sup>3</sup> /s	Laju Sedimentasi ton/bulan
1	99.4	85.53	4877.39
2	102.0	111.43	6354.18
3	99.4	63.95	3646.40
4	73.7	47.04	2682.31
5	99.4	20.91	1192.38
6	99.4	38.22	2179.73
7	99.0	12.09	689.22
8	96.7	5.00	285.39
9	94.1	5.00	285.16
10	92.0	13.78	785.76
11	90.2	40.63	2317.16
12	93.0	99.03	5647.31
Σ		542.62	30942.41

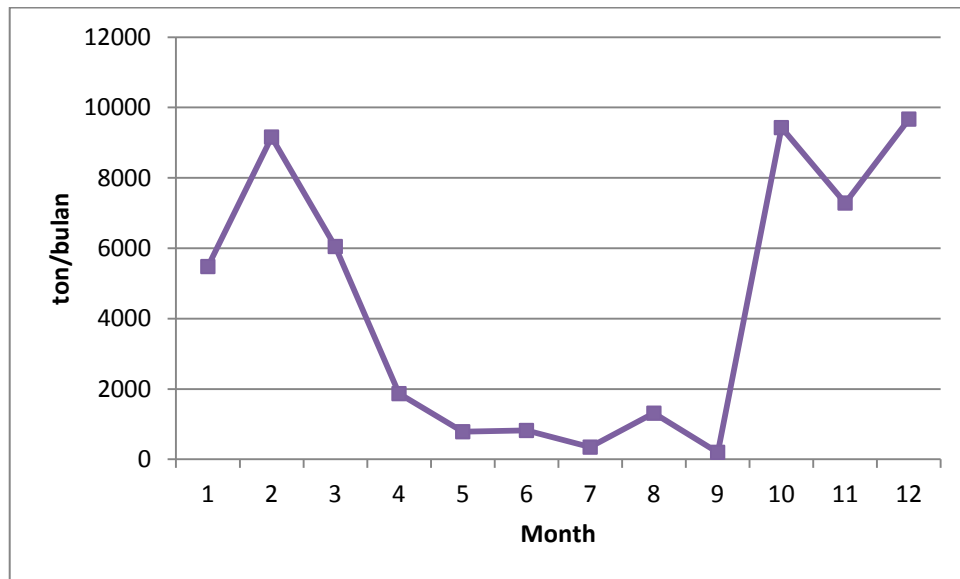


Gambar 4.6 Grafik laju sedimentasi tahun 2000

Pada data di atas, kenaikan laju sedimentasi pada awal tahun 2000 sebesar 6,16 %, dan di akhir tahun sebesar 9,32 %. Puncak kenaikan tertinggi 6354,18 ton/bulan pada bulan Februari. Total laju sedimentasi tahun 2000 yaitu 30942,41 ton/tahun.

Tabel 4.7 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2001

Month	Elevasi (m)	Inflow Discharge m <sup>3</sup> /s	Laju Sedimentasi ton/bulan
1	94.3	96.09	5479.52
2	97.8	160.63	9159.77
3	99.3	106.08	6049.19
4	99.4	32.74	1867.06
5	98.6	13.76	784.73
6	96.2	14.38	820.22
7	93.8	6.09	347.35
8	90.3	23.00	1311.76
9	87.0	3.49	198.97
10	84.4	165.35	9428.69
11	84.4	127.75	7284.82
12	96.5	169.58	9670.13
Σ		918.95	52402.20

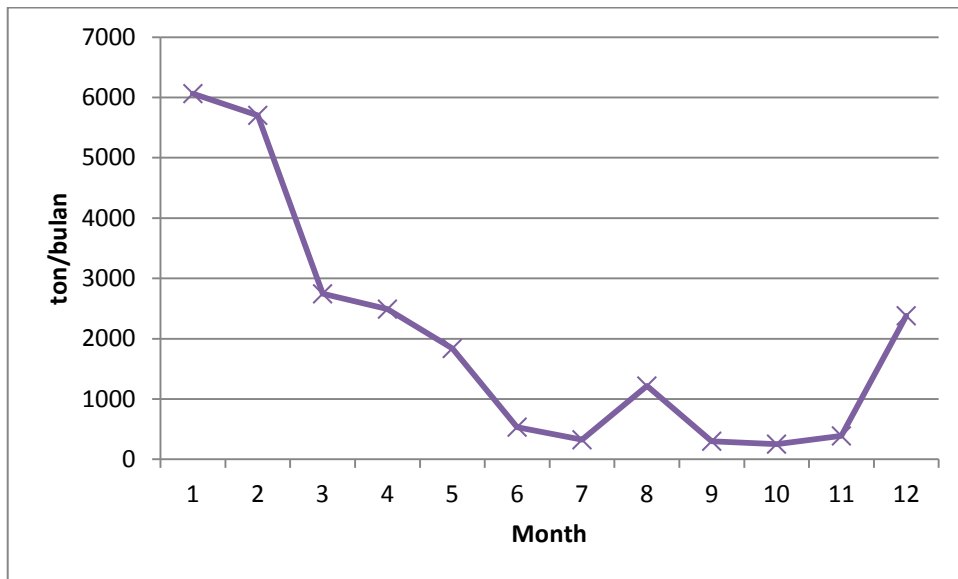


Gambar 4.7 Grafik laju sedimentasi tahun 2001

Pada data di atas, terjadi kenaikan yang signifikan di bulan Oktober sebesar 47,08 %. Puncak tertinggi laju sedimentasi tahun 2001 pada bulan Desember yaitu 9670,13 ton/bulan dengan laju sedimentasi adalah 52402,20 ton/tahun.

Tabel 4.8 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2002

Month	Elevasi (m)	Inflow Discharge m <sup>3</sup> /s	Laju Sedimentasi ton/bulan
1	99.4	106.33	6063.51
2	94.4	100.02	5703.32
3	16.0	48.12	2744.20
4	99.4	43.67	2490.00
5	99.4	32.23	1837.66
6	96.9	9.36	533.95
7	94.7	5.70	325.10
8	91.5	21.31	1215.35
9	88.0	5.27	300.35
10	82.0	4.42	252.10
11	78.6	6.81	388.45
12	82.3	41.75	2380.98
Σ		425.00	24234.97

