

**TESIS**  
**DISTRIBUSI SEDIMEN UNTUK MANAJEMEN UMUR**  
**LAYANAN WADUK PONRE-PONRE**  
**THE SEDIMENT DISTRIBUTION FOR SERVICE AGE**  
**MANAGEMENT PONRE-PONRE RESERVOIR**

**ADI ROSYIDI**  
**P2301216006**



**PROGRAM STUDI S2 TEKNIK SIPIL**  
**FAKULTAS TEKNIK**  
**UNIVERSITAS HASANUDDIN**  
**MAKASSAR**  
**2020**

# TESIS

## DISTRIBUSI SEDIMEN UNTUK MANAJEMEN UMUR LAYANAN WADUK PONRE - PONRE

Disusun dan diajukan oleh :

**ADI ROSYIDI**

**Nomor Pokok P2301216006**

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Tesis

pada tanggal 06 November 2020

dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui

Komisi Penasehat,

  
Dr. Eng. Ir. Farouk Maricar, M.T.

Ketua

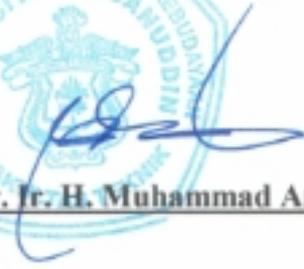
  
Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, S.T., M.T.

Sekretaris

Ketua Program Studi  
S2 Teknik Sipil

  
Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, S.T., M.T.

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin

  
Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, M.T

## ABSTRAK

**ADI ROSYIDI.** Distribusi Sedimen untuk Manajemen Umur Layanan Waduk Ponre-Ponre (dibimbing oleh **H. Farouk Maricar** dan **Bambang Bakri**).

Penelitian ini bertujuan (1) menganalisis perilaku pergerakan sedimen yang jangka panjang akan berpengaruh terhadap umur layanan waduk dan (2) menemukan konfigurasi rekayasa barrier berupa soft structure atau hard structure yang paling efektif dalam mengalihkan distribusi sedimen untuk memperpanjang umur layanan waduk.

Metode yang digunakan adalah kombinasi pendekatan modifikasi dan penelitian kualitatif berdasarkan data lapangan. Penelitian dilaksanakan di Waduk Ponre-Ponre Kabupaten Bone, Provinsi Sulawesi Selatan. Data dianalisis dengan menggunakan perangkat lunak Mike Zero yang dikalibrasi dengan data Bathimetri, kemudian dilakukan validasi dan verifikasi dengan metode pendekatan pada besaran penambahan elevasi yang didapat hasil pengukuran lapangan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa (1) sejak Waduk Ponre-Ponre dioperasikan mulai sebelas tahun yang lalu, terjadi pengurangan kapasitas tampungan waduk sebesar 6.59 juta m<sup>3</sup> Rata-rata terjadi penambahan sedimentasi 0,597 juta m<sup>3</sup> per tahun. Dengan luas catchment area 78,55 km. maka penambahan elevasi sedimentasi yang terjadi adalah 0,008 m per tahun = 7,602 mm per tahun. Angka ini lima kali lebih besar kecepatan sedimentasi rencana yang diperhitungkan hanya 1,5 mm per tahun. Perlu dilakukan langkah-langkah penanggulangan sedimentasi, baik secara soft structure maupun hard structure untuk menahan laju sedimentasi agar waduk dapat beroperasi hingga mencapai umur layanannya dan (2) rekayasa distribusi sedimen barrier paling tepat ditempatkan dengan metode parallel barrier yang memberi manfaat penambahan sedimen hanya menjadi sebesar 83,23% atau 6,327 mm per tahun.

Kata kunci: waduk, sedimentasi, rekayasa topografi

## ABSTRACT

**ADI ROSYIDI.** The Sediment Distribution for Service Age Management Ponre-Ponre Reservoir (supervised by **H. Farouk Maricar** and **Bambang Bakri**).

The research aimed (!) to analyze the long-term sediment movement behaviour which would affect reservoir service age; (2) to find out the barrier engineering configuration in the forms of the most effective soti structure and hard structure in switching the sediment distribution to lengthen the reservoir service age.

The research was conducted in Ponre-Ponre Reservoir, Bone Regency, South Sulawesi Province. The research used the combination of the modification approach and qualitative method based on the data from the field. The data were analyzed using Mike Zero soft-ware which was calibrated with Bathymetry data, the validation and verification were then carried out with the approach on the elevation increase scale which was obtained from the field measurement result.

The research result based on the facts in the field indicates that since Ponre-Ponre reservoir was operated 11 years ago the reservoir storage capacity decreases as much as 6.59 million m<sup>3</sup>. The average sedimentation increase is 0.597 million m<sup>3</sup> /per annual. With the catchment area size of 78.55 km, the sedimentation elevation increase occurring is 0.008 m per annual = 7.602 mm per annual. This figure is 5 times bigger than the sedimentation velocity plan which is predicted only as much as 1.5 mm per annual. The sedimentation counter-measures re necessary to carry out either by the soft strucwre or hard structure method to restrain the sedimentation rate in order that the reservoir can operate until its service age. The research result indicates that the sediment I barrier distribution engineering 1s mostly accurately placed using the parallel barrier method which gives the sediment increase utility to become only as much as 83.23% or 6.327 mm per annual.

Key words: Reservoir, sedimentation. topographic engineering.

## PERNYATAAN KEASLIAN THESIS

Yang Bertanda tangan dibawah ini:

Nama **ADI ROSYIDI**  
Stambuk **P2301216006**  
Strata **S2 (Magister)**  
Fakultas **TEKNIK**  
Jurusan **TEKNIK SIPIL**  
Konsentrasi **TEKNIK SIPIL KEAIRAN**  
Judul Thesis **DISTRIBUSI SEDIMEN UNTUK MANAJEMEN  
UMUR LAYANAN WADUK PONRE-PONRE**

Dengan ini menyatakan bahwa dengan sebenar-benarnya bahwa thesis yang saya susun ini benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilan tulisan orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan thesis ini adalah karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 09 November 2020

Yang Menyatakan

  
ADI ROSYIDI

## **KATA PENGANTAR**

Alhamdulillah, puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul “Distribusi Sedimen Untuk Manajemen Umur Layanan Waduk Ponre-Ponre”, yang merupakan tugas dan syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Hasanuddin Makassar.

Akhir kata, penulis menyadari sepenuhnya didalam penulisan tesis ini masih banyak kekurangan-kekurangan baik dari segi teknik penulisan maupun dari segi materi. Oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik dalam penyempurnaan dan pengembangan tesis ini lebih lanjut.

Makassar, November 2020

penulis

## DAFTAR ISI

	<b>halaman</b>
HALAMAN SAMPUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
PRAKATA .....	iii
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xii
BAB I    PENDAHULUAN.....	1
A.    Latar Belakang .....	1
B.    Rumusan Masalah.....	2
C.    Tujuan Penelitian.....	3
D.    Manfaat Penelitian.....	3
E.    Batasan Masalah.....	4
BAB II   TINJAUAN PUSTAKA .....	5
A.    Waduk dan Pengembangan SDA.....	5
1. Waduk .....	5
2. Sedimentasi.....	8
2.1 Transpor Sedimen .....	9
2.2 Mekanisme Sedimentasi Daerah Pengairan.	10
2.3 Perkiraan Muatan Sedimen Dasar.....	14
2.4 Perhitungan Debit Sedimen Melayang .....	16

2.5 Perhitungan Debit Sedimen Dasar .....	17
2.6 Sedimentasi Waduk.....	19
2.7 Pola Pengendapan Sedimen di Waduk .....	22
2.8 Faktor yang Menentukan Hasil Sedimen .....	24
2.9 Distribusi Sedimen Pada Waduk .....	25
2.10 Metode Pengendalian Sedimentasi .....	27
2.11 Model Angkutan Sedimen.....	28
B. Kerangka Konseptuan Penelitian.....	37
<b>BAB III METODELOGI PENELITIAN .....</b>	<b>38</b>
A. Data Teknis dan Geografis Lokasi Penelitian .....	38
B. Rancangan Penelitian .....	41
C. Sistematika Penelitian .....	43
D. Rancangan Pengujian Model.....	43
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>46</b>
A. Pengelolaan Sedimentasi.....	46
B. Evaluasi Sedimen.....	49
C. Kalibrasi, Validasi, dan Verifikasi.....	51
1. Kalibrasi Perangkat Lunak.....	51
2. Validasi dan Verifikasi Perangkat Lunak.....	55
D. Pengolahan Model.....	57

1. Penentuan Titik Fokus Pengamatan.....	57
2. Rekayasa Topografi.....	59
3. Pengolahan Model.....	61
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	64
A. Kesimpulan.....	64
B. Saran .....	64
DAFTAR PUSTAKA.....	65

## DAFTAR GAMBAR

Nomor	halaman
2.1	Skematis Angkutan Sedimen. .... 12
2.2	Zona Pengendapan Sedimen Pada Waduk ..... 22
2.3	Pola Pengendapan Sedimen di Waduk <i>Delta Deposits</i> ..... 22
2.4	Pola Pengendapan Sedimen di Waduk <i>Wedge-Shaped</i> ..... 23
2.5	Pola Pengendapan Sedimen di Waduk <i>Tepering deposits</i> ..... 23
2.6	Pola Pengendapan sedimen di Waduk <i>Uniform deposits</i> ..... 24
2.7	Dampak Sedimentasi dan Model Distribusi Sedimen ..... 27
2.8	Abstraksi Pemodelan ..... 29
2.9	Skema Kerangka Konseptual Penelitian ..... 37
3.1	Peta Lokasi Waduk Ponre-Ponre ..... 38
3.2	Kerangka Pikir Penelitian ..... 42
3.3	Skema Pelaksanaan Penelitian..... 43
4.1	Lengkungan Kurva Tampang Waduk Pomre-Ponre..... 48
4.2	Perbandingan Kurva Tampung Waduk ..... 50
4.3	Grafik Kalibrasi Perangkat Lunak dengan <i>Echosounding</i> ..... 52
4.4	Model Waduk Pada Perangkat Lunak Kondisi Normal..... 56
4.5	Area Fokus Penelitian Waduk Ponre-Ponre ..... 57
4.6	Titik Fokus Pengamatan Pada Waduk Ponre-Ponre ..... 58
4.7	Titik Fokus Pengamatan Pada Perangkat Lunak ..... 58
4.8	Variasi Identifikasi Arah Arus Dominan ..... 59

