

627.86

PR4

6 21

**KAJIAN POLA DISTRIBUSI SEDIMENTASI
WADUK DENGAN REFERENSI BEBERAPA
WADUK DI JAWA**

TESIS

Disusun Dalam Rangka Melengkapi Salah Satu Persyaratan
Program Magister Teknik Sipil

Oleh :

JANAT PRANOWO
NIM. L4A099023



**MAGISTER TEKNIK SIPIL
PROGRAM PASCASARJANA UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2001**

UPT-PUSTAK UNGGUP

LEMBAR PERSETUJUAN

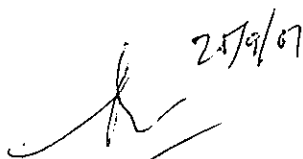
TESIS

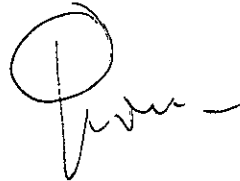
**KAJIAN POLA DISTRIBUSI SEDIMENTASI
WADUK DENGAN REFERENSI BEBERAPA
WADUK DI JAWA**

Disusun Oleh :

JANAT PRANOWO
L 4 A 0 9 9 0 2 3

Disetujui untuk diajukan dalam ujian akhir

 25/9/07
DR. Ir. Suripin, M.Eng
Pembimbing I


Ir. Irawan Wisnu Wardana.MS
Pembimbing II

LEMBAR PENGESAHAN

**KAJIAN POLA DISTRIBUSI SEDIMENTASI WADUK
DENGAN REFERENSI BEBERAPA WADUK DI JAWA**

Disusun oleh

JANAT PRANOWO
NIM. L4A099023

Dipertahankan di Depan Tim Penguji Tanggal :
2 Oktober 2001

Tesis ini diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro

Tim Penguji :

Ketua

Prof.Ir. R. Soediro



Anggota

1. DR. Ir. Suripin, M.Eng



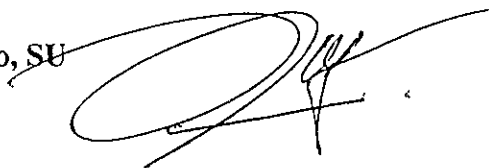
2. Ir. Irawan Wisnu Wardana, MS



3. Ir. Salamun, MS



4. Ir. Agus Suroso, SU



Semarang, Oktober 2001
Universitas Diponegoro
Program Pascasarjana
Magister Teknik Sipil
Ketua,



NIP 130 431 356

ABSTRAK

Sedimentasi merupakan salah satu permasalahan dalam perencanaan dan pengelolaan waduk. Perkembangan fluktuasi volume akumulasi sedimen di *dead storage* dan *effective storage* diperlukan suatu kajian mengenai pola distribusi sedimentasi dalam memprediksi penyebaran sedimen pada seluruh permukaan elevasi. Analisa pola penyebaran dilakukan dengan metode pengukuran dan metode penambahan luas dan pengurangan luas empiris (*area increment and empirical area reduction methods*). Metode empiris tersebut didasarkan pada pengukuran dan pengamatan dalam memprediksi umur guna waduk dan pola penyebaran sedimen elevasi tertentu pada beberapa waduk di Amerika Serikat.

Dalam penelitian ini dilakukan evaluasi metode tersebut terhadap beberapa waduk di Jawa. Waduk yang menjadi obyek studi dilakukan validitas data yang tersedia, dengan menggunakan kriteria akumulasi sedimen dan distribusi sedimen. Dari enam waduk yang menjadi obyek studi menunjukkan bahwa ada satu waduk yang data dianggap valid.

Selanjutnya pola distribusi sedimen dievaluasi dengan metode penambahan luas dan pengurangan luas empiris (*area increment and empirical area reduction methods*) hasilnya menunjukkan bahwa pola penyebaran sedimen yang diperoleh dengan metode empiris tersebut memberikan hasil yang berbeda dengan metode pengukuran (aktual). Prosentase penyimpangan hasil kedua penerapan metode tersebut cukup besar dan hasilnya kurang memuaskan, hanya waduk Mrica yang hasilnya cukup baik.

Penerapan metode empiris pada waduk Mrica menunjukkan indek kesalahan (*error index*) mencapai 26% - 97% pada area kapasitas mati. Hasil tersebut melebihi batas toleransi indek kesalahan sebesar 25%. Sedangkan pada area kapasitas efektif indek kesalahan pada umumnya dibawah batas toleransi 25%. Evaluasi terhadap prediksi pengurangan kapasitas waduk Mrica selama sedimen mengendap menunjukkan bahwa pada area kapasitas mati prosentase sedimen sebesar 56,5% dan area kapasitas efektif sebesar 29,9%.

ABSTRACTION

Sedimentation is one of a problem in reservoir planning and managing. The fluctuation development of the sediment accumulation volume in the dead storage and effective storage, it is needed a study about sedimentation distribution pattern in predicting sedimentation spreading on the whole elevation surface. Spreading pattern analysis is done by measuring method and area increment and empirical area reduction methods. The empirical method is based on the measuring and observation in predicting reservoir purpose age and certain elevation sediment spreading pattern on several reservoir in the United States.

Evaluation of the method was done for this research concerning several reservoir in Java. The available data validity was done for the reservoir which became study object, by using sedimentation accumulation criteria and sedimentation distribution. From the six reservoirs which became study object showing that there is a reservoir which the data is considered valid.

Furthermore sedimentation distribution pattern is evaluated with the area increment and empirical area reduction methods, the result showed that the sedimentation spreading pattern which is obtained by the empirical method give the different result with the measuring method (actual). The percentage of the result deviation of two application of the method is big enough and the result is less satisfy, only the result of the Mrica reservoir is good enough

The application of the empirical method on the Mrica reservoir showed error index attain to 26 % - 97 % at the dead storage area. The result exceeded the limit of the error index in the amount of 25 %. While on the effective storage of the error index generally under tolerance limit 25 %. Evaluation concern the prediction of capacity reduction of Mrica reservoir as long as the sediment settled showed that on the dead storage area, the sediment percentage in the amount of 56.5 %, and the effective storage area in the amount of 29.9 %.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Kuasa, hanya dengan petunjuk-Nya Tesis ini dapat tersusun untuk dapat diajukan kepada Tim Penguji. Tesis dengan judul “Kajian Pola Distribusi Sedimentasi Waduk Dengan Referensi Beberapa Waduk Di Jawa” disusun untuk memenuhi persyaratan dalam Program Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro, Semarang.

Pada kesempatan ini ingin saya menyampaikan ucapan terima kasih kepada Bapak DR.Ir.Suripin, M.Eng dan Ir.Irawan Wisnu Wardana, MS selaku Dosen Pembimbing. Juga kepada Bapak Prof.Ir.Soediro dan Bapak Ir.Salamun, MS serta Bapak Ir.Agus Suroso, SU selaku Tim Pembahas.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada beberapa institusi dari Proyek Induk Bengawan Solo, Pengelola Proyek Induk Serayu Bogowonto, Pengelola Proyek Jratunseluna, PT.Indonesia Power Unit Pembangkit Mrica, PT.Pembangkit Tenaga Listrik Unit Pemeliharaan Cirata, BPD Gapensi Jawa Tengah, serta dosen dan rekan akademisi Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro.

Akhir kata besar harapan penulis semoga Tesis ini dapat bermanfaat untuk menambah khazanah ilmu pengetahuan, khususnya di bidang sumber daya air maupun sebagai acuan untuk penelitian di masa akan datang.

Semarang, 2 Oktober 2001

Penyusun

DAFTAR ISI

JUDUL

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAKSI

KATA PENGANTAR

DAFTAR ISI i

DAFTAR TABEL iv

DAFTAR GAMBAR..... v

DAFTAR NOTASI viii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang 1

1.2 Permasalahan 2

1.3 Pembatasan masalah 3

1.4 Tujuan penelitian 3

1.5 Kontribusi penelitian 3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sedimentasi waduk 4

2.2 Distribusi sedimentasi waduk 5

2.2.1 Metoda penambahan dan metode empiris pengurangan luas 6

2.2.2 Metoda kekuatan arus minimum dan satuan kekuatan arus minimum..... 16

2.2.3 Metode hidrographic survey 24

2.3 Perubahan akumulasi sedimen terhadap T waktu 27

2.4	Identifikasi waduk obyek penelitian	30
2.5	Evaluasi metode prediksi distribusi sedimen	31

BAB III METODOLOGI DAN PROSEDUR PENELITIAN

3.1	Deskripsi data	33
3.2	Pengukuran sedimentasi waduk	35
3.2.1	Pengukuran volume tampung kapasitas waduk	35
3.2.2	Pengukuran batimetri dasar waduk	40
3.2.3	Penentuan posisi dan jarak titik pengukuran (<i>fixed point</i>)	41
3.2.4	Pengukuran kedalaman waduk	42
3.2.5	Tata cara pelaksanaan pemetaan	44
3.2.6	Evaluasi hasil pengukuran <i>Echosounding</i>	45
3.3	Metode empiris pengurangan luas	49
3.4	Tinjauan tipe waduk terhadap kehilangan daya tampung kapasitas	53
3.5	Akumulasi pengendapan sedimen pada tingkatan kapasitas	54
3.6	Flushing (penggelontoran)	54
3.7	Evaluasi penyebaran akumulasi sedimen	55

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1	Validasi data	60
4.2	Tinjauan metode empiris dan aktual	61
4.2.1	Penentuan tipe waduk	61
4.2.2	Luas genangan relatif	62
4.2.3	Validasi data distribusi sedimen	63
4.2.3	Analisa penyimpangan hasil metode empiris dan pengukuran	67

4.3	Tinjauan aplikasi tipe distribusi sedimen terhadap pengurangan kapasitas ...	70
4.4	Perubahan akumulasi sedimen terhadap kapasitas aktual	72
4.5	Distribusi sedimen di <i>dead storage</i> dan <i>effective storage</i>	75
4.6	Pengaruh penggelontoran sedimen waduk Mrica	78

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	81
5.2	Saran	82

DAFTAR PUSTAKA	84
-----------------------------	----

LAMPIRAN

Lampiran A	: Metode empiris pengurangan luas dan metode aktual.....	87
Lampiran B	: Evaluasi validitas data akumulasi sedimen.....	171
Lampiran C	: Distribusi sedimen pada area <i>dead storage</i> dan <i>effective storage</i>	185
Lampiran D	: Pengaruh flushing waduk Mrica.....	192
Lampiran E	: Data gradasi sedimen pada potongan melintang.....	199
Lampiran F	: Aplikasi tipe distribusi sedimentasi waduk.....	200

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Pengelompokan bentuk waduk.....	9
Tabel 2.2	Tipe operasional waduk.....	11
Tabel 2.3	Tipe ukuran material.....	11
Tabel 2.4	Perhitungan penampang permukaan dasar waduk.....	21
Tabel 2.5	Perhitungan volume sedimentasi di waduk Mentz	23
Tabel 2.6	Nama dan lokasi waduk obyek penelitian.....	31
Tabel 4.1	Tipe waduk	62
Tabel 4.2	Data penyebaran sedimen waduk Mrica (1992-1994)	64
Tabel 4.3	Data penyebaran sedimen waduk Mrica (1996-1998)	65
Tabel 4.4	Data penyebaran sedimen waduk Mrica (1999-2000)	66
Tabel 4.5	Tabel evaluasi metode prediksi (luas genangan)	68
Tabel 4.6	Tabel evaluasi metode prediksi (kapasitas)	68
Tabel 4.7	Perkembangan prosentase sedimen.....	73
Tabel 4.8	Koefisien konsolidasi.....	74
Tabel 4.9	Data distribusi gradasi butiran sedimen waduk Mrica.....	75
Tabel 4.10	Distribusi sedimentasi pada area dead storage dan effective storage.....	77
Tabel 4.11	Pengaruh penggelontoran terhadap laju sedimentasi.....	78
Tabel 4.12	Perhitungan volume debit.....	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Proses sedimentasi waduk.....	5
Gambar 2.2	Prosentase sedimen yang tertangkap (tertahan) di kolam pengendali banjir di 11 waduk di wilayah Great plains, Amerika Serikat.....	7
Gambar 2.3	Berbagai tipe kurva untuk metode empiris pengurangan luas genangan untuk memperkirakan kehilangan kapasitas selama sedimen mengendap di waduk.....	8
Gambar 2.4	Hubungan antara kedalaman waduk dengan kapasitas waduk yang digunakan dalam metode empiris pengurangan luas genangan	11
Gambar 2.5	Berbagai kurva untuk menentukan kedalaman nol baru pada bendungan berdasarkan fungsi tanpa dimensi (harga F).....	15
Gambar 2.6	Grafik area design curve.....	16
Gambar 2.7	Hubungan antara kecepatan geser dan jarak untuk waduk Van Rhyneveldpass	18
Gambar 2.8	Distribusi sedimen diatas permukaan persediaan Tampungan	19
Gambar 2.9	Kurva massa kumulatif tanpa dimensi yang menerangkan distribusi sedimen di bawah permukaan persediaan tampungan	20

Gambar 2.10	Hubungan antara lebar dan jarak untuk danau Mentz.....	22
Gambar 2.11	Penentuan proses gerusan dan endapan pada waduk sanmenxia pada teori kekuatan arus minimum.....	24
Gambar 2.11	Perubahan pengukuran profil penampang melintang.....	30
Gambar 3.1	<i>Flow chart</i> pelaksanaan penelitian.....	34
Gambar 3.2	Bentuk matematis volume endapan sedimen.....	36
Gambar 3.3	Luas segmen fungsi A_j dan kurva ab	38
Gambar 3.4	Pembagian permukaan dalam grid ($m \times n$).....	39
Gambar 3.5	Pengukuran cross section diatas dan di bawah permukaan waduk.....	44
Gambar 3.6	Metode perhitungan letak fixed point.....	47
Gambar 3.7	Bagan alir evaluasi akumulasi sedimen.....	59
Gambar 4.1	Hubungan kedalaman waduk dengan kapasitas waduk Mrica	61
Gambar 4.2	Hubungan kedalaman waduk dengan kapasitas waduk Sempor.....	62
Gambar 4.3	Hubungan kapasitas-luas genangan metode empiris dan metode aktual waduk Mrica tahun 1992.....	69
Gambar 4.4	Hubungan kapasitas-luas genangan metode empiris dan metode aktual waduk Sempor tahun 1994.....	69

Gambar 4.5	Tipe kurva prediksi kehilangan kapasitas tampung waduk Mrica	71
Gambar 4.6	Tipe kurva prediksi kehilangan kapasitas tampung waduk Sempor	71
Gambar 4.7	Perkembangan prosentase sedimen (area storage) waduk Mrica	72
Gambar 4.8	Perkembangan distribusi sedimentasi pasda area dead storage dan effective storage.....	76
Gambar 4.9	Grafik konsentrasi flushing sedimen waduk mrica	79
Gambar 4.10	Grafik debit dan T waktu pembukaan drw down culvert.....	80

DAFTAR NOTASI

A	Luas permukaan (genangan) waduk
A_0	Total luas waduk pada kedalaman nol baru
$A_{i,t}$	Luas tampang lintang A_i pada waktu t (m^2)
$A_{i,t+1}$	Luas tampang lintang A_i pada waktu $t + 1$ (m^2)
$A_{i+1,t}$	Luas tampang lintang A_{i+1} pada waktu t (m^2)
$A_{i+1,t+1}$	Luas tampang lintang A_{i+1} pada waktu $t + 1$ (m^2)
A_i	Luas bidang kontur ke i
A_{i+1}	Luas bidang kontur ke $i + 1$
A_1	Luas pada <i>cross section</i> 1 pada elevasi tertentu
A_2	Luas pada <i>cross section</i> ke-2 pada elevasi yang sama dengan <i>cross section</i> ke-1
A_h	Luas genangan waduk pada setiap kedalaman waduk.
A_{PH}	Total luas waduk pada kedalaman P_H
AB	Jarak beacon point ke <i>beacon point</i> selanjutnya
AC	Jarak beacon point ke titik pertolongan (obyek)
AD	Jarak beacon point ke <i>fixed point</i>
a	Luas sedimen relatif
a_0	Luas waduk relatif pada kedalaman nol baru
D	Kedalaman air
dy	Penambahan kedalaman
$E_{x,t}$	Indek sedimentasi,dalam dimensi waktu. Dipengaruhi geometri saluran, hidrologi aliran dan gradasi sedimen
g	Percepatan gravitasi
H	Total kedalaman dari waduk pada muka air normal
H	Selisih elevasi dasar waduk dan elevasi muka air tertinggi
H_i	Elevasi garis kontur ke i
H_{i+1}	Elevasi garis kontur ke $i + 1$
H_1-H_2	Jarak elevasi antara <i>cross section</i> 1 dan <i>cross section</i> 2

h_{\min}	Elevasi dasar waduk mula-mula
IT	Interval waktu pengukuran
J	Nomor tampang memanjang bagian profil waduk
K	Nilai konstan berdasarkan perimbangan untuk luas sedimen relatif yang telah mengalami perubahan
L_j	Jarak antara tampang lintang A_i dan A_{i+1} (m)
O	Elevasi nol mula-mula pada waduk
P	Kedalaman relatif, itu berarti pada setiap bagian kedalaman waduk yang diukur dari dasar waduk
Q	Debit air
Q_s	Kekuatan arus sungai
S	Total sedimen yang terendap di dalam waduk
S	Total endapan sedimen
$T_{\Delta T}$	Volume genangan pada pengukuran ΔT
T	Waktu pengendapan
T	Waktu
TV_{sed}	Total volume sedimen yang mengendap di waduk (m^3)
V	Volume tampungan antara garis kontur ke i dan i + 1
V_{T1}	Volume genangan pada pengukuran T_1
V_{T2}	Volume genangan pada pengukuran T_2
V_o	Volume relatif pada kedalaman nol baru
V_o	Volume total waduk pada kedalaman nol baru
V_{T2-T1}	Volume sedimen dalam selang waktu $T_2 - T_1$ (m^3)
V_{T1}	Volume genangan sebelum sedimentasi (m^3)
V_{T2}	Volume genangan setelah sedimentasi (m^3)
$V_{x,t}$	Volume endapan sedimen pada jarak x dan t waktu
VS	Satuan kekuatan arus
V_{ST}	Volume sedimen yang mengendap tiap tahun.
V_{WT1}	Volume waduk pengukuran ke-1 (m^3)
V_{WT2}	Volume waduk pengukuran ke-2 (m^3)
V_h	Kapasitas waduk pada setiap kedalaman h

$V_{x, \infty}$	Perhitungan Volume endapan sedimen pada jarak x
V_{PH}	Total volume waduk pada kedalaman PH
$V_{SED-J, t+1}$	Volume sedimen pada bagian tampang memanjang j pada waktu t + 1 (m^3)
$V_{scd-J, t+1}$	Volume sedimen pada bagian tampang memanjang j pada waktu t + 1
X_n	Absis X terakhir
x	Jarak
Y_n	Ordinat Y terakhir
Y_o	Elevasi nol kapasitas baru pada waduk setelah periode sedimentasi
Y	Energi potensial persatuan berat air

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Ada dua musim yang terjadi di Indonesia yang dipengaruhi oleh angin muson timur dan angin muson barat. Angin muson timur menyebabkan terjadinya musim kemarau dan angin muson barat menyebabkan musim penghujan. Dua musim tersebut memberikan konsekuensi tersendiri terhadap ketersediaan air dimana pada saat musim penghujan terjadi kelebihan ketersediaan air dan sebaliknya terjadi kekurangan ketersediaan air pada musim kemarau.

Waduk merupakan suatu bangunan air yang berfungsi untuk menampung air pada saat musim hujan dan melepaskan debit air pada musim kemarau. Sayangnya debit yang masuk tidak hanya berupa air tetapi membawa kandungan sedimen. Dengan kata lain bahwa tidak ada satupun waduk yang bebas dari sedimentasi. Besar kecilnya kandungan sedimen berdampak langsung atau tak langsung terhadap sedimentasi waduk. Faktor yang mempengaruhi besarnya produksi sedimen sebagai berikut (USBR, 1974) :

1. Bentuk, ukuran, kemiringan dari jaringan drainase.
2. Tipe tanah dan formasi geologi.
3. Bentuk dan ukuran waduk.
4. Penutup lahan dan Perubahan penggunaan lahan.
5. Frekuensi terjadi banjir dan intensitas curah hujan.
6. Topografi.

Monitoring endapan sedimen dapat dilakukan dengan metode geograpic survey. Pengukuran metode geographic yang dilakukan dengan sebuah peralatan *echo sounding* menghasilkan data pengukuran dan pemetaan jumlah akumulasi endapan sedimen pada tiap elevasi di waduk. Pengukuran endapan sedimen dan debit air diperlukan dalam pola pengoperasian waduk pada sistem penggelontoran sedimen (*Sediment Outlet System*) sehingga memberikan kontribusi pada usaha pengendalian sedimentasi waduk. Sedangkan pola penyebaran endapan sedimen dipengaruhi oleh (USBR, 1974) :

1. Susunan partikel sedimen.
2. Hubungan *inflow dan outflow*
3. Ukuran dan bentuk waduk
4. Prosedur pola pengoperasian waduk.
5. Kecepatan dan turbulensi aliran.

