

TUGAS AKHIR

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

Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan
Guna Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

ALIFIA NURUL ISTIQFARAH

45 13 041 048

**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
JURUSAN SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BOSOWA MAKASSAR
2021**

SURAT PERNYATAAN

KEASLIAN DAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Alifia Nurul Istiqfarah

Nomor Stambuk : 45 13 041 048

Program Studi : Teknik Sipil

Judul Tugas Akhir : "Studi Laju Sedimentasi Waduk Bili – Bili Pasca
Pengembangan Bangunan Penahan

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa :

1. Tugas akhir yang saya tulis ini merupakan hasil karya saya sendiri dan
Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.
2. Demi pengembangan pengetahuan, saya tidak keberatan apabila Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Bosowa menyimpan, mengalih mediadakan / mengalih formatkan, mengelolah dalam bentuk data base, mendistribusikan dan menampilkan untuk kepentingan akademik.
3. Bersedia dan menjamin untuk menanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Bosowa dari semua bentuk tuntutan hukum yang timbul atas pelanggaran hak cipta dalam tugas akhir ini.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya untuk dapat digunakan sebagaimana mestisnya.

Makassar, Maret 2021

Yang Menyatakan



(Alifia Nurul Istiqfarah)

LEMBAR PENGAJUAN UJIAN TUTUP

Tugas Akhir :

"Studi Laju Sedimentasi Waduk Bili-Bili Pasca Pengembangan Bangunan Penahan Sedimen"

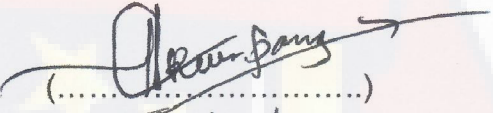
Disusun dan diajukan oleh :

Nama Mahasiswa : **Alifia Nurul Istiqfarah**

Nomor Stambuk : 45 13 041 048

Sebagai salah satu syarat, untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Teknik Sipil / Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Bosowa Makassar.

Telah Disetujui Komisi Pembimbing

Pembimbing I : Dr. Ir. A. Rumpang Yusuf, M.T. (.....)

Pembimbing II : Ir. Hj Satriawati Cangara, MSP (.....)

Mengetahui :

Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ridwan, ST., M.Si
NIDN : 09 1012 701

Ketua Program Studi Teknik Sipil



Nurhadiah Yuhianti, ST.MT
NIDN : 09 16068 201



LEMBAR PENGESAHAN

Berdasarkan Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Bosowa Nomor : /FT/UNIBOS/ /2021 tertanggal Maret 2021, perihal Pengangkatan Panitia dan Tim Penguji Tugas Akhir, maka pada :

Hari / Tanggal : Senin / 1 Maret 2021
Nama : **Alifia Nurul Istiqfarah**
NIM : **45 13 041 048**
Fakultas / Jurusan : Teknik / Teknik Sipil
Judul Tugas Akhir : **Studi Laju Sedimentasi Waduk Bili-Bili Pasca Pengembangan Bangunan Penahan Sedimen**

Telah diterima dan disahkan oleh Panitia Tugas Akhir Fakultas Teknik Universitas Bosowa setelah dipertahankan di depan Tim Penguji Ujian Sarjana Strata Satu (S-1) untuk memenuhi salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Bosowa.

Tim Penguji Tugas Akhir


Ketua / Ex. Officio : Dr. Ir. A. Rumpang Yusuf, M.T. (.....)
Sekretaris / Ex. Officio : Ir. Hj Satriawati Cangara, MSP (.....)
Anggota : Dr. Ir. Hj. Hijriah, ST.MT. (.....)
Nurhadijah Yunianti, S.T.,M.T. (.....)

Makassar, 1 Maret 2021

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Bosowa

Dr. Ridwan, S.T., M.Si.
NIDN : 09 240676 01

Ketua Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Bosowa

Nurhadijah Yunianti, S.T., M.T.
NIDN : 09 050873 04

KATA PENGANTAR

Bismillahi rahmani rahim

Assalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatu

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadiran Allah SubhanaWataala, karena berkat rahmat dan Hidayah-Nya, sehingga tugas akhir saya yang berjudul: **Studi Laju Sedimentasi Waduk Bili-Bili Pasca Pengembangan Bangunan Penahan Sedimen** dapat terlaksana dengan baik.

Harapan hasil penelitian ini dapat memberikan gambaran tentang sedimentasi pada kondisi waduk yang nantinya dapat bermanfaat untuk keperluan teknik. Dalam penyelesaian proposal ini penulis banyak mengalami kesulitan. Namun, berkat bimbingan dari segala pihak, akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan walaupun masih banyak terdapat kekurangan. Oleh karena itu dengan segala kerendahan hati Peneliti siap menerima berbagai masukan berupa saran dan kritik yang konstruktif demi penyempurnaan tugas akhir ini.

Kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu dan membimbing penulis dalam menyelesaikan proposal ini. Dan tak lupa pula saya ucapkan terimakasih kepada kedua orang tua karena atas dari dukungan mereka baik moril maupun materi penulis dapat menyelesaikan proposal ini. Serta ucapan terimakasih dan penghargaan setulus-tulusnya penulis sampaikan kepada:

1. Prof Saleh Pallu, M.Eng selaku Rektor Universitas Bosowa Asisten Direktur I, Asisten Direktur II, Asisten Direktur III yang telah memberikan bantuan kepada penulis.

2. Dr. Ridwan, ST.,M.Si selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar beserta staf dan jajarannya.
3. Nur Hadijah Yunianti., S.T., M.T selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil.
4. Ir. A. Rumpang Yusuf, M.T selaku pembimbing I sekaligus penguji yang telah menyisihkan waktu dan ilmu yang sangat berharga kepada penulis serta nasihat, dan berbagai arahan kepada penulis.
5. Ir. Hj. Satriawati Cangara, MSP selaku pembimbing II sekaligus penguji yang telah memberikan bimbingan, nasihat, dan berbagai arahan kepada penulis selama penyusunan hasil penelitian ini.
6. Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil terutama angkatan 2013.
7. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan yang telah membantu penyelesaian hasil penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan hasil penelitian ini masih terdapat banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan sehingga kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pendidikan khususnya pada bidang teknik sipil. Akhir kata, penulis mengucapkan *billahi taufik walhidayah, wassalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatu.*

Makassar, Februari 2020

Alifia Nurul Istiqfarah

ABSTRAK

Penelitian ini mencoba mengetahui Laju Sedimentasi Waduk Bili-bili Pasca Pengembangan Bangunan Penahan Sedimen. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui Sungai Jeneberang yang tadinya berair bersih dan jernih berubah menjadi keruh dan berlumpur sehingga merusak ekosistem yang berada di sekitar sungai tersebut.

Untuk menangani masalah longsor 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..

This research tries to find out the sedimentation rate of the Bili-bili reservoir after the development of the sediment retaining structure. This study aims to determine the Jeneberang River, which previously had clean and clear water, turned into cloudy and muddy, thus damaging the ecosystem around the river.

To deal with the problem of the landslide, improvements were made and the addition of sediment control buildings consisting of sabo dams, check dams, consolidation dams, and sand pockets. Therefore, a study on the development of the Jeneberang River sediment control and retaining structures was conducted.

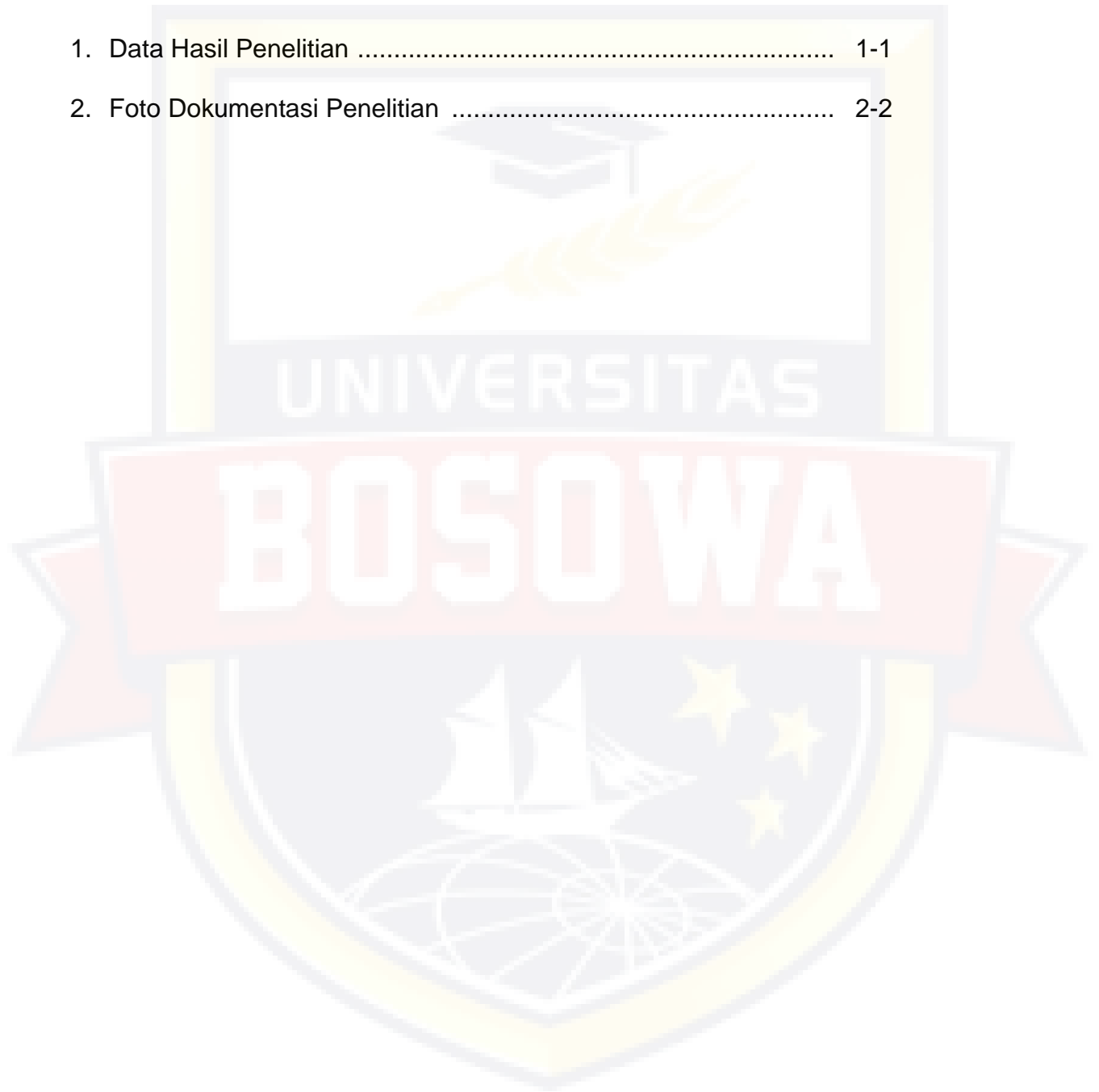
Kata kunci: Pengembangan Bangunan Waduk Bili-bili

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Surat Pernyataan	ii
Lembar Pengajuan Ujian Tutup.....	iii
Lembar Pengesahan	iv
Kata Pengantar	v
Abstrak	vi
Daftar Isi	vii
Daftar Notasi	viii
Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel	x
Daftar Lampiran	xi
BAB I PENDAHULUAN	I-1
1.1. Latar Belakang	I-1
1.2. Rumusan Masalah	I-3
1.3. Tujuan Penelitian.....	I-3
1.4. Manfaat Penelitian.....	I-4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	II-1
2.1. Pengertian Waduk.....	II-1
2.2. Erosi dan Longsor.....	II-3
2.2.1. Erosi	II-3
2.2.2. Longsor	II-5
2.3. Sedimentasi.....	II-8
2.4. Proses Terjadinya Erosi dan sedimen	II-9
2.5. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Sedimentasi	II-14
2.6. Mekanisme Pergerakan Sedimen	II-15
2.7. Upaya Pengendalian Erosi dan Sedimentasi	II-19
2.8. Bangunan Pengendali Sediemen	II-20
2.9. Bangunan Penahan Sedimen (<i>Check DAM</i>).....	II-23
2.10. Bendung Konsolidasi (<i>Concolidation DAM</i>).....	II-24

2.10. Kantong Pasir (Sand Pocket)	II-25
BAB III METODE PENELITIAN	III-1
3.1. Lokasi Penelitian	III-1
3.2. Metode Pengumpulan Data	III-2
3.3. Analisis Longsoran dan Tingkat Sedimentasi Waduk Bili-bili....	III-2
3.3.1. Jenis dan Sumber Data	III-2
3.3.2. Metode Pengumpulan Data	III-3
3.4. Analisis Data	III-3
3.5. Diagram Alir/ Flowchart Penelitian	III-5
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	IV-1
4.1. Analisis Tingkat Erosi Lahan pada Sub DAS Jeneberang	IV-1
4.2. Data Debit Air dan Curah Hujan	IV-1
4.3. Analisis Volume Tampungan Waduk	IV-4
4.4. Analisis Tingkat Sedimentasi Waduk.....	V-7
4.5. Efisiensi Tangkapan Sedimen (Trap Efficiency).....	IV-13
4.6. Identifikasi Pola Pengendalian Bangunan Pengendali Sedimentasi Daerah Tangkapan Air Waduk Bili-Bili.....	IV-15
4.6.1. Kajian Kapasitas Bangunan Pengendali Sedimen	IV-51
4.6.2. Bangunan Sabo di Bagian Hulu (upper stream) Sungai Jeneberang	V-16
4.6.3. Bangunan Sabo di Bagian Tengah (middle stream) Sungai Jeneberang.....	IV-18
4.6.4. Bangunan Kantong Pasir di Hilir (downstream) sungai Jeneberang	IV-21
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	V-1
5.1. Kesimpulan	V-1
5.2. Saran	V-2

DAFTAR PUSTAKA	xii
LAMPIRAN	xii
1. Data Hasil Penelitian	1-1
2. Foto Dokumentasi Penelitian	2-2



DAFTAR NOTASI



Q_w	= Debit Air (m^3 / det)
Q_{sm}	= Debit Sedimen Melayang (ton)
Q_{sd}	= Debit Sedimen Dasar (ton)
Q_b	= Besar Debit Sedimen Dasar (ton)
C_s	= Konsentrasi Sedimen (mg/ltr)
K	= Faktor Konversi (0,0864)
H	= Tinggi Muka Air (m)
D	= Kedalaman Sungai (m)
A	= Luas Penampang Basah (m^2)
B	= Lebar Penampang Sungai (m) S = Kemiringan Dasar Sungai
V	= Kecepatan (m/det)
P	= Keliling Basah (m)
R	= Radius Hidrolik (m)
G	= Percepatan Gravitasi (m/det^2)
r	= Nilai Korelasi
a, b	= Konstanta
n	= Banyaknya Data
d	= Diameter Butiran (mm)
Y_s	= Berat Jenis Sedimen

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Tipe – tipe Longsoran	II-7
Gambar 2.2 (a) Gerakan butiran pasir dalam aliran air	II-16
Gambar 2.2 (b) Proses limpasan hujan di daerah pegunungan	II-16
Gambar 2.3 Bentuk banjir lahar yang mengandung batu-batu	II-16
Gambar 2.4 Progres gerakan sedimen dan perpindahan daerah pengendapan karena terjadinya perubahan muka air	II-17
Gambar 2.4 Skema angkutan sedimen (<i>Sedimen Transport</i>)	II-19
Gambar 2.6 Sketsa memanjang bending	II-21
Gambar 3.1 Lokasi Penelitian	III-1
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian	III-5
Gambar 4.1 Grafik rerata Curah Hujan Tahunan dari Tahun 2012-2018. ..	IV-3
Gambar. 4.2 Lokasi survey <i>cross section</i> sepanjang Sungai Jeneberang Bagian Hulu Waduk Bili-bili	IV-5
Gambar 4.3. Lokasi 22 titik <i>cross section</i> Waduk Bili-Bili	IV-8
Gambar 4.4. Akumulasi Tingkat Sedimentasi di Waduk Bili-Bili 1997-2019	IV-11
Gambar 4.5. Grafik Kapasitas waduk dan Efisiensi Tangkapan Sedimen di Waduk Bili-Bili	IV-14
Gambar 4.6. Lokasi penempatan sabo dam SD7-1 –SD 7-7	IV-16
Gambar 4.7 Sabo dam Tipe Terbuka dan Tipe Tertutup pada bagian tengah sungai Jeneberang	IV-19

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Data Debit Air Masuk Tahunan dari Tahun 2012-2018.....	IV-2
Tabel 4.2. Volume sedimen untuk setiap titik <i>Cross Section</i> tahun 2014-2018	IV-5
Tabel 4.3 Volume Aliran Sedimen Tahun 2013-2018	IV-6
Tabel 4.4 Volume Sedimentasi per Penampang dari Tahun 1997-2019	IV-9
Tabel 4.5 Volume Sedimentasi per Elevasi dari Tahun 1997-2019	IV-10
Tabel 4.6. Prosentase total sedimentasi terhadap Kapasitas Waduk	IV-12
Tabel 4.7. Efisiensi Tangkapan Sedimen 1997-2018	IV-14
Tabel 4.8. Kapasitas Bangunan Pengendali Sabo Dam di <i>Upper Stream</i>	IV-18
Tabel. 4.9. Kapasitas Bangunan Pengendali Sabo Dam di <i>Middle Stream</i>	IV-20

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Waduk adalah bangunan air yang berfungsi untuk menampung air sungai yang dibangun dengan jalan membuat bendungan pada hilirnya. Waduk merupakan salah satu bentuk *reservoir* tempat menampung aliran sungai dalam satu sistem jaringan sungai dalam suatu sistem Daerah Aliran Sungai (DAS). Pada besarnya Waduk atau bendungan berfungsi sebagai penampung air dan tanah hanyut akibat erosi yang bersal dari daerah diatasnya untuk mengamankan daerah dibawahnya dari banjir dan erosi serta dapat menahan air kelebihan pada masa-masa aliran air tinggi untuk menggunakan selama masa-masa kekeringan (Sukartaatmadja, 2004). Waduk dan bendungan juga bermanfaat sebagai konservasi air. Namun, dalam perkembangan terakhir terjadi penurunan pemanfaatan fungsi layanan waduk akibat adanya perubahan kondisi daerah tangkapan waduk karena perubahan pemanfaatan lahan dan juga terjadinya longsoran dinding kaldera (fitur vulkanik dari gunung).