4.9	Variasi Peletakan <i>Buffer</i> atau <i>Barrier</i> .....	60
4.10	Variasi Peletakan <i>Single Barrier</i> .....	61
4.11	Variasi Peletakan <i>Double Barrier</i> .....	62
4.12	Diagram Perbandingan Penambahan Elevasi.....	63

## DAFTAR TABEL

Nomor	halaman
2.1	Perkiraan Muatan sedimen Dasar terhadap Sedimen Melayang .. 18
4.1	Hasil Pengukuran <i>Bathimetri</i> Waduk Ponre-Ponre tahun 2019..... 47
4.2	Perbandingan Data Perencanaan 2008 dengan Pengukuran 2019 ..... 49
4.3	Kalibrasi Perangkat Lunak Dengan <i>Echosounding</i> ..... 52

## DAFTAR GAMBAR

Nomor	halaman
2.1	Skematis Angkutan Sedimen. .... 12
2.2	Zona Pengendapan Sedimen Pada Waduk ..... 22
2.3	Pola Pengendapan Sedimen di Waduk <i>Delta Deposits</i> ..... 22
2.4	Pola Pengendapan Sedimen di Waduk <i>Wedge-Shaped</i> ..... 23
2.5	Pola Pengendapan Sedimen di Waduk <i>Tepering deposits</i> ..... 23
2.6	Pola Pengendapan sedimen di Waduk <i>Uniform deposits</i> ..... 24
2.7	Dampak Sedimentasi dan Model Distribusi Sedimen ..... 27
2.8	Abstraksi Pemodelan ..... 29
2.9	Skema Kerangka Konseptual Penelitian ..... 37
3.1	Peta Lokasi Waduk Ponre-Ponre ..... 38
3.2	Kerangka Pikir Penelitian ..... 42
3.3	Skema Pelaksanaan Penelitian..... 43
4.1	Lengkungan Kurva Tampang Waduk Pomre-Ponre..... 48
4.2	Perbandingan Kurva Tampung Waduk ..... 50
4.3	Grafik Kalibrasi Perangkat Lunak dengan <i>Echosounding</i> ..... 52
4.4	Model Waduk Pada Perangkat Lunak Kondisi Normal..... 56
4.5	Area Fokus Penelitian Waduk Ponre-Ponre ..... 57
4.6	Titik Fokus Pengamatan Pada Waduk Ponre-Ponre ..... 58
4.7	Titik Fokus Pengamatan Pada Perangkat Lunak ..... 58
4.8	Variasi Identifikasi Arah Arus Dominan ..... 59

4.9	Variasi Peletakan <i>Buffer</i> atau <i>Barrier</i> .....	60
4.10	Variasi Peletakan <i>Single Barrier</i> .....	61
4.11	Variasi Peletakan <i>Double Barrier</i> .....	62
4.12	Diagram Perbandingan Penambahan Elevasi.....	63

# **BAB I PENDAHULUAN**

## **A. Latar Belakang**

Air merupakan sumber kehidupan bagi manusia. Dalam kehidupan sehari-hari kita tidak dapat terpisahkan dengan senyawa ini karena air memiliki manfaat besar bagi kehidupan.

Air juga merupakan sumber daya alam yang terbaharui melalui daur hidrologi. Namun keberadaan air sangat bervariasi tergantung pada lokasi dan musim. Ketersediaan air di daerah tropis (sekitar khatulistiwa) sangat besar dibandingkan daerah lain seperti gurun atau padang pasir. Namun demikian juga dengan ketersediaan air pada musim basah (Oktober s/d April) lebih besar dibandingkan pada saat musim kering (April s/d Oktober) dimana ketersediaan air berkurang.

Rekayasa manusia untuk lebih dapat mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya air adalah dengan merubah distribusi air alami menjadi distribusi air secara buatan yaitu diantaranya dengan membangun Bendungan atau Waduk. Waduk merupakan suatu bangunan air yang digunakan untuk menampung debit air berlebih pada musim basah agar kemudian dapat dimanfaatkan pada saat debit air rendah saat musim kering.

Provinsi Sulawesi Selatan telah memiliki beberapa waduk salah satunya adalah waduk Ponre-Ponre yang terletak di Kabupaten Bone. Waduk bertipe *Concrete Face Rockfill Dam* ini memiliki tinggi 55 m, Panjang puncak 235 m, dan kapasitas tampung efektif sebesar 40.400.000  $m^3$ .

Bendungan Ponre-Ponre berfungsi sebagai sistem pengendalian sedimen dan banjir Sungai Tinco dan DAS Walanae, meningkatkan lahan irigasi teknis seluas 4.411 Ha, serta digunakan untuk perikanan air tawar dan pariwisata (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air. 2011).

Dalam pengelolaan waduk, sering dijumpai permasalahan yang menyangkut aspek perencanaan, pengoperasian dan pemeliharaan. Salah satu persoalan utama yang terjadi di dalam operasional waduk adalah terjadinya distribusi sedimentasi yang tidak sesuai perencanaan yang berdampak terhadap umur layanan waduk yang telah direncanakan.

Berdasarkan permasalahan tersebut perlu dilakukan rekayasa distribusi sedimen untuk mengoptimalkan umur layanan waduk.

## **B. Rumusan Masalah**

Berdasarkan permasalahan yang ada, rumusan masalah untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara merekayasa alur laju sedimen pada waduk guna memperpanjang umur layanan waduk tersebut.
2. Bagaimana menentukan penempatan rekayasa *barrier* berupa *soft structure* atau *hard structure* yang paling efektif mengalihkan distribusi sedimen untuk memperpanjang umur layanan waduk.

### **C. Tujuan Penelitian**

Tujuan utama penyusunan *thesis* ini meliputi:

1. Menganalisis perilaku pergerakan sedimen yang secara jangka panjang akan berpengaruh pada umur layanan waduk yang telah terbangun.
2. Menemukan konfigurasi rekayasa *barrier* berupa *soft structure* atau *hard structure* yang paling efektif dalam mengalihkan distribusi sedimen untuk memperpanjang umur layanan waduk.

### **D. Manfaat Penelitian**

1. Meningkatkan pemahaman tentang fungsi-fungsi dan keandalan waduk serta pengaruhnya terhadap sedimentasi.
2. Memperkaya prosedur perencanaan, desain, operasi dan pemeliharaan waduk.
3. Menambah metode pengendalian sedimentasi khususnya penanggulangan sedimentasi dalam waduk dalam rangka mencapai konsep keseimbangan *inflow-outflow* aliran sedimen.
4. Membantu pencapaian konsep keberlanjutan usia manfaat dan layanan waduk sebagai infrastruktur vital dalam penyediaan cadangan air baku untuk berbagai keperluan.

### **E. Batasan Masalah**

1. Lokasi Penelitian berada di waduk Ponre-Ponre Kabupaten Bone, Sulawesi Selatan.
2. Simulasi pola aliran sedimen dengan kondisi tanpa (*existing* waduk) dan simulasi aliran sedimen menggunakan konfigurasi barrier.
3. Simulasi menggunakan komputerasi permodelan distribusi sedimen menggunakan perangkat lunak *DHI Mike Zero*.
4. Data-data yang digunakan adalah berasal dari penelitian sebelumnya yang berhubungan.
5. Pembahasan difokuskan pada pola aliran distribusi sedimen pada waduk Ponre-Ponre.

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

### **A. Waduk dan Pengembangan Sumber Daya Air**

#### **1. Waduk**

Waduk adalah salah satu infrastruktur yang berfungsi untuk menampung air yang dapat memenuhi kebutuhan air sesuai permintaan dengan berbagai pola operasi waduk. Fungsi inilah yang menjadikan peranan waduk sangat penting saat ini. Dengan melakukan pengaturan volume air tampungan, waduk dapat memenuhi kebutuhan air yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, aktifitas ekonomi dan perkembangan irigasi untuk pertanian (Morris, 1997).

Menurut Shiklomanov (1993), dalam hal kuantitas pemanfaatan air, irigasi adalah pemanfaat terbesar dari air yang disediakan oleh waduk. Kebutuhan air irigasi mencapai 69% dari seluruh pemanfaatan air di dunia dan mencapai 89% dalam lingkup penggunaan air untuk kebutuhan konsumtif.

Makin tingginya ketergantungan manusia terhadap kebutuhan air menyebabkan makin tinggi pula tingkat efisiensi dari operasi dan pemeliharaan waduk yang harus dilakukan untuk menekan biaya yang harus dikeluarkan untuk pembangunan bendungan baru dalam rangka menambah kapasitas penyediaan air. Di satu sisi jumlah akumulasi sedimen yang mengendap di dasar waduk yang merupakan perilaku alami sungai akan memegang peranan dalam penentuan usia guna waduk (*Yachiyo Engineering CO., LTD, 2009*).