Sampai saat ini, perhitungan umur guna waduk berdasarkan pada volume kapasitas mati (*dead storage*). Pada kenyataannya sedimen yang masuk dalam waduk tidak hanya mengendap di kapasitas mati (*dead storage*), namun tersebar di seluruh dasar waduk.

1.2. Permasalahan

Dalam menentukan sisa umur waduk perlu diketahui secara pasti prosentase sedimen yang mengendap di *dead storage*. Untuk itu diperlukan pengetahuan tentang pola distribusi endapan sedimen yang masuk ke waduk.

1.3. Pembatasan masalah

Mengingat pola distribusi endapan sedimen di waduk sangat kompleks, maka dalam tesis ini hanya akan diteliti:

1. Pola distribusi sedimentasi waduk di Jawa yang datanya cukup lengkap.
2. Metode empiris dalam memprediksi distribusi endapan sedimen didasarkan pada pengaruh bentuk dan ukuran waduk. Variabel lainnya seperti susunan partikel sedimen, inflow dan outflow, prosedur pola pengoperasian waduk, kecepatan dan turbulensi aliran, yang mempengaruhi pola penyebaran sedimen diabaikan dalam Pembahasan penelitian.
3. Prediksi pola distribusi sedimen secara empiris didasarkan pada kontribusi pengendalian sedimentasi dalam pola pengoperasian waduk.

1.4. Tujuan penelitian

1. Mengevaluasi validitas hasil pengukuran sedimen yang telah ada di beberapa waduk di Jawa.
2. Mengkaji pola distribusi sedimentasi waduk yang datanya dianggap valid.

1.5. Kontribusi penelitian

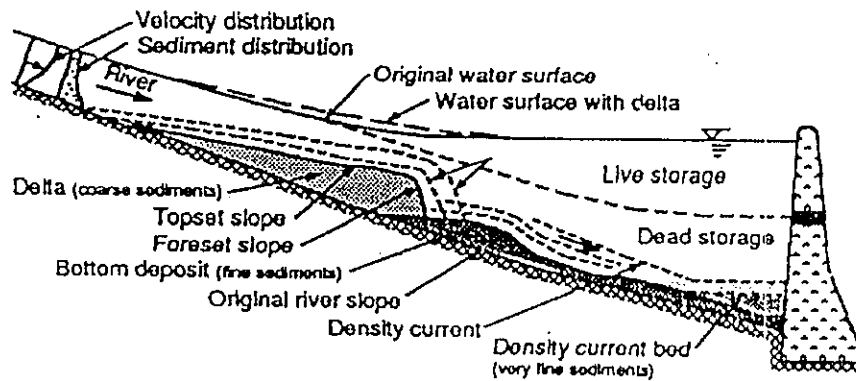
Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberi kontribusi dalam menilai kelayakan hasil pengukuran sedimentasi waduk, sehingga dapat digunakan untuk memprediksi sisa umur waduk secara lebih baik dan keperluan lain yang berkaitan dengan sedimentasi waduk.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sedimentasi waduk

Pada saat arus aliran sungai 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)

Proses pengendapan sedimen umumnya dimulai dengan terbentuknya delta di bagian hulu waduk. Partikel sedimen yang halus dibawa oleh kerapatan atau kekentalan arus menuju waduk. Sedimentasi waduk tergantung dari regim / sistim yang berlaku pada sungai tersebut, frekwensi terjadinya banjir, bentuk dan ukuran waduk, sistim operasional waduk, kepadatan sedimen, konsolidasi sedimen, arus densitas/turbulensi serta perubahan penggunaan lahan yang seluruhnya berpengaruh terhadap umur manfaat (*life time*) suatu waduk. Pada Gambar 2.1 menjelaskan secara umum proses sedimentasi di waduk.



Gambar 2.1 Proses sedimentasi di waduk (Julien, 1995)

Dalam menganalisa sedimentasi pada waduk masalah yang mengenai pengurangan kapasitas dan kapasitas mati suatu waduk, efisiensi tangkapan, pengawasan pengukuran dan sistem operasi waduk harus diperhatikan beberapa hal seperti kecepatan aliran yang masuk ke waduk, volume sedimen yang mengendap, karakteristik sedimen, bentuk waduk, faktor geografi daerah setempat dan tata cara penggunaan lahan. Umur guna (*life time*) waduk menunjukkan seberapa jauh waktu yang dibutuhkan pada saat waduk terisi penuh oleh sedimen. Ini merupakan suatu tantangan bagi para perencana dalam mengevaluasi umur fungsi waduk sejak sumber sedimen tersebut muncul dari berbagai macam perubahan formasi geologi.

2.2 Distribusi Sedimentasi Waduk

Definisi distribusi sedimentasi waduk ialah 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 satu dengan lainnya.

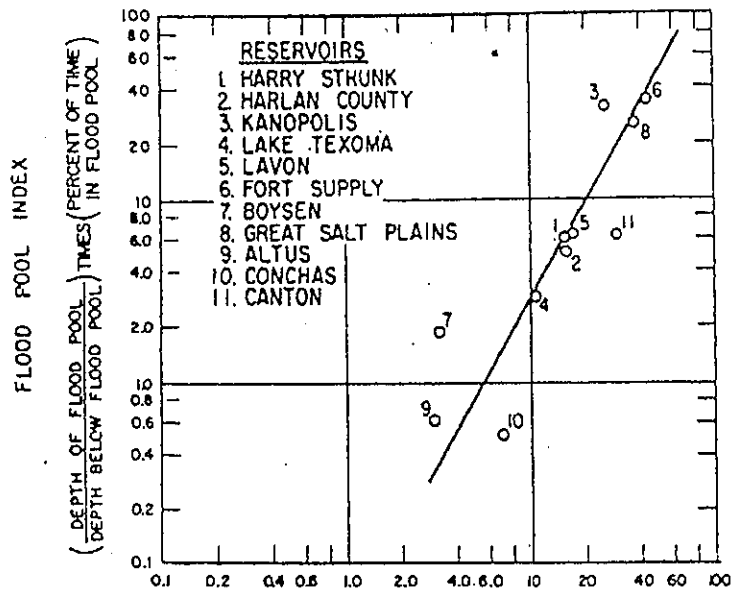
Eksistensi monitoring distribusi sedimentasi waduk dalam periode tertentu amat diperlukan untuk memprediksi akumulasi pada saat terjadi *dead storage*. Ada dua metode yang mengulas distribusi sedimentasi yakni Metode kekuatan arus minimum dan satuan kekuatan arus minimum serta Metode empiris pengurangan luas dan penambahan luas. Metode empiris pengurangan luas dan penambahan luas membahas mengenai bentuk dan ukuran, sistem operasi, ukuran butiran dalam suatu klasifikasi tipe tertentu yang mempengaruhi distribusi sedimentasi. Metode kekuatan arus minimum dan satuan arus minimum menguraikan pengaruh kekuatan arus sungai, jarak dan lebar waduk terhadap distribusi sedimentasi.

2.2.1 Metode Penambahan dan Metode Empiris Pengurangan Luas

Suatu metode berdasarkan pengalaman dan pengamatan di lapangan (empiris) yang dipakai untuk mendistribusikan sedimen dibawah elevasi muka air normal dikembangkan oleh Biro Reklamasi Amerika Serikat (USBR –*United States Bureau of Reclamation*) telah digunakan oleh institusi pengelola waduk pada daerah tersebut. Penggunaan metode tersebut didasarkan pada beberapa prinsip cara antara lain :

1. Menentukan jumlah sedimen yang terdistribusi di dalam waduk .

2. Berdasarkan karakteristik lokasi waduk, dicari kurva empiris yang sesuai untuk mendistribusikan sedimen.

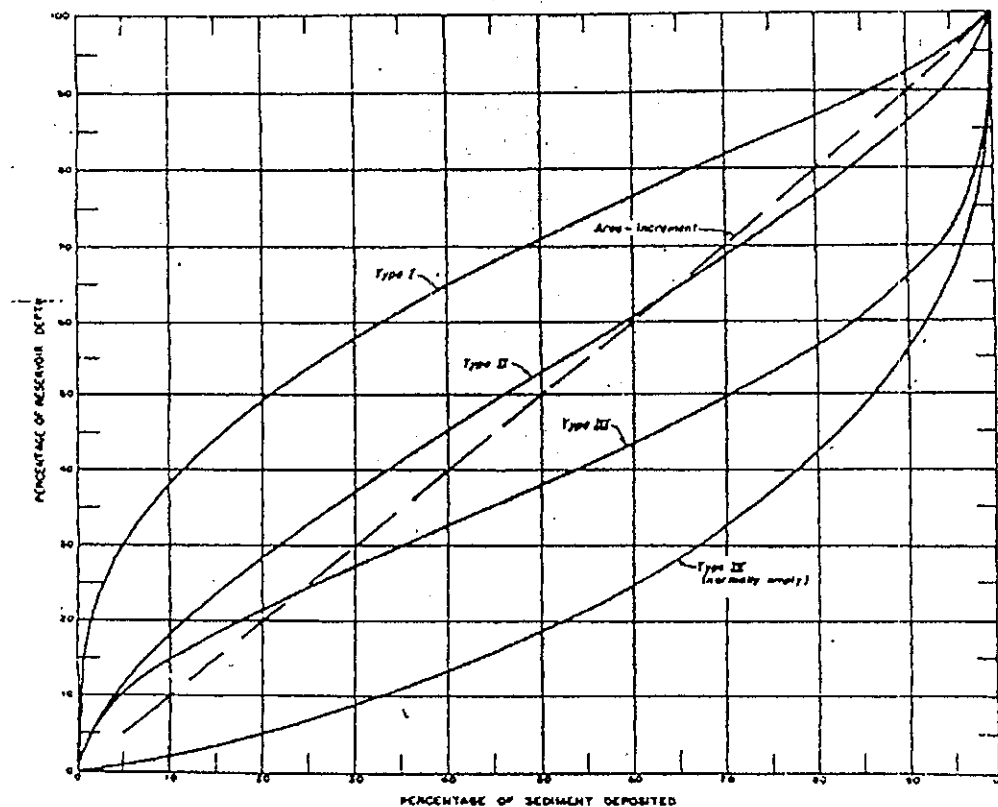


Gambar 2.2. Prosentase sedimen yang tertahan di kolam pengendali banjir di 11 waduk di wilayah Great plains, Amerika Serikat (Strand dan Pemberton, 1987, dalam Morris dan Jiahua Fan, 1997)

3. Menentukan ketinggian atau elevasi akumulasi sedimen di bendungan, yang diukur dari elevasi nol kapasitas baru.
4. Penggunaan kurva empiris yang dipilih untuk mendistribusikan sedimen sebagai fungsi dari kedalaman di atas elevasi nol kapasitas baru.

Metode empiris pertama yang dikembangkan adalah metode penambahan luas yang digunakan berdasarkan anggapan bahwa volume sedimen yang terendap di dalam waduk sebanding dengan setiap penambahannya. Dari pengamatan ulang terhadap beberapa waduk, Biro Reklamasi Amerika Serikat menemukan bahwa

pola pengendapan sedimen bervariasi dari satu tempat ke tempat yang lain. Bentuk dan ukuran waduk, sistem operasi waduk dan ukuran butiran sedimen yang secara keseluruhan mempengaruhi distribusi sedimen di dalam waduk dan keempat tipe kurva empiris yang berbeda tersebut dikembangkan berdasarkan dari karakteristik atau sifat waduk tersebut.



Gambar 2.3. Tipe kurva untuk metode empiris pengurangan luas genangan untuk memperkirakan pengurangan kapasitas selama sedimen mengendap di waduk (Strand dan Pemberton, 1987, dalam Morris dan Jiahua Fan, 1997)

Dengan menggunakan tipe kurva yang sesuai maka dapat menghasilkan distribusi sedimen yang lebih mendekati kenyataan daripada metode penambahan luas. Keempat kurva tersebut dikembangkan dari pengamatan ulang data waduk yang dapat dilihat pada Gambar 2.3. bersama dengan kurva metode penambahan luas.

Perlu diperhatikan bahwa kurva metode penambahan luas hampir sama dengan kurva tipe II. Kedua metode empiris tersebut dikemukakan oleh Borland dan Miller (1958). Metode empiris pengurangan luas ini kemudian direvisi oleh Lara (1962).

Ketika jumlah sedimen yang mengendap di bawah muka air normal telah ditetapkan, metode empiris pengurangan luas dipakai untuk memperkirakan distribusi sedimen dalam berbagai kurun waktu. Metode ini dikembangkan dari data pengamatan waduk di Amerika Serikat. Data itu menjelaskan bahwa ada hubungan yang nyata antara bentuk waduk dengan prosentase endapan sedimen pada setiap kedalaman waduk. Bentuk waduk didefinisikan sebagai hubungan antara kedalaman dengan kapasitas waduk yang pengelompokannya dapat dilihat dalam tabel berikut:

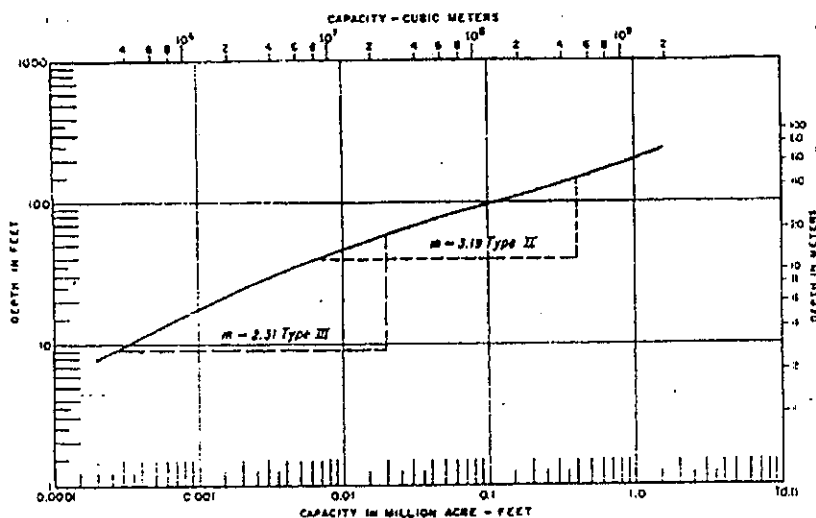
Tabel 2.1 Pengelompokan bentuk waduk

Bentuk Waduk	Tipe	m
Danau	I	3.5 – 4.5
Dataran – kaki bukit	II	1.5 – 3.5
Bukit-pegunungan	III	1.5 – 2.5
Pegunungan	IV	1.0 – 1.5

Sumber : Morris dan Jiahua Fan, 1997

Dimana “m” adalah kemiringan yang dapat dilihat dari hubungan timbal balik antara kedalaman dengan kapasitas waduknya yang digambarkan pada kertas skala logaritma. Perlu diperhatikan bahwa tipe I tidak selalu berada di daratan begitu pula dengan tipe IV yang tidak selalu berada di pegunungan.

Kadang-kadang tipe operasi waduk atau ukuran sedimen mungkin tidak mengindahkan klasifikasi dari bentuk waduknya. Jika tipe III adalah waduk dengan surutan muka air sedang pada selang waktu yang sering atau sedimen dengan dominasi lempung, seharusnya diklasifikasikan sebagai tipe IV, karena sebagian besar sedimen mengendap di permukaan dasar waduk.



Gambar 2.4. Hubungan antara kedalaman waduk dengan kapasitas waduk yang digunakan dalam metode empiris pengurangan luas genangan. (Strand dan Pemberton, 1987, dalam Morris dan Jiahua Fan, 1997)

Dengan pengertian yang sama, penentuan tipe waduk seharusnya didasarkan ketika suatu waduk berada pada garis batas antara tipe-tipe tersebut. Strand dan Pemberton mengemukakan bahwa tipe waduk tidak berubah sejalan dengan bertambahnya endapan sedimen, jika sistem operasi waduk tetap. Oleh karena itu penggambaran kapasitas waduk didasarkan pada genangan waduk mula-mula, bukan pada genangan oleh endapan sedimen. Pengelompokan operasi waduk terdiri dari waduk dengan kolam yang kondisi stabil, surutan muka air waduk

sedang, surutan muka air waduk cukup besar, atau dalam keadaan normal waduk kosong.

Tabel. 2.2 Tipe operasional waduk.

Operasi Waduk	Tingkat Operasional	Bentuk Tingkatan	Klasifikasi
Sedimen terendam di waduk (sampai level tertinggi).	I	I	I
		II	I atau II
		III	II
Surutan muka air waduk sedang	II	I	I atau II
		II	II
		III	II atau III
Surutan muka air waduk cukup besar	III	I	II
		II	II atau III
		III	III
Dalam keadaan normal, waduk kosong	IV	Semua	IV

Sumber : Morris dan Jiahua Fan, 1997

Setelah memilih satu dari dua tipe yang telah ditentukan, dipilih tipe yang sesuai apakah berpengaruh terhadap bentuk waduk atau operasi waduknya. Mengenai ukuran butiran sedimen juga dipertimbangkan dengan menggunakan beberapa petunjuk berikut ini :

Tabel 2.3. Tipe ukuran material

Ukuran butiran yang dominan	Tipe
Pasir atau material kasar	I
Lanau	II
Lempung	III

Sumber : Morris dan Jiahua Fan, 1997

Persamaan umum yang digunakan untuk mengembangkan prosedur diatas adalah:

$$S = \int_0^{Y_0} A \, dy + \int_{Y_0}^H K a \, dy \quad (2.01)$$

Dimana :

S = Total sedimen yang terendap di dalam waduk

o = Elevasi nol mula-mula pada waduk

Y_0 = Elevasi nol kapasitas baru pada waduk setelah periode sedimentasi

A = Luas permukaan (genangan) waduk

dy = Penambahan kedalaman

H = Total kedalaman dari waduk pada muka air normal

K = Nilai konstan berdasarkan perimbangan untuk luas sedimen relatif yang telah mengalami perubahan.

a = Luas sedimen relatif

Dengan penggabungan dan penyederhanaan persamaan di atas, hubungan berikut ini dapat dikembangkan menjadi :

$$\frac{1 - V_0}{a_0} = \frac{S - V_0}{H.A_0} \quad (2.02)$$

dimana:

V_0 = Volume relatif pada kedalaman nol baru

a_0 = luas waduk relatif pada kedalaman nol baru

V_0 = Volume total waduk pada kedalaman nol baru

H = Kedalaman mula-mula waduk

A_0 = Total luas waduk pada kedalaman nol baru

Kemudian dengan menentukan 2 batas yang baru :

$$h_p = \frac{1 - V_p}{a_p} \quad (2.03)$$

$$\text{dan} = h'_p = \frac{S - V_{PH}}{H \cdot A_{PH}} \quad (2.04)$$

dimana :

p = Kedalaman relatif, itu berarti pada setiap bagian kedalaman waduk yang diukur dari dasar waduk

V_{PH} = Total volume waduk pada kedalaman PH

A_{PH} = Total luas waduk pada kedalaman PH

Itu dapat dilihat dari persamaan (2.02), bahwa h_p sama dengan h'_p pada elevasi nol baru yaitu y_0 .

Dengan menggunakan data dari pengamatan waduk, kurva design tampungan non dimensi mengalami penurunan untuk setiap kedalaman dari tipe waduk dan kurva design luas yang diperoleh dari data pengukuran. Kurva design tampungan waduk diperlihatkan pada Gambar (2.3) sedangkan kurva design luas waduk diplotkan pada Gambar (2.5). Gambar (2.6) memuat penggambaran kurva sampai batas penuh dari harga h_p untuk keempat tipe waduk yang dikembangkan dari kurva design tampungan dan luas waduknya.

Penggambaran dari h'_p dapat ditempatkan pada Gambar (2.6) dan harga p yang bersilangan dengan tipe kurva yang sesuai akan memberikan kedalaman relatif p_0 untuk elevasi nol baru. Elevasi y_0 kemudian dapat dihitung dengan menambahkan hasil dari p_0H ke elevasi dasar waduk mula-mula.