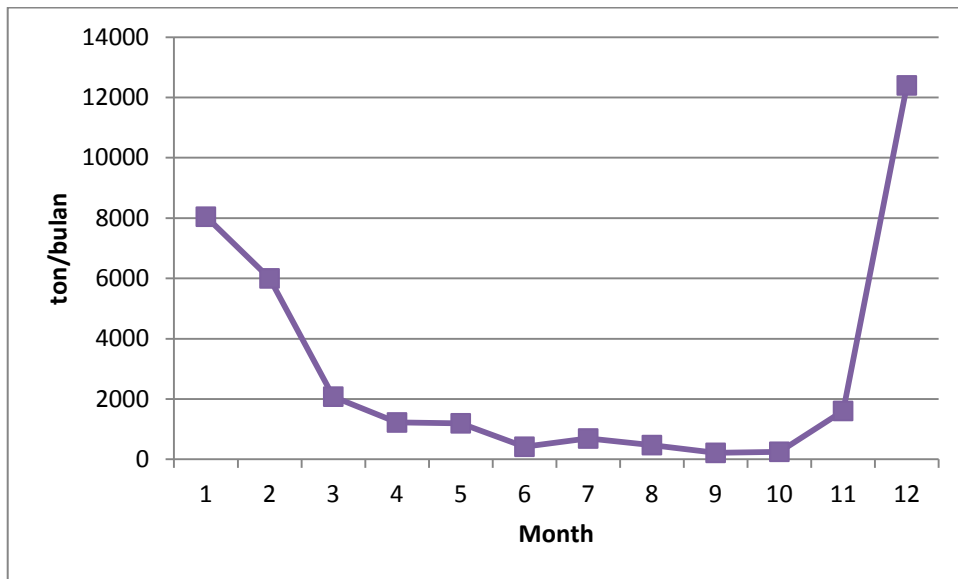


Gambar 4.8 Grafik laju sedimentasi tahun 2002

Pada grafik di atas, terjadi kenaikan laju sedimentasi di awal tahun sedangkan akhir tahun 2002 kenaikan laju tidak mengalami kenaikan seperti tahun-tahun sebelumnya. Puncak tertinggi terjadi di bulan Januari yaitu 6063,51 ton/bulan dengan total laju sedimentasi adalah 24234,97 ton/tahun.

Tabel 4.9 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2003

Month	Elevasi (m)	Inflow Discharge $m^3/s$	Laju Sedimentasi ton/bulan
1	93.4	141.08	8045.22
2	94.2	105.23	6000.39
3	96.1	36.45	2078.46
4	99.4	21.44	1222.71
5	99.1	20.96	1194.94
6	96.9	7.32	417.26
7	94.0	12.11	690.70
8	90.6	8.28	472.15
9	88.0	3.76	214.65
10	85.5	4.39	250.15
11	85.5	28.14	1604.56
12	90.0	217.43	12398.98
$\Sigma$		606.59	34590.16

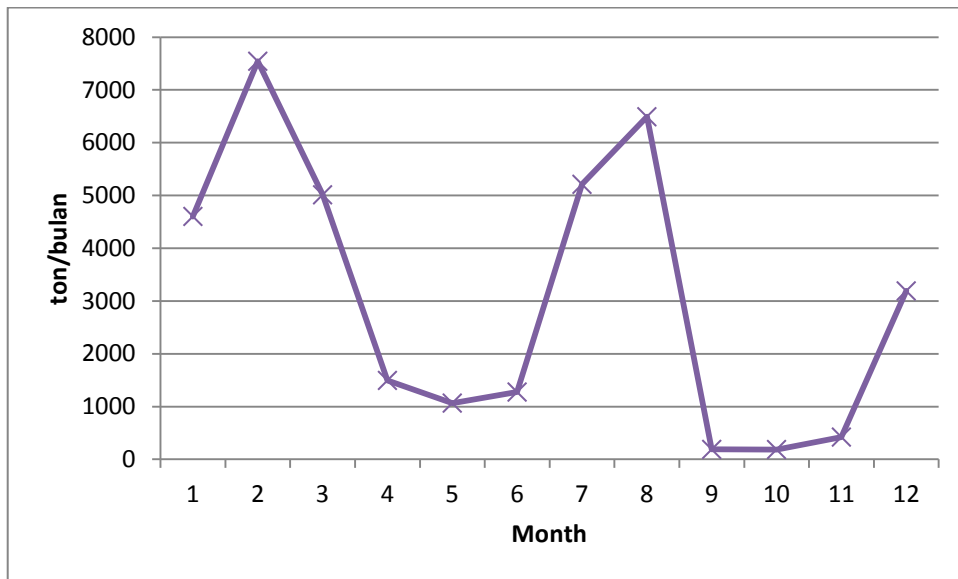


Gambar 4.9 Grafik laju sedimentasi tahun 2003

Pada data di atas, kenaikan laju sedimentasi pada akhir tahun 2003 dari 1604,56 ton/bulan hingga 12398,98 ton/bulan dengan persentase sebesar 22,69 %. Total laju sedimentasi adalah 34590,16 ton/tahun.

Tabel 4.10 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2004

Month	Elevasi (m)	Inflow Discharge $m^3/s$	Laju Sedimentasi ton/bulan
1	96.2	80.71	4602.60
2	99.3	132.27	7542.53
3	99.2	87.90	5012.56
4	98.5	26.22	1495.39
5	98.3	18.69	1066.00
6	96.6	22.36	1275.18
7	93.1	91.38	5211.03
8	89.7	113.84	6491.67
9	87.0	3.32	189.04
10	85.0	3.27	186.38
11	83.2	7.40	422.22
12	81.5	55.97	3191.43
$\Sigma$		643.34	36686.02



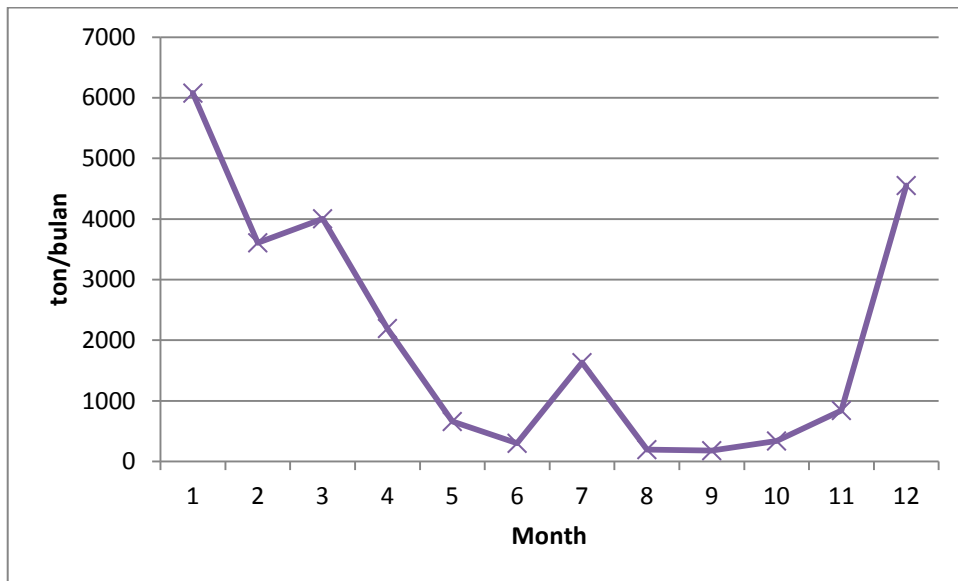
Gambar 4.10 Grafik laju sedimentasi tahun 2004

Pada data di atas, kenaikan laju sedimentasi pada awal tahun 2004 yaitu bulan Januari hingga bulan Maret, namun mengalami peningkatan pesat di bulan Juli-Agustus. Puncak kenaikan tertinggi 6491,67 ton/bulan pada bulan Agustus dengan total laju sedimentasi adalah 36686,02 ton/tahun.