Untuk memastikan bahwa perencanaan, pelaksanaan konstruksi dan pengelolaan bendungan telah memenuhi kaidah-kaidah keamanan bendungan, Pemerintah mengeluarkan aturan bahwa tahap-tahap kegiatan tersebut diatas harus mendapat persetujuan dari Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat yang biasa disebut "Sertifikat Persetujuan". Dalam pemilihan alternatif calon bendungan yang menjadi pertimbangan utama adalah aspek teknik, yaitu lokasi, tipe, tinggi, manfaat, pola operasi, dll. Aspek tinjauan teknik yang mencakup antara lain (Morris dkk, 1997):

- 1) Lokasi; ditinjau berdasarkan kondisi topografi, geologi pondasi dan volume tampungan.
- 2) Tipe; ditinjau berdasarkan ketersediaan material, keahlian & pengalaman tenaga pelaksana, kemudahan pelaksanaan, dll.
- 3) Tinggi; ditinjau berdasarkan volume tampungan, geologi pondasi, topografi, hidrologi, dll.
- 4) Manfaat; ditinjau berdasarkan manfaat yang dapat dikembangkan seperti irigasi PLTA, pengendali banjir, air baku, dll.
- 5) Pola Operasi Waduk; ditinjau berdasarkan operasi waduk harian, tahunan, pengendali banjir, pemenuhan air irigasi, air baku air minum, PLTA beban dasar/ beban puncak, dll.

Degradasi adalah suatu keadaan dimana debit sedimen yang masuk ( $Q_s$ ) lebih kecil dari debit sedimen seimbang ( $Q_{se}$ ) dalam satu satuan waktu. Proses ini akan menyebabkan terjadinya penurunan elevasi dasar sungai sehingga kemiringan dasar sungai akan semakin curam. Peristiwa

ini biasanya terjadi pada bagian hilir bangunan bendung atau Bendungan terutama bangunan-bangunan pengatur sungai (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2009).

Sungai disebut dalam keadaan seimbang jika sedimen yang melewati suatu penampang sungai tetap, atau dengan kata lain debit sedimen (*sedimen discharge*) yang masuk sampai dengan debit sedimen yang keluar didalam satu satuan waktu. Keadaan dimana jumlah debit sedimen yang masuk sama dengan yang keluar didalam satu satuan waktu biasa disebut dengan Debit Sedimen Seimbang ( $Q_{se}$ ) (Pranowo, 2001).

Aggradasi adalah suatu keadaan dimana debit sedimen yang masuk ( $Q_s$ ) lebih besar dari debit sedimen seimbang ( $Q_{se}$ ) dalam satu satuan waktu. Proses aggradasi ini akan mengurangi kemiringan dasar sungai (pendangkalan) yang kemungkinan akan menyebabkan terjadinya proses pelebaran sungai (Rahim, 2018).

Sebagai contoh dari proses aggradasi ini adalah (Rahim, 2018):

- 1) Bagian hulu bangunan bendung/ bendungan.
- 2) Pertemuan anak sungai (yang membawa banyak sedimen) dengan sungai induk.
- 3) Muara sungai (*delta*).
- 4) Hulu bangunan-bangunan pengatur sungai (*check dam, sabo dam*).

Pada dasarnya sedimen yang diangkut oleh aliran dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

- 1) Muatan cuci (*Wash Load*) yaitu partikel yang sangat halus bergerak melayang di bagian atas aliran dan tidak mengendap di dasar sungai.
- 2) Muatan Layang (*Suspended Load*) yaitu partikel yang bergerak dalam pusaran aliran yang cenderung terus-menerus melayang dengan aliran dimana ukuran partikelnya  $> 0,1$  mm.
- 3) Muatan dasar (*Bed Load*), yaitu partikel yang bergerak pada dasar sungai dengan cara berguling, meluncur dan meloncat.

## **2. Sedimentasi**

Sedimentasi adalah proses mengendapnya material fragmental oleh air sebagai akibat dari terjadinya erosi. Proses sedimentasi mulai dari terjadinya erosi dimana butir-butir tanah terlepas dari tempatnya kemudian terseret oleh aliran permukaan sampai alur, parit, sebagian tertahan pada daerah cekungan, akar pepohonan, dan sebagian lainnya terbawa sampai di sungai. Di sungai, material sedimen kemudian terangkut oleh aliran sungai oleh adanya daya angkut aliran yang dikenal dengan *sediment transport* (Marhendi, 2013).

Dalam perjalanan di sungai, material sedimen dapat mengalami berbagai kondisi pergerakan sehingga sebagian mengendap didasar sungai dan sebagian lagi terus terangkut oleh aliran sampai akhirnya mengendap di muara, danau atau di waduk. Mengendapnya material

sedimen yang terus-menerus dalam jumlah yang semakin besar inilah dikenal dengan masalah sedimentasi yang menimbulkan masalah besar dan mengancam keberlangsungan fungsi serta keberadaan infrastruktur alami maupun buatan (Marhendi, 2013; Ajiz, 2017).

Pengendapan sedimen yang terjadi pada saat kecepatan aliran yang dapat mengangkat (*pick up velocity*) mengangkut bahan sedimen mencapai kecepatan pengendapan (*settling velocity*) yang dipengaruhi oleh besarnya partikel-partikel sedimen dan kecepatan aliran (Ajiz, 2017).

Konsentrasi sedimen yang terkandung pada pengangkutan sedimen adalah dari hasil erosi total (*gross erosion*) dimana merupakan jumlah dari erosi permukaan (*interill erosion*) dengan erosi alur (*rill erosion*). Pengendapan sedimen di dasar sungai menyebabkan naiknya dasar sungai yang kemudian mengakibatkan tingginya muka air sehingga berakibat makin seringnya terjadi banjir. Pengendapan sedimen di waduk akan berdampak terhadap pengurangan kapasitas tampung waduk, menurunkan fungsi layanan, dan berkurangnya umur rencana waduk (Asdak, 2007).

## **2.1. Transpor Sedimen**

Besarnya transpor sedimen dalam aliran sungai merupakan fungsi dari suplai sedimen dan energi aliran sungai. Ketika besarnya energi aliran sungai melampaui besarnya suplai sedimen, terjadilah degradasi sungai. Pada sisi lain ketika suplai sedimen lebih besar daripada energi aliran

sungai, terjadilah aggradasi sungai. Dari beberapa studi pengamatan di lapangan menunjukkan bahwa aliran sungai merupakan sistem yang bersifat dinamik sehingga aliran air sungai selalu bervariasi. Selama periode aliran besar (*stormflow events*), meningkatnya kurva hidrograf (*rising limb of hydrograph*) berasosiasi dengan meningkatnya laju transpor sedimen, dan ketika debit aliran puncak telah terlampaui dan debit aliran berkurang dengan cepat laju sedimen pun akan berkurang dengan cepat. Ketika sedimen memasuki badan sungai, maka proses transpor sedimen akan terjadi. Kecepatan transpor sedimen merupakan fungsi dari kecepatan aliran sungai dan ukuran partikel sedimen (USBR, 1974; Priyantoro, 1987).

## **2.2. Mekanisme Sedimentasi Pada Daerah Pengairan**

Sungai adalah jalur aliran air di atas permukaan bumi yang disamping mengalirkan air juga mengangkut sedimen terkandung dalam air tersebut. Jadi sedimen terbawa hanyut oleh aliran air yang dapat dibedakan sebagai endapan dasar (*bed load* – muatan dasar) dan muatan melayang (*suspended load*). Muatan dasar bergerak dalam aliran air sungai secara bergulir, meluncur dan meloncat-loncat di atas permukaan dasar sungai. Sedang muatan melayang terdiri dari butiran halus yang ukurannya lebih kecil dari 0,1 mm dan senantiasa melayang didalam aliran air. Terlebih butiran yang sangat halus, walaupun air tidak lagi mengalir, tetapi butiran

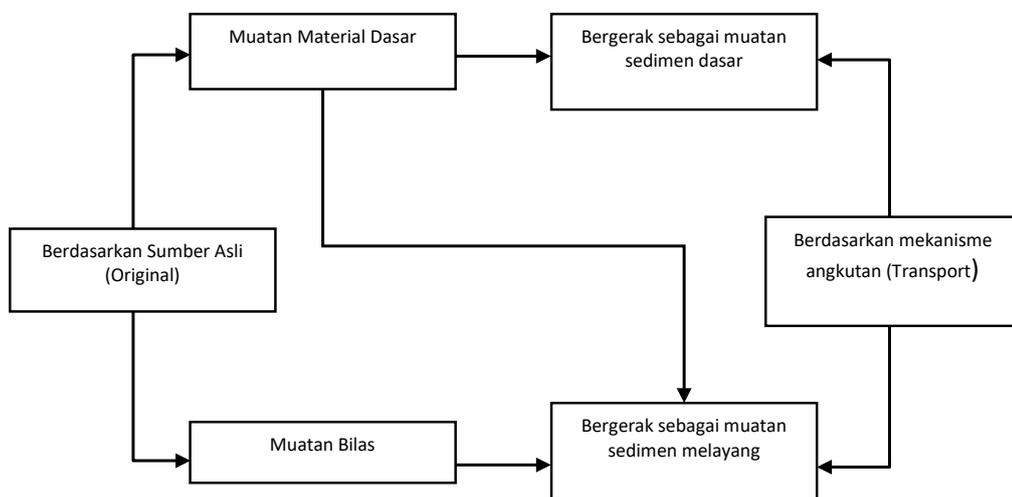
tersebut tetap tidak mengendap serta airnya tetap saja keruh dan sedimen semacam ini disebut muatan bilas (*wash load*) (Sosrodarsono, 1994).