Kadang-kadang kita akan menemukan kondisi waduk dimana kurva h'_p tidak berpotongan dengan kurva h_p untuk tipe waduk yang sesuai. Metode penambahan luas kemudian dipakai untuk memperkirakan kedalaman nol baru pada bendungan. Persamaan umum untuk metode tersebut adalah :

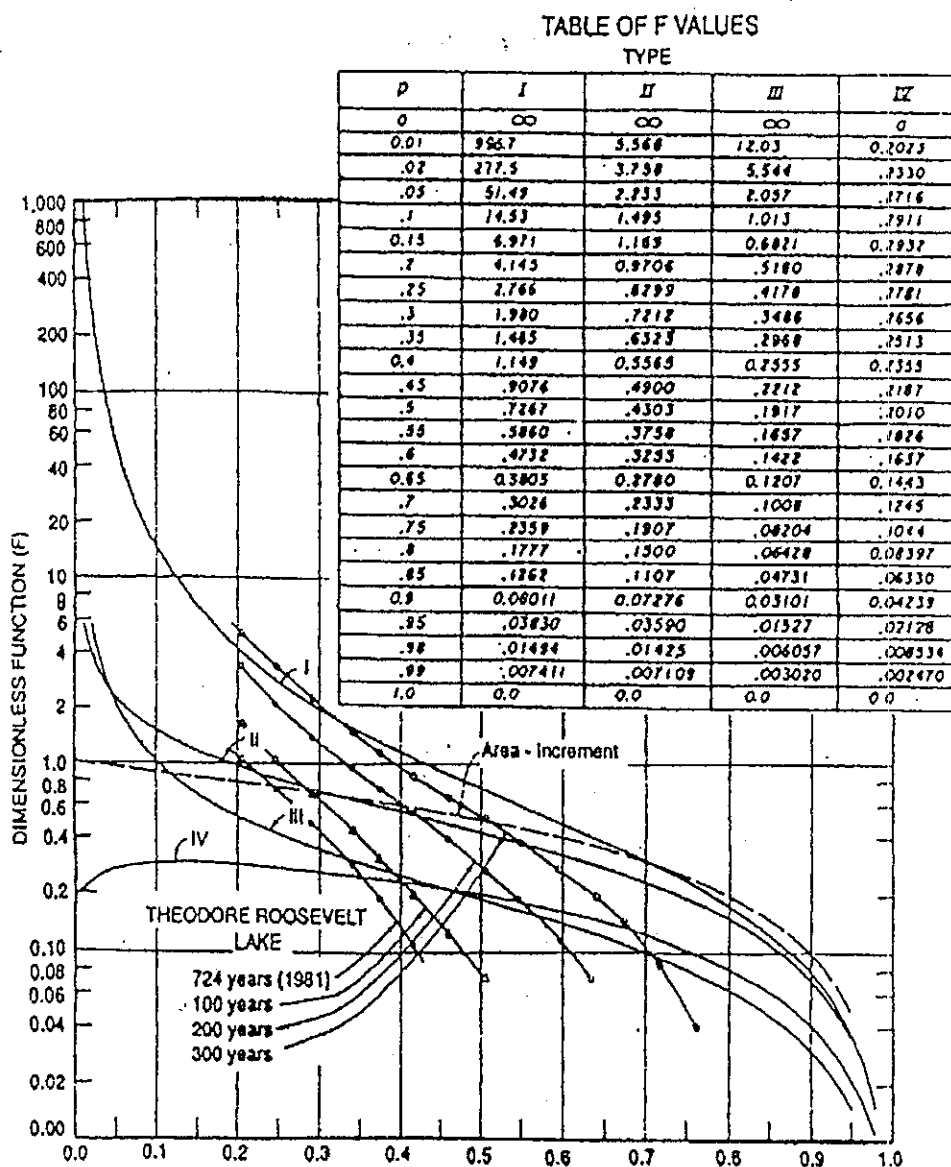
$$S = A_0(H - Y_0) + V_0 \quad (2.05)$$

Sesuai pengujian terhadap persamaan tersebut menunjukkan anggapan dasar bahwa luas endapan sedimen menyisakan harga konstan di setiap kedalaman waduk. Kurva dari harga h_p untuk anggapan penambahan luas juga diplotkan pada Gambar (2.5). Kemungkinan terjadi penyimpangan perhitungan dari metode yang digunakan untuk mendistribusikan sedimen ke dalam waduk, maka Biro Reklamasi jarang merekomendasikan penempatan ambang batas dari bentuk bangunan pengeluaran (outlet) kurang dari 10 feet diatas elevasi dasar waduk.

Volume sedimen yang tertahan di waduk dan yang terdistribusi dapat diprediksi berdasarkan tipe kurva yang dipilih. Perhitungan harga luas sedimen relatif a pada setiap kedalaman relatif P .

Perhitungan luas genangan pada setiap elevasi akibat endapan sedimen dengan cara mengalikan luas terkoreksi dengan luas sedimen relatif pada setiap level diatas elevasi nol kapasitas baru.

Ketika seluruh sedimen masuk ke setiap bagian waduk dan semakin bertambah dimulai dari elevasi nol kapasitas baru sampai dasar waduk mula-mula, sehingga dapat diketahui bahwa luas sedimen sama dengan luas waduk mula-mula.



Gambar 2.5. Tipe kurva untuk menentukan kedalaman nol baru pada waduk berdasarkan fungsi tanpa dimensi (Strand dan Pemberton, 1987, dalam Morris dan Jiahua Fan, 1997)

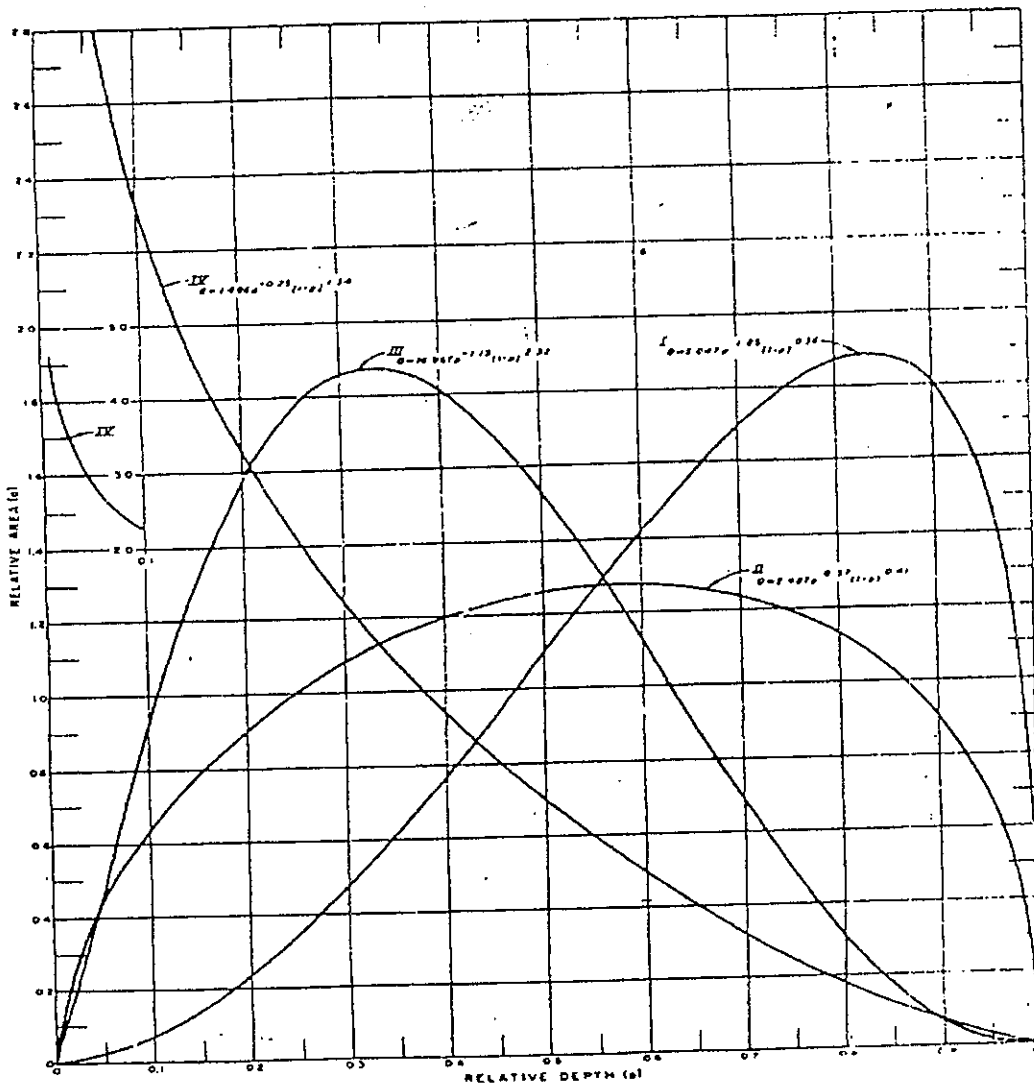


Figure H-8. Reservoir area design curves. 288-D-2849.

Gambar 2.6. Grafik area *design curve* (Strand, 1973, *United States Departement of The Interior Bureau of Reclamation*, 1974)

2.2.2. Metode Kekuatan Arus dan Satuan Kekuatan Arus Minimum

Teori tentang satuan kekuatan daya arus minimum untuk morfologi sungai dikemukakan pertama kali oleh Yang, 1971 (dalam Yang, 1996) dari ilmu termodinamika. Teori tersebut menyebutkan bahwa untuk sistem tertutup dan terbuka pada kondisi yang tidak seimbang dinamis maka :

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dx}{dt} \frac{dy}{dx} = VS = \text{minimum} \quad (2.06)$$

dimana :

y = energi potensial persatuan berat air

x = jarak

VS = satuan kekuatan arus

t = waktu

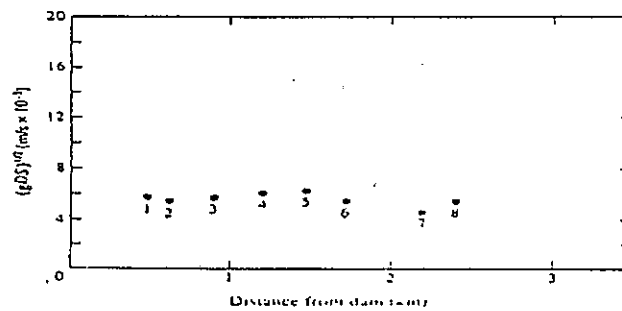
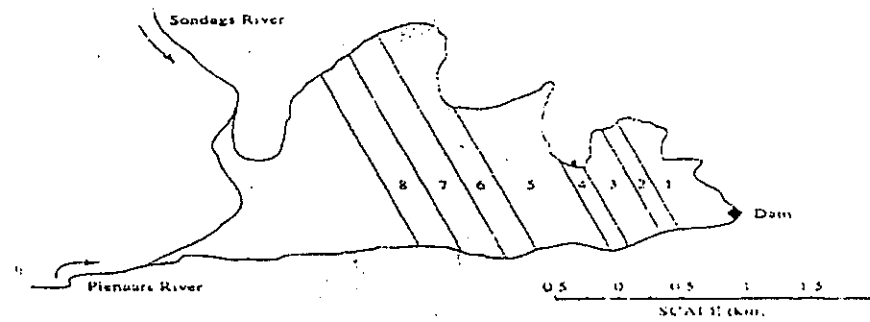
Harga minimum pada persamaan di atas (2.06) tergantung dari apa yang akan diterapkan terhadap sistem tersebut. Teori tersebut kemudian diterapkan untuk perhitungan endapan yang dibawa oleh aliran (Yang, 1976). Yang dan Molinas (1982) menunjukkan bahwa satuan kekuatan arus dapat diperoleh melalui keseluruhan dari tegangan hasil geser (τ) dan gradien kecepatan du/dy , dimana u adalah kecepatan rata-rata setempat pada aliran saluran terbuka. Sebagai konsekuensi harus meminimalkan VS, sama juga dengan meminimalkan (τ) du/dy . Annandale, 1987 (dalam Yang, 1996) menyebutkan bahwa (τ) du/dy dapat diaplikasikan ke dalam metode satuan kekuatan arus. Itu dapat diperlihatkan bahwa dengan meminimalkan aplikasi kekuatan arus minimum adalah sama dengan :

$$(gDS)^{1/2} = \text{minimum} = \text{konstan} \quad (2.07)$$

dimana :

g = Percepatan gravitasi

D = Kedalaman air



Gambar 2.7. Hubungan antara kecepatan geser dan jarak untuk waduk Van Rhyneveldspass (Annandale, 1987, dalam Yang, 1996)

persamaan (2.07) dapat digunakan untuk menentukan penampang memanjang dasar waduk atau di dekat daerah yang kondisinya stabil. Keakuratan dari persamaan (2.07) dibuktikan oleh Annandale, 1987 (Yang, 1996) dengan menggunakan data dari waduk Van Rhyneveldspass di Afrika Selatan, seperti yang terlihat pada Gambar 2.6 menerangkan bahwa harga konstan dari $(gDS)^{1/2} = 6 \times 10^{-3}$ m/detik dapat digunakan untuk waduk Van Rhyneveldspass. Persamaan (2.07) supaya dapat diaplikasikan untuk menentukan penampang memanjang dasar waduk, kita menganggap bahwa kecepatan geser dari sungai ketika memasuki waduk berlangsung konstan sampai menembus elevasi dasar waduk. Perhitungan penampang tinggi muka air waduk yang telah dimodifikasi kemudian

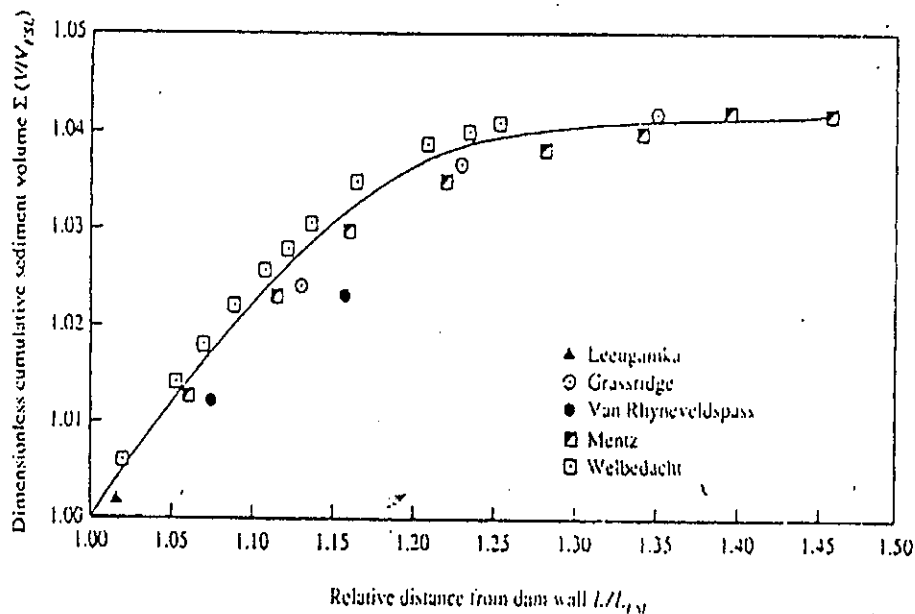
dibuat dengan menganggap dua permukaan bebas yaitu permukaan air waduk dan permukaan dasar waduk. Permukaan dasar waduk yang dihasilkan dalam perhitungan dengan menggunakan persamaan (2.07) diperoleh suatu hasil yang cukup memuaskan untuk sebagian besar sungai dan waduk yang alami, persamaan terhadap teori satuan kekuatan arus minimum dapat dipergunakan yaitu :

$$Q_s = a \text{ minimum} = \text{konstan} \quad (2.08)$$

Dimana :

Q = debit air

Q_s = kekuatan arus sungai



Gambar 2.8. Distribusi sedimen diatas permukaan persediaan tampungan (Annandale , 1987, dalam Yang, 1996)

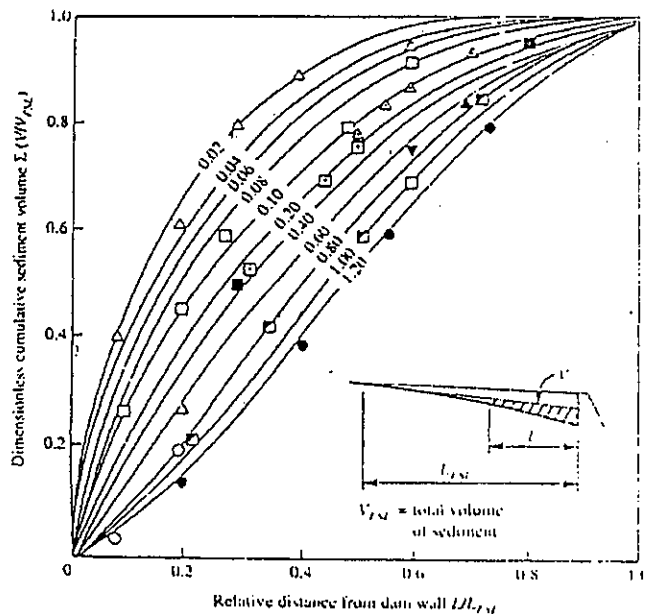
Harga minimum pada persamaan (2.08) tergantung dari parameter yang akan diterapkan terhadap sistem tersebut. Yang dan Song, 1986 (dalam Yang, 1996) menunjukkan bahwa persamaan (2.06) dan persamaan (2.08) merupakan sebuah

kasus yang spesifik namun sederhana dari teori umum tentang pemencaran rata-rata energi minimum. Chang dan Annandale, 1984 (Yang, 1996) menemukan suatu formula dimana saat kekuatan arus mendekati harga minimum untuk jangkauan relatif pendek, maka :

$$\frac{dQ}{dx} = 0 \quad (2.09)$$

Sehingga hubungan antara luas potongan melintang saluran (A) dan keliling basah (P) menjadi :

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dx} &= \frac{A}{Q} \frac{dQ}{dx} + \frac{A}{3P} \frac{dP}{dx} \\ &= \frac{A}{3P} \frac{dP}{dx} \end{aligned} \quad (2.10)$$



Gambar 2.9. Kurva massa kumulatif tanpa dimensi yang menerangkan distribusi sedimen dibawah permukaan persediaan tampungan (Annandale, 1987, dalam Yang, 1996)

Persamaan diatas (2.10) dapat digunakan untuk menyempurnakan kurva aliran kumulatif sebagai fungsi tanpa dimensi dari dP/dx . Pada Gambar (2.9)

menunjukkan berbagai kurva yang dikembangkan oleh Annandale, 1987 (Yang, 1996) berdasarkan data dari 11 waduk di Afrika Selatan, dimana sedimen yang mengendap berada di bawah permukaan persediaan tampungan atau di bawah puncak bangunan pelimpah waduk. Pada Gambar (2.9) Annandale menunjukkan hasil sedimen yang mengendap di atas permukaan persediaan tampungan waduk. Dari beberapa kasus Annandale menerangkan langkah-langkah perhitungan berdasarkan metode kekuatan arus minimum dan satuan kekuatan arus minimum yang dirangkum dalam tabel berikut ini :

Tabel 2.4. Perhitungan Penampang permukaan dasar waduk

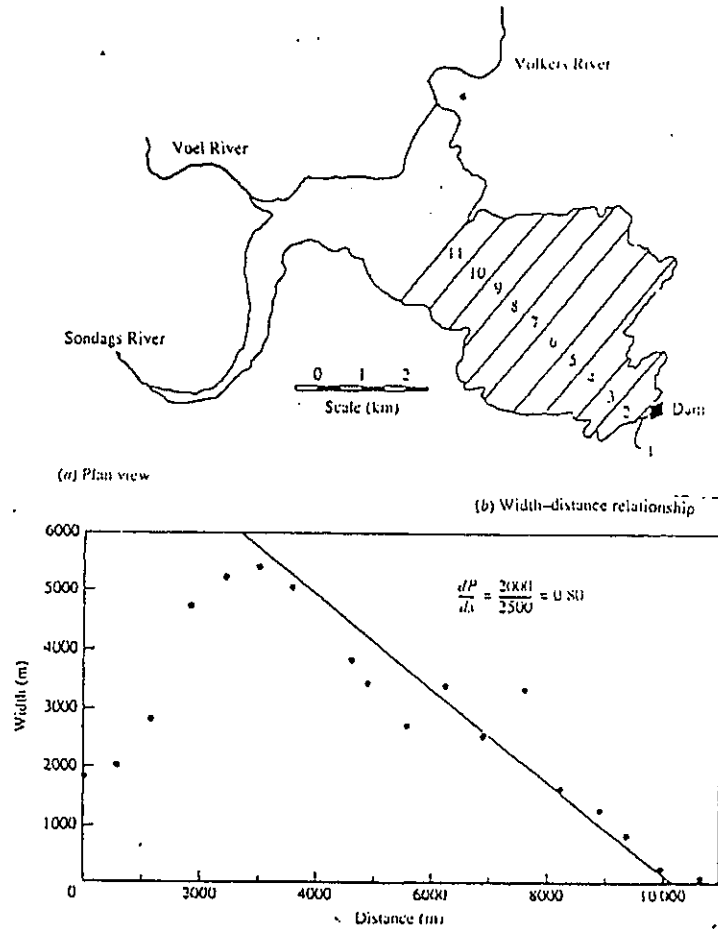
Chainage (m) (1)	Stage (m) (2)	Assumed Bed Level (m) (3)	Flow Depth (m) (4)	Area (m ²) (5)	V / 2g (m) (6)	Total head (m) (7)	F (m) (8)	R (m) (9)
0	100.98	99.900	1.080	1.080	0.0225	101.002	3.160	0.341
0	100.98	99.980	1.000	1.000	0.0262	101.006	3.000	0.333
4	101.000	99.990	1.010	1.010	0.0257	101.025	3.020	0.334
4	100.988	99.990	0.998	0.998	0.0263	101.014	2.996	0.333
4	100.988	99.998	1.000	1.000	0.0262	101.014	3.000	0.333
8	100.100	99.990	1.110	1.110	0.0213	101.121	3.220	0.344
8	100.997	99.990	1.007	1.007	0.0259	101.022	3.014	0.334
10	101.000	100.000	1.000	1.000	0.0262	101.026	3.000	0.333

R ^{1/3} (10)	Friction Slope (S) (11)	Average S overReach (12)	Leght Of reach (m) (13)	H _f (m) (14)	Total Head (m) (15)	(gDS) ^{1/2} (m/s) (16)	Notes
0.239	0.0017	0	0	0	0	0.133	I
0.231	0.0020	0	0	0	0	0.140	II
0.232	0.0020	0.0020	4	0.0078	101.014		III
0.230	0.0020	0.0020	4	0.0081	101.014	0.140	IV
0.231	0.0020	0.0020	4	0.0080	101.014	0.140	V
0.241	0.0016	0.0018	4	0.0071	101.021		III
0.231	0.0020	0.0020	4	0.0079	101.022	0.139	IV
0.231	0.0020	0.0020	4	0.0080	101.022	0.140	V
0.231	0.0020	0.0020	2	0.0040	101.026	0.140	

Sumber : Yang, 1996

Ketentuan diatas dianggap sampai dalam kondisi yang seimbang dinamis. Harga konstan diasumsikan bahwa kecepatan geser di sungai berlaku untuk waduk, oleh karena itu kecepatan geser ditetapkan hasil perhitungan dari sungai

tersebut. Perhitungan penampang permukaan dasar waduk didasarkan teori satuan kekuatan arus minimum.