Pusat Penelitian Lingkungan Hidup Universitas Hasanuddin (2000) menyebutkan bahwa hasil pengukuran angkutan sedimen pada alur sungai Jeneberang yang pernah dilakukan selama rentang waktu 15 tahun, yaitu dari tahun 1986 sampai dengan tahun 2001 menunjukkan kecenderungan peningkatan sedimen rata-rata sebesar 40 ton/ha/tahun dengan laju rata-rata sebesar 2,67% per tahun. Dari hasil penelitian yang dilakukan Fadiah (2006) ternyata pada Daerah

Tangkapan Hujan (DTH) Waduk Bili-Bili juga telah mengalami tingkat erosi lahan sebesar 4,25 ton/ha/tahun. 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 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), terjadi bencana berupa runtuhnya dinding yang merupakan hulu DAS Jeneberang yang mengakibatkan potensi sedimen akibat longoran yang cukup besar akan mengalir ke hilir bila intensitas hujan tinggi sehingga rawan terjadi aliran debris dengan konsentrasi tinggi. Kondisi sungai Jeneberang yang masih kontinyu

mengalirkan sedimen pada saat terjadi banjir dan mengendap di sepanjang alur sungai sampai ke Waduk Bili-Bili menyebabkan peningkatan sedimentasi di waduk Bili-Bili sehingga menyebabkan pendangkalan waduk yang pada akhirnya akan mengurangi umur operasi waduk dan mengancam keberlanjutan fungsi waduk. Sungai Jeneberang yang tadinya berair bersih dan jernih berubah menjadi keruh dan berlumpur sehingga merusak ekosistem yang berada di sekitar sungai tersebut.

Untuk menangani masalah longsor 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”.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana besar debit sedimen yang masuk di Waduk Bili-bili
2. Bagaimana laju sedimentasi setelah adanya pembangunan pengendali sedimen

1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian

1.3.1. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian sebagai berikut:

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

1.3.2. Manfaat Penelitian

1. Bagi pemerintah merupakan bahan pertimbangan dalam memformulasi kebijakan pasca pengembangan penahan sedimen yang terjadi di Waduk Bili-Bili
2. Bagi masyarakat sebagai informasi dalam pemanfaatan dan pelestarian sumberdaya perairan Waduk Bili-Bili
3. Bagi peneliti dan pendidik merupakan stimulus untuk pengembangan ilmu pengetahuan dalam menyelesaikan masalah sedimentasi waduk, khususnya di Waduk Bili-Bili.

1.4. Pokok Pembahasan dan Batasan Masalah

1.4.1. Pokok Pembahasan

1. Studi laju sedimentasi Waduk Bili-Bili Pasca Pengembangan bangunan penahan sedimen
2. Mengetahui Jumlah debit sedimen setiap tahunnya

1.5. Batasan Masalah

Penulis skripsi ini dibatasi pada hal – hal sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan di Waduk Bili-Bili
2. Penelitian ini secara fisik terletak dalam sistem DAS Jeneberang
3. Penelitian ini agar mengetahui laju sedimentasi setelah adanya pembangunan pengendali sedimen

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengertian Waduk

Waduk adalah salah satu sumber air tawar yang menunjang kehidupan semua makhluk hidup dan kegiatan sosial ekonomi manusia. Ketersediaan sumber daya air mempunyai peran yang sangat mendasar untuk menunjang pengembangan ekonomi wilayah. Sumberdaya air yang terbatas di suatu wilayah mempunyai implikasi kepada kegiatan pembangunan yang terbatas dan pada akhirnya kegiatan ekonomipun terbatas sehingga kemakmuran rakyat makin lama tercapai. Air waduk/danau digunakan untuk berbagai pemanfaatan antara lain sumber baku air minum, air irigasi, pembangkit listrik, perikanan dan lain-lain. Hal ini menjadikan pentingnya air tawar yang berasal dari waduk bagi kehidupan.

Waduk sering juga disebut sebagai danau buatan yang besar. Komisi Dam Dunia menyebutkan bahwa bendungan/waduk adalah besar bila tinggi bendungan lebih dari 15 m. Sedangkan embung merupakan waduk kecil dengan tinggi bendungan kurang dari 15 m (Puslitbang SDA, 2008). Sistem tata air waduk berbeda dengan danau alami. Pada waduk komponen tata airnya umumnya telah direncanakan sedemikian rupa sehingga volume, kedalaman, luas, presipitasi, debit inflow/outflow waktu tinggal air diketahui dengan pasti. Pembangunan waduk diperuntukkan berbagai keperluan antara lain pembangkit listrik, irigasi, pengendalian banjir, sumber baku air minum, air industri, perikanan, tempat pariwisata. Saat ini jumlah tenaga listrik yang dihasilkan dari tenaga air yang

berasal dari air waduk ada sebanyak 3,4% dari total kebutuhan nasional (Puslitbang SDA, 2008).

Undang-Undang No.7 tahun 2004 tentang Sumber Daya Air, terdiri dari 3 komponen utama yaitu konservasi, pemanfaatan dan pengendalian daya rusak air. Waduk yang merupakan sumberdaya air telah banyak mengalami penurunan fungsi dan kerusakan ekosistem. Hal ini disebabkan oleh karena pengelolaan waduk yang banyak mengalami kendala. Undang-Undang Sumber Daya Air telah mengamanatkan untuk melakukan pengelolaan waduk dengan melakukan konservasi, pemanfaatan dan pengendalian daya rusak air. Selain itu masih ada peraturan lain seperti PP. No.13 tahun 2010, tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup; PP. No. 32 Tahun 2012, tentang Pengelolaan Daerah Aliran Sungai, PP. No.82 Tahun 2001, tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air; PP. No.32 Tahun 1990 tentang Kawasan Lindung; Kepres No.123/2001, tentang Koordinasi Pengelolaan Sumber Daya Air pada tingkat Propinsi, Wilayah Sungai, Kabupaten dan Kota serta Keputusan Menteri yang terkait dengan pengelolaan sumberdaya air.

Di dalam Peraturan Pemerintah No. 37 Tahun 2010 Tentang Bendungan disebutkan bahwa waduk dibentuk untuk menyimpan air yang berlebih pada saat musim penghujan agar dapat dimanfaatkan untuk pemenuhan kebutuhan air dan daya air pada waktu diperlukan, serta mengendalikan daya rusak air sebagaimana dimaksud pada pasal 22, pasal 34 dan pasal 58 Undang-Undang No.7 Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air. Waduk selain dapat difungsikan sebagai penampung air

juga dapat dilakukan untuk menampung limbah tambang (*tailing*) atau menampung lumpur dalam rangka menjaga keamanan serta keselamatan lingkungan hidup.

Selanjutnya disebutkan untuk pembangunan bendungan dan pengelolaan bendungan beserta waduknya meliputi:

- Bendungan dengan tinggi 15 m atau lebih diukur dari dasar pondasi terdalam
- Bendungan dengan tinggi 10 m sampai dengan 15 m diukur dari dasar pondasi terdalam dengan ketentuan:
 - Panjang puncak bendungan paling sedikit 500 m;
 - Daya tampung waduk paling sedikit 500.000 m³; atau
 - Debit banjir maksimal yang diperhitungkan paling sedikit 100.000 m³/dtk.

Atau

- Bendungan yang mempunyai kesulitan khusus pada pondasi atau bendungan yang didisain menggunakan teknologi baru dan/atau bendungan yang mempunyai kelas bahaya tinggi.

Walaupun sudah banyak undang-undang atau peraturan yang diundangkan tentang pengelolaan sumberdaya air dan yang terkait dengan pengelolaan sumberdaya air namun konservasi sumberdaya air, pengendalian daya rusak air terhadap sumberdaya air pada waduk, danau, situ, embung dan sungai masih jauh dari harapan baik dari segi kuantitas maupun dari segi kualitas airnya.

2.2. Erosi dan Longsor

2.2.1. Erosi

Erosi adalah hilangnya atau terkikisnya tanah atau bagian-bagian tanah dari suatu tempat yang diangkut oleh air atau angin ke tempat lain. Pada peristiwa

erosi, tanah atau bagian-bagian tanah pada suatu tempat terkikis dan terangkut dan selanjutnya akan diendapkan di tempat lain (Arsyad, 2006). Pada daerah yang beriklim basah menurut Arsyad (2006), faktor iklim yang paling mempengaruhi erosi dan aliran permukaan adalah hujan. Jumlah intensitas dan distribusi hujan menentukan kekuatan tumbukan hujan terhadap tanah, jumlah dan kecepatan aliran permukaan dan kerusakan erosi.

Menurut Asdak (2004), proses erosi terdiri atas tiga bagian yang berurutan: pengelupasan (*detachment*), pengangkutan (*transportation*), dan pengendapan (*sedimentation*). Beberapa tipe erosi yang ditemukan untuk daerah tropis adalah:

1. Erosi percikan (*flash erosion*), yaitu proses terkelupasnya partikel-partikel tanah bagian atas oleh tenaga kinetik air hujan bebas atau air lolos.
2. Erosi permukaan (*sheet erosion*), yaitu erosi yang terjadi ketika lapisan tipis permukaan tanah di daerah berlereng terkikis oleh kombinasi air hujan dan air aliran (*run off*).
3. Erosi alur (*rill erosion*), yaitu pengelupasan yang diikuti dengan pengangkutan partikel-partikel tanah oleh air aliran yang terkonsentrasi di dalam saluran air.
4. Erosi parit (*gully erosion*), yaitu erosi yang membentuk jajaran parit yang lebih dalam dan lebar serta merupakan lanjutan dari erosi alur.
5. Erosi tebing (*streambank erosion*), yaitu pengikisan tanah pada tebing-tebing sungai dan penggerusan dasar sungai oleh aliran air sungai.

Faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya erosi adalah iklim, tanah, topografi, vegetasi dan pengelolaan. Faktor iklim yang besar pengaruhnya adalah hujan yang melalui tenaga kinetiknya menghancurkan partikel-partikel tanah dan

kontribusinya terhadap aliran permukaan. Faktor tanah meliputi tekstur, struktur, infiltrasi dan kandungan bahan organik. Faktor topografi umumnya dinyatakan dalam kemiringan dan panjang lereng. Erosi akan meningkat dengan semakin besarnya kemiringan dan panjang lereng. Pengaruh vegetasi penutup lahan terhadap erosi adalah melindungi permukaan tanah dari tumbukan air hujan, menurunkan kecepatan dan volume run off, menahan partikel-partikel tanah pada tempatnya melalui sistem perakaran dan serasah yang dihasilkan, serta mempertahankan kemantapan kapasitas tanah dalam menyerap air.

Jika intensitas hujan lebih rendah dari kapasitas infiltrasi, maka semua hujan yang mencapai permukaan bumi akan terinfiltrasi. Pada saat intensitas hujan melebihi kapasitas infiltrasi, maka akan terjadi aliran permukaan yang menyebabkan terjadinya erosi.

2.2.2. Longsoran

Salah satu jenis tanah yang sering dijumpai di Indonesia adalah hasil letusan gunung api. Tanah ini memiliki komposisi sebagian besar lempung dengan sedikit pasir dan bersifat subur. Tanah yang berada diatas batuan kedap air pada perbukitan/punggungan dengan kemiringan sedang hingga terjal berpotensi mengakibatkan tanah longsor pada musim hujan dengan curah hujan berkuantitas tinggi. Longsoran (slide) merupakan gerakan material pembentuk lereng diakibatkan oleh terjadinya kegagalan geser, di sepanjang satu atau lebih bidang longsor. Massa tanah yang bergerak bisa menyatu atau terpecah-pecah. Perpindahan material total sebelum longsoran bergantung pada besarnya regangan

untuk mencapai kuat geser puncaknya dan pada tebal zona longsornya (Hardiyatmo, 2006).

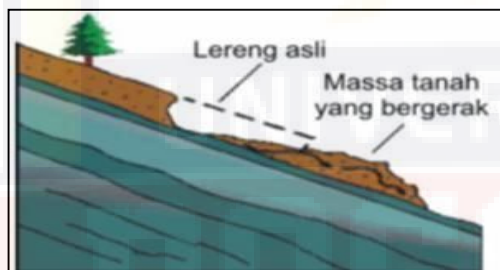
Longsor adalah suatu bentuk erosi yang pengangkutan atau pemindahan atau gerakan tanah terjadi pada saat bersamaan dalam volume yang besar. Berbeda dengan bentuk erosi, pada tanah longsor pengangkutan tanah dalam volume besar terjadi sekaligus. Akan terjadi longsor jika terpenuhi tiga keadaan, yaitu: (1) lereng yang cukup curam sehingga volume dapat bergerak atau meluncur kebawah, (2) terdapat lapisan kedap air dan lunak di bawah permukaan tanah yang merupakan bidang luncur, (3) terdapat cukup air dalam tanah sehingga lapisan tanah tepat di atas lapisan kedap air menjadi jenuh (Arsyad, 2006).

Menurut Kementrian ESDM (2008), jenis tanah longsor dibedakan atas 6 jenis, yaitu longsor translasi, longsor rotasi, pergerakan blok, runtuh batu, rayapan tanah, dan aliran bahan rombakan. Jenis longsor translasi dan rotasi paling banyak terjadi di Indonesia. Sedangkan longsor yang paling banyak memakan korban jiwa manusia adalah aliran bahan rombakan.

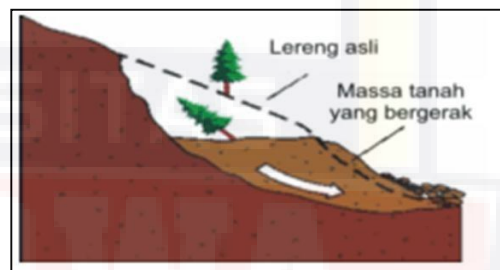
Longsor translasi adalah bergesernya massa tanah dan batuan pada bidang gelincir yang berbentuk rata atau landai, adapun longsor rotasi adalah bergesernya massa tanah dan batuan pada bidang yang cekung. Jika longsor terjadi karena perpindahan batuan yang bergerak pada bidang gelincir berbentuk rata disebut longsor pergerakan blok, dan jika bergerak ke bawah dengan cara jatuh bebas disebut runtuh batu.