Muatan dasar senantiasa bergerak, maka permukaan dasar sungai kadang-kadang naik (*agradasi*), tetapi kadang-kadang turun (*degradasi*) dan naik turunnya dasar sungai tersebut disebut alterasi dasar sungai (*river bed alteration*). Muatan melayang tidak berpengaruh pada alterasi dasar sungai, tetapi dapat mengendap didasar waduk atau muara sungai yang menimbulkan pendangkalan pada waduk dan menyebabkan berbagai masalah. Penghasil sedimen terbesar adalah erosi permukaan lereng pegunungan, erosi dasar dan tebing sungai dan material akibat longoran dan letusan gunung berapi (Priyantoro, 1987).

Dasar sungai biasanya tersusun oleh endapan dari material angkutan sedimen yang terbawa oleh aliran sungai dan material tersebut dapat terangkut kembali apabila kecepatan aliran cukup tinggi. Besarnya volume angkutan sedimen terutama tergantung dari perubahan kecepatan aliran, karena perubahan musim penghujan dan kemarau. Serta perubahan kecepatan yang dipengaruhi oleh aktifitas manusia. Akibat dari perubahan volume angkutan sedimen adalah terjadinya penggerusan di beberapa tempat serta terjadinya pengendapan ditempat lain pada dasar sungai, sehingga bentuk dasar sungai selalu berubah (Soewarno, 1991). Secara skematis angkutan sedimen dapat dilihat pada gambar 2.1.

Pada sungai-sungai aluvial besarnya muatan material dasar tergantung pada kondisi hidrolis, selanjutnya material dasar yang terangkut

dapat dibedakan menjadi muatan sedimen dasar dan muatan sedimen melayang. Disamping material dasar juga ada angkutan sedimen yang sangat halus yang disebut muatan bilas. Besarnya volume muatan bilas umumnya tidak tergantung pada kondisi hidrolis sungai, tetapi akan terantung pada kondisi daerah pengaliran sungai. Jumlah total ketiga tipe angkutan sedimen tersebut adalah merupakan debit sedimen total (*total sediment discharge*) (Soewarno, 1991).



**Gambar 2.1.** Skematis Angkutan Sedimen

Selain perhitungan data debit air, kita hendaknya juga harus dapat memperhitungankan debit sedimen yang masuk kedalam waduk. Sampling merupakan metode tertentu untuk mendapatkan keakuratan sedimen yang dibawa oleh aliran air pada lokasi tertentu, dan merupakan metode untuk menentukan inflow sedimen ke waduk (Sumi dkk, 2011).

Ada dua macam pengumpulan data sedimen *suspended* (terbuang) yaitu berkala dan harian. Koleksi dan analisis sampel sedimen merupakan proses yang mahal dan sampel harian menghasilkan sebagian besar duplikasi pada aliran dasar. Oleh karena itulah program pengumpulan

sampel berkala dan campuran adalah lebih umum. Hasil dari program pengumpulan jenis koleksi yang lain dipakai untuk mengembangkan koleksi antara muatan sedimen (*sediment load*) dan debit air (Sosrodarsono dan Takeda, 2011).

Korelasi ini umumnya ditunjukkan sebagai kurva rata-rata sedimen. Data secara normal di plot pada kertas logaritmis, dengan debit sedimen sebagai absis dan debit air sebagai ordinat. Kemudian suatu garis yang mendekati digambar melalui titik-titik yang diplot, atau dapat juga dibuat persamaan secara matematis dengan metode-metode yang telah ada, misalnya metode *least square* (umumnya persamaannya adalah  $Q_s = a Q_b$ ), metode-metode regresi, atau juga dengan interpolasi. Data sampel berkala sering tidak memberikan definisi yang mendekati untuk bagian puncak atau rata-rata transportasi sedimen akibat muatan yang sangat besar terbawa selama periode banjir (Lu, 2006).

Kurva durasi aliran didasarkan pada satu satuan waktu yang lebih besar dari 1 hari, mempunyai harga yang kecil dalam menyiapkan estimasi muatan sedimen. Untuk menyiapkan kurva durasi aliran, diperlukan pencatatan debit aliran harian, yang kemudian disusun menurut besarnya dan prosentase waktu dimana debit aliran disamakan dengan harga spesifik yang dihitung. Kurva durasi aliran hanya dipakai untuk periode dimana data dipakai untuk mengembangkan kurva, tetapi jika data aliran mewakili aliran batas yang panjang dari aliran, kurva tersebut harus dianggap sebagai

kurva probabilitas dan dipakai untuk mengestimasi aliran yang akan datang (Achsan, 2015).

### 2.3. Perkiraan Muatan Sedimen Dasar

Berbagai persamaan untuk memperkirakan muatan sedimen dasar telah banyak dikembangkan. Umumnya digunakan persamaan Meyer-Peter (Soewarno, 1991):

$$\frac{q^{2/3} S}{D} - 9,57 \left( \frac{\tau_S - \tau}{\tau} \right)^{10/9} = 0,462 \frac{(\tau_S - \tau)^{1/3}}{\tau^{1/3} D} \times \left( \frac{\tau_S - \tau}{\tau_S} \times qb \right)^{2/3} \dots\dots\dots(2-1)$$

Dimana:

q = Debit aliran per unit lebar (m<sup>3</sup>/detik)

qb = Debit muatan sedimen dasar (m<sup>3</sup>/detik)

τ = Berat jenis (specific gravity) dari air (1,00 ton/m<sup>3</sup>)

τ<sub>S</sub> = Berat jenis partikel muatan sedimen dasar (umumnya bervariasi antara 2,60 sampai 2,70 ton/m<sup>3</sup>)

D = Diameter butir (mm)

S = Kemiringan garis energi

Persamaan 2-1 digunakan untuk ukuran butir yang seragam. Untuk ukuran material bervariasi dari 3 mm sampai 29 mm digunakan persamaan berikut (Soewarno, 1991):

$$\frac{\tau R \left( \frac{n'}{n} \right)^{3/2} S}{(\tau_S - \tau) D_{50}} = 0,047 + 0,25 \left( \frac{\tau}{g} \right)^{1/3} \times \left( \frac{\tau_S - \tau}{\tau_S} \right)^{2/3} \times qb^{2/3} \times \frac{1}{(\tau_S - \tau)} D_{50} \dots\dots\dots(2-2)$$

Dimana:

- $q$  = Debit aliran per unit lebar ( $m^3/detik$ )  
 $q_b$  = Debit muatan sedimen dasar ( $m^3/detik/m$ )  
 $\tau$  = Berat jenis (specific gravity) dari air ( $1,00 \text{ ton}/m^3$ )  
 $\tau_s$  = Berat jenis partikel muatan sedimen dasar (umumnya bervariasi antara 2,60 sampai 2,70  $ton/m^3$ )  
 $D$  = Diameter butir (mm)  
 $S$  = Kemiringan garis energi (m/m)  
 $\Gamma, \Gamma_s$  = Kerapatan (Density cairan dan partikel ( $kg/m^3$ ))  
 $D_{50}$  = Ukuran median diameter butir (m)  
 $g$  = Percepatan gravitasi =  $9.81 \text{ m}/detik^2$   
 $R$  = Jari-jari hidrolis = kedalaman rata-rata (m)  
 $n'$  = Koefisien kekasaran untuk dasar rata  
 $n$  = Koefisien kekasaran aktual

Apabila intensitas aliran dihitung dengan rumus:

$$U = \frac{\Gamma_s - \Gamma}{\Gamma} \times \frac{D_{50}}{S \left(\frac{n'}{n}\right)^{3/2} R} \dots\dots\dots(2-3)$$

Dan intensitas angkutan muatan sedimen dasar

$$\phi = \frac{q_b}{\Gamma_s} \left( \frac{\Gamma}{\Gamma_s - \Gamma} \times \frac{1}{gD^3} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(2-4)$$

Dengan:

$$\frac{\Gamma_s - \Gamma}{\Gamma} = \frac{\tau_s - \tau}{\tau} \dots\dots\dots(2-5)$$

Sehingga kombinasi persamaan (2-3), (2-4), (2-5) adalah:

$$\phi = \frac{4}{U} - 0,188)^{3/2} \dots\dots\dots(2-6)$$

Kemudian diperoleh debit muatan sedimen dasar per unit lebar:

$$\phi = \frac{q_b}{\tau_s} \left( \frac{\Gamma}{\Gamma_s - \Gamma} \times \frac{1}{gD_{50}^3} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(2-7)$$

Maka muatan sedimen dasar untuk seluruh lebar dasar aliran:

$$Q_b = q_b \times W \dots\dots\dots(2-8)$$

Dimana:

Qb = Debit muatan sedimen dasar (kg/detik)

W = Lebar Dasar

#### 2.4. Perhitungan Debit Sedimen Melayang

Besarnya debit sedimen layang (Qs) dihitung berdasarkan lengkung debit sedimen dan berdasarkan kurva frekuensi lama aliran (flow duration curve). Untuk perhitungan debit sedimen melayang dengan lengkung debit sedimen, persamaan yang digunakan adalah (Soewarno, 1991):

$$Q_s = 0,0864 \times C_b \times Q_w \dots\dots\dots(2-9)$$

Dimana:

Qs = Debit sedimen melayang rata-rata harian (ton/hari)

C = Konsentrasi rata-rata harian (mg/ltr)

Qw = debit rata-rata harian (m<sup>3</sup>/det)

K = 0,0864 (faktor perubahan unit).

Sementara untuk metode perhitungan debit sedimen layang dengan kurva frekuensi lama aliran, data yang digunakan adalah data dari *Automatic Water Level Recorder* (AWLR). Kurva frekuensi lama aliran (*flow duration curve*) merupakan frekuensi kumulatif yang menunjukkan persen waktu dari kelas debit yang mempunyai nilai sama atau terlampaui selama periode yang diberikan.