Gambar 2.10. Hubungan antara lebar dan jarak untuk danau Mentz (Annandale, 1987, dalam Yang, 1996)

Lokasi waduk Mentz di Afrika Selatan menurut Anandale, 1987 (Yang, 1996) diperlihatkan pada Gambar (2.8) menunjukkan perkiraan volume sedimen yang mengendap di waduk di harapkan mencapai $129 \times 10^6 \text{ m}^3$. Dengan menganggap bahwa keliling basah dapat diganti dengan lebar penampang waduk. Hubungan antara lebar waduk dan jarak pada permukaan persediaan tampungan air dapat dilihat pada gambar (2.8). Dari grafik hubungan kedua parameter

tersebut didapat harga $dP/dx = 0.8$. Harga tersebut dipakai untuk memilih kurva pada Gambar (2.7). Sedangkan perhitungan volume sedimen di bawah permukaan persediaan tampungan. Bila volume sedimen dengan formula L/L_{FSL} lebih dari 1.0 maka hasil distribusi sedimen diatas permukaan persediaan tampungan.

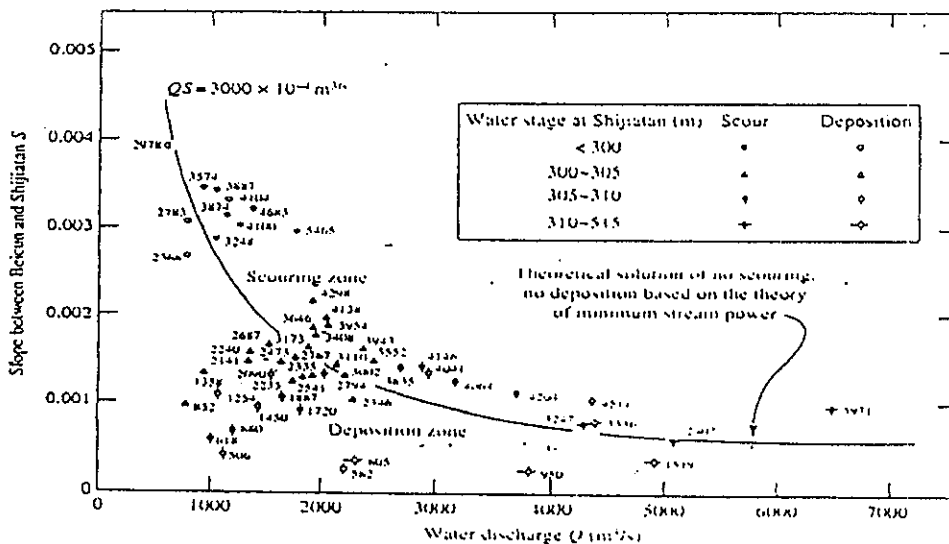
Tabel 2.5 Perhitungan volume sedimentasi di waduk Mentz.

<i>Relative Distace L/L_{FSL}</i>	<i>Actual Distace (m)</i>	<i>Dimensionless cumulative Sediment volume $\sum (V/V_{FSL})$</i>	<i>Estimated cumulative Sediment volume ($10^6 m^3$)</i>	<i>Estimated sediment volume between sections ($10^6 m^3$)</i>
0	0	0	0	0
0.1	1200	0.08	9.92	9.92
0.2	2400	0.20	24.81	14.89
0.3	3600	0.36	44.65	19.84
0.4	4800	0.50	62.02	17.37
0.5	6000	0.60	74.42	12.40

Sumber : Yang, 1996

Waduk Sanmenxia yang terletak pada sungai Kuning (Yellow River) di China telah mengalami beberapa masalah sedimentasi (agradasi). Waduk Sanmenxia tersebut melewati tiga fase penyusunan ulang untuk mengubah operasi waduk sejak waduk tersebut penuh oleh sedimen. Perubahan tersebut termasuk dengan membuka kembali saluran pengelak pada permukaan bawah dan pembuatan saluran pembilas untuk menggelontorkan sedimen. Konsep mengenai pengoperasian juga diubah untuk membiarkan pelepasan air dengan konsentrasi sedimen yang tinggi selama banjir dan menampung air dengan konsentrasi sedimen yang rendah setelah banjir terjadi. Setelah perubahan tersebut, sedimen yang masuk ke waduk dan yang keluar dari waduk sekarang dalam kondisi seimbang dinamis. Diperlukan proses yang cukup lama dalam menentukan

rekonstruksi optimal dan perubahan pola mengenai pengoperasian waduk, komisi konservasi sungai kuning mengumpulkan data yang tererosi dan yang mengendap di waduk. Data tersebut diplotkan pada Gambar (2.10), gambar tersebut menunjukkan bahwa erosi atau pengerusan terjadi ketika $QS > 0.3$ m/detik sedangkan pengendapan terjadi ketika $QS < 0.3$ m / detik . Untuk keadaan yang setimbang dinamis dapat dipertahankan pada $QS = 0.3$ m / detik (konstan). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa teori kekuatan arus minimum seperti yang tercantum dalam persamaan (2.08) dapat diterapkan sepenuhnya untuk desain dan operasi waduk guna menjaga keadaan yang seimbang dinamis antara sedimen yang masuk ke waduk dengan sedimen yang keluar dari waduk



Gambar 2.11 Penentuan proses gerusan dan endapan pada waduk Sanmenxia pada teori kekuatan arus minimum (Annandale, 1987, dalam Yang, 1996)

2.2.3 Metode Hidrographic Survey

Hidrographic survey merupakan metode pengamatan yang meliputi pengukuran dan pemetaan jumlah akumulasi endapan sedimen di waduk. Metode

tersebut menyusun sebuah peta *batimetri* dasar waduk dan dibandingkan dengan peta topografi sebelum dibangun waduk. Setelah itu perbedaan volume endapan sedimen dapat ditentukan. Ada dua metode dalam memproses data untuk survey jenis ini, yaitu metode kontur dan metode melintang dan jarak.

Perhitungan yang umum dipakai di Indonesia menggunakan metode profil melintang dan jarak. Posisi potongan melintang digunakan secara berulang-ulang pada pengamatan sebuah waduk. Prosedur baku pada pengamatan ini termasuk penentuan elevasi dasar waduk sepanjang potongan melintang yang dipilih. Pengukuran dilakukan dengan sebuah peralatan *Echo sounding* yang diletakan di atas perahu dikompilasikan dengan pengamatan atau pengukuran tanah. Pengukuran bawah air dilakukan dengan mengukur kedalaman air di bawah perahu yang berada di atas permukaan waduk. Pengukuran tanah ditujukan untuk menentukan elevasi dari permukaan tanah dengan metode *terrestrial*. Data dari kedua metode tersebut digabungkan untuk menyusun penampang potongan melintang. Volume antar batas diperkirakan dengan menggunakan metode luas akhir rata-rata. Dengan menjumlahkan semua volume diantara dua batas tersebut akan menghasilkan kapasitas total yang sebenarnya dari waduk. Volume akumulasi endapan sedimen didalam waduk kemudian diperoleh dari perbedaan antara kapasitas sebelumnya dengan kapasitas yang dihitung pada pengamatan ulang yang terakhir (Suripin, 1998).

Sementara ini metode hidrograpic survey diyakini lebih akurat dibandingkan metode lain. Dengan metode ini waduk diukur volume genangannya baik dengan pantulan suara (*echosounding*) maupun dengan satelit. Daerah genangan waduk

dipotong menjadi beberapa penampang dalam jumlah sesuai dengan kondisi lapangan yang dianggap dapat mewakili untuk perhitungan volume. Pada setiap penampang dilakukan pengukuran kedalaman terhadap suatu titik ikat. Dari hasil pengukuran dibuat peta kontur dengan interval kontur 2.50 meter dan skala peta 1:10000. Perhitungan volume dengan menggunakan metode luas kontur peta genangan. Dengan metode ini diharapkan dapat diperoleh hasil volume waduk yang benar baik pada kondisi sebelum maupun setelah mengalami sedimentasi. Hasil perhitungan luas kontur yang diperoleh merupakan hasil luas pada elevasi tertentu di areal genangan waduk. Volume genangan diantara dua buah garis kontur dapat dihitung dengan rumus (Chow, 1964) :

$$V_1 = \frac{1}{3} (H_{i+1} - H_i) (A_i + A_{i+1} + \sqrt{A_i A_{i+1}})$$

$$V = \sum V_1 \quad (2.11)$$

Dimana V_1 = Volume tampungan antara dua garis kontur (m^3)

V = Volume tampung waduk (m^3)

H_i = Elevasi garis kontur pertama (m)

H_{i+1} = Elevasi garis kontur kedua (m)

A_i = Luas bidang kontur pertama (m^2)

A_{i+1} = Luas bidang kontur ke dua (m^2)

Volume genangan seluruhnya ($\sum V_1$) dihitung dengan menjumlahkan seluruh volume di antara dua garis kontur (V_1). Perhitungan volume ini dilakukan sebelum dan setelah bendungan mengalami sedimentasi dalam selang

waktu perhitungan sedimen inflow. Volume sedimen yang mengendapkan didalam waduk dalam jangka waktu ($T_2 - T_1$) adalah selisih volume genangan sebelum dan setelah waktu T tersebut

$$V_{T_2-T_1} = V_{T_1} - V_{T_2} \quad (2.12)$$

Dimana :

$V_{T_2-T_1}$ = Volume sedimen dalam selang waktu $T_2 - T_1$ (m^3)

V_{T_1} = Volume genangan sebelum sedimentasi (m^3)

V_{T_2} = Volume genangan setelah sedimentasi (m^3)

Hasil perolehan pengukuran dengan metode hydrographic survey berupa volume sedimen. Untuk merubah volume menjadi berat perlu dihitung kepadatan endapan sedimen dari waktu ke waktu. Hasil pengolahan data dengan metode aktual atau hidrographic survey yaitu:

1. Pengukuran kontur dasar waduk.
2. Volume endapan sedimen.
3. Kapasitas tampung waduk.
4. Pengukuran kedalaman waduk.

2.3 Perubahan Akumulasi sedimen terhadap T waktu

Pengendapan dan penyebaran sedimen terjadi ketika aliran dari sungai membawa kandungan sedimen dan masuk ke waduk. Proses ini terjadi pada saat aliran air memasuki waduk mengalami pengurangan kecepatan aliran,

peningkatan kedalaman air dan pengurangan turbulensi akibat perubahan perluasan permukaan air sungai. Sedimen yang terbawa sebagian mengendap dan bersama air keluar melalui waduk. Sedimen mengendap di seluruh permukaan dasar waduk, kemudian menaikkan elevasi dasar waduk (agradasi). Variasi pola pengendapan sedimen didalam waduk di pengaruhi oleh ukuran butiran, kecepatan aliran air, fluktuasi ketinggian permukaan air waduk, berat jenis sedimen, penampang geometri waduk.

Proses pengoperasian waduk menerangkan bahwa pada saat tercapai muka air tinggi (*maximum water level*) sedimen terakumulasi pada area kapasitas efektif atau daerah hulu. Namun saat terjadi penurunan permukaan air (air keluar dari *bottom outlet* dan pintu intake) menimbulkan adanya arus yang masuk ke waduk sehingga terjadi pergerakan akumulasi sedimen dari hulu waduk ke bagian tubuh waduk. Akumulasi sedimen yang mengalami siklus secara berkelanjutan menjadikan peningkatan akumulasi sedimen pada area kapasitas mati.

Menurut Lanshenkov (1978), Volume endapan sedimen semakin meningkat mengikuti pertambahan T waktu. Persamaan yang menerangkan hal tersebut diatas:

$$V_{x,t} = V_{x,\infty} (1 - e^{-\frac{t}{E_{x,t}}}) \quad (2.13)$$

Dimana:

$V_{x,t}$ = Volume endapan sedimen pada jarak x dan t waktu

$V_{x,\infty}$ = Perhitungan Volume endapan sedimen pada jarak x

$E_{x,t}$ = Indek sedimentasi, dalam dimensi waktu. Dipengaruhi geometri saluran, hidrologi aliran dan gradasi sedimen

Aturan pemangkatan pada persamaan di atas menunjukkan semakin meningkatnya kemajuan pengendapan menurut T waktu. Volume akhir dari endapan merupakan nilai yang dicapai setelah periode operasi waduk. Volume tersebut dapat diperhitungkan dengan mengurangi volume sebelumnya dari kapasitas waduk mula-mula. Menurut Lanshenkov bahwa indeks E dapat ditentukan dari parameter dengan harga yang telah ditentukan.

Volume sedimen waduk diperhitungkan dengan membandingkan volume waduk awal pengukuran dan volume waduk pada saat pengukuran. Perhitungan volume ini dilakukan dengan menghitung volume waduk antara garis kontur tertentu pada tiap seksi pengukuran. Volume sedimen yang mengendap tiap tahun dihitung sebagai berikut:

$$V_{ST} = \frac{V_{WT1} - V_{WT2}}{IT} \quad (2.14)$$

Dimana :

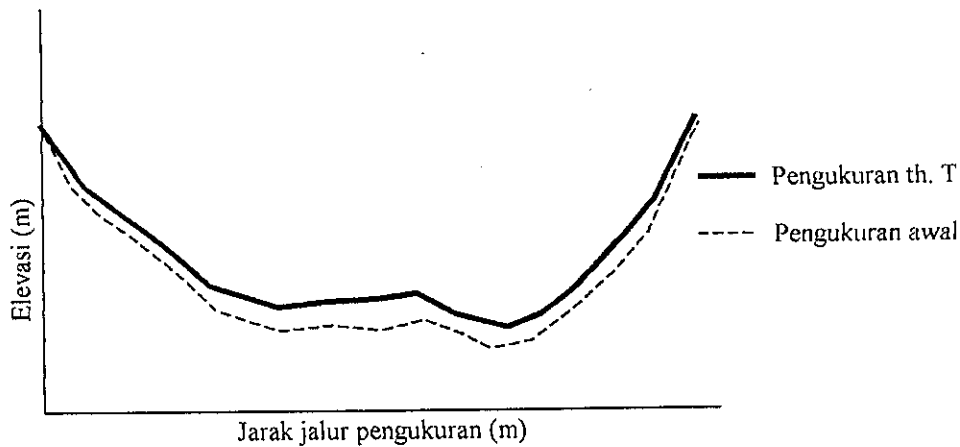
V_{ST} = Volume sedimen yang mengendap tiap tahun.

V_{WT1} = Volume waduk pengukuran ke-1 (m^3)

V_{WT2} = Volume waduk pengukuran ke-2 (m^3)

IT = Interval waktu pengukuran

Untuk memudahkan dalam perhitungan maka dilakukan dengan menghitung pengurangan luas pada masing-masing penampang yang diukur dengan cara membandingkan hasil pengukuran luas profil pada waktu pengukuran yang berbeda. Hasil pengukuran atau pemeruman dibuat dalam bentuk profil penampang melintang pada setiap titik pengukuran seperti Gambar (2.12).



Gambar 2.11. Perubahan pengukuran profil penampang melintang

Adanya sirkulasi air yang ada di dalam waduk yaitu pada saat air sungai masuk ke dalam waduk terutama banjir memberikan pengaruh terhadap karakteristik pengendapan sedimen. Oleh adanya gaya gravitasi akan menyebabkan air sungai mengalir di bawah air waduk yaitu sepanjang dasar waduk. Apabila dilihat dari permukaan air waduk kemungkinan akan terlihat lebih jernih bila dibandingkan dengan air pada inlet waduk, tetapi meskipun begitu pada dasar waduk terjadi sirkulasi air dan sedimen.

2.4 Identifikasi waduk obyek penelitian

Rencana lokasi waduk yang akan dijadikan obyek penelitian untuk memprediksi pola distribusi endapan sedimen dengan metode pengukuran aktual, metode penambahan dan pengurangan luas empiris sejumlah 6 waduk di Propinsi

Jawa barat dan Jawa tengah. Dari ke-6 waduk tersebut diharapkan mempunyai data pengukuran endapan sedimen secara aktual.

Tabel . 3.1. Nama dan lokasi waduk obyek penelitian

NO	Waduk	Luas DAS (km ²)	Kabupaten	Propinsi
1	Cirata	4119	Purwakarta	Jawa Barat
2	Wadas Lintang	196	Kebumen	Jawa Tengah
3	Mrica	1022	Banjarnegara	Jawa Tengah
4	Gajah Mungkur	1350	Wonogiri	Jawa Tengah
5	Sempor	42	Gombong	Jawa Tengah
6	Kedung Ombo	890	Boyolali	Jawa Tengah

2.5 Evaluasi metode prediksi distribusi sedimen

Kriteria evaluasi metode prediksi distribusi sedimen akan dilakukan dengan menggunakan 2 metode , yaitu

- Metode visual : *double plot method* antara hasil analisis aktual dan metode empiris yang ada yaitu metode pengurangan dan penambahan luas / kekuatan arus minimum serta metode *hidrographic survey*. Dari hasil plotting jika titik terpecah jauh dari *perfect line* (garis 1:1), maka metode empiris dianggap menyimpang (tidak cocok).
- Indek kesalahan (error index) dengan persamaan:

$$IK = \frac{[Aktual - Prediksi]}{Aktual} \times 100\%$$

Bilamana hasil prosentase harga IK

- IK < 25 % → dapat diterima
- IK < 25 – 50 % → perlu perbaikan
- IK > 50 % → tidak cocok

Parameter yang perlu dievaluasi :

1. Distribusi endapan sedimen terhadap kedalaman waduk.
2. Prosentase endapan sedimen di kapasitas mati.
3. Prosentase endapan sedimen di kapasitas efektif.

BAB III

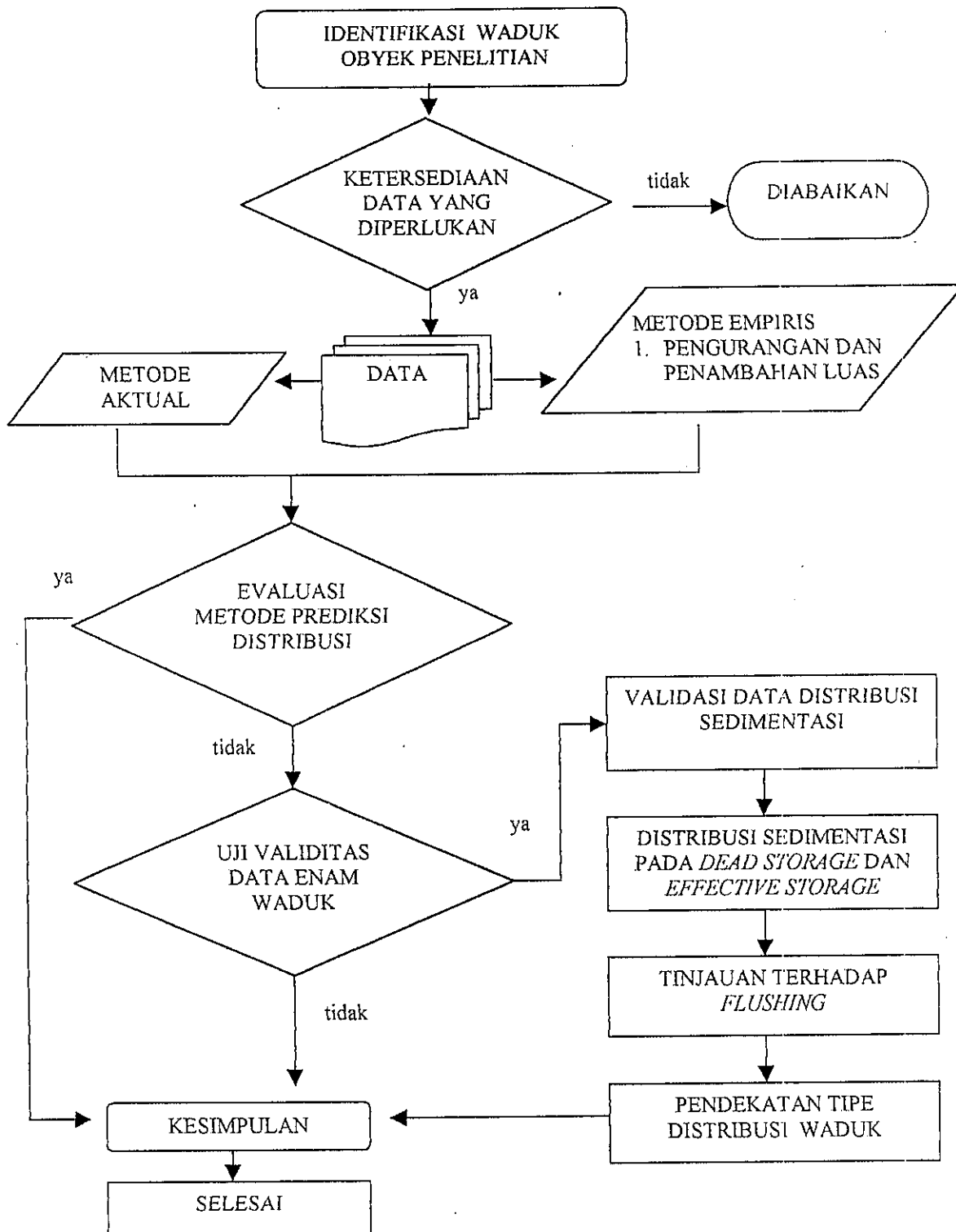
METODOLOGI DAN PROSEDUR PENELITIAN

Prinsip dasar langkah-langkah pelaksanaan penelitian meliputi identifikasi waduk obyek penelitian, ketersediaan data yang diperlukan, proses perhitungan dengan metode aktual, proses perhitungan dengan metode empiris, evaluasi metode prediksi yang ada, analisis hasil evaluasi metode tersebut.