Tabel 4.11 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2005

Month	Elevasi (m)	Inflow Discharge $m^3/s$	Laju Sedimentasi ton/bulan
1	87.9	106.56	6076.58
2	97.2	63.26	3607.54
3	99.3	70.22	4004.04
4	99.2	38.47	2193.76
5	97.9	11.55	658.87
6	94.3	5.26	299.78
7	89.5	28.59	1630.60
8	85.7	3.43	195.55
9	83.7	3.13	178.39
10	82.6	5.93	338.02
11	83.1	14.74	840.65
12	88.4	79.83	4552.02
$\Sigma$		430.97	24575.81



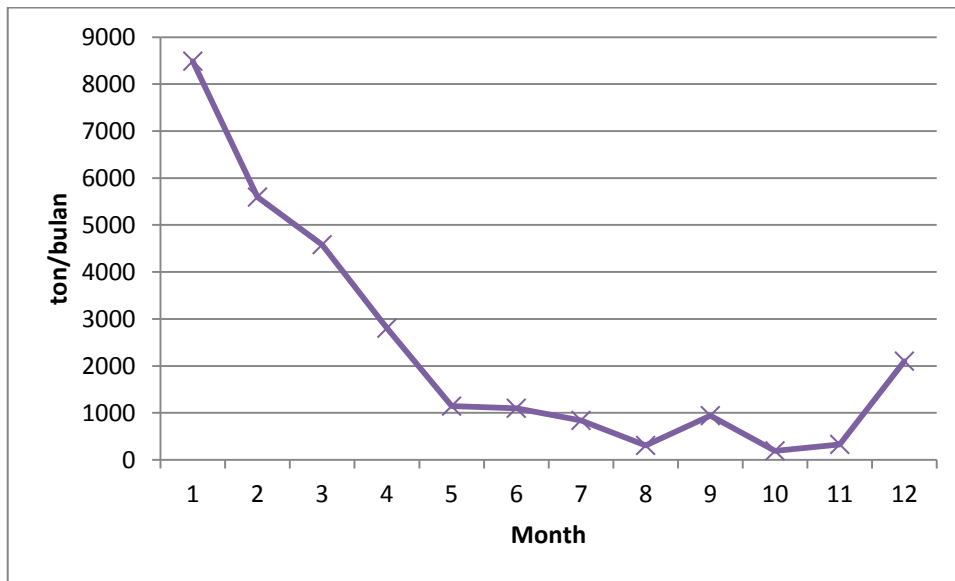


Gambar 4.11 Grafik laju sedimentasi tahun 2005

Pada data di atas, kenaikan laju sedimentasi pada awal tahun 2005 yaitu bulan Januari hingga bulan Maret. Sedangkan pada akhir tahun bulan Desember terjadi kenaikan 18,4 %. Puncak kenaikan tertinggi pada bulan Januari yaitu 6076,58 ton/bulan dengan total laju sedimentasi adalah 24575,81 ton/tahun.

Tabel 4.12 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2006

Month	Elevasi (m)	Inflow Discharge $m^3/s$	Laju Sedimentasi ton/bulan
1	98.0	148.87	8489.01
2	99.3	98.14	5596.15
3	99.0	80.36	4582.30
4	99.3	49.16	2803.38
5	98.6	20.08	1145.00
6	97.4	19.28	1099.48
7	95.1	14.76	841.54
8	90.7	5.41	308.36
9	86.3	16.52	941.88
10	82.7	3.39	193.35
11	79.1	5.78	329.75
12	76.9	36.87	2102.55
$\Sigma$		498.61	28432.76

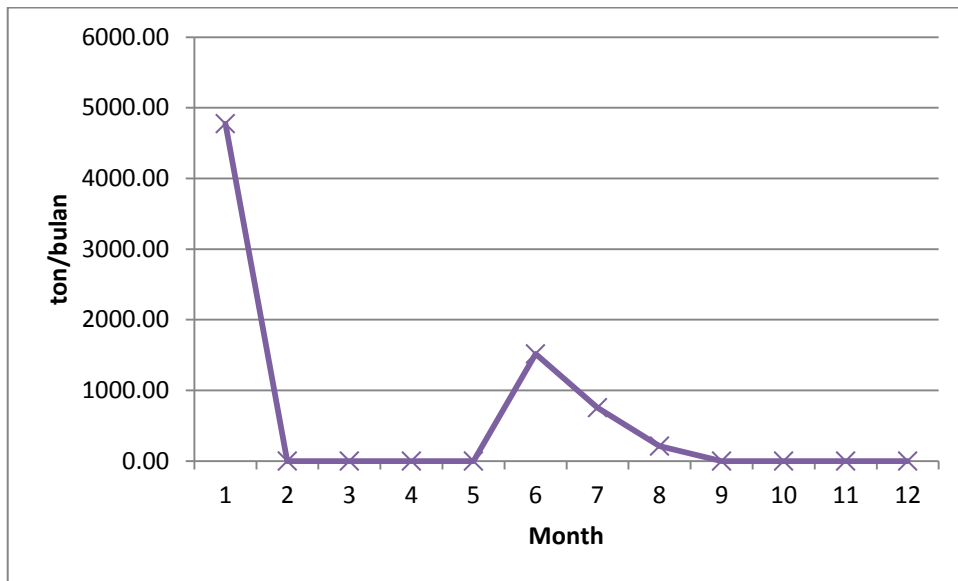


Gambar 4.12 Grafik laju sedimentasi tahun 2006

Pada tahun 2006, grafik laju sedimentasi tertinggi pada bulan Januari yaitu 8489,01 ton/bulan dengan total laju sedimentasi adalah 28432,76 ton/tahun.