## **2.5. Perhitungan Debit Sedimen Dasar (*Bed Load*)**

Beberapa formulasi untuk menghitung jumlah transportasi sedimen dasar telah dikembangkan oleh beberapa peneliti dari tahun ke tahun. Formula sedimen dasar ini didasarkan pada prinsip bahwa kapasitas aliran sediment transport sepanjang dasar waduk bervariasi dan terkait secara langsung dengan perbedaan antara shear stress pada partikel dasar dan *shear stress* (tegangan geser) kritis yang diijinkan untuk partikel yang bergerak (Phillips dkk, 1976).

Muatan sedimen dasar pada umumnya terdiri dari partikel-partikel kasar dan merupakan faktor penting dalam proses sedimentasi, meskipun tidak sebesar muatan sedimen melayang. Pengukuran sedimen dasar (*bed load*) dan peralatan yang digunakan masih dalam taraf perkembangan, tidak ada satu metode atau peralatan yang cocok untuk semua kondisi lapangan.

Di samping itu penelitian secara intensif dalam masalah ini masih sangat kurang. Pengukuran sedimen dasar (*bed load*) dilakukan dengan

pengambilan sampel dengan alat penangkap sedimen. Bila pengukuran sedimen dasar (*bed load*) tidak dilakukan, besarnya sedimen tersebut dapat diperkirakan dengan menggunakan tabel Borland dan Maddock (1951) yang tergantung pada konsentrasi dan gradasi butiran sedimen layang (*suspended load*) berupa lempung, silt dan pasir (Marhendi, 2011).

Analisis sedimen adalah diantaranya memperkirakan besarnya volume material endapan yang mungkin terjadi selama umur ekonomi atau umur layanan waduk. Umur ekonomi waduk adalah lama waktu yang diperkirakan sampai seluruh kapasitas tampungan sedimen (*dead-storage*) terisi penuh dengan sedimen yang terbawa oleh aliran yang masuk ke waduk (*inflow*).

**Tabel 2.1.** Perkiraan Muatan Sedimen Dasar Terhadap Sedimen Melayang

Konsentrasi Sedimen Melayang (ppm)	Komposisi Dasar Sungai	Komposisi Sedimen Melayang	Perbandingan
< 1000	Pasir	Sama dengan dasar	0,25-1,50
	Kerikil terikat liat (Clay)	Jumlah Pasir Sedikit	0,05-0,12
1000-7500	Pasir	Sama dengan dasar	0,10-0,35
	Kerikil terikat liat (Clay)	25% pasir atau kurang	0,05-0,12
>7500	Pasir	Sama dengan dasar	0,05-0,15
	Kerikil terikat liat (Clay)	25% pasir atau kurang	0,02-0,08

Sumber: Soewarno, 1991

Pada Tabel 2.1. dapat dilihat apabila kapasitas tampungan waduk lebih kecil dari debit inflow pertahun, maka air akan tertampung pada waduk yang dalam waktu yang relatif pendek sehingga sedimen yang melayang akan lebih banyak melimpas pada pelimpah tanpa banyak yang mengendap. Sebaliknya, apabila kapasitas tampungan waduk lebih besar dari debit *inflow* pertahun dan air akan tertampung dalam waktu yang lama, sehingga praktis hampir semua sedimen akan mengendap pada tampungan waduk tersebut.

Pada saat kondisi waduk secara bertahap berkurang kapasitas tampungannya akibat sedimentasi, maka efisiensi tampungannya secara bertahap juga akan berkurang.

## **2.6. Sedimentasi Waduk**

Perubahan tata guna lahan di hulu DAS yang merupakan daerah tangkapan suatu waduk akan mengakibatkan terjadinya erosi dan adanya peristiwa longsor hulu suatu DAS akan menyebabkan masuknya sedimen dalam aliran sungai. Selain mengalirkan air, sungai juga membawa sedimen di dalam alirannya, dimana dalam kondisi tersebut harus menampung keduanya dengan perbedaan konsekwensi yang signifikan. Air yang masuk dalam waduk dapat memberikan manfaat dan dapat dengan mudah dikeluarkan dari tampungan waduk, sedangkan sedimen yang masuk kedalam waduk akan terakumulasi dan cenderung sulit untuk dikeluarkan. Sejalan dengan usia guna waduk, dampak dari sedimentasi

akan menimbulkan pengaruh terhadap berbagai aspek operasional dari waduk (Morris dan Fan, 1997; Lu dkk, 2006).

Pada saat arus aliran masuk ke dalam waduk terjadi perubahan kecepatan dimana kecepatan aliran semakin berkurang. Perubahan sifat tersebut dapat mengurangi kapasitas angkutan sedimen dari arus aliran sungai yang masuk ke waduk dan menyebabkan sedimentasi. Sedimen yang terbawa masuk ke waduk kemungkinan akan mengendap di seluruh panjang waduk, kemudian menaikkan elevasi dasar waduk atau terjadi aggradasi yaitu kenaikan dasar waduk akibat muatan sedimen yang dibawa oleh aliran sungai (Julien, 1995 dalam Pranowo 2001).

Sedimentasi waduk dimulai dikenal sejak tahun 1930an namun saat itu teknik mengenai bendungan dan waduk lebih terfokus pada masalah struktur bendungan dan hanya menyisakan sedikit perhatian pada masalah akumulasi sedimen pada waduk (Shiklomanov, 1993). Menurut Strand, semua tampungan baik tampungan alami maupun yang terbentuk karena pembangunan bendungan akan mengalami sedimentasi (Morris, 1997).

Pengetahuan mengenai bentuk distribusi endapan sedimen di waduk di perlukan untuk memprediksi dampak yang ditimbulkan oleh sedimentasi, waktu pembentukan sedimen, dan langkah penanganan sedimen yang dapat dilakukan (Pranowo, 2001).

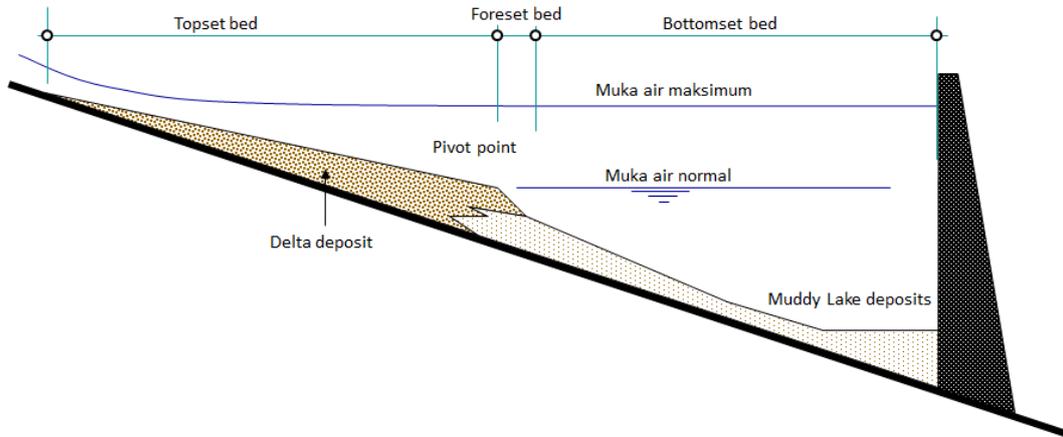
Perubahan penampang melintang sungai yang relatif sempit ke penampang melintang waduk yang lebar menyebabkan berkurangnya aliran sungai serta daya angkut aliran terhadap sedimen yang terdiri atas

material halus yang melayang dalam air waduk (*suspended load*) dan material kasar (*bed load*) (Sosrodarsono dan Tominaga, 1994).

Proses pengendapan sedimen umumnya dimulai dengan terbentuknya delta di bagian hulu waduk. Partikel sedimen halus dibawa oleh kerapatan atau kekentalan arus menuju waduk. Sedimentasi waduk tergantung dari regim/ *system* yang berlaku pada sungai tersebut, frekwensi terjadinya banjir, bentuk dan ukuran waduk, system operasional waduk, kepadatan sedimen, konsolidasi sedimen, arus densitas/ turbulensi serta perubahan penggunaan lahan yang seluruhnya berpengaruh terhadap umur manfaat (*usefull life*) suatu waduk (Priyanto, 1987).

Zona tempat pengendapan sedimen pada potongan memanjang waduk dapat dibedakan menjadi 3 (tiga) zona utama, seperti pada gambar 2.2. Sedimen berbutir kasar memiliki kecepatan pengendapan yang lebih besar dan bergerak cenderung pada dasar sungai sehingga mengendap terlebih dahulu di hulu tampungan waduk (*top set*). Sedangkan sedimen yang berbutir halus memerlukan waktu lebih lama mengendap sehingga pengendapan lebih kehilir pada tampungan waduk (*bottom set*). Sedangkan pada daerah transisi di ujung material berbutir kasar yang biasanya ditandai dengan kemiringan yang makin tinggi dan makin kecil diameter butiran sedimennya (*foreset bed*) (Morris, 1997).

Secara umum kondisi terjadinya sedimentasi di waduk adalah pada saat aliran sungai memasuki genangan waduk, kecepatan arus menurun, dan beban sedimen mulai mengendap.