Longsor rayapan tanah adalah jenis longsor yang bergerak lambat sehingga hampir tidak dapat dikenali. Setelah waktu yang cukup lama longsor jenis

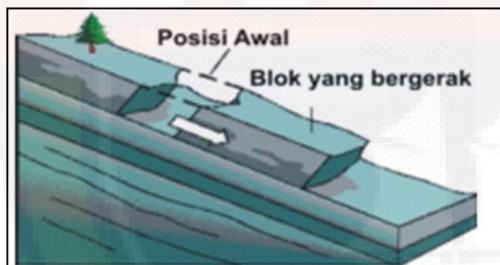
rayapan ini bisa menyebabkan tiang-tiang telepon, pohon atau rumah menjadi miring ke bawah. Jenis tanah longsor akibat aliran bahan rombakan terjadi ketika massa tanah bergerak didorong oleh air. Kecepatan aliran tergantung pada kemiringan lereng, volume dan tekanan air, dan jenis materialnya. Gerakannya terjadi di sepanjang lembah dan mampu mencapai ratusan meter jauhnya. Aliran tanah ini dapat menelan korban cukup banyak. Untuk lebih jelasnya beberapa gambar jenis tanah longsor dapat dilihat pada Gambar 3.



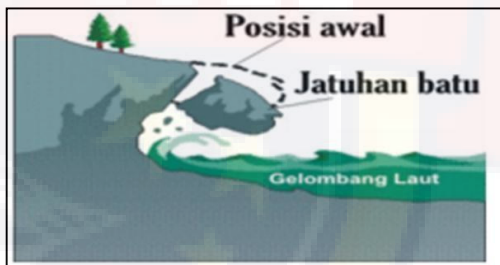
Longsoran Translasi



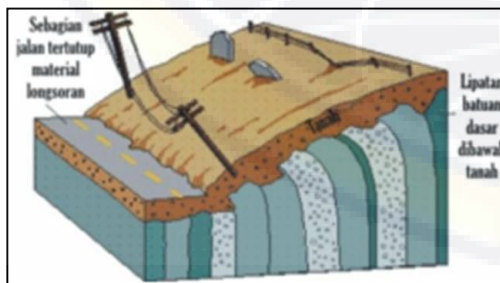
Longsoran Rotasi



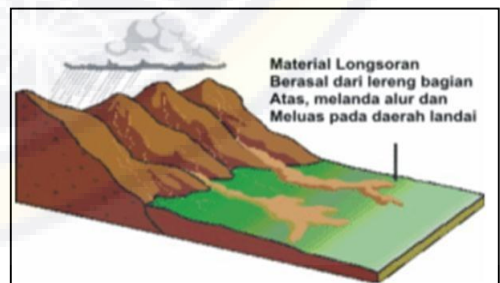
Longsoran Pergerakan Blok



Longsoran Runtuhan Batu



Longsoran Rayapan Tanah



Longsoran Aliran Bahan Rombakan

Gambar 2. 1. Tipe – tipe Longsoran

2.3. Sedimentasi

Tanah dan bagian-bagian tanah yang terangkut dari suatu tempat yang tererosi secara umum disebut sedimen. Sebagian saja dari sedimen yang akan sampai dan masuk ke dalam sungai dan terbawa keluar daerah tampung atau daerah aliran sungai. Nisbah jumlah sedimen yang betul-betul terbawa oleh sungai dari suatu daerah terhadap jumlah tanah yang tererosi dari daerah tersebut, dinamakan Nisbah Pelepasan Sedimen (NPS) atau Sediment Delivered Ratiom (SDR). Nilai NPS yang mendekati satu artinya semua tanah yang tererosi masuk ke dalam sungai hanya mungkin terjadi pada daerah aliran sungai kecil dan yang tidak mempunyai daerah-daerah datar atau yang memiliki lereng-lereng curam, banyak butir-butir tanah halus yang terangkut, kerapatan drainase yang tinggi, atau secara umum dikatakan tidak memiliki sifat yang cenderung menghambat pengendapan sedimen di dalam daerah aliran (Arsyad, 2006).

Sedimen yang dihasilkan oleh proses erosi dan terbawa oleh suatu aliran akan diendapkan pada suatu tempat yang kecepatan airnya melambat atau terhenti. Proses ini yang dikenal dengan sedimentasi atau pengendapan, atau proses yang menyebabkan terbentuknya dataran-dataran aluvial yang luas yang pada banyak tempat di dunia merupakan pendukung perkembangan pertanian. Namun demikian, sedimen yang dihasilkan oleh tererosinya tanah yang salah dalam pengelolaannya akan menimbulkan masalah.

Sedimentasi adalah proses pengendapan sedimen hasil proses erosi, baik berupa erosi permukaan, erosi parit atau erosi tanah lainnya yang terjadi di dasardasar waduk, sungai, muara sungai dan laut. Sedimen yang terbawa sampai

masuk ke dalam waduk atau danau sebagian akan terendap dalam waduk atau danau tersebut dan sebagian akan terbawa oleh air yang mengalir keluar. Bagian dari sedimen yang mengendap di dalam waduk menunjukkan efisiensi waduk dalam menangkap sedimen. Kemampuan waduk untuk menahan dan mengendapkan sedimen tersebut disebut keefisienan perangkap atau *trap efficiency*, yang dinyatakan dalam persen terhadap banyaknya sedimen yang terbawa aliran masuk. Efisiensi perangkap tergantung pada sifat-sifat sedimen (distribusi ukuran butir) dan laju aliran melalui waduk (Arsyad, 2006).

2.4. 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 :

- 1) Pelepasan butiran tanah atau partikel tanah dari bongkah agregat tanah.
- 2) Pemindahan atau pengangkutan butiran tanah oleh media pengangkut, yaitu air.
- 3) Pengendapan butiran tanah dimana butiran tanah tidak dapat diangkut lagi oleh media pengangkut.

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

- 1) 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.
- 2) 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-longsoran. Polongan tersebut tumbuh ke arah hulu. Ini dinamakan erosi ke arah belakang (*backward erosion*).
- 3) Longsoran massa tanah yang terletak di atas batuan keras atau lapisan tanah liat. Longsoran ini terjadi setelah adanya curah hujan panjang, yang lapisan tanahnya menjadi jenuh oleh air tanah.
- 4) Erosi tebing sungai, terutama terjadi pada saat banjir, yaitu tebing tersebut mengalami penggerusan air yang dapat menyebabkan longsornya tebingtebing pada belokan sungai.

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

- 1) Di sungai, pengendapan sedimen di dasar sungai yang menyebabkan naiknya dasar sungai, kemudian mengakibatkan tingginya muka air
- 2) sehingga berakibat sering terjadi banjir.
- 3) 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.
- 4) Di waduk, pengendapan sedimen di waduk akan mengurangi volume efektif waduk yang berdampak terhadap berkurangnya umur rencana waduk.
- 5) Di bendung atau pintu-pintu air.
- 6) 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.

Volume sedimen yang masuk ke dalam waduk dipengaruhi oleh beberapa faktor berikut ini (Sukartaatmadja, 2004):

- a. Musim, yaitu besarnya curah hujan dan adanya limpasan (runoff). Kemampuan curah hujan menimbulkan erosi pada tanah didasarkan pada besarnya curah hujan, intensitas hujan dan penyebaran hujan. Hal tersebut menentukan kekuatan aliran permukaan, sehingga menyebabkan erosi permukaan yang masuk ke dalam aliran sungai dan akhirnya mengalir dan masuk ke waduk.
- b. Vegetasi pada daerah pengaliran. Hal ini berkaitan dengan besarnya erosi tanah (erosi permukaan) yang diakibatkan tidak adanya pengelolaan tanaman sebagai pelindung tanah. Penanaman tumbuhan pada daerah aliran sungai dan sekitar waduk yang tidak dikelola dengan baik dan dalam jumlah yang sedikit akan semakin memudahkan terjadinya erosi permukaan akibat adanya pengikisan permukaan tanah secara langsung.

- c. Geologi dan sifat tanah permukaan. Laju sedimentasi tergantung pada kondisi geologi (sifat batuan) dan erosi permukaan juga tergantung dari sifat tanah permukaan, seperti struktur tanah dan permeabilitas tanah.
- d. Kemiringan tanah dan sungai, yaitu berkaitan dengan panjang kemiringan dan besarnya kemiringan. Semakin panjang dan besar kemiringan tanah, maka erosi permukaan akan semakin besar, sehingga mengakibatkan bertambahnya sedimen yang masuk ke dalam waduk.
- e. Aktifitas manusia dan pengelolaan lahan, yaitu kegiatan manusia dengan pembuatan bangunan serta pekerjaan yang dilakukan di dalam alur sungai ataupun yang berhubungan dengan pola penggarapan lahan yang baik, misalnya dengan terasering dan penanaman sejajar (berpola), dimana hal ini dapat mengurangi terjadinya kehilangan tanah akibat erosi permukaan.
- f. Karakteristik waduk, yaitu kapasitas, kedalaman, fluktuasi permukaan air yang terdapat di dalamnya.

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.

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.

2.5. 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, 2010).

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*).

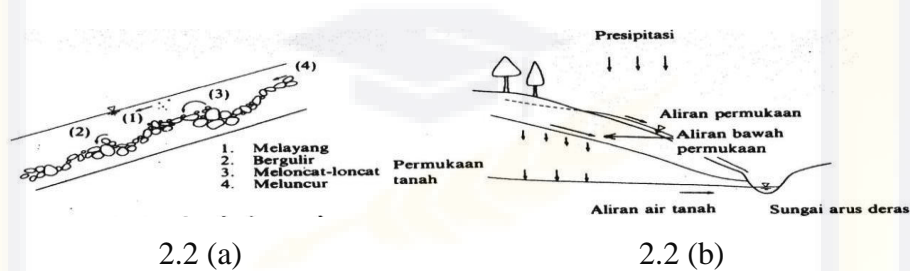
Namun demikian pengetahuan mengenai faktor tersebut tidak menjamin ketepatan perkiraan volume sedimen yang masuk ke DAS. Dari faktor yang telah diterangkan di atas yang paling berpengaruh terhadap besarnya sedimen di DAS adalah iklim atau curah hujan tahunan.

2.6. 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.

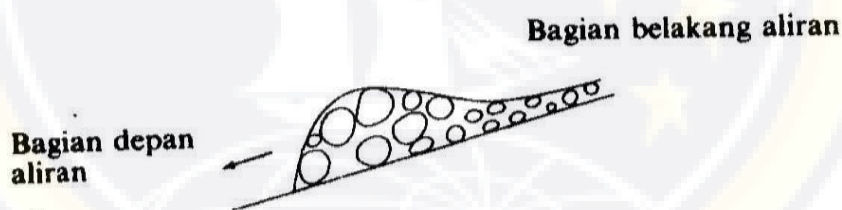
Karena muatan dasar senantiasa bergerak, maka permukaan dasar sungai kadang naik (*agradasi*), tetapi kadang-kadang turun (*degradasi*) dan naik-turunnya dasar sungai disebut alterasi dasar sungai (*river bed alternation*). Muatan melayang tidak berpengaruh pada alterasi dasar sungai, tetapi dapat mengendap 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.



Gambar 2.2 (a) Gerakan butiran pasir dalam aliran air. 2.2 (b) Proses limpasan hujan di daerah pegunungan

Gerakan massa sedimen adalah gerakan air bercampur massa sedimen dengan konsentrasi yang sangat tinggi, di hulu sungai arus deras, di daerah lerenglereng 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 2.3 Bentuk banjir lahar yang mengandung batu-batu

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 aggradasi 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.



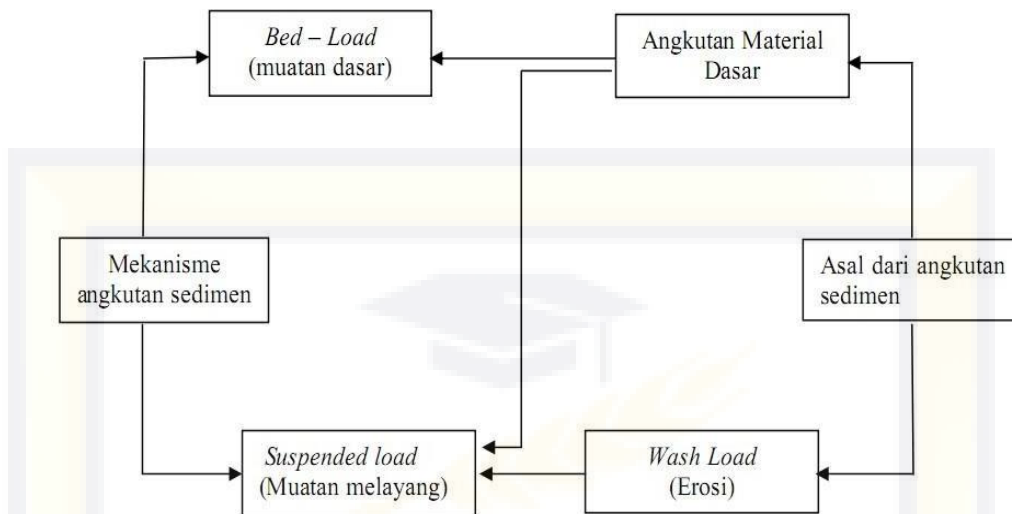
Gambar 2.4 Progres gerakan sedimen dan perpindahan daerah pengendapan karena terjadinya perubahan muka air

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

- 1) *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.

- 2) *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*.
- 3) *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.
- 4) *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 2.4 Skema angkutan sedimen (*Sedimen Transport*)

2.7. 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

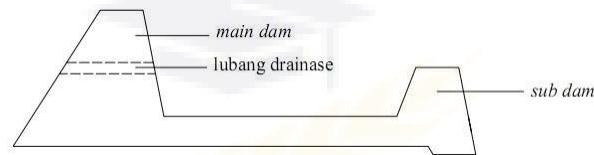
dalam melakukan usaha konservasi lahan, dimana bangunan pengendali sedimen dapat meminimalisasi jumlah sedimen selama proses konservasi lahan berlangsung.

2.8. Bangunan Pengendali Sedimen

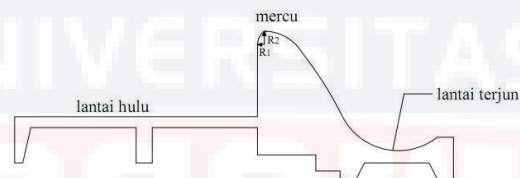
Mencegah terjadinya proses sedimentasi adalah suatu hal yang tidak mungkin dapat dilakukan, karena sedimentasi adalah suatu proses gejala alam yang sangat kompleks di atas permukaan bumi ini. Akan tetapi intensitas proses sedimentasi tersebut secara teknis dapat diperlambat mencapai tingkat yang tidak 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 2.5 dan Gambar 2.6 di bawah ini.



Gambar 2.5 Sketsa memanjang sabo dam



Gambar 2.6 Sketsa memanjang bendung

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 bendungbendung pengatur dibangun berderet-deret di sebelah hulu daerah kipas pengendapan. Untuk sungai-sungai yang berpotensi banjir lahar, maka bendungbendung 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.

Jenis pekerjaan sabo dam terbagi atas dua bagian, yaitu :

- 1) Pekerjaan langsung, yaitu pemantapan lereng bukit sebagai upaya pencegahan terjadinya erosi, antara lain sengkedan, penghutanan, 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.

2.9. 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:

- 1) Menampung sebagian angkutan sedimen dalam waktu suatu kolam penampung.

2) 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.

3) 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.

2.10. Bendung Konsolidasi (*Consolidation DAM*)

Peningkatan aggradasi 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 bendungbendung 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 bendungbendung 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:

- 1) 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.
- 2) Apabila terdapat anak sungai, mesti dipertimbangkan penempatan bendung-bendung konsolidasi pada lokasi yang terletak di sebelah hilir muara anak sungai tersebut.
- 3) Untuk tujuan pencegahan gerusan pada lapisan tanah pondasi suatu bangunan sungai, bendung-bendung konsolidasi ditempatkan di sebelah hilir bangunan tersebut.
- 4) 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.
- 5) 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.

2.11. 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.