Tabel 4.13 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2007

Month	Elevasi (m)	Inflow Discharge m <sup>3</sup> /s	Laju Sedimentasi ton/bulan
1	94.9	83.75	4775.90
2	99.3	0.00	0.00
3	98.9	0.00	0.00
4	99.2	0.00	0.00
5	97.4	0.00	0.00
6	94.8	26.61	1517.34
7	93.9	13.25	755.78
8	89.7	3.71	211.74
9	86.1	0.00	0.00
10	83.7	0.00	0.00
11	82.8	0.00	0.00
12	88.1	0.00	0.00
Σ		127.33	7260.75

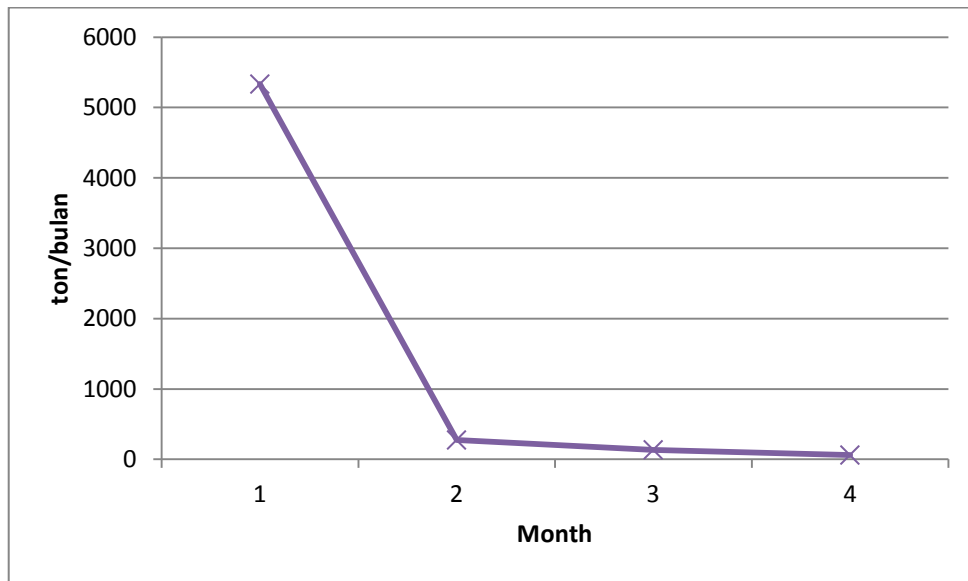


Gambar 4.13 Grafik laju sedimentasi tahun 2007

Pada tahun 2007, grafik tertinggi laju sedimentasi bulan Januari adalah 4775,9 ton/bulan. Namun pada bulan Feb - Mei dan bulan Sept - Des tidak mengalami pergerakan laju sedimentasi ataupun adanya data debit masuk. Total laju sedimentasi adalah 7260,75 ton/tahun.

Tabel 4.14 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2008

Month	Elevasi (m)	Inflow Discharge $m^3/s$	Laju Sedimentasi ton/bulan
1	99.1	93.52	5333.142
2	99.3	144.82	8258.216
3	99.1	71.49	4076.485
4	98.7	32.19	1835.489
$\Sigma$		342.02	19503.332

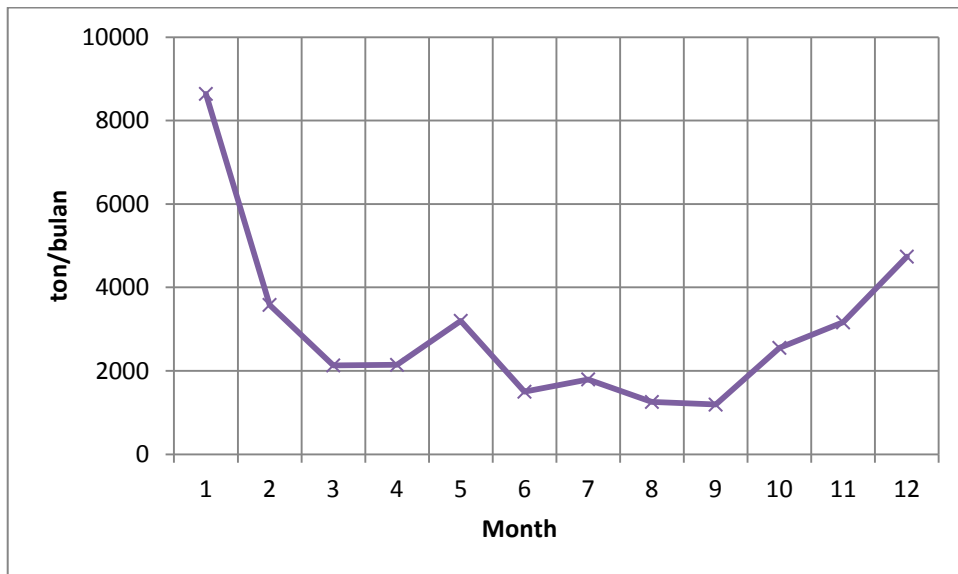


Gambar 4.14 Grafik laju sedimentasi tahun 2008

Pada tahun 2008, grafik tertinggi laju sedimentasi bulan Januari adalah 8258,216 ton/bulan dengan laju sedimentasi adalah 19503,332 ton/tahun.

Tabel 4.15 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2010

Month	Elevasi (m)	Inflow Discharge $m^3/s$	Laju Sedimentasi ton/bulan
1	94.17	151.52	8640.02
2	99.36	62.81	3581.96
3	98.10	37.39	2131.99
4	97.54	37.62	2145.51
5	97.21	56.13	3200.76
6	96.69	26.33	1501.40
7	96.69	31.52	1797.15
8	96.79	22.03	1256.24
9	94.71	20.90	1192.06
10	94.04	44.77	2552.75
11	97.97	55.48	3163.71
12	99.24	83.10	4738.82
$\Sigma$		629.60	35902.37

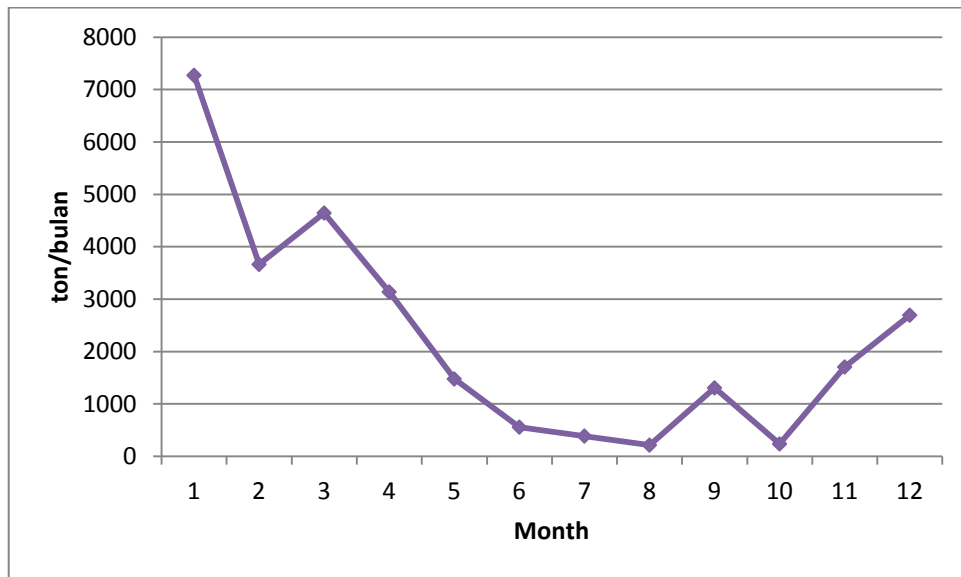


Gambar 4.15 Grafik laju sedimentasi tahun 2010

Pada grafik di atas, bulan Januari adalah puncak laju sedimentasi tertinggi dengan nilai 8640,02 ton/bulan dengan total laju sedimentasi adalah 35902,37 ton/tahun pada tahun 2010.