Penerapan metode dilakukan terhadap enam waduk sebagai obyek penelitian untuk mencari prediksi pola distribusi endapan sedimen. Hasil pengolahan data-data dievaluasi perbandingan hasil metode dengan asumsi indek kesalahan yang telah ditentukan. Deskripsi ilustrasi prosedur penelitian selanjutnya dapat disajikan pada bagan alir penelitian pada Gambar 3.1

3.1. Deskripsi Data

Data yang diperlukan pada penelitian ini terdiri dari data yang sudah ada (data sekunder). Pengambilan data sekunder dilakukan terhadap data diambil dari data survei yang telah dilaksanakan oleh instansi dinas teknis terkait maupun swasta. Disamping itu sebagian data diolah dan dievaluasi berdasarkan data yang telah dipakai di literatur yang membahas materi metode distribusi sedimen, beberapa data yang diperlukan misalnya peta kontur waduk, data teknis waduk, data pengukuran batimetri, data sedimen dan peta operasi waduk.



Gambar 3.1. Flow Chart Pelaksanaan penelitian

3.2. Pengukuran Sedimentasi Waduk

Pada umumnya pelaksanaan pengukuran terhadap endapan sedimen di waduk dilakukan pada lokasi yang tidak tergenang air dan daerah genangan waduk. Hal tersebut dilakukan mengingat elevasi air waduk tidak berada pada elevasi muka air waduk tertinggi (*maximum water level*) sehingga daerah yang tidak tergenangi dilakukan pengukuran secara *terrestris*, sedang daerah yang tergenang air dilakukan pengukuran secara *echosounding*.

3.2.1 Pengukuran Volume Tampang kapasitas Waduk

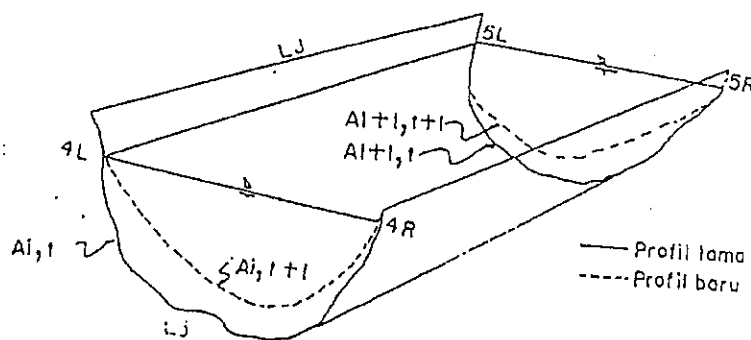
Ada dua metode perhitungan volume sedimen yaitu metode lintasan (grid) dan metode kontur/luas genangan. Metode lintasan sering digunakan mengingat keuntungan waktu yang singkat dan biaya relatif kecil, sedangkan metode kontur waktu perhitungannya relatif lama. Metode kontur dilakukan dengan cara menghitung perbedaan luas tampang melintang daerah genangan waduk, antara hasil pengukuran sebelumnya dengan hasil pengukuran saat terakhir. Dalam bentuk persamaan matematis volume endapan sedimen sebagai berikut:

$$V_{SED-J,t+1} = \frac{L_j}{2} \times [(A_{i,t} - A_{i,t+1}) + (A_{i+1,t} - A_{i+1,t+1})] \quad (3.01)$$

Dimana :

$V_{SED-J,t+1}$: Volume sedimen pada bagian tampang memanjang j pada waktu t
+1 (m^3)

- L_j : Jarak antara tampang lintang A_i dan A_{i+1} (m)
 $A_{i,t}$: Luas tampang lintang A_i pada waktu t (m^2)
 $A_{i,t+1}$: Luas tampang lintang A_i pada waktu $t + 1$ (m^2).
 $A_{i+1,t}$: Luas tampang lintang A_{i+1} pada waktu t (m^2).
 $A_{i+1,t+1}$: Luas tampang lintang A_{i+1} pada waktu $t + 1$ (m^2).



Gambar 3.2. Bentuk matematis volume endapan sedimen

Dari hasil penghitungan volume endapan sedimen pada tiap bagian tampak memanjang, dengan menggunakan pendekatan rumus di atas, maka akan dapat dihitung besarnya total volume sedimen yang mengendap di perairan waduk dengan cara sebagai berikut:

$$TV_{sed} = \sum_{j=1}^{j=n} V_{sed-j, t+1} \quad (3.02)$$

Dimana :

TV_{sed} = Total volume sedimen yang mengendap di waduk (m^3)

J = Nomor tampang memanjang bagian profil waduk

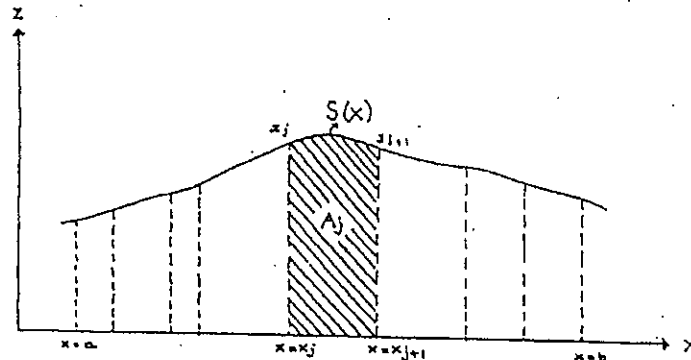
$V_{\text{sed-}j, t+1}$ = Volume sedimen pada bagian tampang memanjang j pada waktu $t + 1$
(m^3)

Metode perhitungan di atas untuk waduk tampaknya kurang akurat karena profil-profil sounding tidak sejajar, sehingga untuk pengukuran sedimentasi di waduk perlu dilakukan metode alternatif yang lain. Hal ini dikarenakan beberapa alasan antara lain :

- a). Garis pantai diantara 2 profil yang tidak teratur.
- b). Jarak antara profil terlalu besar, sehingga kurang realitis melinierkan kedua profil tersebut sebagai profil rata-rata diantara dua penampang.
- c). Karena banyak profil yang pemerumannya tidak sejajar, maka kebenaran menghitung jarak antara 2 profil tersebut masih dipertanyakan.

Metode lain perhitungan volume waduk yang diterapkan adalah metode lintasan (grid). Metode ini menerapkan fungsi polinomial pangkat (3) tiga untuk penentuan formulasinya. Mengingat penyajian profil permukaan dijabarkan secara numerik berdasarkan hasil pencatatan lapangan yang bervariasi dalam interval jarak, maka pada metode ini data pada grid diambil dari yang mewakili bentuk profil sesungguhnya.

Persamaan matematis dalam penentuan luas pada suatu interval X_j dan X_{j+1} dari kurva ab seperti pada gambar berikut:



Gambar 3.3 Luas segmen fungsi A_j dan kurva ab

Dengan menggunakan formula fungsi polinomial $S_j(x)$ pada interval $[x_j, x_{j+1}]$ luas A_j dihitung dari integrasi :

$$A_j = \int_{x_j}^{x_{j+1}} S_j(x) dx \quad (3.03)$$

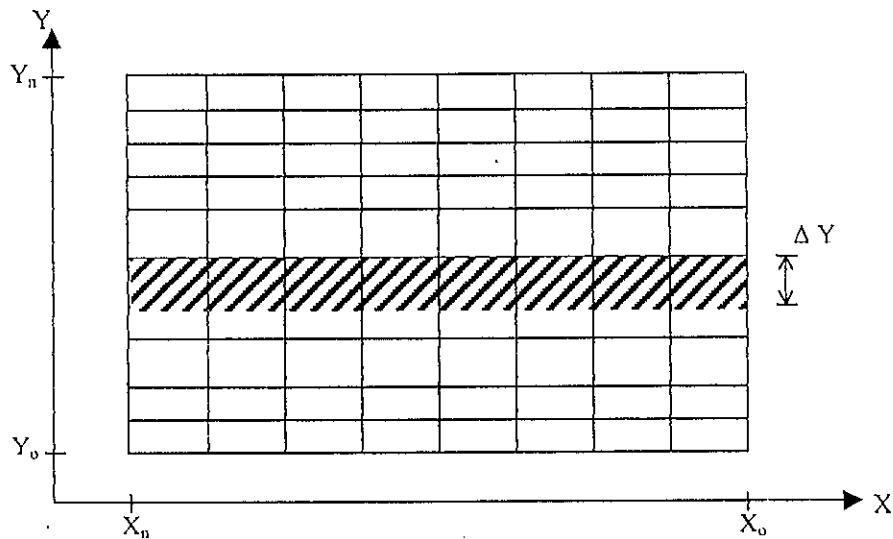
dengan penyelesaian integral dari $S_j(x)$ maka akan diperoleh :

$$A_j = (a_j - b_j x_j + c_j x_j^2 - d_j x_j^3) (x_{j+1} - x_j) + \left[\frac{b_j}{2} - c_j x_j + \frac{3d_j}{2} \right] (x_{j+1}^2 - x_j^2) \\ + \left(\frac{c_j}{3} - d_j x_j \right) (x_{j+1}^3 - x_j^3) + \frac{d_j}{4} (x_{j+1}^4 - x_j^4) \quad (3.04)$$

Dengan menggunakan persamaan diatas, dapat dihitung luas antara batasan $a < x < b$, atau interval $[X_0, X_n]$ dengan formula :

$$A_{total} = \int_{x_j}^{x_{j+1}} S_j(x) dx = \sum_{j=0}^{n-1} A_j \quad (3.05)$$

Bilamana permukaan dalam grid persegi sebagai berikut:



Gambar 3.4 Pembagian permukaan dalam grid [$m \times n$]

Untuk menghitung volume, ditinjau suatu interval $[(x_1, y_0) (x_1, y_n)]$. Dengan menggunakan rumusan luas, dihitung luas dalam interval $[(x_0, y_0) (x_n, y_n)]$ dalam notasi A_{yk} sebagai :

$$A_{yk} = \int_{X_0}^{X_n} [S_{i,k}]^{m-1} (x) dx \quad (3.06)$$

Menggunakan prosedur serupa, luas kurva dalam interval $[(x_0, y_{k+1}), (x_n, y_{k+1})]$

$$A_{yk+1} = \int_{X_0}^{X_n} [S_{i,k+1}]^{m-1} (x) dx \quad (3.07)$$

Jika ditetapkan jarak dua garis paralel $y = y_k$ dan $y = y_{k+1}$ sangat kecil, yaitu $\Delta y = (y_{k+1}) - (y_k)$, maka metode luas ujung dapat diberlakukan

$$V = \frac{1}{2} (A_{y_k} + A_{y_{k+1}}) (\Delta y) \quad (3.08)$$

3.2.2. Pengukuran batimetri dasar waduk

Salah satu faktor yang mempengaruhi perubahan kapasitas waduk adalah besarnya sedimen yang masuk dan mengendap di dasar waduk. Sedimen tersebut masuk ke dalam waduk, sebagian besar masuk melalui alur sungai dan hanya sebagian kecil sedimen keluar dari pintu intake waduk. Pola penyebaran sedimen di dasar waduk sangat tergantung dari topografi waduk, ukuran butiran sedimen, dan pola operasi waduk. Untuk mengetahui perubahan kapasitas waduk dan volume sedimen yang mengendap di dasar waduk, diperlukan pengukuran *batimetri* dasar waduk dan membandingkan dengan hasil pengukuran sebelumnya atau kapasitas awal.

Tujuan utama dari pekerjaan survei *batimetri* adalah untuk memperoleh data kontur ketinggian waduk, sehingga perubahan topografi, penampang melintang, maupun penampang memanjang waduk dapat diperkirakan. Berdasarkan data tersebut, maka gambaran pola penyebaran sedimen yang terjadi dapat diperkirakan. Begitu pula perkiraan volume sedimen yang mengendap dalam suatu kurun waktu tertentu, yaitu dengan cara membandingkan hasil saat waktu pengukuran dengan hasil pengukuran sebelumnya (*design*). Pelaksanaan pengukuran *cross section* dasar waduk

didasarkan pada titik ikat (*beacon point*) yang telah ada (dari pengukuran terdahulu). Kedudukan titik ikat tersebut berdasarkan posisi koordinat dan elevasi (X,Y,Z). Namun ternyata kondisi titik ikat yang ada sudah banyak yang rusak atau berubah posisi sehingga sebagian besar titik ikat yang masih ada, posisinya harus diukur kembali. Uraian pekerjaan pengukuran kontur dasar waduk terdiri dari pelaksanaan penentuan posisi dan jarak titik pengukuran dan pengukuran kedalaman waduk.

3.2.3. Penentuan posisi dan jarak titik pengukuran (*Fixed Point*)

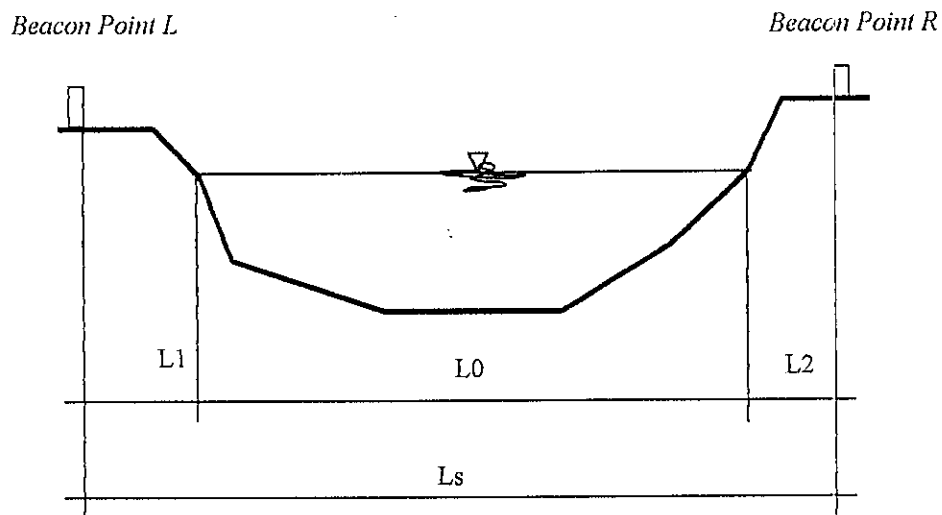
Sebelum pelaksanaan pengukuran *Echo sounding*, terlebih dahulu dilakukan pengecekan terhadap jarak antara titik tetap (*beacon point*) ke titik tetap lainnya dari masing-masing pasangan *cross section*, dengan menggunakan alat ukur jarak theodolit. Hal tersebut dilakukan untuk menghindari kesalahan pasangan titik ikat tersebut. Pada waktu pelaksanaan pengukuran echosounding, penentuan kedalaman setiap titik diusahakan pada posisi jalur lurus pada setiap *cross section*, yang nantinya akan digunakan sebagai jalur perahu pada setiap *cross section*, yang nantinya akan digunakan sebagai jalur perahu pada waktu pengukuran. Pangarahan jalur perahu dilakukan dengan bantuan alat Theodolit (T_1) dan dipandu dengan alat komunikasi *Walky Talky* dari tepi jalur yang diukur.

Penentuan jarak setiap titik pada jalur *cross section* ditentukan dengan single sextan, yaitu dengan mengukur besarnya sudut dari posisi perahu (posisi *tranducer*) ke jalur pengukuran dan garis acuan (referensi) dengan menggunakan satu *sextan*. Perhitungan jarak tiap *fixed point* dihitung dengan menggunakan rumus sinus. Pada setiap saat penentuan kedalaman (*echosounding*), bersamaan dilaksanakan pembacaan besarnya sudut dengan *sextan*, disamping itu perlu dicatat tanggal dan waktu pada saat sebelum dan sesudah pengukuran satu *section*. Hal ini dimaksudkan untuk mengecek muka air pada saat pengukuran, mengingat muka air waduk selalu turun (ada pengambilan debit air) selama kurun waktu pengukuran.

3.2.4. Pengukuran kedalaman waduk

Pengukuran kedalaman waduk sepanjang *cross section* (pada jalur pengukuran) dilakukan dengan alat *echosounder* yang diletakan pada perahu. Melalui *tranducer* (bagian alat *echosounder*) yang dipasang di sisi perahu dan dimasukkan ke dalam air (kurang lebih 40 cm) dipancarkan gelombang elektromagnetik. Gelombang tersebut akan sampai di dasar waduk yang kemudian dipantulkan dan ditangkap kembali oleh *tranducer*. Dengan demikian dapat dihitung kedalaman waduk yang merupakan fungsi dari kecepatan (v) dan waktu (t).

Pengukuran *cross section* pada umumnya dilakukan dengan alat *echosounder*, akan tetapi pada daerah yang berada diatas permukaan air pengukuran dilakukan dengan alat *theodolit* dan bak ukur yang menentukan jarak dan beda tinggi. Hal tersebut dapat diterangkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Pengukuran *cross section* diatas dan di bawah permukaan waduk.

Pada gambar tersebut, L_s adalah jarak keseluruhan dari *cross section*, L_1 dan L_2 adalah jarak pada daerah diatas muka air (daratan), yang diukur dengan menggunakan theodolit, dan L_0 adalah jarak pada daerah di bawah permukaan air yang diukur dengan menggunakan *Echosounder*.

Data hasil pengukuran yang diperoleh terlebih dahulu harus diperiksa di lapangan untuk mengetahui apakah pengambilan titik detail telah cukup mencukupi atau belum, yaitu dengan melihat perubahan detail yang ada pada kertas (pias) *echosounder*. Apabila pengambilan titik detail dianggap kurang memenuhi maka perlu dilakukan pengukuran ulang.

3.2.5. Tata Cara Pelaksanaan Pemetaan

A). Pekerjaan poligon dilaksanakan untuk mengetahui posisi horisontal setiap patok pengukuran yang harus mengikuti ketentuan-ketentuan sebagai berikut:

1. Pengukuran dilaksanakan pada titik bantu / patok pengukuran batas areal genangan yang ada sebelumnya dengan interval 100 m.
2. Titik awal dan akhir poligon harus dikaitkan pada titik kontrol Benchmark yang ditentukan kemudian.
3. Kesalahan penutup sudut poligon utama $20\sqrt{n}$, n merupakan jumlah titik poligon pengukuran.
4. Pengukuran jarak dilakukan 3-5 kali dan diambil rata-rata.
5. Ketelitian jarak linier 1/5000.
6. Alat-alat yang digunakan :
 - Pengukuran sudut
 - Theodolit T-2 atau alat sejenisnya yang mempunyai ketelitian setingkat.
 - Pengukuran jarak.
 - Electronic distance meter atau EDM wild DI 4L atau alat sejenis yang mempunyai ketelitian setingkat.
 - Buku ukur yang digunakan adalah standart yang dipakai oleh pemberi pekerjaan.

B). Pengukuran situasi dilaksanakan untuk mengetahui kondisi bebas genangan dan ketinggian dari patok pengukuran, yang harus mengikuti ketentuan sebagai berikut:

1. Pengukuran pengikatan dilakukan untuk mengikat posisi planimetris pada poligon terdahulu.
2. Pengukuran ketinggian dengan metoda tachymetris.
3. Pengukuran batas areal genangan dari setiap titik bantu dilakukan dengan metode tachymetris, metode kipas.
4. Unsur yang diambil antara lain garis batas darat dan air, kondisi topografi.
5. Alat yang digunakan : *Theodolit Wild T-O* atau alat sejenis yang mempunyai ketelitian setingkat.
6. Buku ukur yang digunakan adalah standart dari pemberi pekerjaan.
7. Pengolahan data awal poligon dan situasi langsung dihitung sehingga bila terjadi kesalahan pengukuran dapat dilakukan pengukuran ulang.