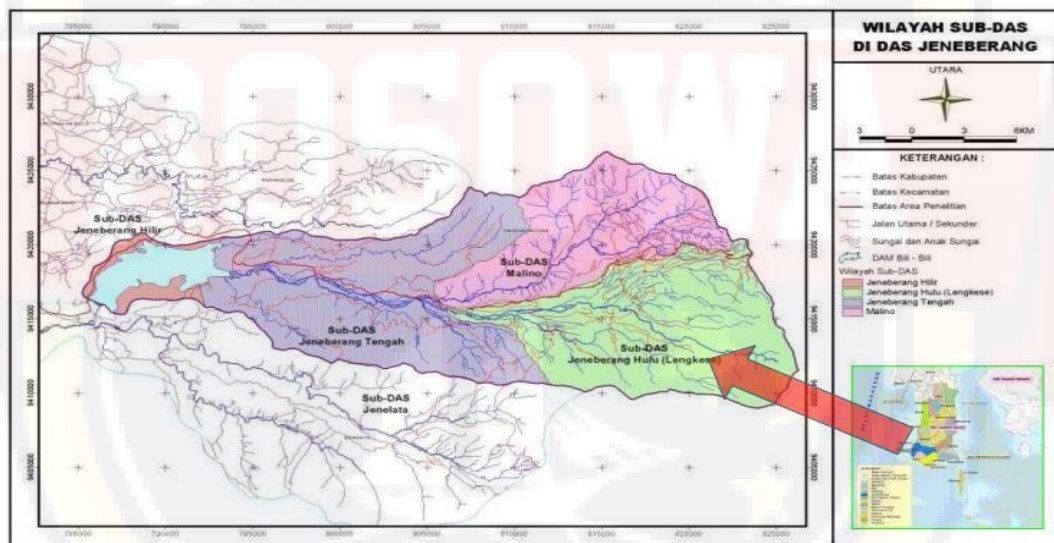
Guna meningkatkan fungsi kantong pasir biasanya diusahakan supaya kantong senantiasa dalam keadaan kosong, yaitu menggali endapan yang sudah masuk ke dalamnya. Hasil galiannya biasanya dapat dimanfaatkan sebagai bahan bangunan, yang kualitasnya cukup baik. Pada gunung berapi yang masih aktif dengan periode 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.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini secara fisik terletak dalam sistem DAS Jeneberang. Dalam penelitian ini batasan yang digunakan adalah batasan yang secara fisik mempunyai pengaruh langsung pada daya dukung waduk Bili-Bili, yakni wilayah DAS Jeneberang. Secara administratif daerah kajian Waduk Bili-Bili terletak di Kabupaten Gowa, Propinsi Sulawesi Selatan.



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian

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 longsoran 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.

3.2. 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).

3.3. Analisis Longsor dan Tingkat Sedimentasi Waduk Bili-Bili

3.3.1. Jenis dan sumber data

Jenis data yang digunakan untuk menganalisis longsor dan tingkat sedimentasi di waduk Bili-Bili terdiri dari data primer dan data sekunder. Data

primer yang dikoleksi adalah elevasi sedimentasi di sepanjang sungai Jeneberang dan waduk Bili-Bili yang diperoleh berdasarkan hasil pengukuran echosounding di waduk, dan data sekunder berupa karakteristik DAS dan waduk Bili-Bili berdasarkan hasil dari survei lapangan. Adapun data sekunder yang dikoleksi adalah data Infrastruktur Waduk Bili-Bili dari Balai PSDA dan PU, kondisi iklim dan cuaca dari Badan Meteorologi dan Geofisika.

3.3.2. Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data dilakukan dengan Survey lapangan untuk mendapatkan data primer yang dibutuhkan dengan melakukan pengamatan sedimen di beberapa titik pengamatan yang representatif. Kegiatan pengukuran diarahkan untuk mengambil data primer seperti elevasi sedimentasi yang terjadi di badan sungai dan waduk. Pengambilan data sekunder, dilakukan pada berbagai instansi yang terkait dengan pengelolaan waduk dan melakukan studi literatur.

3.4. Analisis Data

Perhitungan besarnya volume sedimen akibat terjadinya longsor Kaldera dilakukan beberapa analisis yaitu: uraian deskriptif melalui peta digital kontur dan data sekunder untuk mengetahui keadaan karakteristik daerah tangkapan waduk. selanjutnya, dilakukan analisis disepanjang hulu sungai Jeneberang dan di waduk Bili-Bili serta analisis kapasitas pengendalian sedimentasi menggunakan bangunan Sabo Dam.

a. Analisis volume sedimen di sepanjang hulu sungai Jeneberang

Volume sedimentasi yang terjadi di hulu sungai Jeneberang dianalisis berdasarkan data hidrologi dan data hasil pengukuran lapangan yang dilakukan

dengan menggunakan 26 titik potongan melintang (*cross section*). Volume sedimentasi diperhitungkan berdasarkan elevasi untuk setiap titik potong yang dibandingkan dengan data elevasi awal sebelumnya.

b. Analisis volume sedimentasi yang terjadi di Waduk Bili-Bili

Volume sedimentasi yang terjadi di waduk Bili-Bili dianalisis berdasarkan data pengukuran lapangan (*echosounding*) tingkat elevasi sedimentasi pada menggunakan 22 titik potongan melintang (*cross section*). Volume sedimentasi diperhitungkan berdasarkan elevasi untuk setiap titik potong yang dibandingkan dengan data elevasi awal sebelumnya.

c. Analisis Kapasitas Bangunan Sabo

Perhitungan besarnya volume sedimen per tahun (Q_s) di lokasi pembangunan Sabo didekati dengan perkalian antara luas daerah tangkapan air (m^2) dengan tingkat sedimentasi di daerah tangkapan air tersebut (mm/thn).

Tingkat sedimentasi dihitung dari volume sedimen yang terendapkan di waduk setiap tahunnya.

$$Q_s = \text{Luas} \times \text{tingkat sedimentasi} / \text{tahun}$$

Kapasitas bangunan Sabo tipe tertutup dihitung berdasarkan tinggi bangunan Sabo dan geometri sungainya (Subarkah, 2005).

$$V_s = \frac{1}{2} HBL_1 \rightarrow L_1 = H / (I_0 - I_s)$$

$$V_{tot} = \frac{1}{2} HBL_2 \rightarrow L_2 = H / (I_0 - I_d)$$

Dimana:

V_s = volume tampungan mati

V_{tot} = V_s + volume kontrol

B = lebar sungai rata-rata

H = tinggi check dam

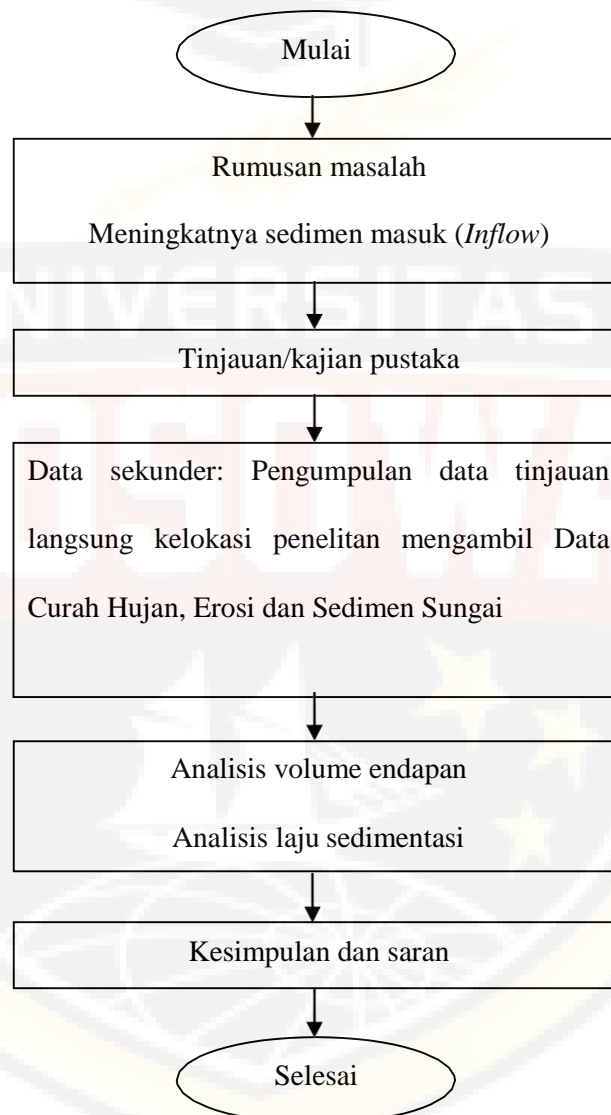
I_0 = kemiringan dasar semula

Is = kemiringan statis = $\frac{1}{2} I_0$

Id = kemiringan dinamis = $\frac{3}{4} I$

3.5. Diagram Alir / Flowchart Penelitian

Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.2 di bawah ini.



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Sumber Sedimen Daerah Tangkapan Air Waduk dan Tingkat sedimentasi

4.1. Analisis Tingkat Erosi Lahan pada Sub DAS Jeneberang

Erosi tanah merupakan kejadian alam yang pasti terjadi dipermukaan daratan. Besarnya erosi sangat tergantung dari beberapa faktor alam di tempat kejadian erosi tersebut, namun demikian saat ini manusia juga ikut berperan penting atas terjadinya erosi. Adapun faktor alam yang mempengaruhi erosi adalah erodibilitas tanah, karakteristik landsepak dan curah hujan. Akibat dari adanya pengaruh manusia dalam proses peningkatan laju erosi seperti pemanfaatan yang tidak sesuai dengan peruntukannya dan/atau pengelolaan lahan yang tidak didasari tindakan konservasi tanah dan air menyebabkan perlunya dilakukan suatu analisis tingkat erosi lahan sehingga bisa dilakukan suatu pengelolaan lahan yang berfungsi untuk memaksimalkan produktivitas lahan dengan tidak mengabaikan keberlanjutan dari sumberdaya lahan.

4.2. Data Debit Air dan Curah Hujan

Dari data debit air bulanan sejak tahun 2012 sampai dengan tahun 2018 menunjukkan bahwa musim hujan diawali pada bulan Oktober dan berakhir pada bulan Juni. Untuk setiap tahunnya rata-rata terdapat 9 bulan basah dan 3 bulan kering.

Pada musim hujan jumlah debit air maksimum terjadi pada bulan Desember tahun 2016 yaitu sebesar 217.43 m³/s. Pada bulan basah (Oktober-Juni) debit air yang masuk minimum terjadi pada bulan Mei tahun 2012 yaitu sebesar 11.55 m³/s. Tabel jumlah debit air masuk bulanan untuk setiap tahunnya pengamatan disajikan pada Tabel 1.1.

Tabel 4.1 Data Debit Air Masuk Tahunan dari Tahun 2012-2018

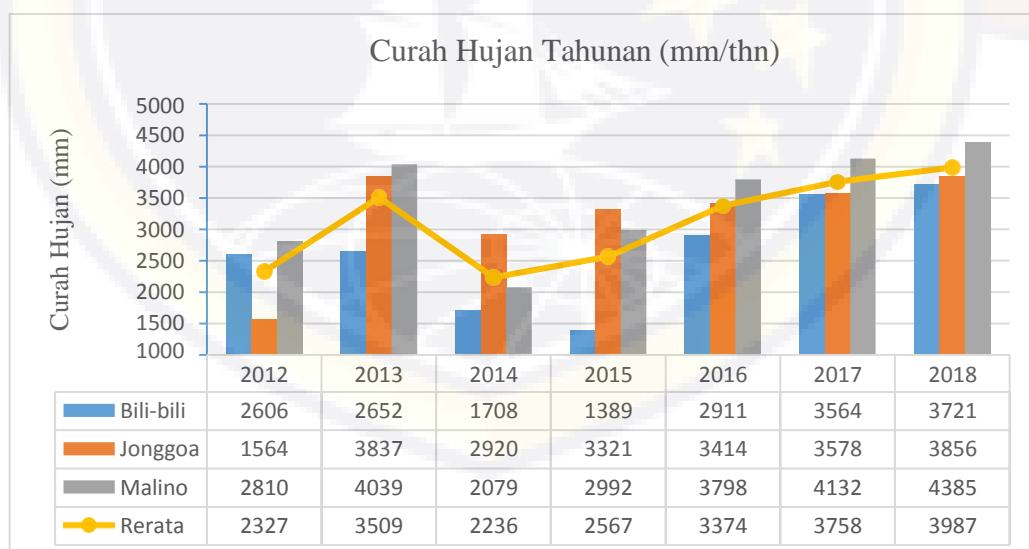
<i>Bulan</i>	<i>Inflow Discharge m³/s</i>						
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Januari	106.56	84.27	127.51	85.53	141.08	81.62	96.09
Februari	63.26	56.69	64.23	111.43	105.23	166.56	160.63
Maret	70.22	68.92	81.42	63.95	36.45	65.49	106.08
April	38.47	39.33	55.01	47.04	21.44	58.19	32.74
Mei	11.55	40.1	25.89	20.91	20.96	20.4	13.76
Juni	5.26	15.28	9.77	38.22	7.32	38.57	14.38
Juli	28.59	9.32	6.79	12.09	12.11	12.63	6.09
Agustus	3.43	5.54	3.75	5	8.28	7.03	23
September	3.13	3.51	22.9	5	3.76	5.02	3.49
Oktober	5.93	3.31	4.14	13.78	4.39	19.55	165.35
November	14.74	8.9	29.9	40.63	28.14	76.03	127.75
Desember	79.83	19.1	47.24	99.03	217.43	106.59	169.58
Σ	430.97	354.26	478.56	542.62	606.59	657.67	918.95

Data curah hujan untuk Daerah Aliran Waduk Bili-Bili diambil dari 3 stasiun curah hujan, yaitu Bili-Bili Dam, Jonggoa dan Malino. Ketiga stasiun curah hujan tersebut dipilih karena dapat mewakili data curah hujan yang mempengaruhi jumlah curah hujan di wilayah sub DAS Jeneberang

Dari data curah hujan, disajikan bahwa intensitas hujan pada bulan Juli, Agustus dan September sangat rendah dengan jumlah hari hujan rata-rata 5 hari. Curah hujan rata-rata pada bulan tersebut adalah kurang dari 150 mm, dimana berdasarkan kriteria BMG (Tjasyono, 2004), bulan ini dikategorikan sebagai bulan

kering. Intensitas hujan yang rendah memiliki energi kinetik yang rendah pula sehingga erosi percikan yang terjadi sangat kecil atau bahkan tidak ada, limpasan permukaan juga tidak terjadi karena hujan dengan intensitas yang rendah akan langsung terinfiltrasi kedalam tanah akibat keringnya lapisan tanah yang disebabkan oleh adanya penguapan. Dengan demikian pada bulan Juli, Agustus dan September diperkirakan tidak terjadi erosi.

Pada bulan Oktober sampai dengan bulan Juni curah hujan dalam sebulan lebih dari 150 mm, dikategorikan dalam bulan basah. Intensitas hujan yang terjadi sangat besar dan berlangsung rata-rata 25 hari dalam sebulan. Intensitas hujan tersebut menghasilkan energi kinetik yang besar dan aliran permukaan yang lebih banyak sehingga menyebabkan terjadinya erosi yang cukup besar. Evaporasi pada musim hujan tidak terlalu mempengaruhi kandungan air pada lapisan tanah karena kondisi tanah yang selalu basah akibat kejadian hujan yang sering terjadi dengan intensitas tinggi.

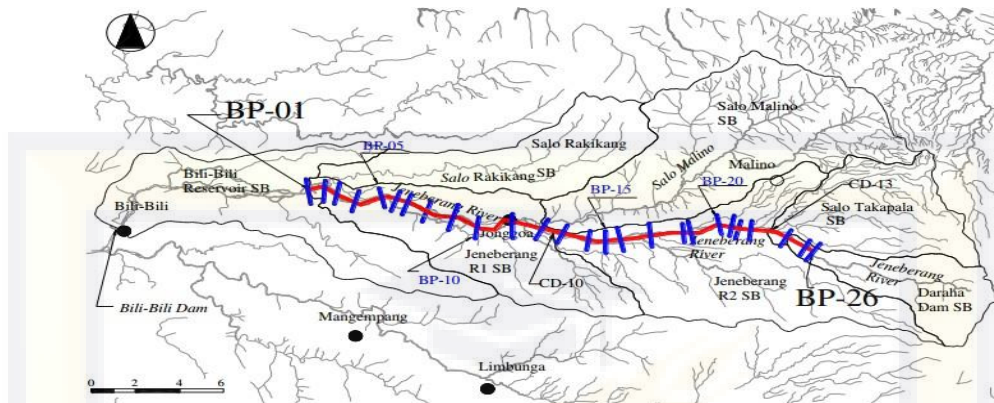


Gambar 4.1 Grafik rerata Curah Hujan Tahunan dari Tahun 2012-2018.