Tabel 4.16 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2011

Month	Elevasi (m)	Inflow Discharge $m^3/s$	Laju Sedimentasi ton/bulan
1	99.22	127.51	7271.06
2	99.24	64.23	3662.82
3	99.32	81.42	4643.14
4	99.26	55.01	3137.12
5	97.56	25.89	1476.16
6	93.91	9.77	556.97
7	96.69	6.79	387.04
8	89.31	3.75	214.03
9	78.27	22.90	1306.09
10	74.67	4.14	236.15
11	75.78	29.90	1704.91
12	83.79	47.24	2694.05
$\Sigma$		478.56	27289.55

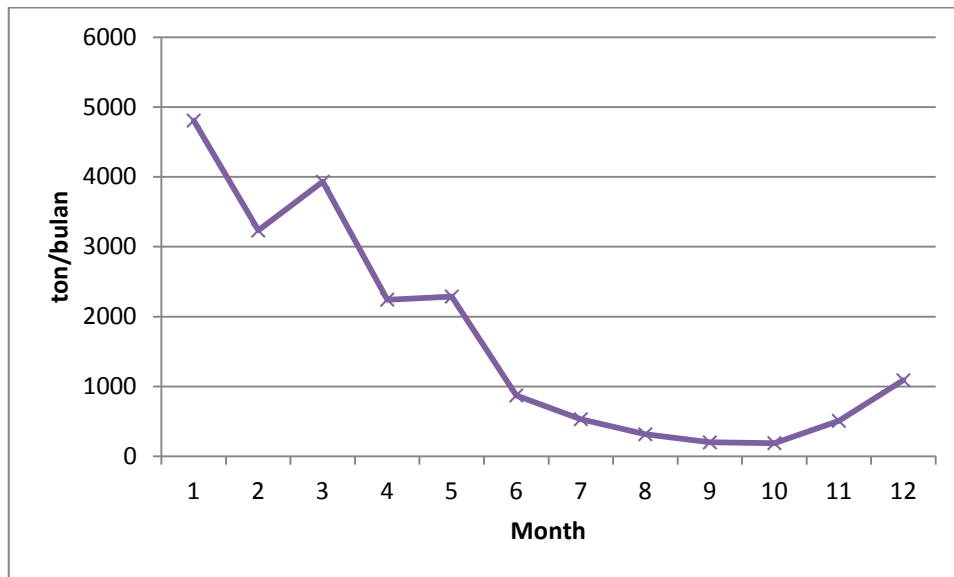


Gambar 4.16 Grafik laju sedimentasi tahun 2011

Pada grafik di atas, tahun 2011 puncak tertinggi laju sedimentasi pada bulan Januari sebesar 7271,06 ton/bulan dengan total laju sedimentasi adalah 27289,55 ton/tahun.

Tabel 4.17 Elevasi, laju sedimentasi, dan debit masuk tahun 2012

Month	Elevasi (m)	Inflow Discharge m <sup>3</sup> /s	Laju Sedimentasi ton/bulan
1	96.32	84.27	4805.56
2	99.17	56.69	3232.82
3	99.34	68.92	3930.13
4	99.27	39.33	2242.52
5	99.01	40.10	2286.48
6	97.27	15.28	871.12
7	94.60	9.32	531.33
8	89.75	5.54	315.96
9	84.66	3.51	199.98
10	81.02	3.31	188.50
11	78.44	8.90	507.48
12	79.31	19.10	1089.25
Σ		354.26	20201.15



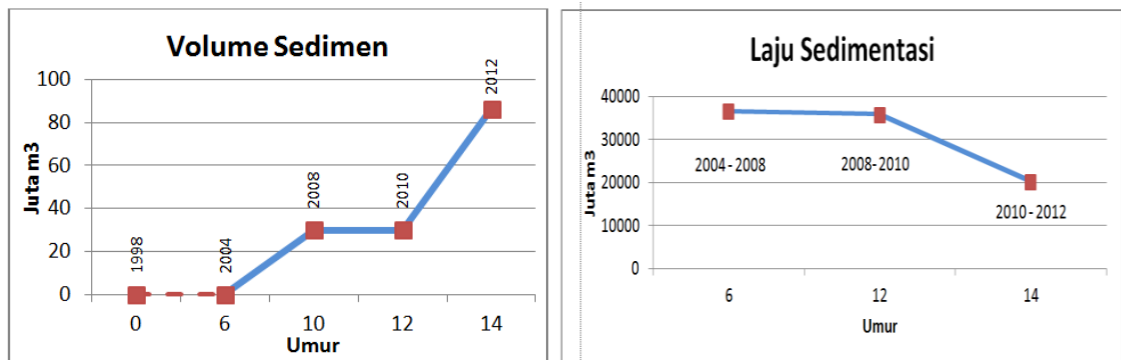
Gambar 4.17 Grafik laju sedimentasi tahun 2012

Pada grafik di atas, awal tahun 2012 mengalami puncak tertinggi sebesar 4805,56 ton/bulan dengan total laju sedimentasi adalah 20201,15 ton/tahun.

Berikut ini ditampilkan perubahan volume dan perubahan laju sedimentasi di waduk, dalam tabel dan gambar.

Tabel 4.18 Perubahan volume dan laju sedimentasi

Tahun	Umur	Perubahan Volume (Terlampir)	Laju Sedimentasi
	(tahun)	(juta m <sup>3</sup> )	(ton/tahun)
1998	0	0	0
2004	6	0	36686.02
2008	10	30.079	5805.48
2010	12	29.960	35902.37
2012	14	86.187	20201.15



Gambar 4.19 Grafik volume dan perubahan laju sedimentasi

Berdasarkan Gambar 4.19, terlihat menurunnya grafik laju sedimentasi dapat dinyatakan bahwa bangunan sedimentasi yang telah direnovasi dan dibangun di sepanjang Sungai Jeneberang berfungsi dengan baik sehingga dapat menahan laju sedimentasi sebesar 13,38 % dihitung sejak tahun 2008.

Hasil sedimentasi setelah runtuhnya dinding kaldera menghasilkan volume sedimen yang signifikan, utamanya di tahun 2004 - 2005 mengalami peningkatan. Akibat longoran tersebut terjadi aliran debris di jalur sungai dan merusak bangunan penahan sedimen di sepanjang sungai Jeneberang. Sehingga pada tahun 2005, dimulai perbaikan serta penambahan bangunan di hulu sungai guna mengendalikan beban sedimen dan mencegah terjadinya aliran debris bencana di hilir sungai.