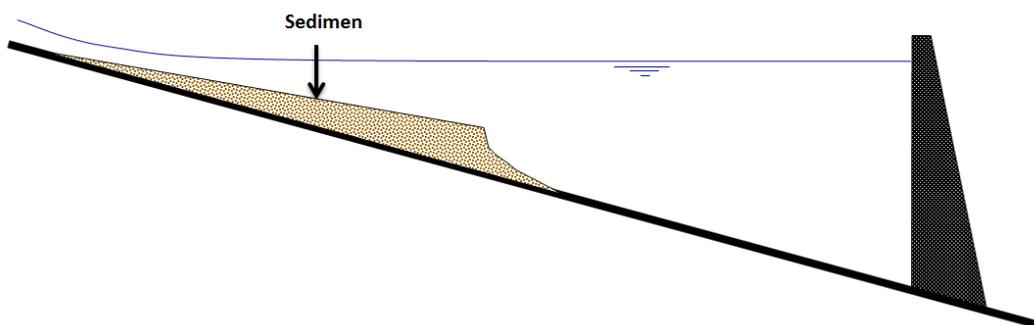


**Gambar 2.2.** Zona Pengendapan sedimen pada waduk

## 2.7. Pola Pengendapan Sedimen di Waduk

Pada dasarnya pola pengendapan sedimen di dalam waduk sangat bervariasi tergantung pada kondisi hidrologi, karakteristik sedimen (*grain size*), geometri waduk, dan pola operasi waduk. Pola pengendapan sedimen di waduk secara horizontal dapat dibedakan menjadi 4 kelompok, yaitu (Morris, 1997):

### 1) *Delta Deposits*



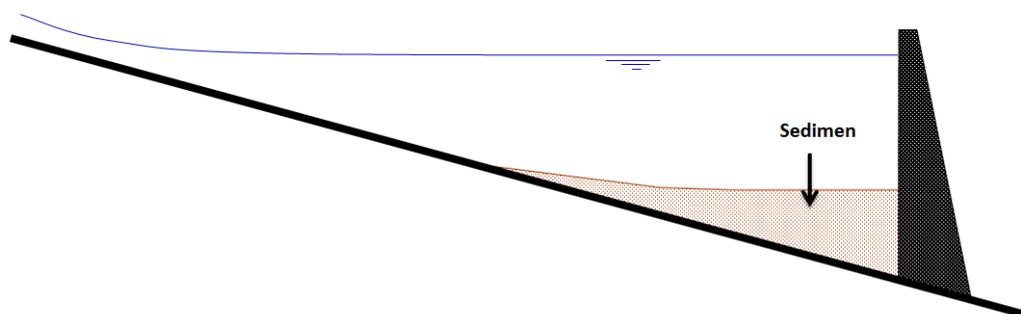
**Gambar 2.3.** Pola Pengendapan sedimen di Waduk deposits

Dapat kita lihat pada gambar 2.3. diatas, sedimen yang masuk terdiri dari sedimen kasar, yang segera mengendap di zona *inflow* (muara).

Komposisi sedimen hampir semuanya material kasar ( $d > 0,062$  mm), tetapi juga dimungkinkan berisi sedimen yang lebih halus seperti *silt*.

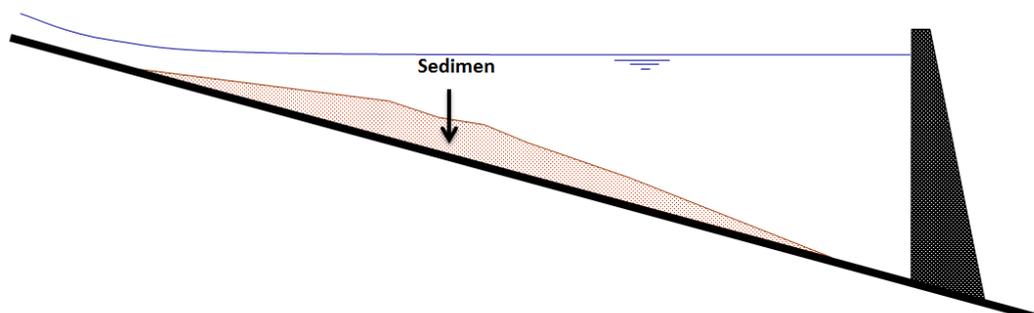
## 2) *Wedge-Shaped Deposits*

Sedimen yang masuk terdiri dari sedimen halus, yang terangkut sampai dekat bendungan oleh aliran turbiditas (*turbidity currents*). Bentuk ini juga ditemukan pada waduk-waduk kecil dengan *inflow* sedimen halus yang tinggi, dan juga reservoir besar dengan pola operasi air rendah pada kejadian banjir, yang menyebabkan sebagian besar sedimen terbawa sampai mendekati bendungan.



**Gambar 2.4.** Pola Pengendapan sedimen di Waduk *Wedge-shaped deposits*

## 3) *Tepering Deposits*

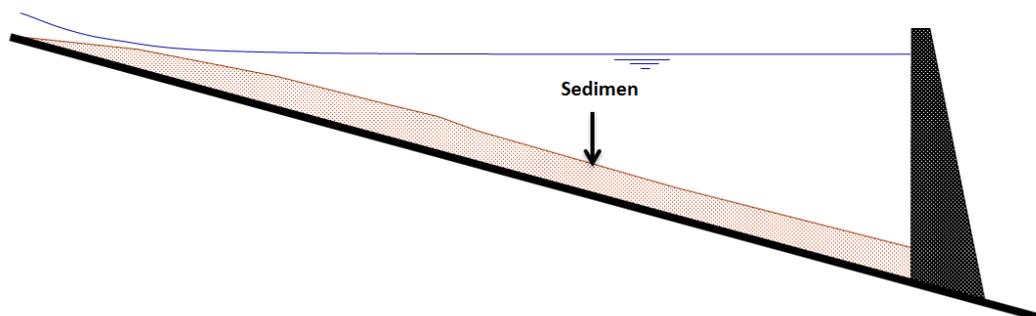


**Gambar 2.5.** Pola Pengendapan sedimen di Waduk *Tepering deposits*

Seperti pada gambar 2.5. model *tepering deposits* ini terjadi manakala sedimen yang mengendap makin mendekati bendungan makin menipis. Bentuk ini biasanya terjadi pada waduk yang sangat panjang dan dioperasikan pada muka air tinggi.

#### 4) *Uniform Deposits*

Bentuk ini tidak umum tapi dapat terjadi. Waduk sempit dengan pola operasi muka air yang berfluktuasi dengan masukan sedimen halus lumayan berpotensi terjadi endapan sedimen yang hampir merata (*uniform*).



**Gambar 2.6.** Pola Pengendapan sedimen di Waduk *Uniform deposits*

### 2.8. Faktor-faktor Yang Menentukan Hasil Sedimen (*Sediment Yield*)

Faktor-faktor yang menentukan hasil sedimen (*sediment yield*) dari suatu daerah aliran sungai dapat diringkas sebagai berikut (USBR, 1974):

1. Jumlah dan intensitas curah hujan.
2. Tipe tanah dan formasi geologi.
3. Lapisan tanah.

4. Tata guna lahan.
5. Topografi.
6. Jaringan sungai, yang meliputi: kerapatan sungai, kemiringan, bentuk, ukuran dan jenis saluran.

Sistem penanganan yang serius dari sedimen yang dipengaruhi faktor-faktor tersebut telah dicari jalan keluarnya, antara lain sampai pada rata-rata hasil sedimen untuk daerah aliran sungai. Analisis tipe ini sebaiknya menggunakan studi perencanaan pendahuluan dan merupakan keadaan yang dapat dipercaya jika rata-rata hasil sedimen-hasil perhitungan dapat dikorelasikan dengan hasil sedimen hasil pengukuran pada daerah yang dibatasi atau sub DAS (Rahim, 2018).

### **2.9. Distribusi Sedimen Pada Waduk**

Distribusi sedimentasi waduk adalah penyebaran partikel sedimen pada elevasi permukaan waduk dalam periode tertentu. Masing-masing waduk mempunyai pola tersendiri dalam distribusi sedimentasi, dengan pengertian lain bahwa semua waduk mempunyai karakteristik dan sistem yang berbeda antara waduk yang satu dengan yang lainnya. Pola distribusi waduk dipengaruhi oleh (Priyantoro, 1987):

1. Jenis muatan Sedimen.
2. Ukuran dan bentuk waduk
3. Lokasi dan ukuran *outlet*.

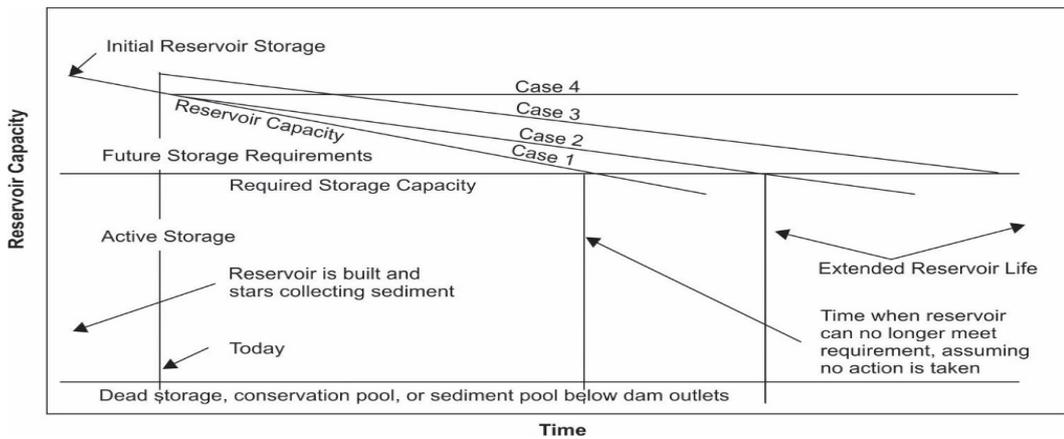
Besarnya gaya partikel sedimen yang masuk ke waduk meliputi komponen horisontal dalam arah aliran yang berkewajiban menahan gerakan air dan komponen vertikal yang berkewajiban terhadap gravitasi dan turbulensi air. Partikel sedimen akan tinggal dalam suspensi dan dipindahkan ke waduk sepanjang gaya turbulensi air sama dengan atau melampaui gaya gravitasi. Jika aliran masuk ke waduk hasil kenaikan luas potongan melintang menyebabkan kecepatan turun dan terjadi turbulensi sampai air menjadi tidak efektif dalam menggerakkan sedimen dan partikel-partikel, maka akan terjadi pengendapan (Priyanto, 1987).