Selanjutnya dari grafik data curah hujan tahunan rata-rata Gambar 4.2 dari ketiga stasiun pengamatan maka curah hujan di wilayah hulu DAS Jeneberang berkisar antara 2.326 – 3.987 mm/tahun dengan rata-rata sebesar 3.108 mm/tahun. Dari rerata curah hujan tahunan selama 7 tahun menunjukkan bahwa peningkatan jumlah curah hujan terjadi pada tahun 2014 sampai pada tahun 2018. Curah hujan maksimum rata-rata adalah 3.987 mm/thn. Jika dilihat dari setiap stasiun curah hujan, tingkat curah hujan tertinggi adalah pada stasiun Malino yang berada di hulu DAS Jeneberang dengan curah hujan sebesar 4.385 mm/thn terjadi pada tahun 2018.

4.3. Analisis Volume Tampungan Waduk

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). Analisis sedimentasi akibat longsor dilakukan berdasarkan hasil survey pengukuran lapangan (2014-2018) dengan 26 titik potong melintang (BP01-BP26) di sepanjang sungai Jeneberang bagian hulu Waduk Bili-Bili seperti terlihat pada Gambar 4.3.



Gambar. 4.2 Lokasi survey *cross section* sepanjang Sungai Jeneberang Bagian Hulu Waduk Bili-bili

Volume sedimentasi di sepanjang sungai Jeneberang dihitung berdasarkan perubahan elevasi dasar sungai dari tahun 2014 sampai tahun 2018 dan selanjutnya dihitung perbedaan luas penampang untuk masing-masing titik potong. Adapun hasil analisis yang telah dilakukan berdasarkan perbandingan luas penampang setiap tahunnya disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Volume sedimen untuk setiap titik *Cross Section* tahun 2014-2018

No	Jarak	Akumulasi Jarak	Vol. Sedimen					Sabo Dam
			2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	
		m	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	
BP-1	0	0	0	0	0	0	0	
BP-2	969	969	0	353.985	71.433	187.064	141.664	
BP-3	836	1805	0	325.153	68.372	119.425	1.121.601	SP-1
BP-4	1167	2972	0	493.381	249.748	410.607	1.930.867	SP-2
BP-5	1630	4602	0	579694	295.673	649.789	648.828	
BP-6	678	5280	0	233.072	26.784	61.979	27.655	SP-3
BP-7	555	5835	0	216.912	20.59	94.349	5.354	
BP-8	1037	6872	792.268	183.248	6.09	825.566	137.464	
BP-9	1128	8000	1.357.520	253.205	48.942	813.225	226.456	SP-4
BP-10	1207	9207	3.629.147	349.562	115.27	513.222	375.139	
BP-11	1449	10656	4.546.238	1.001.023	134.766	571.519	589.324	SP-5
BP-12	1478	12134	5.978.141	902.526	655.441	512.727	311.417	
BP-13	1048	13182	5.509.860	178.11	578.298	377.187	156.258	KD-1
BP-14	1337	14519	5.178.535	197.879	476.782	115.117	340.064	

BP-15	898	15.417	1.893.209	127.506	313.51	50.956	183.328	
BP-16	686	16.103	1.717.230	105.164	185.648	6.481	72.139	
BP-17	1.134	17.237	2.584.670	76.618	315.652	143.057	176.641	
BP-18	1.509	18.746	1.590.863	623.11	357.08	290.336	156.71	KD-2
BP-19	390	19.136	296.888	201.245	82.815	37.483	30.342	
BP-20	1.459	20.595	1.940.105	2.241.106	182.658	544.599	140.74	
BP-21	844	21.439	1.497.467	2.665.345	129.418	328.34	109.796	KD-3
BP-22	407	21.846	569.698	746.939	84.517	75.429	46.71	KD-4
BP-23	790	22.636	883.615	1.482.493	164.051	718.346	3.964	CD-1-2
BP-24	1.894	24.53	1.474.953	3.453.771	794.173	1.447.067	14.983	CD-3
BP-25	904	25.434	1.955.126	315.813	240.438	0	6.476	CD-4
BP-26	279	25.713	632.423	84.308	0	0	0	
Total			45.027.954	17.391.167	5.598.149	8.893.869	6.953.921	

Berdasarkan data diperoleh bahwa total endapan sejak tahun 2014 sampai dengan 2018 adalah 83.865.060 m³. Adapun total volume erosi adalah 18.212.962 m³ sehingga total volume aliran sedimen yang terjadi pada saat itu telah mencapai 65.652.098 m³. Hal ini menunjukkan telah terjadi peningkatan jumlah sedimen secara total terutama pada saat terjadinya longsor kaldera pada tahun 2004 yang menyebabkan volume endapan sebesar 45.027.954 m³. Secara rinci dapat diperhatikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Volume Aliran Sedimen Tahun 2013-2018

Tahun	Volume Endapan Tahunan (m3)	Volume Erosi Tahunan (m3)	Volume Aliran Sedimen (m3)
2013	0	0	0
2014	45,027,954	0	45,027,954
2015	17,391,167	2,192,642	15,198,525
2016	5,598,149	5,147,673	450,477
2017	8,893,869	5,834,397	3,059,472
2018	6,953,921	5,038,250	1,915,671
Total	83,865,060	18,212,962	65,652,099

Namun demikian jika diperhatikan perubahan volume aliran sedimen setiap tahun ternyata dapat dikendalikan. Hal ini terlihat dari volume aliran sedimen

sampai pada tahun 2018 telah berkurang menjadi 1.915.671 m³. Bangunan sabo dam sebagai pengendali sedimen yang dibangun sepanjang hulu sungai Jeneberang telah berfungsi efektif. Bangunan pengendali sedimen tersebut adalah berupa Sabo dam (SD) sebagai pengendali sedimen utama yang mampu menahan pergerakan sedimen dari kaldera dibangun tujuh buah terletak di bagian hulu. kemudian Konsolidasi dam (KD) sebagai pengendali aliran debris dan angkutan sedimen dibangun di bagian tengah sebanyak 6 buah serta bangunan penangkap pasir/sand pocket (SP) untuk meminimalkan masuknya sedimen ke waduk Bili-Bili dibangun sebanyak 5 buah di bagian bawah dekat outlet waduk Bili-Bili. SP dibangun selain untuk pengendali sedimen juga dapat berfungsi untuk penampungan pasir sehingga dapat ditambang oleh penduduk setempat.

4.4. Analisis Tingkat Sedimentasi Waduk

Tingkat sedimentasi di waduk Bili-Bili dianalisis dengan menggunakan data pengukuran echosounding yang diambil berdasarkan 22 garis *cross section* (L1-L22) di sepanjang area waduk Bili-Bili Gambar 4.4 . Untuk setiap garis melintang diambil data kedalaman dengan menggunakan perahu dan alat echosounding. Data yang dikumpulkan untuk setiap garis melintang rata-rata 50-100 kali tergantung pada jarak tempuh dan keadaan lokasi. Pada setiap titik juga dilakukan plotting koordinat untuk menentukan letak dan posisi titik pengambilan data.



Gambar 4.3. Lokasi 22 titik *cross section* Waduk Bili-Bili.

Volume sedimentasi waduk yang setiap tahun yang diukur berdasarkan data *echosounding* selanjutnya dianalisis berdasarkan luas penampang untuk setiap titik penampang. Volume dihitung berdasarkan luas penampang dengan jarak antara setiap titik penampang. Volume untuk setiap tahunnya diperhitungkan berdasarkan data elevasi terakhir.

Berdasarkan dari hasil analisis data untuk setiap penampang diperoleh bahwa tingkat sedimentasi waduk pada tahun 2019 telah mencapai total 75.055.327 m³. Jika dilihat perubahan tingkat sedimentasi sebelum terjadinya longoran Kaldera yaitu sebesar 8.376.013 m³ (tahun 1997-2011) dan 14.558.105 m³ (tahun 2011-2014) sampai pada tahun 2019, menunjukkan terjadinya peningkatan yang cukup tinggi terutama pada tahun 2014-2015 yaitu sebesar 21.743.403 m³. Lebih lengkapnya disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Volume Sedimentasi per Penampang dari Tahun 1997-2019

Penampang	Volume Sedimentasi m ³							
	1997-2011	2011-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	1997-2019
L1-L2	409.856	763.793	1.891.909	-293.39	258.556	261.401	386.616.	3.417.340
L2-L3	713.636	713.669	1.533.420	341.081	-277.302	319.805	311.805	3.415.309
L3-L4	368.501	939.762	1.213.782	606.729	-468.159	285.148	458.805	3.119.420
L4-L5	-83.064	1.155.873	-103.206	344.451	-297.905	203.527	567.3	1.583.448
L5-L6	510.017	1.213.466	-197.245	225.511	3-2.773	832.048	780.298	2.844.820
L6-L7	1.222.885	724.021	146.792	444.093	90.293	439.258	916.748	3.544.834
L7-L8	420.489	33.86	2.426	294.374	146.836	-98.698	893.1	1.781.086
L8-L9	-140.736	38.679	770.972	-1.180029	1.012.080	253.517	2.296.148	2.797.114
L9-L10	-588.242	91.733	1.525.169	-926.715	887.616	447.761	1.370.925	2.360.486
L10-L11	-338.013	225.388	2.546.338	-918.752	1.299.883	943.648	819.973	3.634.817
L11-L12	1.773.260	672.264	2.812.859	-824.25	625.277	1.323.508	626.262	5.685.673
L12-L13	2.302.718	1.789.475	954.262	1.451.066	-177.507	1.166.898	511.84	6.831.854
L13-L14	1.308.677	1.817.775	314.865	2.091.326	-870.95	410.868	265.05	4.926.742
L14-L15	465.101	1.200.576	1.483.342	999.684	-545.585	-242.826	13.87	3.616.988
L15-L16	-85.844	1.463.7171	2.010.121	612.978	567.781	-307.047	137.009	4.705.762
L16-L17	24.119	520.796	2.305.184	776.520	62.289	356.925	757.904	4.446.812
L17-L18	321.434	-187.524	2.166.379	589.703	-388.331	852.853	983.192	3.439.853
L18-L19	106.759	296.976	859.526	481.675	-207.272	634.998	562.324	2.009.988
L19-L20	-325.541	1.004.805	-439.201	1.435.895	-792.915	416.070	1.205.163	2.088.207
L20-L21	0	0	-63.966	22.526	-16.769	0	193.609	135.400
L21-L22	0	0	-326	-2.991	0	0	83.173	79.856
Total	8.376.013	14.558.105	21.743.403	6.571.487	1.210.690	8.499.518	14.096.113	75.055.327

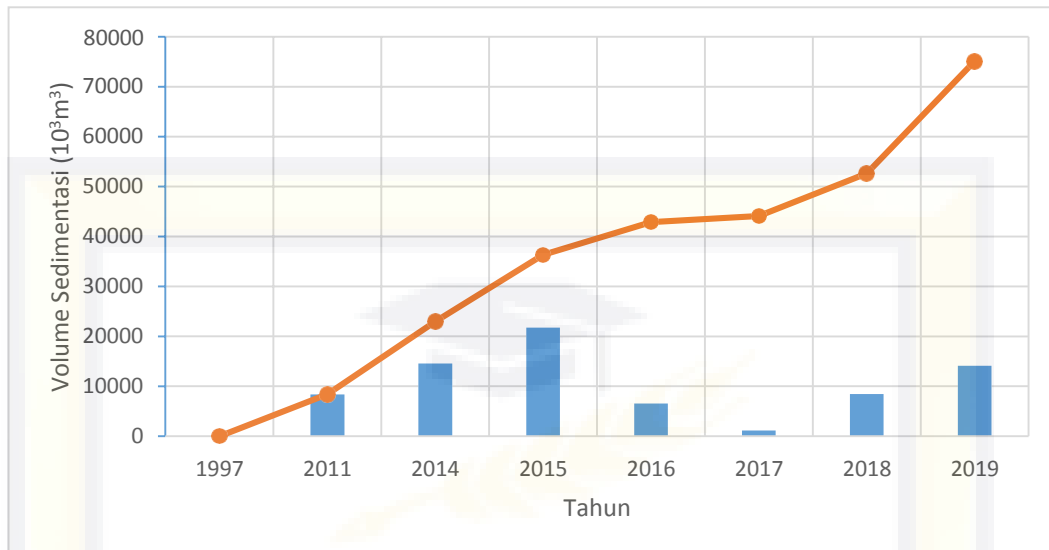
Berdasarkan data dari tahun 1997 sampai dengan tahun 2019 menunjukkan adanya peningkatan sedimentasi yang terjadi di waduk Bili-Bili. Peningkatan sedimentasi tersebut terutama pada tahun 2015 telah mencapai elevasi diatas 60 m (pada jarak kurang dari 1 km dari bendung). Jika dibandingkan pada tahun 2014 yang masih di elevasi 50 m. Hal ini menunjukkan telah terjadi peningkatan sedimentasi sekitar 10 m hanya dalam kurun waktu 1 tahun. Peristiwa longoran kaldera pada tahun 2004 merupakan penyebab terjadinya peningkatan sedimentasi tersebut, namun selanjutnya tingkat sedimentasi di waduk Bili-Bili dapat

dikendalikan dengan berkurangnya prosentase peningkatan sedimentasi untuk tahun 2016 sampai dengan 2019. Untuk lebih lengkapnya disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Volume Sedimentasi per Elevasi dari Tahun 1997-2019

Elevansi (M)	Volume Sedimentasi Waduk (m ³)							
	1997-2011	2011-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	1997-2019
100	1.842	-275.776	527.018	990.417	-154.522	0	608.231	1.697.211
99.5-90	-9.633	37.292	330.53	392.344	-80.817	-75.776	861.316	1.454.256
90-00.5	-567.692	1.1136.343	7.730.446	2.383.198	-3.082315	1.526.989	2.475.848	11.601.815
80-90	4.506.471	6.003.469	3.918.494	2.138.179	2.802.795	4.889.476	2.242.136	26.501.020
70-80	1.697.957	2.788.171	2.212.287	-353,640	2.743.048	1.272.881	4.822.661	15.183.364
65-70	859.05	955.18	59.165	534.857	-1.279009	772.503	1.647.006	3.548.811
60-65	793.352	1.972.217	3.391.338	486.13	326.941	114.446	1.196.383	8.279.907
50-60	785.561	1.857.772	3.574.124	0	-65.431	0	243.474	6.395.501
40-50	209.106	84.437	0	0	0	0	0	393.543
Total	8.376.013	14.558.105	21.743.403	6.571.487	1.210.690	8.499.518	14.096.113	75.055.327

Secara keseluruhan dari hasil pengukuran volume sedimentasi waduk diperoleh bahwa tingkat sedimentasi sebelum kejadian longsor Kaldera, sedimentasi yang tertampung di waduk Bili-Bili secara kumulatif adalah sebesar 8.376.000 m³ (April 2011). 15 tahun setelah kejadian longsor tersebut (2019) volume sedimen telah mencapai 75.055.000 m³. Dari tabel tersebut nampak bahwa akumulasi tingkat sedimentasi waduk paling tinggi adalah pada saat setelah tahun 2014, namun kemudian dapat dikendalikan pada tahun berikutnya sampai tahun 2019.



Gambar 4.4. Akumulasi Tingkat Sedimentasi di Waduk Bili-Bili 1997-2019.

Volume sedimentasi yang masuk kedalam waduk Bili-Bili terdistribusi berdasarkan elevasi dasar waduk. Berdasarkan data teknis bangunan Waduk Bili-bili diperoleh bahwa untuk elevasi 101,6 –99,5 m adalah kapasitas waduk dengan fungsi sebagai pengendali banjir dan untuk penyediaan air baku batas elevasi adalah pada 99,5 – 65 m. Adapun untuk kapasitas Daya Tampung Mati (dead storage) pada elevasi 65 m dengan maksimal tampungan adalah 29.000.000 m³.