Persentase sedimentasi disetiap tahunnya mengalami penurunan utamanya di tahun 2011. Dimana bangunan-bangunan penahan sedimen sudah mulai rampung tahapan penyelesaian. Namun erosi yang terjadi di DAS akan membuat laju sedimentasi rencana akan jauh berbeda.



## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **A. Kesimpulan**

1. Volume endapan pada tahun 2008 pada ketinggian elevasi 99,5 m (muka air normal) dengan luas 317,733 juta m<sup>3</sup>. Volume endapan pada tahun 2010 pada ketinggian elevasi 99,5 m dengan luas 317,852 juta m<sup>3</sup>. Volume endapan pada tahun 2012 pada ketinggian elevasi 99,5 m dengan luas 261,625 juta m<sup>3</sup>. Dengan perbedaan persentase sebesar 1,97 %, volume endapan yang terjadi di Waduk Bili-bili mengalami kenaikan dan menyebabkan berkurangnya kapasitas daya tampung waduk.
2. Laju sedimentasi di Waduk Bili-bili mengalami penurunan yang signifikan pasca pembangunan bangunan pengendali sedimen. Sebelum longsor Dinding Kaldera, laju sedimentasi sebesar 24234,97 ton/tahun pada tahun 2002. Setelah longsor pada tahun 2004 yaitu 36686,02 ton/tahun.. Pasca pembangunan pada tahun 2011 dimana bangunan pengendali sedimen mulai rampung, laju sedimentasi mengalami penurunan sebesar 20201,15 ton/tahun dengan perbedaan persentase sebesar 6,15 %. Hasil laboratorium untuk konsentrasi sedimen adalah 22 mg/l. Nilai Cs yang dihasilkan tidak terlalu besar disebabkan karena cuaca yang cerah.

## **B. Saran**

1. Pada penelitian ini, tidak tersedianya data curah hujan di hulu sungai Jeneberang, akan tetapi menjelaskan secara langsung debit aliran yang terjadi. Maka penelitian selanjutnya, diharapkan meneliti curah yang berkaitan dengan debit sungai.
2. Pengambilan data untuk daya tampungan volume endapan waduk menggunakan metode tachimetri dan bathimetry. Dimana pada penelitian ini, tidak menjelaskan proses pengukuran situasi areal waduk dan volume sedimen yang diplotkan secara grafis menggunakan aplikasi Cad untuk menghitung luas dan volume waduk yang berhubungan dengan masing-masing elevasi.
3. Dalam pengambilan sampel sedimen tersuspensi sebaiknya dilakukan pada saat banjir atau debit tinggi.

## DAFTAR PUSTAKA

Anonim a. *Annex 3 Sediment and Turbidity Analysis*, Yachiyo Engineering CO., LTD association with IDEA Consultants, Inc., PT. DDC Consultant, PT. Tricon Jaya, PT. Bina Karya (Persero), PT. Indeso Gema Utama, PT. Purnajasa Bimapratama, PT. Barunadri Engineering Consultant, PT. Widya Graha Asana, PT. Amythas Experts & Associates, Makassar, 2008.

Anonim b. *Laporan Survey, Analisis dan Evaluasi Sedimentasi Waduk*. Inspeksi Besar Evaluasi Keamanan Bendungan Bili-Bili. PT. Aria Jasa Konsultan, Makassar, 2012.

Jmk, Dake, *Hidrolika Teknik*, Erlangga, Jakarta, 1985.

Linsley, Ray K. Franzini, Joseph B., *Teknik Sumberdaya Air*, Erlangga, Jakarta, 1994.

Linsley, Ray K. Dkk., *Hidrologi untuk Insinyur*, Erlangga, Jakarta, 1989.

Luknanto, Djoko. *Aliran Air Tanah*, UGM, Yogyakarta, 1999.

Martha W, Joyce. Adidarma, Wanny., *Mengenal Dasar-Dasar Hidrologi*, Nova, Bandung, 1982.

Sucipto. *Kajian Sedimentasi di Sungai Kaligarang Dalam Upaya Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Kaligarang*, Semarang, 2008.

Sugiarto. Sirang., *Studi Karakteristik Air Tanah Dangkal Dengan Teknik Sumur Tunggal Dan Ganda*, Universitas Hasanuddin, Makassar, 2003.

Suyono Sosrodarsono, Masateru Tominaga. *Perbaikan dan Pengaturan Sungai*. Jakarta, 2008.

Usmar, H., 2006., *Bab II Dasar Teori dan Metodologi Penelitian*.

<http://eprints.undip.ac.id>

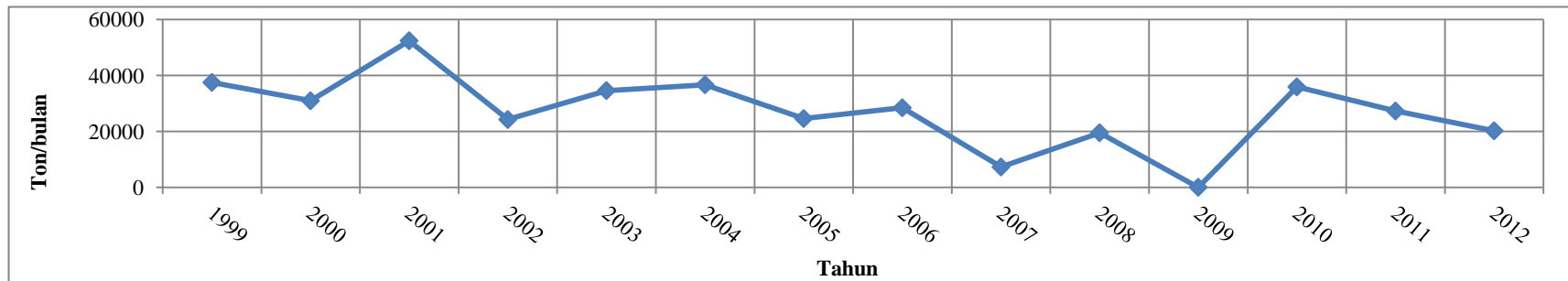
[http://eprints.undip.ac.id/33847/5/1797\\_CHAPTER\\_II.pdf](http://eprints.undip.ac.id/33847/5/1797_CHAPTER_II.pdf)

Verruijt, A., *Theory of Groundwater Flow*, Macmillan, Netherlands, 1970.