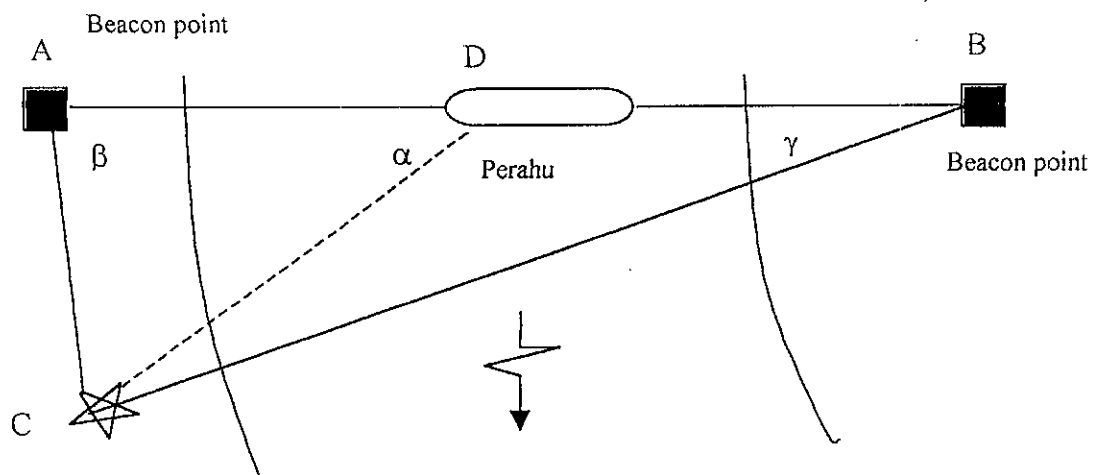
C). Pemasangan patok bantu dilaksanakan pada waktu pengukuran poligon dan situasi berupa patok kayu ukuran 5/7 cm , dicat dan diberi paku seng diatasnya.

3.2.6. Evaluasi hasil pengukuran Echosounding

Dari hasil pengukuran cross section dan pengukuran kedalaman waduk dapat dihasilkan data kontur dasar, penampang melintang maupun penampang memanjang waduk. Berdasarkan data tersebut maka gambaran pola penyebaran sedimen yang terjadi dapat diketahui. Begitu pula perkiraan volume sedimen yang mengendap

dalam suatu kurun waktu tertentu, yaitu dengan cara membandingkan hasil pengukuran sekarang dengan hasil pengukuran sebelumnya (*design*). Setelah data pengukuran diperoleh selanjutnya dilakukan perhitungan, pengolahan data dan penggambaran. Perhitungan dan pengolahan data meliputi perhitungan titik tetap, perhitungan luas cross section hasil pengukuran dan perhitungan volume kapasitas waduk. Untuk pelaksanaan penggambaran meliputi gambar peta situasi waduk dan gambar penampang melintang serta penampang memanjang waduk.

Perhitungan titik tetap (*fixed point*) yang ditetapkan pada jalur cross section dihitung dengan rumus sinus sesuai dengan Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Metode perhitungan letak *fixed point*.

$$\text{Garis bantu AC} = \frac{AB \times \sin \gamma}{\sin (\alpha + \gamma)} \text{ dan jarak AD} = \frac{AC \times \sin (\alpha + \beta)}{\sin \alpha}$$

(3.09)

Dimana :

AB = Jarak beacon point ke *beacon point* selanjutnya.

AC = Jarak beacon point ke titik pertolongan (obyek).

AD = Jarak beacon point ke *fixed point*.

Setelah melalui perhitungan dan pengolahan data, selanjutnya dapat diperoleh gambar peta situasi, gambar penampang melintang dan memanjang waduk. Gambar yang telah diperoleh dapat dilakukan perhitungan luas pada berbagai elevasi pada penampang melintang dengan interval yang diatur sedemikian rupa sehingga setiap perhitungan memuat elevasi pada kondisi HWL dan LWL pada masing masing waduk. Luas pada masing-masing *cross section* dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini

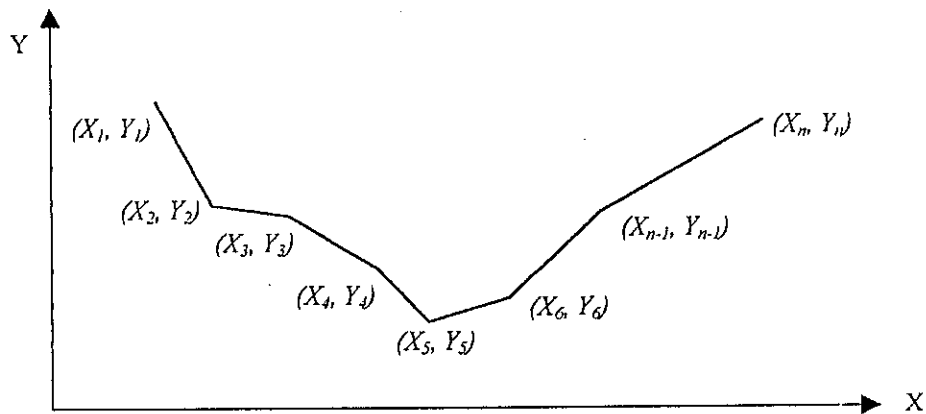
$$2A = [(X_1Y_2) + (X_2Y_3) + \dots + (X_{n-1}Y_n) + (X_nY_1)] - [(Y_1X_2) + (Y_2X_3) + \dots + (Y_{n-1}X_n) + (Y_nX_1)] \quad (3.10)$$

Dimana :

X_n = Absis X terakhir

Y_n = Ordinat Y terakhir

A = Luas penampang melintang



Gambar 3.7. Kordinat dari hasil pengukuran echo-sounding.

Volume total waduk pada elevasi tertentu dihitung berdasarkan perhitungan volume antara dua penampang melintang pada elevasi yang dimaksud. Rumus yang digunakan untuk menghitung volume adalah sebagai berikut:

$$V = \frac{1}{3} (H_1 - H_2) (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 A_2}) \quad (3.11)$$

Dimana :

$(H_1 - H_2)$ = jarak elevasi antara *cross section* 1 dan *cross section* 2

A_1 = luas pada *cross section* 1 pada elevasi tertentu

A_2 = luas pada *cross section* ke-2 pada elevasi yang sama dengan *cross section* ke-1

3.3. Metode empiris pengurangan luas

Prediksi distribusi sedimen dengan menggunakan metode empiris didasarkan pada pengamatan dan pengukuran di lapangan yang dibuat dari beberapa waduk di Amerika Serikat. Ruang lingkup metode tersebut hanya dibatasi sampai beberapa hal utama dalam mengevaluasi pendahuluan, perencanaan serta hasil studi kelayakan waduk. Penggunaan metode tersebut didasarkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Menentukan jumlah sedimen yang terdistribusi di waduk, volume sedimen dapat diperkirakan dengan anggapan bahwa pengurangan volume waduk rata-rata pada pengamatan sebelumnya akan berlanjut pada masa yang akan datang. Dalam hal ini pengurangan volume waduk diperkirakan dari prediksi muatan sedimen yang masuk ke waduk, efisiensi pengeluaran sedimen dan berat jenis waduk.
2. Berdasarkan karakteristik lokasi waduk, dipilih kurva empiris yang paling sesuai untuk mendistribusikan sedimen. Model pengukuran endapan sedimen didalam waduk dapat digunakan sebagai dasar pemilihan kurva empiris untuk mendistribusikan sedimen yang terendap pada masa yang akan datang.
3. Menentukan ketinggian akumulasi sedimen di bendungan, yang diukur dari elevasi nol kapasitas baru.
4. Digunakan kurva empiris yang dipilih untuk mendistribusikan sedimen sebagai fungsi dari kedalaman di atas elevasi nol kapasitas baru. Harga tersebut diambil dari kurva luas genangan dan kapasitas guna menghasilkan kurva yang telah disesuaikan.

Selanjutnya dilakukan pengulangan terhadap seluruh prosedur untuk setiap volume sedimen yang akan dianalisa. Ketika jumlah akumulasi sedimen yang mengendap di bawah muka air normal telah ditetapkan, metode empiris pengurangan luas dalam kurun waktu tertentu dapat memprediksi pola penyebaran sedimen. Dari data pengamatan yang sudah ada terdapat hubungan antara bentuk waduk dengan prosentase endapan sedimen pada setiap kedalaman waduk. Baik metode empiris penambahan luas maupun metode empiris pengurangan luas, mempunyai perbedaan dalam pemilihan kurva untuk mendistribusikan dapat dicari pemecahannya dengan langkah-langkah sebagai berikut.

1. Menentukan volume sedimen yang mengendap (dari hasil pengukuran lapangan).
Volume sedimen tersebut akan didistribusikan ke areal tiap elevasi.
2. Dipilih kurva design yang sesuai. Kemudian digambarkan hubungan antara kedalaman mula-mula dengan kapasitas waduk diatas kertas skala logaritma dan dihitung garis kemiringan antara semua titik plotting dalam suatu nilai atau harga m . Harga m diperoleh dari pasangan garis hubungan antara kedalaman dan kapasitas waduk Gambar 2.4. Hasil perhitungan kemiringan (harga m) dapat digunakan dalam mengelompokan bentuk waduk sesuai dengan menggunakan Tabel 2.1. Tipe kurva yang disajikan dalam Gambar 2.4. menunjukkan kecenderungan bahwa tipe waduk yang berlokasi di danau atau daratan, sedimennya mengendap di air yang dangkal sedangkan tipe waduk yang berlokasi di pegunungan, sedimennya mengendap jauh di dalam air. Ketika kemiringan

atau harga m tidak berada pada sebuah garis lurus, maka digunakan bentuk dari tipe hubungan seluruh kemiringan yang dominan atau kemiringan m yang berada di dalam area waduk dimana kebanyakan sedimennya akan mengendap.

3. Hitung elevasi nol kapasitas baru pada bendungan. Dipergunakan kurva luas genangan elevasi mula-mula dan kapasitasnya untuk menghitung harga F sebagai fungsi tanpa dimensi dari beberapa elevasi waduk yang berbeda-beda di setiap

$$\text{kedalaman waduk, dengan rumus : } F = \frac{(S - V_h)}{(H \cdot A_h)} \quad (3.12)$$

Dimana :

S = Total endapan sedimen.

V_h = Kapasitas waduk pada setiap kedalaman h .

H = Kedalaman waduk mula-mula di bawah air normal.

A_h = Luas genangan waduk pada setiap kedalaman waduk.

Perlu diperhatikan bahwa satuan hektare harus diubah terlebih dahulu ke dalam satuan m^2 sebelum dilakukan perhitungan. Juga dilakukan perhitungan harga desimal untuk kedalaman relatif P dengan rumus :

$$P = \frac{h - h_{\min}}{H} \quad (3.13)$$

Dimana :

h_{\min} : Elevasi dasar waduk mula-mula . .

H : Selisih elevasi dasar waduk dan elevasi muka air tertinggi.

4. Hasil formula tersebut (harga P dan harga F) dengan tipe kurva yang dipilih untuk menentukan elevasi nol kapasitas baru pada bendungan. Perpotongan harga F dan kedalam relatif P menghasilkan P_o (kedalaman relatif elevasi nol kapasitas baru).
5. Penentuan elevasi nol kapasitas baru ditentukan oleh formula :

$$H_o = (P_o \cdot H + h_{\min}) \quad (3.14)$$

Elevasi nol kapasitas baru tersebut termasuk dalam deretan yang berurutan seperti yang terlihat pada Tabel 2.6. dan luas genangan waduk dihitung dari elevasi genangan waduk mula-mula. Penentuan elevasi nol kapasitas baru tidak bersifat statis (ketelitian pengambilan harga dalam grafik) sehingga jumlah volume sedimen sama dengan jumlah kumulatif distribusi sedimen di tiap elevasi pada perhitungan metode empiris.

6. Penyebaran sedimen

Volume sedimen yang tertahan dan terdistribusi di dalam di waduk, dapat dirinci berdasarkan tipe kurva yang dipilih. Perhitungan harga untuk luas sedimen relatif a pada setiap kedalaman relatif p dengan menggunakan persamaan :

$$\begin{aligned} \text{Tipe I} & : a = 5.047 p^{1.85} (1-p)^{0.36} \\ \text{Tipe II} & : a = 2.487 p^{0.57} (1-p)^{0.41} \\ \text{Tipe III} & : a = 16.967 p^{1.15} (1-p)^{2.32} \\ \text{Tipe IV} & : a = 1.486 p^{-0.25} (1-p)^{1.34} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Untuk perhitungan luas genangan setiap elevasi dari akibat endapan sedimen dengan cara mengalikan luas terkoreksi dengan luas relatif pada setiap level diatas elevasi nol kapasitas baru. Ketika seluruh sedimen masuk ke setiap bagian

waduk dan semakin bertambah dimulai dari elevasi nol kapasitas baru sampai dasar waduk mula-mula, sehingga dapat diketahui bahwa luas sedimen sama dengan luas waduk mula-mula.

7. Perhitungan volume sedimen untuk setiap penambahan genangan diatas elevasi nol kapasitas baru menggunakan metode luas akhir (*Volume increment*). Dari elevasi nol kapasitas baru sampai dasar waduk, dapat diketahui bahwa volume sedimen sama dengan kapasitas waduk mula-mula, sejak area tersebut penuh dengan penuh dengan sedimen. Volume kumulatif endapan sedimen (*Volume cumulative*) dihitung dengan cara menjumlahkan setiap harga yang ada pada kolom (*volume increment*). Total volume sedimen hasil perhitungan seharusnya tepat dengan prediksi volume sedimen dari langkah pertama dengan selisih 1 %.
8. Perhitungan luas dan kapasitas yang diperbaharui (revisi) dengan mengurangi luas sedimen dan kumulatif sedimen dari luas mula-mula dan harga kapasitas waduknya (original data)

3.4. Tinjauan tipe waduk terhadap kehilangan daya tampung kapasitas

Tipe waduk ditinjau dari kehilangan tampungan akibat volume sedimen sudah dikembangkan di Amerika Serikat dan diformulasikan dalam persamaan variable atau indikator yang sama. Indikator yang sama tersebut baik dari bentuk tipe I sampai dengan tipe IV dicoba untuk diterapkan pada waduk di pulau Jawa. Dengan variable yang sama yaitu terdiri dari prosentase kedalaman dan prosentase volume endapan sedimen, dari masing-masing waduk di Jawa menghasilkan suatu plotting

perkembangan tipe waduk. Plotting-ploting tersebut akan menggambarkan tipe waduk yang sesuai dan mendekati pola tipe waduk I sampai dengan tipe IV.

3.5. Akumulasi pengendapan sedimen pada tingkatan kapasitas

Tingkat kapasitas pada waduk terdiri dari area kapasitas mati (kantong lumpur), kapasitas efektif (kapasitas yang dialokasikan untuk menjalankan fungsi operational waduk), *flood control storage* (kapasitas simpanan untuk menampung debit ekstrim akibat banjir). Perubahan bentuk pola operational waduk, pengendalian erosi daerah aliran sungai merupakan salah satu bahwa pola pengendapan sedimen tidak hanya cenderung di area kapasitas mati (kantong lumpur) tetapi mempunyai kemungkinan untuk menyebar ke area kapasitas efektif.

Kedua area *storage* tersebut dimungkinkan terjadi perkembangan frekuensi prosentase pengendapan yang berbeda tiap tahun. Sedimen yang mengendap di tiap elevasi dihitung secara kumulatif dalam internal masing-masing *storage* dalam tiap tahun pengukuran. Volume kumulatif tiap *area storage* diformulasikan dalam prosentase, dari Prosentase sedimen total yang mengendap.

3.6. Flushing (penggelontoran)

Pelaksanaan penggelontoran (*flushing*) berfungsi untuk memperbesar kapasitas tampung pada area dead storage. Pengendalian sedimen di kapasitas mati (kantong lumpur) bermanfaat untuk mengoptimalkan area kapasitas efektif dan kerja

operasional power intake. Se jauh mana pengaruh terhadap pola penyebaran sedimen di area kapasitas mati dan kapasitas efektif.

Cara pelaksanaan

- Ditentukan waktu ketika akan dibuka dan akan ditutup (interval waktu dalam menit)
- Pengambilan sample lumpur (sedimen) pada proses pembukaan pintu secara hidrolis dan pencatatan waktu pengambilan.
- Pengambilan sample dilakukan berulang kali dan diakhiri bila air mulai jernih.
- Sample diendapkan dalam gelas ukur dalam beberapa hari, prosentase lumpur dapat diperkirakan.
- Estimasi Volume sedimen
- Ploting waktu pengambilan sample (dalam menit).
- Ploting luas area debit air yang dibatasi antara kedua waktu pengambilan sample.
- Dihitung luas areal debit yang masing-masing memuat satu kejadian pengambilan sample.

3.7. Evaluasi penyebaran akumulasi sedimen

Kerangka hasil pengukuran Echosounding diketahui bahwa jumlah endapan sedimen yang masuk ke waduk semakin besar pada masa-masa yang akan datang (dibandingkan dengan kondisi saat pengukuran). Prosentase sedimen yang cenderung tertampung di area dead storage dibandingkan di daerah hulu, diperlukan kebijakan

tentang pola pengoperasian untuk memperpanjang usia operasi waduk sesuai target perencanaan awal (*feasibility*). Tujuan pengukuran lapangan (*geographic survey*) untuk memperoleh informasi data kuantitatif tentang prediksi laju dan penyebaran sedimen. Informasi data kuantitatif tersebut akan membawa implikasi penyusunan pola pengendalian sedimen seperti:

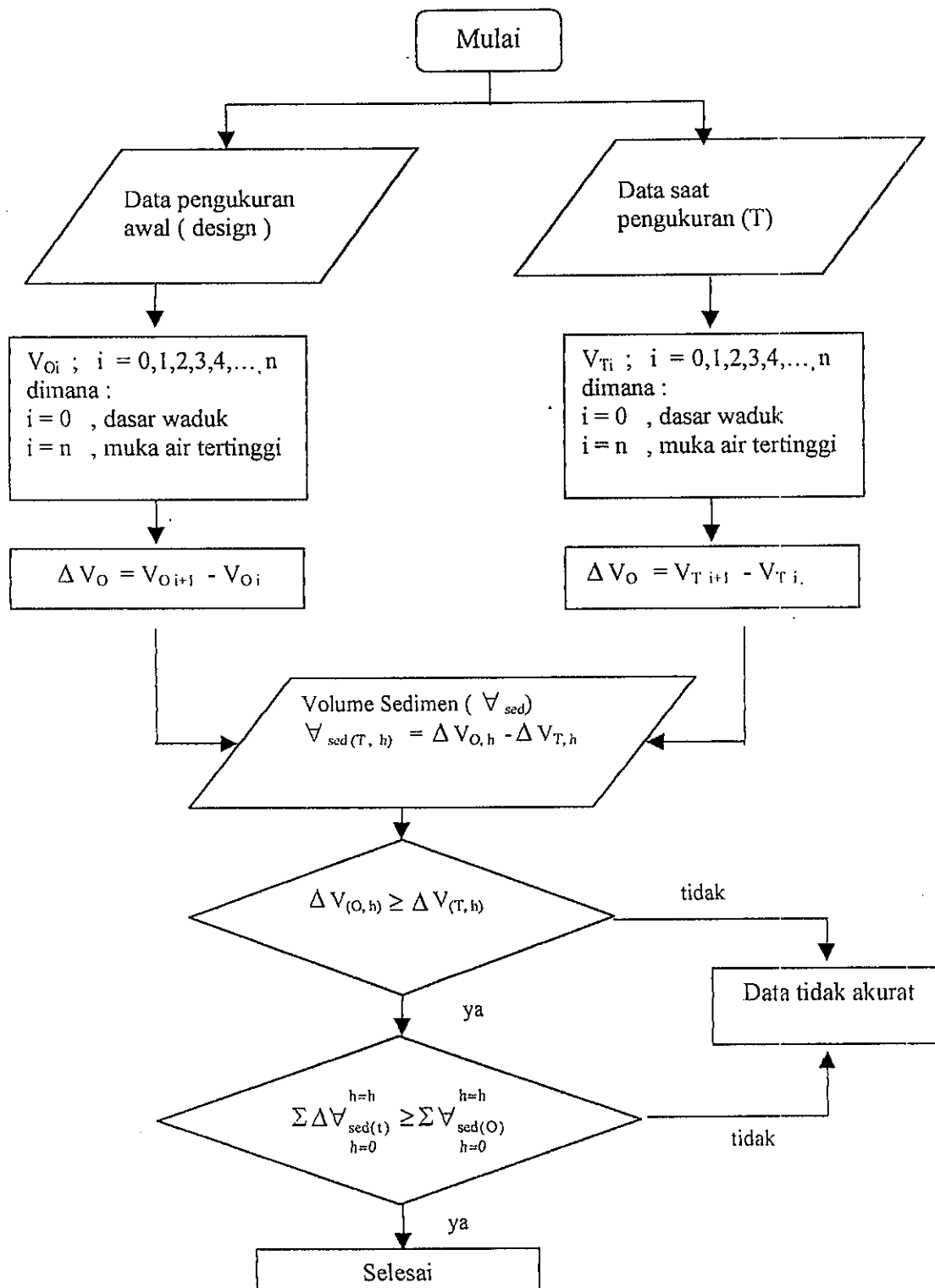
- a. Pengendalian erosi permukaan daerah aliran sungai di sekitar waduk.
- b. Pengembangan wilayah sabuk hijau (*Green belt*).
- c. Penanganan dengan bangunan pengendali sedimen (*checkdam*).
- d. Pengendalian erosi di lahan secara vegetatif.