Volume sedimentasi waduk jika dianalisis berdasarkan tinggi elevasi permukaannya menunjukkan bahwa sebagian besar sedimentasi terjadi pada elevasi 65 –99,5 m yaitu sebesar 56.835.000 m³ atau 75,7% dari total sedimen yang masuk ke waduk. Kemudian sebesar 15.069.000 m³ (20,1%) yang sampai pada tampungan mati waduk yaitu pada elevasi dibawah 65 m. namun demikian, jika dilihat khusus pada dead storage waduk maka dapat diartikan bahwa kapasitas tampungan mati telah terisi lebih dari 50%. Lebih lengkapnya dapat diperhatikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Prosentase total sedimentasi terhadap Kapasitas Waduk

Kapasitas Waduk (1000m ³)	Elevasi (m)	Sedimentasi (1000 m ³)	Total (1000 m ³)	%	
Pengendalian Banjir	41,000	100 - 101,6	1,697	3.151	4,2
		99,5 - 100	1,454		
Air Baku	305,000	90-99,5	11,602	56.835	75,7
		80-90	26,501		
		70 - 80	15,183		
		65 - 70	3,549		
		60 - 65	8,279		
Daya Tampung Mati	29,000	50 - 60	6,395	15.069	20,1
		40 - 50	394		
Total	375,000		75,055	100	

Berdasarkan data elevasi (*echosounding*) untuk setiap titik cross section (L1-L22) yang diambil disepanjang area waduk Bili-Bili dan data titik koordinat dari setiap titik pengamatan, dilakukan analisis 3 dimensi menggunakan bantuan software Surfer 8 untuk mendapatkan visualisasi perubahan permukaan hasil sedimentasi waduk dari tahun 1997 sampai dengan tahun 2019. Dari hasil analisis menunjukkan bahwa pada tahun 1997 permukaan hasil sedimentasi pada kedalaman lebih kecil dari 65 m (daya tampung mati) masih berada dalam keadaan yang normal.

Dari hasil sedimentasi waduk dari tahun 1997 sampai dengan 2019 dengan kapasitas volume 75 juta m³ terdistribusi ke dalam waduk secara tidak merata. Volume sedimen yang masuk ke waduk lebih dominan terkonsentrasi di area hulu waduk. Namun demikian area dead storage (daya tampung mati) yang berada di dekat bendungan tetap harus dikendalikan walaupun sedimen yang mencapai area tersebut hanya sekitar 20%.

4.5. Efisiensi Tangkapan Sedimen (Trap Efficiency)

Jumlah sedimen yang tertahan atau mengendap di dalam waduk dapat dihitung yaitu dengan cara mencari besarnya trap efficiency yang didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah sedimen yang mengendap di waduk dengan total angkutan sedimen yang masuk ke dalam waduk. Metode yang digunakan untuk mengestimasi efisiensi tangkapan sedimen (*trap efficiency*) adalah metode yang diusulkan oleh Brune (EM.1995) yaitu data masukan berupa perbandingan antara kapasitas waduk dengan aliran air rata-rata yang masuk ke dalam waduk tiap tahun.

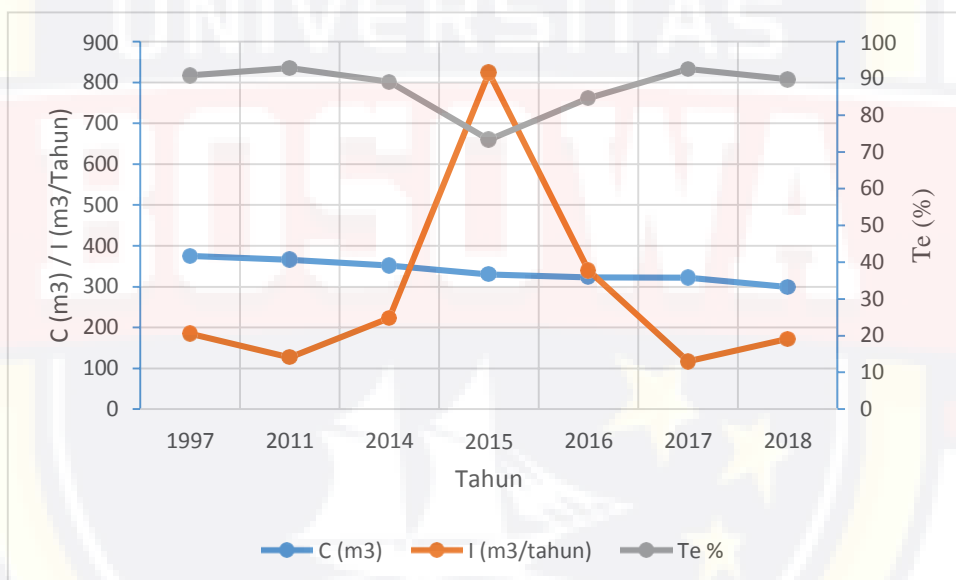
Perhitungan untuk menentukan besarnya trap efficiency yaitu berdasarkan perbandingan antara kapasitas tampungan (C) dengan inflow aliran tahunan (I), kemudian perbandingan itu diplotkan pada grafik trap efficiency yaitu hubungan antara ratio of reservoir capacity to annual inflow (sumbu x) dengan sediment trapped percent (sumbu y), nilai tersebut akan berkurang sejalan dengan umur operasional karena kapasitas waduk akan berkurang akibat sedimen.

Data kapasitas waduk diambil dari hasil pengukuran *echosounding* dari tahun 1997 sampai dengan tahun 2018. Adapun data inflow diambil dari rekaman *Automatic Water Level Recorder (AWLR)* dari tahun 1997 sampai dengan tahun 2018. Berdasarkan data tersebut kemudian dihitung perbandingan dari nilai kapasitas waduk dan inflow setiap tahun. Hasil perhitungan yang diperoleh berdasarkan data kapasitas waduk dan aliran inflow disajikan pada Tabel 4.6. Efisiensi Tangkapan Sedimen berkurang dari 90,81% (1997) menjadi 73,34%

(2015), namun kemudian meningkat kembali 92,57% pada tahun 2017 dan cenderung menurun menjadi 89,79% pada tahun 2018.

Tabel 4.7. Efisiensi Tangkapan Sedimen 1997-2018

Tahun	C (m3)	I (m3/tahun)	C/I	Te %
1997	375,000,000	1,854,040,558	0.2023	90.81
2011	366,623,987	1,270,118,181	0.2887	92.81
2014	352,065,882	2,236,983,017	0.1574	89.08
2015	330,322,479	8,242,750,015	0.0401	73.34
2016	323,750,993	3,406,095,492	0.0951	84.68
2017	322,540,303	1,172,011,222	0.2752	92.57
2018	299,945,000	1,727,769,509	0.1736	89.79



Gambar 4.5. Grafik Kapasitas waduk dan Efisiensi Tangkapan Sedimen di Waduk Bili-Bili.

Dari Gambar 4.5 mengenai grafik perbandingan kapasitas waduk dan efisiensi tangkapan sedimen di waduk Bili-Bili menunjukkan bahwa dampak dari longsoran kaldera yang terjadi pada tahun 2004 berimplikasi meningkatnya debit inflow secara cepat pada tahun 2015 sebesar 8.242.750.015 m³ dari tahun sebelumnya yang hanya 2.236.983.017 m³. Sementara kapasitas waduk terus

berkurang dari 375.000.000 m³ (1997) menjadi 299.945.000 m³ (2018). Dengan demikian efisiensi tangkapan sedimen secara nyata juga ikut menurun sampai 73,34% pada tahun 2015. Namun demikian kemampuan waduk kembali membaik karena adanya usaha pengendalian sedimen yang dilakukan di sepanjang sungai Jeneberang yang turut mempengaruhi masuknya sedimen ke waduk Bili-Bili.

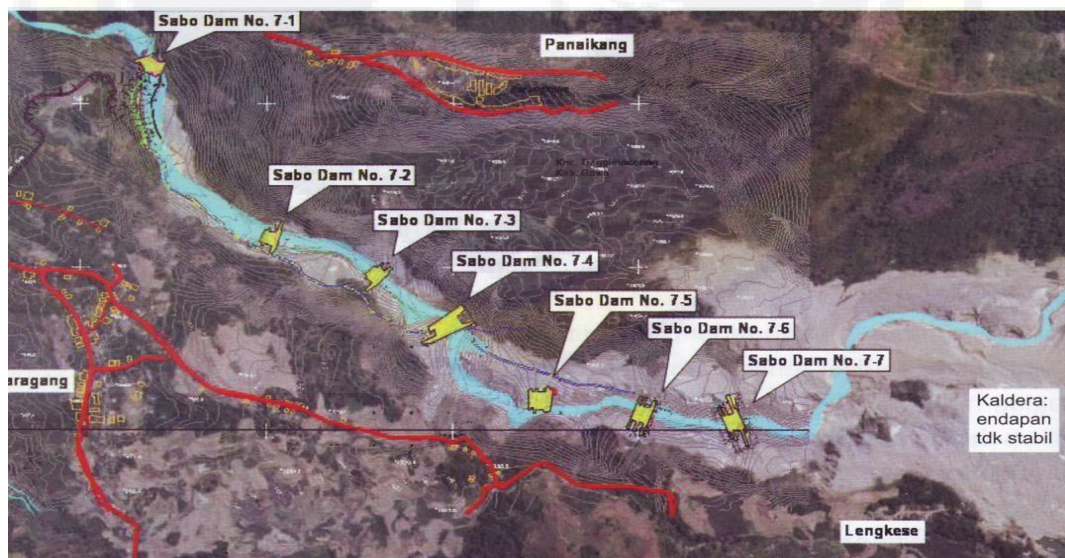
4.6. Identifikasi Pola Pengendalian Bangunan Pengendali Sedimentasi Daerah Tangkapan Air Waduk Bili-Bili

4.6.1. Kajian Kapasitas Bangunan Pengendali Sedimen

Runtuhnya dinding Kaldera pada tahun 2004 menyebabkan tingkat sedimentasi sungai Jeneberang meningkat tajam akibat tingginya material longsor yang masuk ke badan sungai. Berdasarkan data sampai dengan tahun 2018, volume material yang longsor mencapai 250-300 juta m³ (JICA, 2005) dan yang berupa sedimen telah mengalir ke sungai Jeneberang sebesar 140 juta m³ dan selebihnya masih berada di Kaldera. Material longsor yang tertinggal di bagian Kaldera Gunung Bawakaraeng tersebut bersifat tidak stabil yang berarti sewaktu-waktu akan dapat terbawa ke badan sungai Jeneberang yang merupakan sungai utama menuju waduk Bili-Bili. Dengan demikian erosi longsor masih berpotensi untuk terjadinya aliran sedimen yang besar. Berdasarkan hal tersebut telah dibangun pengendali aliran sedimen berupa sabo dam, konsolidasi dam, kantong pasir (*sand pocket*). Pelaksanaan pengendalian sedimentasi akibat longsor di sepanjang DAS Jeneberang dibuat dalam empat bagian, yaitu di bagian hulu (*upper stream*), tengah (*middle stream*), hilir (*downstream*) dan waduk Bili-Bili.

4.6.2. Bangunan Sabo di Bagian Hulu (*upper stream*) Sungai Jeneberang

Pembangunan sabo di bagian hulu dilakukan untuk mengendalikan pergerakan sedimen (*debris flow*). Pengendalian aliran debris di bagian hulu dilakukan dengan membangun sabo dam yang berlokasi paling dekat dengan dinding kaldera gunung Bawakaraeng. Bangunan sabo ini memiliki fungsi utama agar mampu mengantisipasi terjadinya erosi lateral dan tingginya aliran debris yang terjadi. Ada dua tipe struktur yang dibangun yaitu, kombinasi antara tipe beton, dan tipe dengan dinding baja ganda. Kedua tipe ini dipilih untuk menghadapi gerakan sedimen yang kuat di bagian hulu (Budiman et al. 2012). Pada bagian ini dibangun 7 (tujuh) unit Sabo Dam dengan initial SD 7-1 sampai dengan SD 7-7. Dari ketujuh seri sabo dam nampak bahwa SD 7-1 yang paling vital sehingga dirancang lebih kuat dan kokoh. Setelah beberapa kali mengalami kerusakan dan perbaikan, akhirnya pada bagian tengah (yang paling lemah) dipasang beton dengan menggunakan metode ISM (*insitu site mixing*) dan CSG (*cemented sand and gravel*). Adapun lokasi penempatan dari sabo dam disajikan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Lokasi penempatan sabo dam SD7-1 –SD 7-7.

Sabo Dam SD 7-1 merupakan bangunan sabo yang memiliki kapasitas tampung sedimen terbesar yaitu 453.000 m³. Adapun dari total volume sedimen yang dapat dikendalikan yaitu SD 7-7 merupakan bangunan sabo yang paling mampu menahan sedimen sebesar 10.006.925 m³. Hal ini disebabkan letak SD 7-7 berada paling dekat dengan lokasi longsoran Kaldera sehingga memiliki konstruksi yang lebih kuat khususnya dalam menahan pergerakan sedimen longsoran sebelum berpindah ke bangunan sabo lainnya.

Berdasarkan hasil analisis dari ketujuh bangunan pengendali SD tersebut menunjukkan bahwa sabo dam efektif mengendalikan volume sedimen sebesar 29.561.034 m³. Dalam hal ini, dapat dilihat pada volume sedimen besar dan kapasitas tampung sedimen sehingga dari total tersebut yang dikendalikan secara langsung sebesar 1.299.500 m³ dan tidak langsung sebesar 28.261.533 m³. Pengendalian secara langsung adalah endapan yang tertahan sebagai volume sedimen dan volume dari kapasitas tampung sedimen pada bangunan sabo dam, adapun untuk pengendalian secara tidak langsung adalah volume sedimen yang tidak stabil dan volume tampungan sungai (*river bank*) pada bangunan sabo dam. Secara jelas kapasitas untuk masing-masing Bangunan Pengendali Sabo Dam disajikan pada Tabel 4.8.

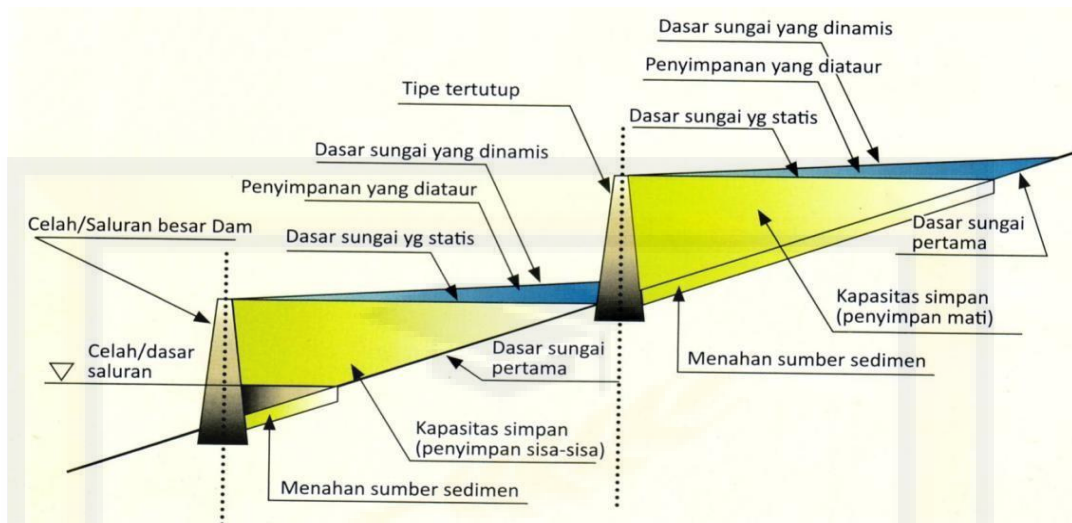
Tabel 4.8. Kapasitas Bangunan Pengendali Sabo Dam di *Upper Stream*

Sabo Dam	Dimensi Sabo		Vol. Sedimen (m ³)	Kapasitas Tampung Sedimen (m ³)	<i>River Bank</i> (m ³)	Endapan Tidak Stabil (m ³)	Total Vol. Sedimen Yang Dikendalikan (m ³)
	Tinggi Dam Utama (m)	Lebar Dam (m)					
SD 7-7	10,0	163,0	15,700	31,900	115,000	9,844,325	10,006,925
SD 7-6	10,0	102,8	32,900	45,700	132,500	7,443,775	7,654,875
SD 7-5	14,5	81,0	50,000	76,300	96,000	4,634,350	4,856,650
SD 7-4	10,0	153,0	44,500	68,500	66,000	2,441,925	2,620,925
SD 7-3	12,5	121,0	51,000	102,000	70,000	1,886,238	2,109,238
SD 7-2	12,5	97,0	34,000	68,000	70,000	912,936	1,084,936
SD 7-1	12,0	94,5	226,000	453,000	422,000	126,485	1,227,485
TOTAL			454,100	845,400	971,500	27,290,034	29,561,034

4.6.3. Bangunan Sabo di Bagian Tengah (*middle stream*) Sungai Jeneberang

Pada bagian tengah sungai Jeneberang, aliran debris dan angkutan sedimen tetap perlu dikendalikan. Pengendalian sedimen tersebut pada bagian tengah bertujuan untuk membuat kondisi dasar sungai stabil, dan profil tebing sungai dengan elevasi dasar sungai. Selain itu, juga dilakukan untuk mengendalikan arah aliran debris dan menampung endapan angkutan sedimen. Untuk itu pada bagian tengah sungai Jeneberang dibangun sabo dam berseri yang memiliki fungsi, selain menahan sedimen juga menstabilkan dasar sungai, mengurangi gerakan sedimen sekunder, mengendalikan erosi tebing sungai pada saat banjir, menampung dan mengatur endapan aliran debris dari hulu, serta mengarahkan aliran air.