Wilson, E.M., *Hidrologi Teknik*, ITB, Bandung, 1993

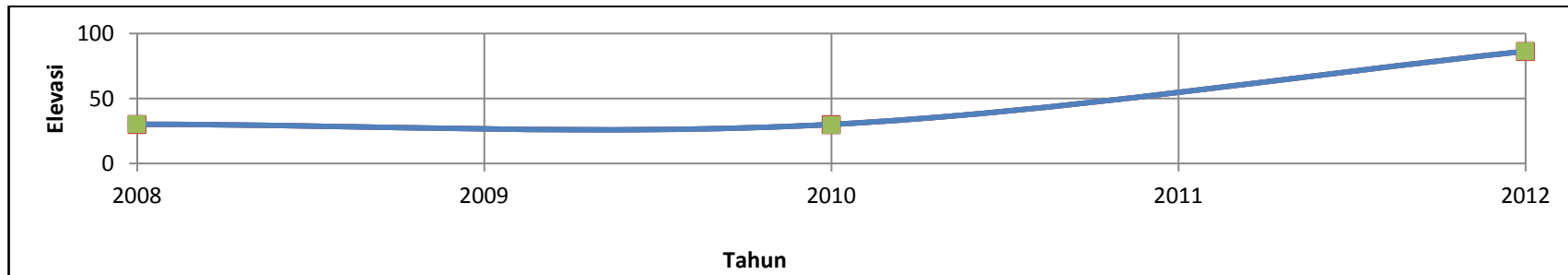
Tabel L.1 Laju sedimentasi periode 14 tahun

Bulan	Laju Sedimentasi/tahun													
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
1	4654.11	4877.39	5479.52	6063.51	8045.22	4602.60	6076.58	8489.01	4775.90	5333.14	0.00	8640.02	7271.06	4805.56
2	9497.75	6354.18	9159.77	5703.32	6000.39	7542.53	3607.54	5596.15	0.00	8258.22	0.00	3581.96	3662.82	3232.82
3	3734.51	3646.40	6049.19	2744.20	2078.46	5012.56	4004.04	4582.30	0.00	4076.49	0.00	2131.99	4643.14	3930.13
4	3318.02	2682.31	1867.06	2490.00	1222.71	1495.39	2193.76	2803.38	0.00	1835.49	0.00	2145.51	3137.12	2242.52
5	1163.29	1192.38	784.73	1837.66	1194.94	1066.00	658.87	1145.00	0.00	0.00	0.00	3200.76	1476.16	2286.48
6	2199.44	2179.73	820.22	533.95	417.26	1275.18	299.78	1099.48	1517.34	0.00	0.00	1501.40	556.97	871.12
7	719.97	689.22	347.35	325.10	690.70	5211.03	1630.60	841.54	755.78	0.00	0.00	1797.15	387.04	531.33
8	400.69	285.39	1311.76	1215.35	472.15	6491.67	195.55	308.36	211.74	0.00	0.00	1256.24	214.03	315.96
9	286.15	285.16	198.97	300.35	214.65	189.04	178.39	941.88	0.00	0.00	0.00	1192.06	1306.09	199.98
10	1115.09	785.76	9428.69	252.10	250.15	186.38	338.02	193.35	0.00	0.00	0.00	2552.75	236.15	188.50
11	4335.72	2317.16	7284.82	388.45	1604.56	422.22	840.65	329.75	0.00	0.00	0.00	3163.71	1704.91	507.48
12	6077.96	5647.31	9670.13	2380.98	12398.98	3191.43	4552.02	2102.55	0.00	0.00	0.00	4738.82	2694.05	1089.25
S	37502.69	30942.41	52402.20	24234.97	34590.16	36686.02	24575.81	28432.76	7260.75	19503.33	0.00	35902.37	27289.55	20201.15



Tabel L.2 Perbandingan luas dan volume waduk kondisi awal dan volume tampungan tahun 2008, 2010, 2012

Elevasi (m)	Volume kondisi awal		2008	Perbedaan	2010	Perbedaan	2012	Perbedaan
	Luas km2	Volume Juta m3	Volume Juta m3	Volume Juta m3	Volume Juta m3	Volume Juta m3	Volume Juta m3	Volume Juta m3
50	0.000	0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
54	0.461	0.461	0.452	0.009	0.453	0.008	0.000	0.461
56	0.844	1.768	1.274	0.494	1.279	0.489	0.000	1.768
58	1.200	3.812	2.510	1.302	2.519	1.293	0.000	3.812
60	1.571	6.584	4.322	2.262	4.331	2.253	0.000	6.584
62	1.966	10.122	6.777	3.345	6.783	3.339	0.085	10.037
64	2.493	14.582	9.973	4.609	9.974	4.608	1.016	13.566
66	3.069	20.144	13.987	6.157	13.987	6.157	3.606	16.538
68	3.570	26.786	18.653	8.133	18.743	8.043	7.556	19.230
70	4.102	34.456	24.465	9.991	24.653	9.803	12.644	21.812
75	5.737	59.056	45.256	13.800	45.451	13.605	28.836	30.220
80	8.074	93.486	75.778	17.708	75.967	17.519	51.897	41.589
85	10.546	140.136	118.393	21.743	118.564	21.572	86.917	53.219
90	13.512	200.281	174.839	25.442	174.993	25.288	134.788	65.493
95	15.604	273.071	244.633	28.438	244.767	28.304	194.707	78.364
99.5	17.412	347.812	317.733	30.079	317.852	29.960	261.625	86.187



Tabel L.3 Kelas bahaya erosi

Kelas		Bahaya erosi	
		ton/ha/tahun	mm/tahun
I	Sangat Ringan	< 1,75	< 0,1
II	Ringan	1,75 – 17,50	0,1 – 1,0
III	Sedang	17,50 – 46,25	1,0 – 2,5
IV	Berat	46,25 - 92,50	2,5 - 5,0
V	Sangat Berat	> 92,50	> 5,0

Sumber : Suripin (2002)

Perhitungan besarnya debit sedimen harian menurut Suripin (2002) dihitung dengan rumus :

$$Q_s = 0.0864 C_s Q_w$$

$Q_s$  = Debit sedimen harian (ton/hari)

$Q_w$  = Debit aliran harian (m<sup>3</sup>/det)

$C_s$  = Konsentrasi sediment layang (mg/l)

( Sumber : Sucipto, 2008)



LABORATORIUM KUALITAS AIR  
JURUSAN PERIKANAN  
FAKULTAS ILMU KELAUTAN DAN PERIKANAN  
UNIVERSITAS HASANUDDIN

Kampus Tamalanrea, Jln. Perintis Kemerdekaan KM.10  
Telp. 62-0411586025 (586200 Ext. 2373, 2394) FAX 586025  
Makassar 90245

No : 01/Lab.Air/V/2015  
Pemilik sampel : Siti Rizkiyanti (Teknik Sipil UH)  
Tanggal masuk : 4 Mei 2015  
Jumlah sampel : 5  
Jenis sampel : Air sungai  
Asal sampel : Je'neberang

Data Hasil Analisis

No	Kode Sampel	Parameter	
		TSS (ppm)	TDS (ppm)
1	CP1	22.0	384
2	CP2	14.0	416
3	CP3	4.0	359
4	CP4	9.0	364
5	CP5	5.0	357