Batasan indeks kolam banjir (*flood pool indeks*) atau tampungan banjir dihitung sebagai perbandingan antara tinggi tampungan banjir dengan tinggi dibawah tampungan, dikalikan dengan prosentase waktu muka air waduk berada dalam tampungan pengendali banjir. Informasi ini untuk waduk yang diusulkan harus didapat dari studi operasi waduk (Rahim, 2018).

Eksistensi monitoring distribusi sedimentasi waduk dalam periode tertentu amat diperlukan untuk memprediksi akumulasi sedimen yang terjadi pada tampungan mati (*dead storage*).

## 2.10. Metode Pengendalian Sedimentasi Waduk

Tujuan model distribusi sedimen adalah untuk mengurangi laju sedimentasi dalam waduk dengan sasaran meminimalkan kerugian akibat berkurangnya kapasitas tampung waduk dan memperpanjang usia layanan waduk (*Utah Division of Water Resource, 2010*).



**Gambar 2.7.** Dampak Sedimentasi dan Model distribusi Sedime Terhadap Umur Waduk (Sumber: *Utah Division of Water Resource, 2010*)

Gambar 2.7. menunjukkan perbandingan teoritis terhadap kondisi kapasitas tampung dan usia fungsional waduk bila atau tidak dilakukan upaya pencegahan. Untuk mempertahankan kapasitas tampung waduk maka diperlukan upaya pengendalian sedimen yang sesuai dengan kondisi lingkungan waduk itu sendiri. Sehubungan dengan hal ini maka telah dilakukan berbagai pendekatan antara lain dikenal metode Brown, Fan, dan Brabben.

Morris dan Fan (1997) memberikan tiga pendekatan secara garis besar dalam mengendalikan sedimen yaitu:

1. Pengurangan produksi sedimen;

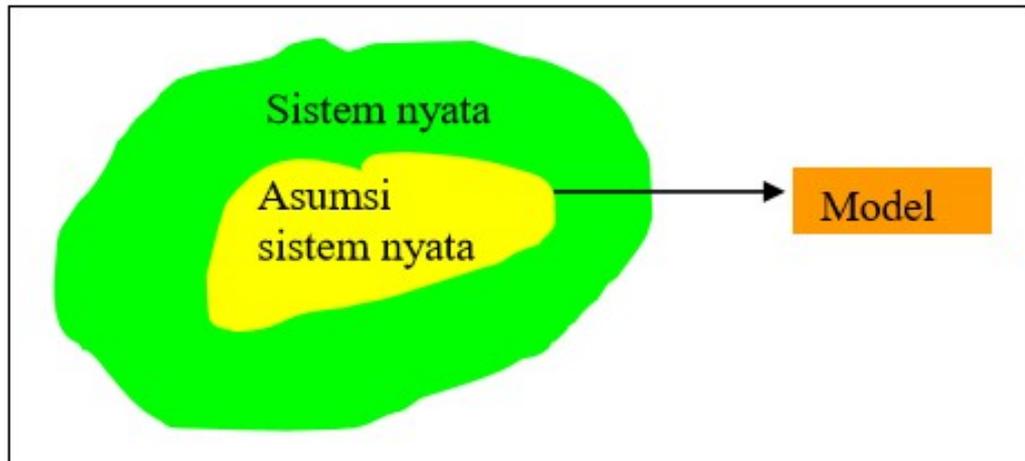
2. Penggalian sedimen; dan
3. Metode hidraulik seperti penggelontoran dan *sediment routing*.

Pengurangan sedimen yang memasuki waduk tidak menyelesaikan keseluruhan permasalahan sedimentasi waduk, tetapi dapat mengurangi tingkat akumulasi sedimen dengan cara pengendalian erosi dan perangkapan sedimen (Fan dan Morris, 1992). Berbagai cara untuk mengurangi sedimen telah dipraktekkan saat ini antara lain cara struktur dan nonstruktur. Untuk pengendalian erosi, cara-cara struktur atau mekanikal digunakan untuk mengurangi kecepatan aliran, meningkatkan penampungan aliran permukaan, dan mengalihkan aliran. Bangunan air untuk menahan sedimen pada bagian hulu sungai termasuk antara lain; *check dam*, kolam hanyutan, kantong pasir, dll. Perangkapan sedimen merupakan salah satu cara efektif untuk mengurangi sedimen tetapi masih mempunyai beberapa kelemahan seperti harga pembangunan yang mahal, kapasitas terbatas, dan kurang ekonomis (Asdak, 2007).

### **2.11. Model Angkutan Sedimen**

Proses pembuatan lingkungan nyata terkadang rumit dan tidak memungkinkan sehingga untuk memahami kondisi tersebut ataupun untuk dikomunikasikan dengan orang lain diperlukan sebuah model yang representatif. Dalam *operation research* (Phillips, 1976), yang dimaksudkan dengan model adalah representasi sederhana dari sesuatu yang nyata. Asumsi sistem nyata (lihat Gambar 2.9) diwujudkan dengan cara

menentukan faktor-faktor dominan (variabel, kendala dan parameter) yang mengendalikan perilaku dari sistem tersebut (Taha,1992).



**Gambar 2.8.** Abstraksi Pemodelan (Taha,1992)

Dikenal tiga tipe model, yaitu: model fisik, model matematik dan model analog. Model Fisik merupakan tiruan permasalahan sistem alam nyata secara fisik, dengan skala lebih kecil, sama ataupun lebih besar. Model matematik adalah tiruan permasalahan alam nyata dengan menggunakan persamaan-persamaan matematik. Sedangkan yang dimaksud dengan model analog adalah tiruan permasalahan/fenomena alam nyata dengan fenomena alam yang lain yang mempunyai kemiripan, yang selanjutnya dibuat bangunan fisiknya (Taha, 1992).

### 1. Model Fisik

Pada model fisik, replika atau tiruan dilaksanakan dengan menirukan domain/ ruang/ daerah dimana fenomena atau peristiwa alam tersebut terjadi. Fenomena/ peristiwa atau bangunan di alam nyata yang ditirukan disebut *prototipe*. Tiruan ini dapat lebih besar ataupun lebih kecil

dibandingkan dengan prototipenya. Kesesuaian model ditentukan oleh seberapa mungkin kesebangunan hidraulik (geometrik, dinamik, kinematik) di alam dapat ditirukan ke dalam model (Philips dan Solberg, 1976).

Yang dimaksudkan dengan sebangun geometrik adalah jika model dan *prototipe* mempunyai bentuk sama, dengan ukuran yang boleh berbeda. Perbandingan semua dimensi yang ada adalah sama termasuk tinggi kekasarannya. Perbandingan ini disebut skala geometrik model (Morris, 2003).

Dikatakan sebangun kinematik apabila *prototipe* dan model sebangun geometrik dan perbandingan kecepatan dan percepatan di dua titik yang bersangkutan pada prototipe dan model adalah sama di seluruh pengaliran. Pengertian sebangun dinamik bilamana prototipe dan model sebangun geometrik maupun sebangun kinematik dan perbandingan antara gaya-gaya pada dua titik yang bersangkutan pada *prototipe* dan model adalah sama dan searah. Dengan model fisik, dapat diprediksi perilaku atau kinerja sistem baik berupa bangunan struktur ataupun fenomena alam sehingga bilamana dalam pengamatan model dijumpai kekurangan-kekurangan maka akan segera diketahui untuk segera dihindari pada kejadian alam yang sesungguhnya. Selain itu dengan model ini bisa dipelajari beberapa alternatif perancangan sehingga dapat dipilih rancangan bangunan yang paling optimum (Sumi dkk, 2011).

Di bawah adalah prinsip-prinsip kesebangunan yang digunakan dalam model fisik hidrolika (Stern, 1999):

- 1) Kesebangunan geometris atau yang biasa juga disebut sebangun bentuk adalah jika perbandingan dari semua dimensi yang berkaitan antara model dan *prototipe* sama besar.
- 2) Kesebangunan kinematis adalah kesebangunan dalam gerakan dan waktu. Bila suatu benda bergerak dalam waktu tertentu dimana perbandingan kecepatan dari partikel yang sejenis sama besar. Perbandingan-perbandingan biasa digunakan pada perhitungan kesebangunan kinematis.
- 3) Kesebangunan dinamis berlaku jika rasio dari gaya antara model dan prototipe sama dalam sistem yang sama secara geometris maupun kinematis.

## **2. Model Matematik**

Jenis model yang paling sering digunakan oleh para insinyur dan ilmuwan adalah non fisik yang dikenal sebagai model matematik (Cooper,1977). Model matematik adalah representasi ideal dari sistem nyata yang dijabarkan/dinyatakan dalam bentuk simbol dan pernyataan matematik. Dengan kata lain model matematik merepresentasikan sebuah sistem dalam bentuk hubungan kuantitatif dan logika yang berupa suatu persamaan matematik.

Model matematik seringkali digunakan untuk mempelajari fenomena alam nyata yang kompleks dengan cara analisis serta menyelidiki

hubungan antara parameter yang mempengaruhi fungsi sistem dalam proses yang kompleks. Pada model matematik replika/tiruan dari fenomena/peristiwa alam dideskripsikan melalui satu set persamaan matematik. Kecocokan model terhadap fenomena alam yang dideskripsikan tergantung dari ketepatan formulasi persamaan matematiknya (Stern, 1999).