Pada bagian ini dibangun 4 (empat) unit Sabo Dam dengan initial CD-1 sampai dengan CD-4, dan 4 (empat) unit Konsolidasi Dam dengan initial KD-1 sampai dengan KD-4. Struktur dan tipe yang dipakai adalah sabo dam berseri dan konsolidasi dam. Ada enam tipe sabo dam berseri dengan lima unit diantaranya memiliki tipe tertutup dan satu unit tipe terbuka.



Gambar 4.7 Sabo dam Tipe Terbuka dan Tipe Tertutup pada bagian tengah sungai Jeneberang

Perbedaan kemampuan kedua tipe tersebut dalam mengendalikan sedimen disajikan dari kapasitas simpan dan pengendalian sumber sedimen. Pada tipe terbuka dimensi dan jumlah celah mempengaruhi volume kontrol sedimen. Makin kecil dimensi celah dan makin sedikit jumlah celah maka makin besar volume kontrol sedimen. Hasil analisis dari ketujuh bangunan konsolidasi dam menunjukkan bahwa bangunan konsolidasi dapat mengendalikan volume sedimen secara efektif sebesar $49.989.195 \text{ m}^3$. Dalam hal ini, jumlah sediman dikendalikan semakin berkurang dan disesuaikan dengan kapasitas tampung sedimen besar. Dari total yang dikendalikan secara langsung sebesar $1.951.800 \text{ m}^3$ dan tidak langsung sebesar $48.037.395 \text{ m}^3$. Pengendalian secara langsung adalah yang tertahan sebagai volume sedimen dan volume dari kapasitas tampung sedimen pada bangunan konsolidasi dam, adapun untuk pengendalian secara tidak langsung adalah volume sedimen yang tidak stabil dan volume tampungan sungai (*river bank*) pada bangunan konsolidasi dam. Selanjutnya kapasitas bangunan pengendali sabo dam disajikan pada Tabel 4.9.

Tabel. 4.9. Kapasitas Bangunan Pengendali Sabo Dam di *Middle Stream*

Sabo Dam	Dimensi Sabo		Vol. Sedimen (m ³)	Kapasitas Tampung Sedimen (m ³)	<i>River Bank</i> (m ³)	Endapan Tidak Stabil (m ³)	Total Vol. Sedimen Yang Dikendalikan (m ³)
	Tinggi Dam Utama (M)	Lebar Dam (M)					
CD-3	6,00	104,0	54,700	131,300	105,000	7,977,185	8,268,185
CD-2	6,00	107,0	36,000	78,600	144,900	12,813,096	13,072,596
CD-1	12,30	886,0	17,200	54,900	125,800	16,945,203	17,143,103
KD-4	5,00	143,5	48,700	117,900	72,200	4,203,326	4,442,126
KD-3	7,00	323,7	55,800	175,500	76,500	3,246,813	3,554,613
KD-2	9,00	230,0	37,200	117,000	76,500	1,571,452	1,802,152
KD-1	7,00	186,0	247,300	779,700	461,700	217,720	1,706,420
TOTAL			496,900	1,454,900	1,062,60	46,974,795	49,989,195

4.6.4. Bangunan Kantong Pasir di Hilir (downstream) sungai Jeneberang

Pada bagian hilir merupakan bagian penanganan pengendapan sedimen, dan pengendalian arah aliran sedimen untuk itu pada bagian ini dibangun *sand pocket* yang berfungsi menampung material krakal (gravel) dan pasir dalam volume yang banyak. Beberapa sabo dam dan konsolidasi dam dibangun secara paralel dengan peninggian *sand pocket* yang ada dan penguatan pekerjaan perlindungan hulu dan hilir untuk membantu meningkatkan kapasitas pengendalian sedimen dan mengarahkan arah aliran air. Tertampungnya sedimen yang berupa material krakal dan pasir membantu masyarakat untuk memanfaatkannya dengan melakukan penambangan.

Sebelum terjadi longsor Kaldera pada bagian ini telah dibangun 5 (lima) unit bangunan sabo berupa Sand Pocket (SP-1 sampai dengan SP-5). Untuk meminimalkan sedimentasi yang masuk ke waduk Bili-Bili telah dilakukan rehabilitasi dari bangunan *Sand Pocket*. Aktifitas penambangan di SP-5 tidak terlalu banyak karena jaraknya cukup jauh dari lokasi utama konsumen, yaitu kota

Makassar (sekitar 60 km). Pada musim hujan rata-rata 20 truk dan musim kering 30 truk (kapasitas 4 m³) setiap hari mengangkut pasir, batu dan sirtu (pasir batu) ke Malino (jarak 16 km) untuk pembangunan perumahan. Estimasi volume yang dihasilkan adalah 80 m³ pada saat musim hujan dan 120 m³ pada musim kering

Penambangan yang aktif adalah pada bagian hulu dan hilir bangunan sabo dam SP-3. Pada bagian hulu, hasil tambang berupa pasir, batu dan sirtu diangkut ke Makassar untuk digunakan sebagai bahan pembuatan jalan raya, pondasi bangunan perumahan. Adapun pada bagian hilirnya, terutama batu sungai digunakan sebagai bahan baku dari 7 pabrik pemecah batu di sekitar SP-3. Berdasarkan jumlah dan kapasitas air pabrik tersebut diperkirakan 1000 m³ material sedimen diangkut setiap hari.

Penambangan pada bagian hilir bangunan sabo SP-2 juga aktif dilakukan khususnya untuk melayani kota Sungguminasa dan Makassar. Volume penambangan adalah sebesar 900 m³ per hari. Adapun pada lokasi SP-1 merupakan lokasi yang paling banyak melakukan aktifitas penambangan khususnya untuk material pasir. Hal ini karena dekatnya dengan kota Makassar (sekitar 40 km) dan banyaknya material pasir yang tersedia. Ratusan truk dengan kapasitas 10 m³ sampai 17 m³ mengangkut pasir ke daerah-daerah konsumen. Berbagai alat berat seperti excavator (*backhoes*) beroperasi untuk mengambil material pasir. Volume penambangan adalah 2000 m³ per hari. Pada musim kering tidak ada penambangan karena kualitas pasir tidak baik karena tertutupi oleh lumpur yang tebal.

Dari hasil penelitian ini terdapat beberapa hal yang dapat dijadikan pertimbangan dalam mengambil kebijakan ke depan. Salah satunya adalah faktor

karakteristik sub DAS Jeneberang dan faktor sosial ekonomi masyarakat setempat. Jika melihat karakteristik wilayah sub DAS Jeneberang terutama pada bagian hulu yang menjadi arahan pertimbangan kebijakan sebaiknya mengacu pada: kondisi eksisting lahan setempat dikaitkan dengan komoditas tanaman yang ada; tingkat erosi lahan kaitannya dengan pola konservasi yang ada dan/ataupun telah diterapkan oleh masyarakat; kondisi pergerakan tanah pada bagian kaldera; indeks kapasitas waduk yang berdampak pada tingkat pendapatan masyarakat dan pemerintah daerah setempat.

Oleh karena itu direkomendasikan kepada Pemerintah Kabupaten Gowa dan khususnya pada Instansi Teknis maupun non Teknis yang terkait sebagai stakeholders penentu kebijakan, mengenai pemanfaatan lahan di hulu DAS Jeneberang dan khususnya terhadap keberlanjutan fungsi waduk Bili-Bili sebagai waduk multiguna, yaitu:

- a. Laju erosi permukaan terbesar adalah penutupan lahan berupa ladang/tegalan sebesar 29.552,14 ton/ha/tahun. Oleh karena itu perlu dievaluasi kembali permasalahan pemanfaatan lahan pada bagian hulu DAS Jeneberang terkait dengan kondisi lahan dengan tingkat erosi yang semakin rawan.
- b. Akibat longsoran kaldera maka sampai pada tahun 2009, volume sedimentasi di waduk Bili-Bili telah mencapai 75.055.000 m³.
- b. Oleh karena itu, pada wilayah kaldera G. Bawakaraeng yang masih rawan longsor susulan perlu dilakukan pengelolaan secara baik pada lahan yang telah dibuka oleh masyarakat melalui program reboisasi atau sejenisnya.

- a. Perlu diintensifkan dalam bentuk penyuluhan terhadap mengenai pentingnya menjaga struktur pengendali terasering kaitannya dengan pengendalian erosi lahan khususnya kawasan DAS Jeneberang pada bagian hulu dengan mensosialisasikan Peraturan Pemerintah No.37 Tahun 2012 Tentang Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) sebagai tindak lanjut dari UU No.7 Tahun 2004 Tentang Sumber Daya Air.
- b. Peningkatan aktifitas penambangan sebesar 30% (rata-rata eksisting 2,19 juta m³/tahun), dapat menurunkan tingkat sedimentasi waduk sebesar 19,8%. Sehingga dengan adanya signifikansi antara tingkat aktifitas penambangan terhadap tingkat sedimentasi waduk maka perlu dioptimalkan pemanfaatan hasil tambang sedimen namun tetap menjaga kelestarian fasilitas bangunan pengendali sedimen dengan menetapkan aturan-aturan yang ketat terhadap izin dan cara penambangan.
- c. Melibatkan masyarakat dalam mewujudkan kawasan konservasi, memelihara fasilitas struktur bangunan pengendali, pengaturan cara penambangan pasir yang tidak merusak. Dengan demikian diharapkan terbentuknya komunitas yang dapat bertanggung jawab dalam memelihara fasilitas penunjang tersebut sehingga dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian karakteristik sumber sedimen dan tingkat sedimentasi waduk;

1. Tinggi elevasi permukaannya menunjukkan bahwa sebagian besar sedimentasi terjadi pada elevasi 65 – 99,5 m yaitu sebesar 75,7% dari total sedimen yang masuk ke waduk. Kemudian sebesar 20,1% yang sampai pada tampungan mati waduk yaitu pada elevasi dibawah 65 m, jika dilihat khusus pada *dead storage* waduk maka dapat diartikan bahwa kapasitas tampungan mati telah terisi lebih dari 50%.

2. Kapasitas Bangunan Pengendali dan Pola Pengendalian sedimen

Bangunan sabo dam di hulu sungai Jeneberang mampu mengendalikan sedimen sebesar 35% dari total sedimen. Bangunan sand pocket menampung sedimen dalam volume yang besar sehingga dimanfaatkan oleh masyarakat untuk melakukan penambangan dengan total volume yang ditambang adalah 2.190.000 m³ per tahun.

5.2. Saran

1. 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.
2. Dalam pengambilan sampel sedimen tersuspensi sebaiknya dilakukan pada saat banjir atau debit tinggi.



DAFTAR PUSTAKA

- Arsyad, S. 2006. *Konservasi Tanah dan Air*. Edisi kedua. IPB Press. Bogor.
- Asdak, C. 2004. *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Gajah Mada University Press. Cetakan ketiga. Yogyakarta.
- Asdak, Chay. 2010. *Hidrologi Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Gajah Mada University Press. Yogyakarta
- Budiman dan Haeruddin, C.M. 2012. *Mengendalikan MegalongSORAN Gunung Bawakaraeng*. PT. Sarana Komunikasi Utama. Bogor.
- Fadiyah. 2006. *Kajian Pengaruh Erosi Lahan terhadap Sedimentasi di Waduk Bili-Bili Kabupaten Gowa Propinsi Sulawesi Selatan*. [Tesis]. Sekolah Pascasarjana, Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- JICA. 2005. *The Study on Capacity Development for Jeneberang River Basin Management in the Republic of Indonesia*. Final Report. Volume 1. Japan International Cooperation Agency.
- Kironoto, BA. 2006. *Sedimentasi Waduk dan Erosi Lahan. Program Magister Pengelolaan Bencana Alam (MPBA)*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- LPM UNHAS. 2004. *Laporan Akhir ANDAL Pekerjaan Pengendalian Sedimen akibat Longsor Dinding Kaldera Gunung Bawakaraeng*. Lembaga Pengabdian pada Masyarakat Universitas Hasanuddin. Makassar.
- PPLH UNHAS. 2000. *Pengelolaan Terpadu Daerah Aliran Sungai (DAS) Jeneberang Tahap I*. Pusat Penelitian Lingkungan Hidup. Makassar.
- Puslitbang SDA. 2008. *Pengelolaan Danau dan Waduk di Indonesia. Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air*. Balai Lingkungan Keairan. Bandung.

Subarkah dan Diah Rahayu P. 2005. *Sistem Pengendalian Banjir dan Debris. Program Magister Pengelolaan Bencana Alam (MPBA)*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.

Sukartaatmadja, S. 2004. *Perencanaan dan Pelaksanaan Teknis Bangunan Pencegah Erosi*. Institut Pertanian Bogor (IPB). Bogor.

Tangkaisari, R. 1987. *Tingkat Erosi di Sub DAS Jeneberang*. Bulletin Penelitian Universitas Hasanuddin. Ujung Pandang.

Tjasyono, B. 2004. *Klimatologi*. Penerbit ITB. Bandung.

Undang-Undang No.7 Tahun 2004. Tentang Sumber Daya Air.



LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Curah Hujan Bulan untuk Setiap stasiun pengamatan

Stasiun Bili-bili

Tahun	Bulan (mm)												Total (mm/thn)
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nop	Des	
2011	561	448	400	323	186	31	0	0	0	9	151	497	2606
2012	725	341	218	154	30	18	3	0	4	61	178	920	2652
2013	257	451	424	115	90	4	4	0	9	7	138	209	1708
2014	208	122	226	79	131	26	21	0	0	137	216	223	1389
2015	543	686	377	119	0	0	0	2	5	255	367	557	2911
2016	691	758	509	180	78	118	1	0	10	179	270	770	3564
2017	787	629	505	299	167	230	72	0	5	274	313	440	3721
Max	787	758	509	323	186	230	72	2	10	274	367	920	3721
Rerata	539	491	380	181	97	61	14	0	5	132	233	517	2650
Min	208	122	218	79	0	0	0	0	0	7	138	209	1389

Stasiun Jongga

Tahun	Bulan (mm)												Total (mm/thn)
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nop	Des	
2011	464	122	0	0	0	82	1	0	0	1	388	506	1564
2012	978	640	484	104	76	23	12	65	16	78	233	1128	3837
2013	506	747	564	238	129	30	15	0	2	17	264	408	2920
2014	509	565	668	262	72	25	78	27	31	162	353	569	3321
2015	1019	356	521	138	0	0	0	3	5	224	380	768	3414
2016	702	902	440	464	34	131	33	4	3	204	213	448	3578
2017	805	398	484	281	139	295	27	40	3	351	537	496	3856
Max	1019	902	668	464	139	295	78	65	31	351	537	1128	3856
Rerata	712	533	452	212	64	84	24	20	9	148	338	618	3213
Min	464	122	0	0	0	0	0	0	0	1	213	408	1564

Stasiun Malino

Tahun	Bulan (mm)												Total (mm/thn)
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nop	Des	
2011	705	583	498	265	173	90	7	0	0	2	125	362	2810
2012	1005	727	420	132	79	40	23	41	17	80	374	1101	4039
2013	221	482	424	205	188	88	16	0	0	12	6	437	2079
2014	505	411	495	312	131	46	40	22	0	174	335	521	2992
2015	786	829	483	202	0	0	0	7	1	169	448	873	3798
2016	677	702	410	267	89	219	8	2	0	268	361	1129	4132
2017	616	636	567	424	224	390	80	35	3	215	379	816	4385
Max	1005	829	567	424	224	390	80	41	17	268	448	1129	4385
Rerata	645	624	471	258	126	125	25	15	3	131	290	748	3462
Min	221	411	410	132	0	0	0	0	0	2	6	362	2079