Analisis

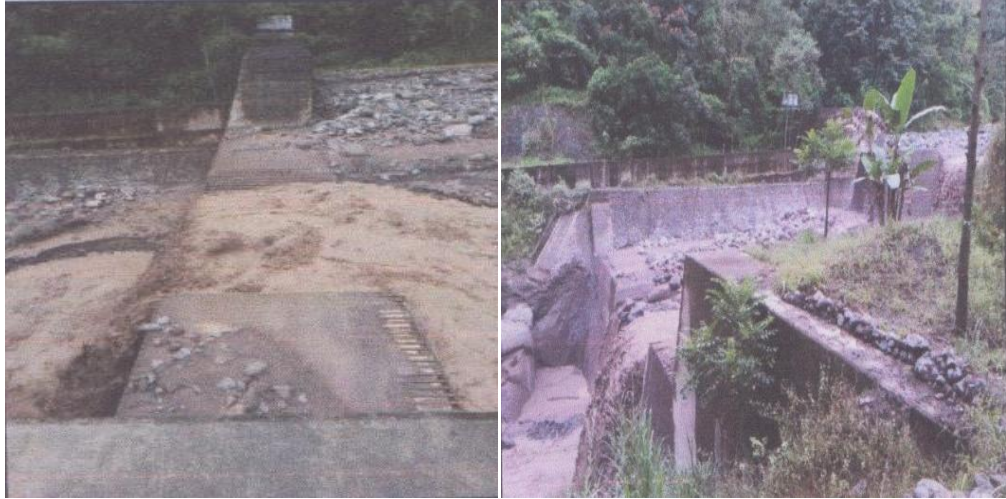
Fitriyani, S.Si  
Nip: 1977012 200112 2 001

Makassar, 7 Mei 2015  
Mengetahui  
Pengelola Lab.

Dr. Ir. Khusnul Yaqin, M.Sc  
Nip: 196807261994031002



## Dokumentasi



Gambar 1. Sabo Dam No. 7-1



Gambar 2. Sabo Dam No. 7-2



Gambar 3. Sabo Dam No. 7-3



Gambar 4. Sabo Dam No. 7-4





Gambar 5. Sabo Dam No. 7-5



Gambar 6. Sabo Dam No. 7-6



Gambar 7. Sabo Dam No. 7-7



Gambar 8. Sabo Dam CD-1





Gambar 9. Sabo Dam CD-2



Gambar 10. Sabo Dam CD-3



Gambar 11. Sabo Dam CD-4



Gambar 12. Sabo Dam KD-1



Gambar 13. Sabo Dam KD-2





Gambar 14. Sabo Dam KD.2-1



Gambar 15. Sabo Dam KD.2-2



Gambar 16. Sabo Dam KD.3



Gambar 17. Sabo Dam KD-4



Gambar 18. Sabo Dam SP-1



Gambar 19. Sabo Dam SP-2





Gambar 20. Sabo Dam SP-3



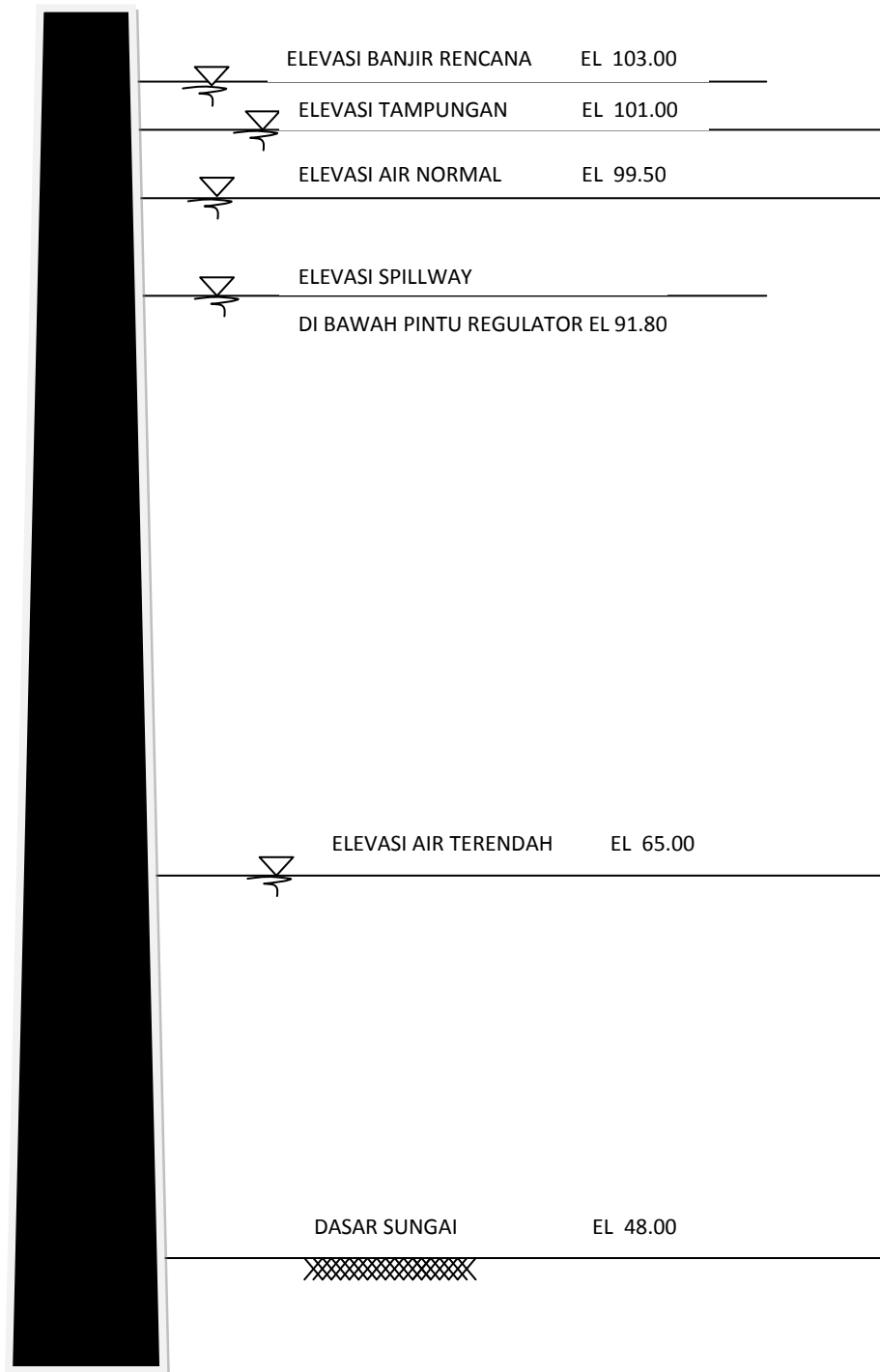
Gambar 21. Sabo Dam SP-4



Gambar 22. Sabo Dam SP-5



Gambar 23. Patok BM dan CP



Gambar Elevasi muka air waduk Bili-Bili

(Sumber : Sumber : BBWS Pompengan Jeneberang, 2013)