Untuk itu informasi data kuantitatif amat diperlukan ketepatan dan keakuratan mengenai akumulasi sedimen secara kumulatif maupun tiap segmen kontur (elevasi). Dengan anggapan bahwa akumulasi sedimen dari area kapasitas mati menuju *maximum water level* semakin besar maka asumsi penyebaran sedimen terjadi merata pada tiap elevasi dengan tingkat volume yang berbeda. Beberapa langkah untuk mengevaluasi keakuratan data akumulasi sedimen yaitu :

1. Dari pengukuran design awal (T_0)
 - a. Menentukan luas genangan pada masing-masing elevasi yang ditentukan dari hasil pengukuran dasar waduk mula-mula (*bathimetri*).
 - b. Menentukan kapasitas tampung waduk untuk tiap elevasi (V_0) dari hasil

$$\text{estimasi luas genangan } \left[\frac{1}{3} (H_{i+1} - H_i) (A_i + A_{i+1} + \sqrt{A_i A_{i+1}}) \right]$$

2. Dari pengukuran pada waktu (T_T)
 - a. Menentukan luas genangan pada masing-masing elevasi yang ditentukan dari hasil pengukuran dasar waduk (*bathimetri*) pada saat pengukuran.
 - b. Menentukan kapasitas tampung (V_T) untuk tiap elevasi dari hasil estimasi luas genangan $[\frac{1}{3} (H_{i+1} - H_i) (A_i + A_{i+1} + \sqrt{A_i A_{i+1}})]$
 - c. Mengamati pola penyebaran yang dianggap valid maka kumulatif akumulasi sedimen dari elevasi bawah ke elevasi atas semakin besar (semakin bertambah elevasi muka waduk, semakin besar tingkat jumlah sedimen yang mengendap).
3. Menentukan volume sedimen yang mengendap (ΔV) dari selisih hasil kapasitas tampung (V_0) pada saat pengukuran awal waduk dengan kapasitas tampung (V_T) pada saat pengukuran.



Gambar 3.8. Bagan alir evaluasi akumulasi sedimen.

4. Beberapa kriteria yang menyatakan keakuratan hasil kapasitas atau volume sedimen bila :
- a. Kapasitas (V_0) lebih besar dari volume kapasitas pada saat pengukuran ($V_0 > V_T$) atau pada level elevasi tertentu tidak terakumulasi endapan sedimen atau $\Delta V = 0$ ($V_0 \geq V_T$).
 - b. Pola penyebaran sedimen bersifat menyeluruh pada tiap elevasi dengan pola gradasi yang berbeda tetapi mempunyai volume akumulasi yang berlainan pada tiap elevasi.

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi data

Identifikasi waduk untuk mengestimasi prediksi penyimpangan metode aktual dan empiris pengurangan luas, diperlukan uji validasi data. Validasi data sedimentasi waduk dilakukan dengan menggunakan kriteria :

1. Akumulasi sedimen : Volume sedimen merupakan hasil pengurangan kapasitas awal pada waktu (T) terhadap kapasitas saat tahun pengukuran ($\Delta V = \Delta V_{o,h} - \Delta V_{T,h}$).
2. Distribusi sedimen : Volume kumulatif penyebaran sedimen semakin bertambah dari elevasi dasar waduk (h_o) sampai dengan elevasi air normal (h_n) pada jarak x elevasi tertentu

Tabel 4.1. Validasi data sedimentasi waduk

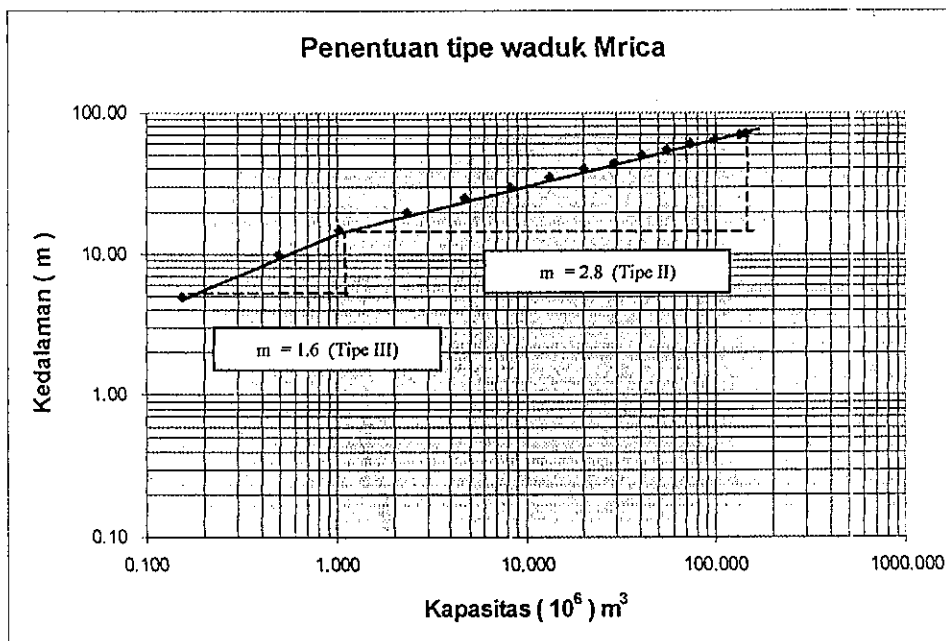
No	Waduk	Akumulasi Sedimen	Distribusi Sedimen	Keterangan
1	Gajah Mungkur	-	-	Tidak Memenuhi
2	Cirata	-	-	Tidak Memenuhi
3	Mrica	+	+	Memenuhi
4	Wadaslintang	-	-	Tidak Memenuhi
5	Kedungombo	-	-	Tidak Memenuhi
6	Sempor	+	+	Memenuhi

Dari Tabel.4.1 Validasi data sedimentasi waduk, prediksi akumulasi sedimen dalam hasil positif (+) didefinisikan terjadi pengurangan kapasitas pada jarak elevasi yang ditentukan ($\Delta h = h_{i+1} - h_i$), sedangkan hasil negatif (-) dinyatakan terjadi penyimpangan akumulasi dan distribusi sedimen. Identifikasi data terhadap enam waduk menunjukkan bahwa waduk Mrica dan Sempor yang memenuhi kriteria validasi data sedimen.

4.2. Tinjauan metode empiris dan aktual

4.2.1. Penentuan tipe waduk

Salah satu faktor yang mempengaruhi distribusi endapan sedimen adalah bentuk waduk. Dengan metode empiris pengurangan luas, bentuk waduk ditentukan berdasarkan hubungan antara kedalaman mula-mula dan kapasitas waduk. Hubungan tersebut difungsikan dalam parameter m sesuai Gambar 4.1. Nilai m didefinisikan sebagai garis kemiringan atau *slope* dari garis yang diperoleh dari plot antara data kedalaman awal dengan data kapasitas waduk. Rata-rata nilai m yang dihasilkan tidak linier tergantung pada kapasitas tampung pada tiap elevasi. Atau harga m tidak berada pada garis lurus maka digunakan bentuk dari tipe hubungan garis kemiringan yang dominan atau harga m yang berada pada kecenderungan terjadi pengendapan.



Gambar 4.1. Hubungan kedalaman waduk dengan kapasitas Waduk Mrica

Dari bentuk tipe waduk dalam Tabel 4.2 hanya waduk Kedung Ombo yang berdasarkan nilai kemiringan m berlokasi di pegunungan, sedang waduk Gajah mungkur, Mrica, Wadaslintang, Cirata, Sempor berlokasi di kaki bukit. Penentuan tipe waduk lainnya berdasarkan nilai m terurai pada lampiran Gambar A.2.1, A.3.1, A.4.1 dan Gambar A.6.1.

Tabel 4.2. Tipe Waduk

No	Waduk	Lokasi	Tipe	Tipe Aktual
1.	Gajah Mungkur	Jawa Tengah	I,II	II
2.	Sempor	Jawa Tengah	II	II
3.	Wadas Lintang	Jawa Tengah	II	II
4.	Cirata	Jawa Barat	II	II
5.	Mrica	Jawa Tengah	II, III	II
6.	Kedungombo	Jawa Tengah	IV	IV

4.2.2. Luas Genangan relatif (a)

Nilai luas relatif merupakan suatu formula dari tiap tipe waduk untuk menentukan perubahan luas genangan dari tiap-tiap elevasi. Perubahan nilai relatif tersebut menyesuaikan variable dari kedalaman relatif (P) dari dasar waduk pada saat pengukuran awal (*original*). Untuk perhitungan luas genangan endapan sedimen yang merupakan hasil data pengukuran luas awal dan faktor koreksi dari nilai luas relatif. Nilai maksimum luas relatif pada tipe II berbeda dengan tipe lainnya atau tidak ada kesamaan nilai maksimum luas relatif untuk semua tipe. Hal tersebut berpengaruh pada pola distribusi mengingat volume sedimen maksimum berada pada elevasi yang memiliki nilai relatif maksimum. Perhitungan luas genangan sedimen tertera pada lampiran Tabel A.1.2, A.2.2, A.3.2 dan Tabel A.4.2.

4.2.3. Validasi data distribusi sedimen

Dalam Tabel 4.3 mengenai validasi data distribusi sedimen, data kapasitas awal (kolom 5) dan kapasitas pengukuran (kolom 6) masing-masing ditetapkan pada jarak elevasi tertentu. Akumulasi sedimen diperhitungkan dari pengurangan kapasitas awal pada waktu (T_0) terhadap kapasitas saat pengukuran T ($\Delta \nabla_{sed(T,h)} = \Delta \nabla_{o,h} - \nabla_{T,h}$). Sedangkan pada kolom 8 merupakan kumulatif volume sedimen dari dasar waduk hingga elevasi muka air tinggi ($\sum_{i=0}^{i=n} \nabla_{sed}$). Akurasi data penyebaran sedimen bila pada kapasitas awal (kolom 5) harus lebih besar atau sama dengan kapasitas tiap elevasi. Prosentase sedimen diestimasi dari kumulatif sedimen tiap elevasi terhadap total volume sedimen yang mengendap di waduk pada saat tahun pengukuran.

Validasi data distribusi sedimentasi waduk mrca yang ditampilkan pada Tabel 4.3, 4.4 dan 4.5 dalam delapan tahun pengukuran secara ringkas menunjukkan adanya akumulasi volume sedimen yang mengendap, bila tidak terjadi sedimentasi maka volume kapasitas pada mula-mula T_0 sama dengan volume kapasitas pada waktu T ($\nabla_{o,h} = \nabla_{T,h}$). Hasil negatif pada penyebaran sedimen pada elevasi tertentu ($\Delta \nabla_{sed(T,h)}$) menunjukkan penyimpangan hasil estimasi akumulasi sedimen yang dihasilkan perhitungan kapasitas pada tahun pengukuran lebih besar dari pengukuran sebelum waduk dioperasikan. Evaluasi data terangkum dalam lampiran Tabel B.1.1 sampai dengan Tabel B.6.1.

Tabel 4.3. Data penyebaran sedimen Waduk Mrica tahun (1992-1994)

No	Elevasi	h / H	Prosentase Kedalaman	Kapasitas Awal	1992			1993			1994			%		
					Kapasitas	Sedimen	%	Kapasitas	Sedimen	%	Kapasitas	Sedimen	%			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	160.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	165.00	0.07	7.04	0.153	0.000	0.153	0.153	0.990	0.000	0.153	0.153	0.867	0.000	0.153	0.153	0.727
3	170.00	0.14	14.08	0.489	0.000	0.336	0.489	3.165	0.000	0.336	0.489	2.771	0.000	0.336	0.489	2.325
4	175.00	0.21	21.13	1.019	0.027	0.503	0.992	6.421	0.000	0.530	1.019	5.775	0.000	0.530	1.019	4.845
5	180.00	0.28	28.17	2.329	1.024	0.313	1.305	8.447	0.704	0.606	1.625	9.210	0.383	0.927	1.946	9.253
6	185.00	0.35	35.21	4.706	3.401	0.000	1.305	8.445	2.873	0.208	1.833	10.389	2.433	0.327	2.273	10.808
7	190.00	0.42	42.25	8.191	6.836	0.050	1.355	8.770	6.321	0.037	1.870	10.599	5.637	0.281	2.554	12.144
8	195.00	0.49	49.30	13.141	11.688	0.098	1.453	9.405	11.039	0.232	2.102	11.913	9.882	0.705	3.259	15.496
9	200.00	0.56	56.34	19.745	18.072	0.220	1.673	10.828	17.322	0.321	2.423	13.733	15.800	0.686	3.945	18.758
10	205.00	0.63	63.38	28.631	26.200	0.758	2.431	15.735	25.224	0.984	3.407	19.310	23.130	1.556	5.501	26.157
11	210.00	0.70	70.42	40.282	36.385	1.466	3.897	25.223	34.984	1.881	5.298	30.027	32.304	2.477	7.978	37.934
12	215.00	0.77	77.46	55.102	49.501	1.704	5.601	36.252	47.607	2.197	7.495	42.479	44.678	2.446	10.424	49.565
13	220.00	0.85	84.51	73.837	66.014	2.222	7.823	50.634	63.643	2.699	10.194	57.776	60.596	2.817	13.241	62.959
14	225.00	0.92	91.55	98.609	87.260	3.526	11.349	73.456	84.517	3.898	14.092	79.869	80.972	4.375	17.637	83.862
15	230.00	0.99	98.59	133.024	119.374	2.301	13.650	88.350	117.089	1.843	15.935	90.316	113.675	1.712	19.349	92.001
16	231.00	1.00	100.00	141.247	125.797	1.800	15.450	100.000	123.603	1.709	17.644	100.000	120.216	1.662	21.031	100.000

Tabel 4.4. Data penyebaran sedimen Waduk Mrica tahun (1996-1998)

No	Elevasi	h / H	Prosentase Kedalaman	Kapasitas Awal	1996			1997			1998			%			
					Kapasitas	Sedimen	%	Kapasitas	Sedimen	%	Kapasitas	Sedimen	%				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1	160.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.452
2	165.00	0.07	7.04	0.153	0.000	0.153	0.153	0.596	0.000	0.153	0.153	0.549	0.000	0.153	0.153	0.153	0.452
3	170.00	0.14	14.08	0.489	0.000	0.336	0.489	1.903	0.000	0.336	0.489	1.755	0.000	0.336	0.489	0.489	1.444
4	175.00	0.21	21.13	1.019	0.000	0.530	1.019	3.966	0.000	0.530	1.019	3.657	0.000	0.530	1.019	1.019	3.009
5	180.00	0.28	28.17	2.329	0.007	1.303	2.322	9.040	0.000	1.310	2.329	8.358	0.000	1.310	2.329	2.329	6.877
6	185.00	0.35	35.21	4.706	1.093	1.291	3.613	14.064	0.992	1.385	3.714	13.329	0.448	1.310	4.258	4.258	12.575
7	190.00	0.42	42.25	8.191	3.763	0.815	4.428	17.237	3.242	1.235	4.949	17.762	2.318	1.615	5.873	17.344	17.344
8	195.00	0.49	49.30	13.141	7.983	0.730	5.158	20.078	7.029	1.163	6.112	21.935	5.578	1.690	7.563	22.334	22.334
9	200.00	0.56	56.34	19.745	13.826	0.761	5.919	23.038	12.612	1.021	7.133	25.599	10.791	1.390	8.954	26.440	26.440
10	205.00	0.63	63.38	28.631	21.589	1.124	7.042	27.413	19.927	1.571	8.704	31.235	17.939	1.738	10.692	31.572	31.572
11	210.00	0.70	70.42	40.282	31.170	2.070	9.112	35.469	29.110	2.469	11.172	40.095	26.793	2.797	13.489	39.831	39.831
12	215.00	0.77	77.46	55.102	42.893	3.097	12.209	47.522	40.686	3.244	14.416	51.735	37.833	3.781	17.269	50.994	50.994
13	220.00	0.85	84.51	73.837	57.834	3.795	16.003	62.293	55.942	3.479	17.895	64.220	51.953	4.615	21.884	64.622	64.622
14	225.00	0.92	91.55	98.609	76.889	5.716	21.720	84.544	75.116	5.598	23.493	84.308	70.181	6.543	28.428	83.945	83.945
15	230.00	0.99	98.59	133.024	109.112	2.193	23.913	93.078	107.004	2.527	26.020	93.378	101.182	3.414	31.842	94.027	94.027
16	231.00	1.00	100.00	141.247	115.556	1.778	25.691	100.000	113.382	1.845	27.855	100.000	107.382	2.023	33.865	100.000	100.000

Tabel 4.5. Data penyebaran sedimen Waduk Mrica tahun (1999-2000)

No	Elevasi	h / H	Prosentase Kedalaman	Kapasitas Awal	1999			2000			%	
					Kapasitas	Sedimen	Kumulatif	-%	Kapasitas	Sedimen		Kumulatif
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	160.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	165.00	0.07	7.04	0.153	0.000	0.153	0.153	0.353	0.000	0.153	0.153	0.304
3	170.00	0.14	14.08	0.489	0.000	0.336	0.489	1.128	0.000	0.336	0.489	0.970
4	175.00	0.21	21.13	1.019	0.000	0.530	1.019	2.350	0.000	0.530	1.019	2.022
5	180.00	0.28	28.17	2.329	0.000	1.310	2.329	5.370	0.000	1.310	2.329	4.621
6	185.00	0.35	35.21	4.706	0.218	2.159	4.488	10.348	0.000	2.377	4.706	9.338
7	190.00	0.42	42.25	8.191	1.772	1.931	6.419	14.800	0.699	2.786	7.492	14.866
8	195.00	0.49	49.30	13.141	4.529	2.193	8.612	19.857	2.957	2.692	10.184	20.208
9	200.00	0.56	56.34	19.745	8.939	2.194	10.806	24.916	6.483	3.078	13.262	26.316
10	205.00	0.63	63.38	28.631	14.985	2.840	13.646	31.465	11.913	3.455	16.718	33.173
11	210.00	0.70	70.42	40.282	22.473	4.163	17.809	41.064	19.568	3.996	20.714	41.103
12	215.00	0.77	77.46	55.102	31.809	5.484	23.293	53.708	28.669	5.719	26.433	52.450
13	220.00	0.85	84.51	73.837	43.749	6.795	30.088	69.377	40.261	7.143	33.576	66.623
14	225.00	0.92	91.55	98.609	60.678	7.843	37.931	87.462	55.368	9.665	43.241	85.801
15	230.00	0.99	98.59	133.024	91.678	3.415	41.346	95.335	84.938	4.845	48.086	95.416
16	231.00	1.00	100.00	141.247	97.878	2.023	43.369	100.000	90.851	2.310	50.396	100.000

4.2.4. Analisa penyimpangan hasil metode empiris dan pengukuran

Perhitungan penyimpangan atau perbedaan metode prediksi diestimasi dari metode empiris berupa hasil perhitungan penyebaran sedimen berupa volume kapasitas dan luas genangan dievaluasi dengan hasil volume kapasitas dan luas genangan dari metode pengukuran (aktual). Dalam Tabel 4.6 dan 4.7 menunjukkan nilai perbandingan yang bervariasi dengan prosentase penyimpangan lebih dari 25 %. Sementara nilai perbandingan berpedoman pada metode aktual, yang mempunyai asumsi nilai kebenaran (pengukuran di lapangan). Secara visual pada grafik hubungan kapasitas-luas genangan terlihat penyimpangan yang *significant* antara metode aktual dan empiris. Selisih hasil kapasitas dan luas genangan didapat dari jarak plotting titik-titik dalam grafik hubungan kapasitas luas genangan (lampiran Gambar A.1.2, A.1.3, A.1.4).