Lampiran 2. Output General Cell

Grid Number	C_Faktor	Flow Direction	K_Faktor	Land Slope	Mannings_n	P_Fact	Rec_CellNo	SCS_No	Slope Length	Soil_Texture	Soil Group	Surf Cond
1000	0.008	5	0.48	17.564	0.6	1	3	73	150	2	C	0.34
2000	0.008	5	0.48	27.079	0.6	1	8	73	150	2	C	0.34
3000	0.008	5	0.48	17.472	0.6	1	9	73	150	2	C	0.35
4000	0.0079	5	0.48	25.275	0.599	1	10	73	150	2	C	0.34
5000	0.0079	6	0.479	48.415	0.6	1	10	73	150	2	C	0.34
6000	0.1164	5	0.48	42.555	0.525	1	17	75	150	2	C	0.4
7000	0.008	5	0.479	32.426	0.6	1	18	73	150	2	C	0.35
8000	0.008	5	0.48	35.518	0.6	1	19	73	150	2	C	0.35
9000	0.008	3	0.48	47.144	0.6	1	10	73	150	2	C	0.35
10000	0.008	5	0.48	32.116	0.6	1	21	73	150	2	C	0.35
11000	0.008	5	0.48	38.277	0.6	1	22	73	150	2	C	0.35
12000	0.008	5	0.48	41.499	0.6	1	23	73	150	2	C	0.35
13000	0.008	6	0.454	68.921	0.6	1	23	73	150	2	C	0.34
14000	0.008	5	0.423	35.982	0.6	1	25	73	150	2	C	0.35
15000	0.3	5	0.48	52.214	0.4	1	30	79	150	2	C	0.5
16000	0.3	7	0.479	52.214	0.4	1	15	79	150	2	C	0.5
17000	0.1138	5	0.48	56.377	0.527	1	32	75	150	2	C	0.4
18000	0.008	3	0.48	33.968	0.6	1	19	73	150	2	C	0.35
19000	0.008	5	0.48	20.437	0.6	1	34	73	150	2	C	0.35
20000	0.008	7	0.48	26.783	0.6	1	19	73	150	2	C	0.35
21000	0.008	5	0.48	23.968	0.6	1	36	73	150	2	C	0.35
22000	0.008	5	0.48	23.256	0.6	1	37	73	150	2	C	0.35
23000	0.008	7	0.48	41.773	0.6	1	22	73	150	2	C	0.35
24000	0.008	5	0.48	44.646	0.6	1	39	73	150	2	C	0.35
25000	0.008	5	0.48	45.243	0.6	1	40	73	150	2	C	0.35
26000	0.008	5	0.412	61.525	0.599	1	41	73	150	2	C	0.34
27000	0.008	5	0.28	50.254	0.599	1	42	73	150	2	C	0.34
28000	0.1284	5	0.48	14.676	0.517	1	49	75	150	2	C	0.41
29000	0.0679	7	0.48	26.546	0.558	1	28	74	150	2	C	0.38
30000	0.3	3	0.48	30.058	0.4	1	31	79	150	2	C	0.5
31000	0.2416	5	0.48	28.384	0.439	1	52	78	150	2	C	0.47
32000	0.0129	7	0.48	45.94	0.596	1	31	73	150	2	C	0.35
33000	0.008	4	0.48	32.998	0.6	1	55	73	150	2	C	0.35
34000	0.008	5	0.48	28.146	0.6	1	55	73	150	2	C	0.35
35000	0.008	5	0.48	25.138	0.6	1	56	73	150	2	C	0.35
36000	0.008	5	0.48	36.881	0.6	1	57	73	150	2	C	0.35
37000	0.008	5	0.48	20.134	0.6	1	58	73	150	2	C	0.35

38000	0.008	7	0.48	40.778	0.6	1	37	73	150	2	C	0.35
39000	0.008	5	0.48	32.13	0.6	1	60	73	150	2	C	0.35
40000	0.008	3	0.48	25.995	0.6	1	41	73	150	2	C	0.35
41000	0.008	5	0.479	34.288	0.6	1	62	73	150	2	C	0.35
42000	0.008	7	0.302	42.201	0.6	1	41	73	150	2	C	0.35
43000	0.0079	7	0.28	40.78	0.599	1	42	73	150	2	C	0.34
44000	0.008	5	0.28	24.291	0.599	1	65	73	150	2	C	0.34
45000	0.008	5	0.479	38.367	0.599	1	67	73	150	2	C	0.34
46000	0.008	5	0.48	44.9	0.6	1	68	73	150	2	C	0.35
47000	0.2943	3	0.48	33.542	0.403	1	48	79	150	2	C	0.49
48000	0.2943	5	0.48	31.49	0.411	1	75	79	150	2	C	0.49
1449000	0.008	8	0.48	34.5	0.6	1	1424	73	150	2	C	0.35
1450000	0.233	1	0.479	33.168	0.409	1	1429	76	150	2	C	0.27
1451000	0.3219	1	0.48	35.388	0.334	1	1430	77	150	2	C	0.24
1452000	0.0199	7	0.48	19.033	0.589	1	1451	73	150	2	C	0.34
1453000	0.008	7	0.48	14.51	0.6	1	1452	73	150	2	C	0.34
1454000	0.008	7	0.479	25.483	0.599	1	1453	73	150	2	C	0.35
1455000	0.0079	7	0.479	10.269	0.6	1	1454	73	150	2	C	0.34
1456000	0.008	7	0.479	10.114	0.6	1	1455	73	150	2	C	0.34
1457000	0.335	7	0.479	22	0.323	1	1456	77	150	2	C	0.23
1458000	0.5545	8	0.479	19.981	0.138	1	1436	79	150	2	C	0.16
1459000	0.0804	1	0.48	26.371	0.538	1	1438	74	150	2	C	0.32
1460000	0.008	7	0.479	28.739	0.599	1	1459	73	150	2	C	0.34
1461000	0.008	1	0.48	29.83	0.6	1	1440	73	150	2	C	0.35
1462000	0.008	3	0.48	37.444	0.6	1	1263	73	150	2	C	0.35
1463000	0.1926	1	0.48	49.078	0.473	1	1442	77	150	2	C	0.44
1464000	0.3	3	0.48	27.563	0.4	1	1465	79	150	2	C	0.5
1465000	0.3	1	0.48	14.78	0.4	1	1444	79	150	2	C	0.5
1466000	0.2457	7	0.48	18.776	0.473	1	1465	78	150	2	C	0.47
1467000	0.1119	1	0.48	36.938	0.528	1	1446	75	150	2	C	0.4
1468000	0.0079	1	0.479	170.448	0.599	1	1447	73	150	2	C	0.35
1469000	0.008	1	0.48	16.851	0.6	1	1451	73	150	2	C	0.34
1470000	0.008	8	0.479	31.652	0.6	1	1461	73	150	2	C	0.35
1471000	0.0101	1	0.48	47.08	0.598	1	1463	73	150	2	C	0.35
1472000	0.1348	1	0.48	90.356	0.513	1	1464	76	150	2	C	0.41
1473000	0.2841	1	0.48	63.816	0.41	1	1465	79	150	2	C	0.49
1474000	0.0833	1	0.48	32.892	0.548	1	1466	74	150	2	C	0.38
1475000	0.008	8	0.48	74.069	0.6	1	1466	73	150	2	C	0.35
1476000	0.008	8	0.479	41.184	0.599	1	1471	73	150	2	C	0.35
1477000	0.1531	1	0.479	96.144	0.5	1	1473	76	150	2	C	0.42
1478000	0.1373	1	0.48	68.442	0.511	1	1474	76	150	2	C	0.41

Lamp -1.4

Lampiran 3. Output Sedimen

Grid Number	Clay Cell Erosion	LAgg Cell Erosion	SAgg Cell Erosion	Sand Cell Erosion	Silt Cell Erosion	Total Cell Erosion	Total Cell Yeild	Total Deposition
1000	0.04	0.28	0.45	0.05	0.07	0.89	3.43	94
2000	0.09	0.59	0.94	0.11	0.15	1.89	6.23	95
3000	0.04	0.27	0.44	0.05	0.07	0.89	8.99	85
4000	0.05	0.28	0.45	0.05	0.07	0.9	3.45	94
5000	0.08	0.51	0.83	0.1	0.13	1.65	5.56	95
6000	3.96	24.53	39.57	4.75	6.33	79.14	282.84	94
7000	0.21	1.33	2.15	0.26	0.35	4.29	13.24	95
8000	0.13	0.81	1.3	0.16	0.21	2.6	19.75	88
9000	0.15	0.95	1.53	0.18	0.25	3.07	28.01	86
10000	0.26	1.6	2.58	0.31	0.41	5.17	51.05	86
11000	0.13	0.79	1.28	0.15	0.2	2.56	8.16	95
12000	0.18	1.09	1.76	0.21	0.28	3.53	10.99	95
13000	0.19	1.19	1.92	0.23	0.31	3.83	11.92	95
14000	0.46	2.87	4.63	0.56	0.74	9.27	28.39	95
15000	5.9	36.6	59.03	7.08	9.44	118.06	2719.92	69
16000	11.75	72.84	117.48	14.1	18.8	234.96	1409.8	90
17000	5.15	31.96	51.54	6.19	8.25	103.09	1007.39	85
18000	0.14	0.88	1.42	0.17	0.23	2.84	27.54	85
19000	0.06	0.36	0.57	0.07	0.09	1.15	43.89	65
20000	0.09	0.57	0.93	0.11	0.15	1.85	6.13	95
21000	0.08	0.47	0.76	0.09	0.12	1.52	65.37	55
22000	0.07	0.45	0.72	0.09	0.12	1.45	49.38	64
23000	0.21	1.28	2.07	0.25	0.33	4.14	38.12	86
24000	0.23	1.45	2.34	0.28	0.37	4.67	14.37	95
25000	0.24	1.48	2.39	0.29	0.38	4.79	51.76	84
26000	0.36	2.26	3.64	0.44	0.58	7.29	22.38	95
27000	0.34	0.85	1.94	0.07	0.2	3.41	19.32	91
28000	0.53	3.31	5.33	0.64	0.85	10.66	107.5	85
29000	0.77	4.77	7.7	0.92	1.23	15.39	47.73	95
30000	4.27	26.46	42.69	5.12	6.83	85.37	3527.07	56
31000	3.1	19.21	30.98	3.72	4.96	61.96	3018.17	63
32000	0.4	2.46	3.97	0.48	0.64	7.95	752.06	50
33000	0.13	0.83	1.34	0.16	0.21	2.69	8.54	95
34000	0.1	0.62	1.01	0.12	0.16	2.01	70.23	58
35000	0.08	0.51	0.82	0.1	0.13	1.65	5.55	95
36000	0.16	1.02	1.65	0.02	0.26	3.29	101.12	62
37000	0.06	0.35	0.56	0.07	0.09	1.12	64.45	51
399000	0	0	0	0	0	0	203283.5	1

1440000	0.2	1.22	1.96	0.24	0.31	3.93	59.64	78
1441000	0.16	1.01	1.63	0.2	0.26	3.26	10.22	95
1442000	14.31	88.7	143.07	17.17	22.89	286.13	4934.62	73
1443000	0.9	5.59	9.01	1.08	1.44	18.02	5475.12	14
1444000	0.73	4.55	7.34	0.88	1.17	14.67	5284.07	13
1445000	0.83	5.16	8.32	1	1.33	16.64	6622	15
1446000	0.37	2.29	3.7	0.44	0.59	7.4	6752.4	27
1447000	10.01	62.08	100.13	12.02	16.02	200.26	8618.1	69
1448000	0.25	1.56	2.52	0.3	0.4	5.05	15.49	95
1449000	0.15	0.9	1.46	0.17	0.23	2.91	9.2	95
1450000	3.96	24.53	39.57	4.75	6.33	79.13	315.09	94
1451000	6.14	38.08	61.43	7.37	9.83	122.85	1432.8	82
1452000	0.13	0.79	1.27	0.15	0.2	2.53	189.88	41
1453000	0.03	0.2	0.32	0.04	0.05	0.065	164.73	22
1454000	0.08	0.53	0.85	0.1	0.14	1.69	170.53	35
1455000	0.02	0.11	0.18	0.02	0.03	0.38	158.8	25
1456000	0.02	0.11	0.18	0.02	0.03	0.37	187.19	30
1457000	2.74	16.99	27.41	3.29	4.39	54.82	234.09	93
1458000	3.85	23.87	38.5	4.72	6.16	77.01	517.16	89
1459000	0.91	5.71	9.05	1.09	1.45	18.11	100.19	91
1461000	0.1	0.65	1.05	0.13	0.17	2.09	6.82	95
1462000	0.11	0.69	1.1112	0.13	0.18	2.24	26.24	81
1463000	0.17	1.05	1.69	0.2	0.27	3.38	10.55	95
1464000	6.73	41.7	67.25	8.07	10.76	134.51	852.93	90
1465000	3.66	22.66	36.56	4.39	5.85	73.11	1944.53	67
1466000	1.26	7.81	12.6	1.51	2.02	25.19	5188.45	47
1467000	1.54	9.52	15.36	1.84	2.46	30.71	922.91	66
1468000	2.3	14.28	23.03	2.76	3.69	46.07	160.79	94
1467000	3.02	18.71	30.18	3.62	4.83	60.36	192.38	95
1468000	0.04	0.26	0.42	0.05	0.07	0.84	3.26	94
1469000	0.12	0.77	1.25	0.15	0.2	2.5	8	95
1471000	0.33	2.02	3.26	0.39	0.52	6.53	45.23	89
1472000	15.01	93.07	150.11	18.01	24.02	300.23	1273.7	93
1473000	16.25	100.73	162.46	19.5	25.99	24.93	5374.88	75
1474000	1.39	8.63	13.91	1.67	2.23	27.83	803.76	67
1475000	0.61	3.77	6.08	0.73	0.97	12.17	37.14	95
1476000	0.2	1.25	2.02	0.24	0.32	4.03	12.49	95
1477000	19.18	118.93	191.83	23.02	30.69	383.66	1646.91	93
1478000	8.96	55.57	89.62	10.75	14.34	179.25	738.46	93

Lamp -1.6

DOKUMENTASI



Gambar 1. Lokasi Penambangan



Gambar 2. Lokasi Konsolidasi Dam 2



Gambar 3. Sabo Dam No. 7-1



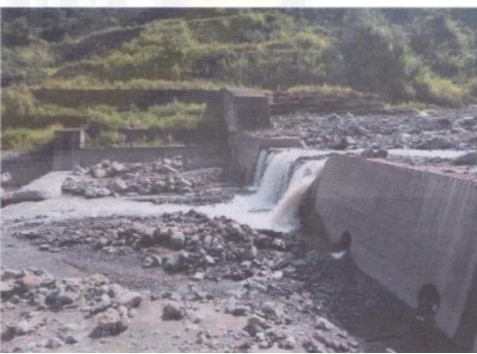
Gambar 3. Sabo Dam No. 7-2



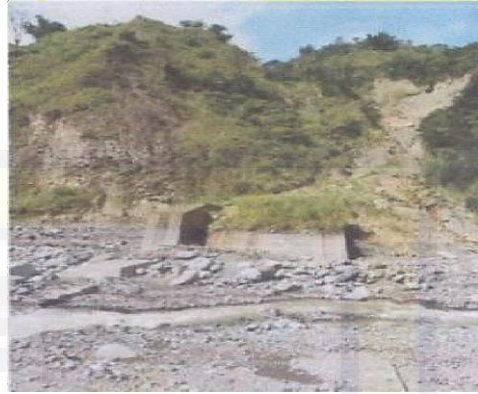
Gambar 4. Sabo Dam No. 7-3



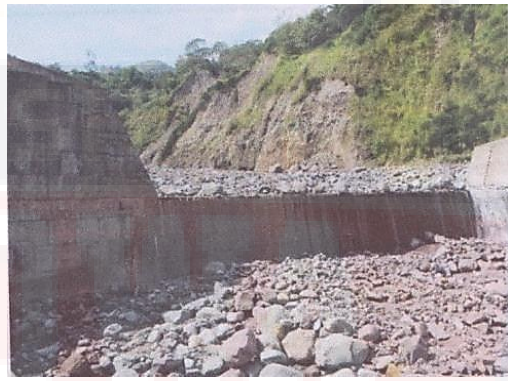
Gambar 5. Sabo Dam 7-4



Gambar 6. Sabo Dam 7-5



Gambar 7. Sabo Dam 7-6



Gambar 8. Sabo Dam 7-7





Gambar 9. Patok BM dan CP