Model matematik memiliki keuntungan yang lebih besar bila dibandingkan dengan mendeskripsikan permasalahan secara lisan karena model ini mendeskripsikan permasalahan dengan sangat ringkas. Keseluruhan struktur permasalahan cenderung menjadi lebih dapat dipahami serta membantu mengungkapkan hubungan sebab-akibat yang penting.

Ketika mengembangkan model matematik, pendekatan yang baik yaitu memulai dengan versi yang sangat sederhana kemudian mengarah pada pengembangan model yang lebih terperinci yang mencerminkan kompleksitas dari sistem nyata.

Model matematik dapat digunakan baik untuk tujuan optimasi maupun bukan optimasi. Model matematik untuk tujuan optimasi, dinamakan model optimasi. Pembentukan suatu model optimasi, dimulai dengan menentukan variabel, kendala dan tujuan (Taha, 1992). Bilamana terdapat keputusan sejumlah  $n$  hubungan terukur ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) yang akan dibuat, dinyatakan sebagai variable keputusan dimana masing-masing nilainya akan ditentukan. Dengan hasil pengukuran yang tepat/sesuai kemudian

diekspresikan sebagai fungsi matematik dari variabel keputusan. Misalnya ( $P = 3x_1 + 2x_2 + \dots + 5x_n$ ) persamaan ini dinamakan fungsi tujuan. Dalam variabel keputusan dapat juga disertakan suatu nilai pembatasan, misalnya ( $x_1 + 3x_2 + 2x_3 \leq 10$ ), pernyataan ini disebut kendala (Rahim, 2018).

Model matematik yang bukan untuk optimasi, bisa diselesaikan secara analitis atau numeris, dengan bantuan komputer. Penyelesaian secara analitis adalah penyelesaian yang paling diharapkan, dimana penyelesaiannya berlaku secara menerus. Akan tetapi banyak permasalahan yang tidak dapat diselesaikan secara analitis karena sulitnya permasalahan. Jika demikian maka penyelesaiannya secara numeris yaitu penyelesaian yang berlaku secara diskrit, pada titik-titik hitung saja (Achsas, 2015).

Kalibrasi pada model matematika adalah suatu keharusan, dengan kalibrasi diharapkan akan didapat harga koefisien empiris (konstanta) yang dipakai dalam model (Soewarno, 1991). Selanjutnya untuk menguji validitas model dilakukan verifikasi, yaitu menguji model dengan memasukkan *input* lain yang ada, harus menghasilkan pasangan *output* yang sesuai. Setelah melalui tahap kalibrasi dan verifikasi, model dianggap sudah valid/ baik untuk mewakili sistem nyata, dengan demikian dapat dilakukan simulasi (Achsas, 2015).

Dari hasil simulasi didapatkan karakteristik *output* dari suatu *input*. Masukan yang menghasilkan keluaran yang baik, menjadi dasar untuk strategi mengatur rekayasa sistem/fenomena alam nyata yang dimodelkan.

### 3. Model Analog

Permasalahan/ fenomena alam nyata dianalogikan dengan fenomena alam yang lain, yang selanjutnya dibuat model fisik. Sebagai contoh yaitu fenomena aliran air tanah dibawah bendung, ditirukan dengan model yang menggunakan arus listrik (Soewarno, 1991).

### 4. Contoh Permodelan Angkutan Sedimen

Beberapa contoh penggunaan model fisik pada analisis angkutan sedimen antara lain: *Shields, Fortier dan Scobey*, Hjulstrom dan ASCE, Malvis dan Laushey, Yang, Meyer, Peter dan Muller, serta dari USBR menggunakan model fisik untuk mempelajari permulaan gerak butiran. Du Boy's, Shield, Meyer dan Peter, Meyer, Peter dan Muller, maupun Schocklitsch membuat model fisik dalam meneliti angkutan sedimen dasar. Penelitian Einstein, Brooke, Simon, Chang dan Richardson mengenai angkutan suspensi juga menggunakan model fisik, membuat model fisik untuk menentukan kriteria erosi dan sedimentasi pada butiran seragam. Model koefisien Drag (CD) meneliti hubungan koefisien CD dengan angka  $R_e$  untuk sedimen berbentuk butiran. Model fisik juga digunakan oleh Einstein dalam mempelajari konfigurasi dasar dimana kecepatan kritik sebagai fungsi ukuran butiran. Yang (1996) dengan menggunakan model fisik meneliti hubungan unit *stream power* dan kedalaman air pada butiran pasir dengan diameter 0,19 mm. Model hidraulik angkutan sedimen dasar dianalogikan pada sungai berbatu (USBR, 1974).

Analisis angkutan sedimen juga telah banyak dilakukan dengan model matematik. Beberapa model matematis yang digunakan dalam analisis angkutan sedimen adalah (Stern, 1999):

- 1) Pembuatan model numeris saluran stabil yang merupakan rumus dan penyelesaian numeris saluran stabil dengan dasar bergerak.
- 2) Model numerik 2-D transport sedimen aliran tidak tetap.
- 3) Pembuatan model angkutan sedimen halus untuk Analisis angkutan sedimen halus dalam saluran.
- 4) Pembuatan model 2 fraksi permulaan gerak sedimen pada dasar sungai.
- 5) Model matematik meneliti pengaruh kelengkungan lereng terhadap proses erosi tanah dan deposisi.
- 6) Model matematik juga dapat digunakan untuk kebutuhan pengelolaan. Sebagai contoh yaitu penggunaan teknik pemodelan sedimen terhadap berbagai kebutuhan pengelolaan sungai Eden, Cumbria, UK.
- 7) Menggunakan model matematik melakukan simulasi proses penyebaran angkutan dasar.

Untuk model analog belum ditemukan penerapannya pada bidang analisis angkutan sedimen. Dengan kata lain belum ada permasalahan

dalam angkutan sedimen dimana penyelesaiannya menggunakan model analog.

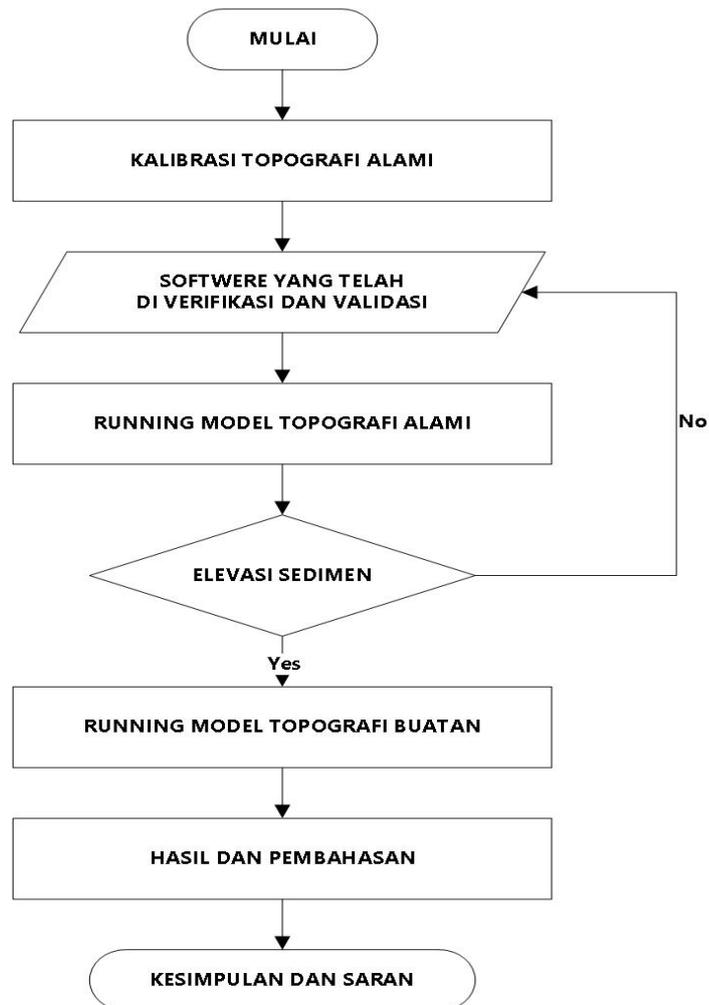
## **5. Metode Pengendalian Sedimentasi Waduk**

Tujuan model distribusi sedimen adalah untuk mengurangi laju sedimentasi dalam waduk dengan sasaran meminimalkan kerugian akibat berkurangnya kapasitas tampung waduk dan memperpanjang usia layanan waduk. Untuk mempertahankan kapasitas tampung waduk maka diperlukan upaya pengendalian sedimen yang sesuai dengan kondisi lingkungan waduk itu sendiri.

Pengurangan sedimen yang memasuki waduk tidak menyelesaikan keseluruhan permasalahan sedimentasi waduk, tetapi dapat mengurangi tingkat akumulasi sedimen dengan cara pengendalian erosi dan perangkapan sedimen (Fan dan Morris, 1992). Berbagai cara untuk mengurangi sedimen telah dipraktekkan saat ini antara lain cara *hard structure* maupun *soft structure*. Untuk pengendalian erosi, cara-cara struktur atau mekanikal digunakan untuk mengurangi kecepatan aliran, meningkatkan penampungan aliran permukaan, dan mengalihkan aliran. Bangunan air untuk menahan sedimen pada bagian hulu sungai termasuk antara lain; *check dam*, kolam hanyutan, kantong pasir, dll. Perangkapan sedimen merupakan salah satu cara efektif untuk mengurangi sedimen tetapi masih mempunyai beberapa kelemahan seperti harga pembangunan yang mahal, kapasitas terbatas, dan kurang ekonomis.

## B. Kerangka Konseptual Penelitian

Konsep penelitian ini adalah membandingkan penambahan sedimen pada waduk sebelum dan sesudah adanya rekayasa topografi.



**Gambar 2.9** Skema Kerangka Konseptual Penelitian