Penentuan koefisien indeks kesalahan dalam prosentase diperhitungkan dengan persamaan berikut ini dan hasilnya terlihat dalam Tabel 4.6 dan 4.7.

$$\text{Indek kesalahan (prosentase)} = \frac{\text{kapasitas aktual} - \text{kapasitas empiris}}{\text{kapasitas aktual}}$$

Analisa mengenai indek kesalahan dalam Tabel 4.5 dan 4.6 menunjukkan bahwa adanya penyimpangan hasil prediksi metode empiris dan aktual (pengukuran lapangan). Faktor pembagi (kapasitas aktual) mempengaruhi besar indek yakni semakin kecil metode aktual semakin besar penyimpangan atau indek kesalahan. Pada gambar hubungan kapasitas dan luas genangan jarak plotting perhitungan secara visual terdapat penyimpangan secara berpecah jauh titik-titik dari *perfect line*. Mengenai hasil perbandingan metode empiris dan metode aktual

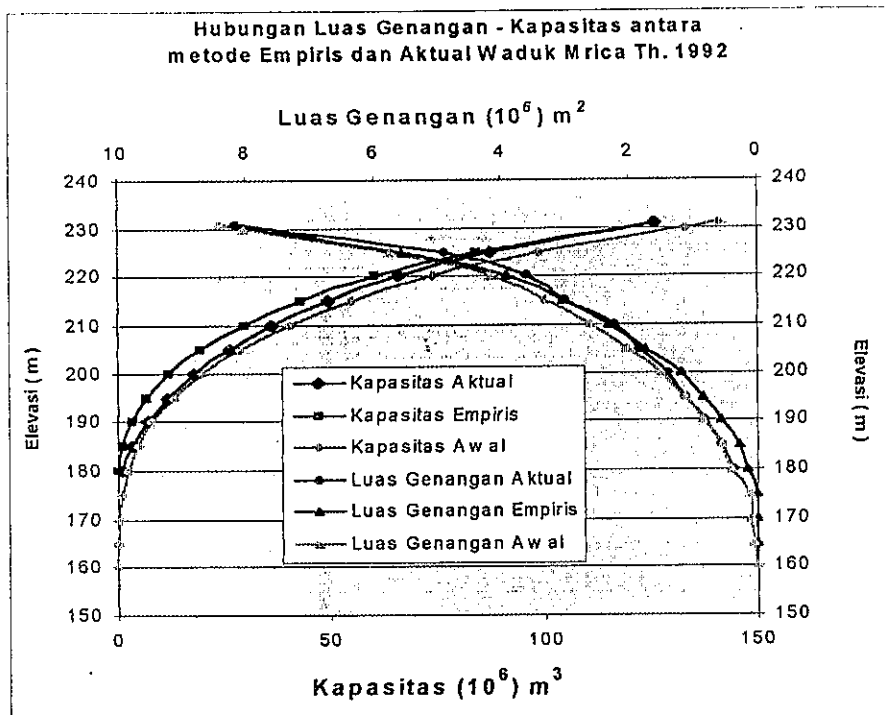
waduk lainnya tertuang pada lampiran A (Metode empiris pengurangan luas dan metode aktual).

Tabel 4.6. Tabel evaluasi metode prediksi distribusi sedimen waduk Mrica

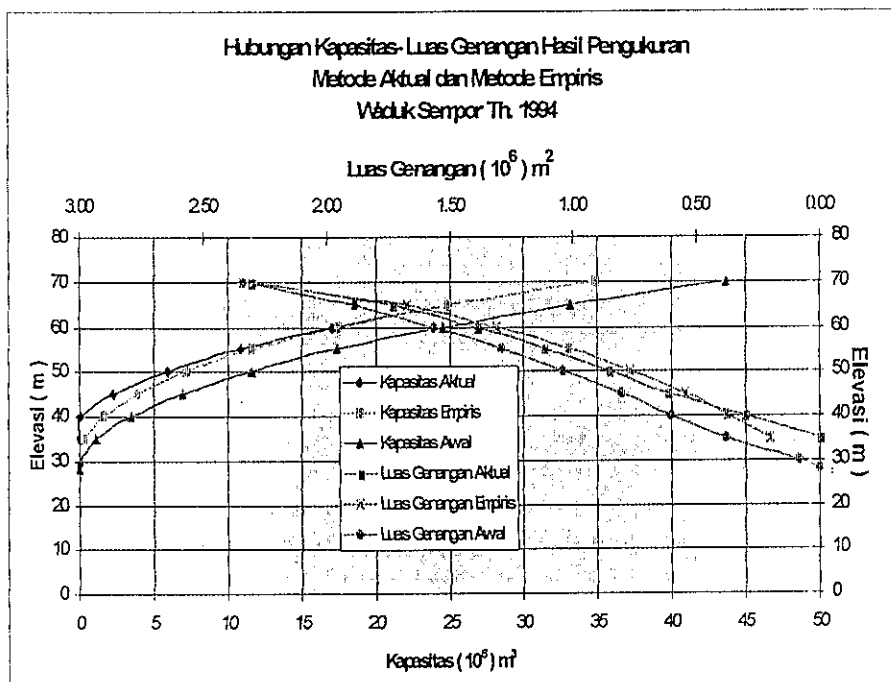
NO	Elevasi (m)	Luas Genangan Metode Aktual 10^6m^2	Luas Genangan Metode Empiris 10^6m^2	Selisih Luas Genangan 10^6m^2	Dalam 100%
1	231.00	8.152	8.416	0.264	3.238
2	225.00	4.901	5.534	0.633	12.916
3	220.00	3.598	3.927	0.329	9.144
4	215.00	3.007	3.047	0.04	1.330
5	210.00	2.239	2.318	0.079	3.528
6	205.00	1.835	1.756	0.079	4.305
7	200.00	1.416	1.202	0.214	15.113
8	195.00	1.138	0.846	0.292	25.659
9	190.00	0.803	0.555	0.248	30.884
10	185.00	0.566	0.285	0.281	49.647
11	180.00	0.390	0.150	0.24	61.538
12	175.00	0.054	0.000	0.054	0.000
13	170.00	0.000	0.000	0	0.000
14	165.00	0.000	0.000	0	0.000
15	160.00	0.000	0.000	0	0.000

Tabel 4.7. Tabel evaluasi metode prediksi distribusi sedimen Mrica

NO	Elevasi (m)	Kapasitas Metode Aktual 10^6m^3	Kapasitas Metode Empiris 10^6m^3	Selisih Kapasitas 10^6m^3	Dalam 100%
1	231.00	125.797	125.800	0.003	0.002
2	225.00	87.260	83.970	3.290	3.770
3	220.00	66.014	60.310	5.704	8.641
4	215.00	49.501	42.880	6.621	13.375
5	210.00	36.385	29.460	6.925	19.033
6	205.00	26.200	19.280	6.920	26.412
7	200.00	18.072	11.880	6.192	34.263
8	195.00	11.688	6.760	4.928	42.163
9	190.00	6.836	3.250	3.586	52.458
10	185.00	3.413	1.160	2.253	66.012
11	180.00	1.024	0.070	0.954	93.164
12	175.00	0.027	0.000	0.027	0.000
13	170.00	0.000	0.000	0.000	0.000
14	165.00	0.000	0.000	0.000	0.000
15	160.00	0.000	0.000	0.000	0.000



Gambar 4.2. Hubungan Kapasitas–Luas Genangan Metode Empiris dan Metode Aktual Waduk Mrica tahun 1992.

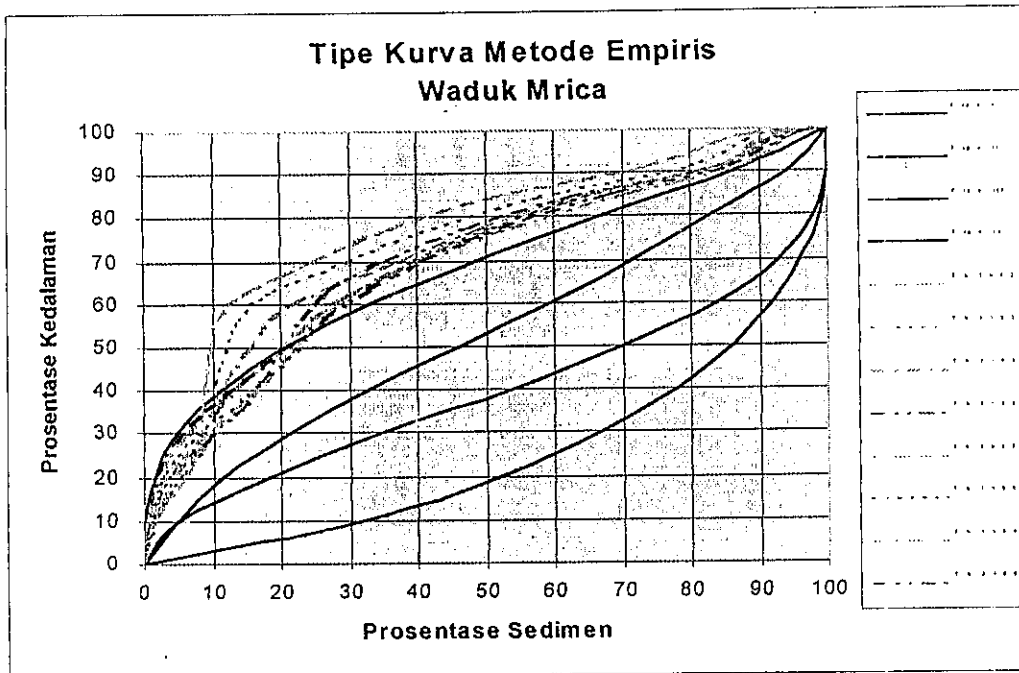


Gambar 4.3. Hubungan Kapasitas–Luas Genangan Metode Empiris dan Metode Aktual Waduk Sempor tahun 1994.

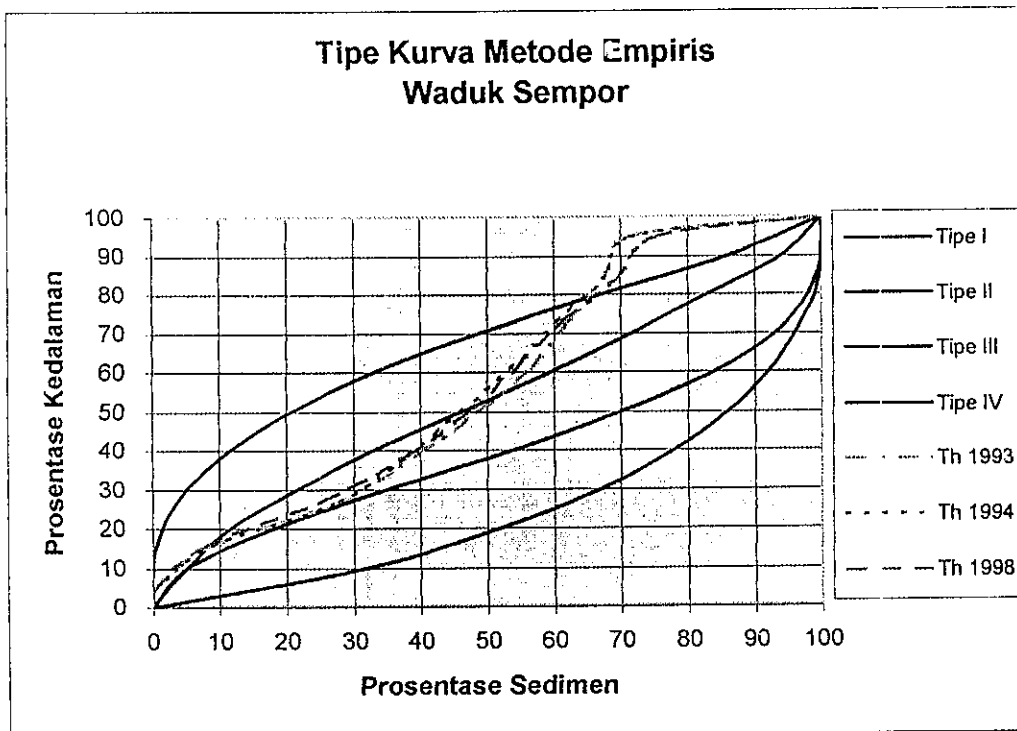
4.3. Tinjauan aplikasi tipe distribusi sedimen terhadap pengurangan kapasitas

Volume sedimen pada tiap elevasi dihitung secara kumulatif pada tiap prosentase kedalaman waduk dan divisualkan dalam bentuk grafik. Hasil kedua variabel diploting untuk mencari bentuk tipe waduk. Ploting tipe waduk ditentukan dari validasi data akumulasi sedimen (Tabel.4.4).

Berdasarkan frekuensi delapan kali pengukuran pada waduk Mrica yang diterapkan pada grafik prediksi kehilangan kapasitas tampungan (Gambar 4.4) menunjukkan waduk tersebut pada tipe I. Grafik prediksi ini didasarkan pada perhitungan prosentase pengendapan sedimen pada tiap prosentase kedalaman (lampiran Tabel F.6.1 sampai dengan tabel F.6.3). Untuk waduk Sempor (Gambar.4.5) pada area kapasitas mati (kantong lumpur) berada pada tipe II sedangkan area kapasitas efektif berada pada tipe I. Perhitungan prediksi pengurangan kapasitas waduk Sempor dapat dilihat pada lampiran Tabel F.1.1. Adapun hasil aplikasi tipe distribusi terhadap waduk lainnya terdapat pada lampiran (Gambar F.2.1, F.3.1, F.4.1 dan F.5.1).



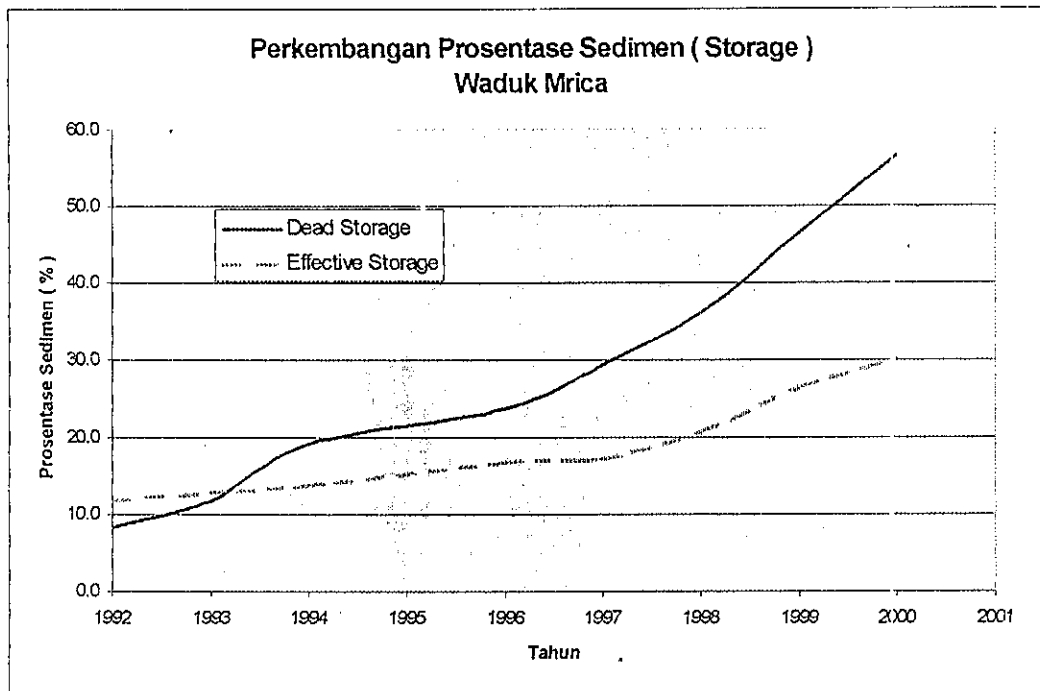
Gambar 4.4. Tipe Kurva Prediksi Kehilangan Kapasitas Tampung.



Gambar 4.5. Tipe kurva prediksi kehilangan kapasitas tampungan.

4.4. Perubahan akumulasi sedimen terhadap kapasitas aktual

Dari perkembangan pola distribusi waduk Mrica terhadap waktu delapan tahun pengukuran antara tahun 1992 sampai dengan tahun 2000, prosentase volume sedimen cenderung mengendap pada area *dead storage*. Dalam jangka waktu operasional waduk selama 11 tahun prosentase sedimen sebesar 56,5 % mengendap di *dead storage*, dibandingkan pada area *effective storage* dengan prosentase volume sedimen sekitar 29,9 %.



Gambar 4.6. Perkembangan Prosentase Sedimen (Area Storage) Waduk Mrica

Pengamatan perkembangan prosentase sedimen diperhitungkan terhadap volume kapasitas mati (kantong lumpur) sebesar 30,6 juta m^3 . Estimasi akumulasi sedimen yang mengendap didasarkan pada pengurangan volume *dead storage*

mula-mula dengan kapasitas *dead storage* pada saat pengukuran. Prosentase sedimen yang mengendap di area *dead storage* menunjukkan besar volume sedimen terhadap volume kapasitas tampungan maksimum (30,6 juta m³). Dengan cara yang sama dilakukan estimasi prosentase sedimen yang mengendap pada area kapasitas efektif dari jumlah sedimen (juta m³) terhadap kapasitas efektif (110,697 juta m³). Sedangkan untuk area *flood control storage* tidak didapatkan data sedimen dikarenakan pengukuran hanya pada elevasi muka air normal (kapasitas efektif).

Dalam analisa Tabel 4.8. kolom prosentase terjadi peningkatan rata-rata akumulasi sedimen di *dead storage* sebesar 10 % sehingga diasumsikan bahwa untuk jangka waktu 10 tahun yang akan datang bila pelaksanaan operasional waduk Mrica tidak berubah maka diprediksikan area kapasitas mati (kantong lumpur) penuh dengan sedimen.

Tabel 4.8. Perkembangan Prosentase Sedimen

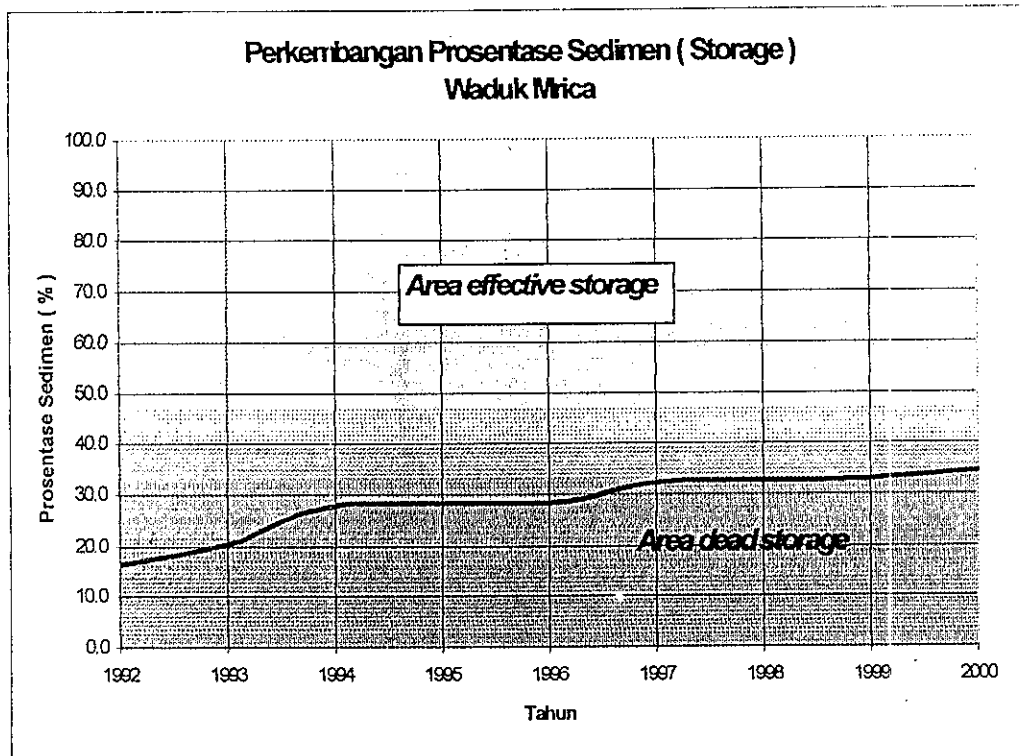
No	Tahun	Dead Storage			Effective Storage			Flood Control Storage					
		Kap.Awal (Juta M3)	Kap.Aktual (Juta M3)	Sedimen (Juta M3)	Persentase (%)	Kap.Awal (Juta M3)	Kap.Aktual (Juta M3)	Sedimen (Juta M3)	Persentase (%)	Kap.Awal (Juta M3)	Kap.Aktual (Juta M3)	Sedimen (Juta M3)	Persentase (%)
1	1992	30.600	28.075	2.525	8.3	110.647	97.772	12.875	11.6	37.940	37.940	0.000	0.0
2	1993	30.600	27.028	3.572	11.7	110.647	96.575	14.072	12.7	37.940	37.940	0.000	0.0
3	1994	30.600	24.719	5.881	19.2	110.647	95.497	15.150	13.7	37.940	37.940	0.000	0.0
4	1996	30.600	23.376	7.224	23.6	110.647	92.180	18.467	16.7	37.940	37.940	0.000	0.0
5	1997	30.600	21.618	8.982	29.4	110.647	91.764	18.883	17.1	37.940	37.940	0.000	0.0
6	1998	30.600	19.589	11.011	36.0	110.647	87.793	22.854	20.7	37.940	37.940	0.000	0.0
7	1999	30.600	16.380	14.220	46.5	110.647	81.497	29.150	26.3	37.940	37.940	0.000	0.0
8	2000	30.600	13.313	17.287	56.5	110.647	77.537	33.110	29.9	37.940	37.940	0.000	0.0

4.5 Distribusi Sedimen di *Dead storage* dan *Effective storage*

Penyebaran diperhitungkan terhadap total volume sedimen yang mengendap di waduk dan diperhitungkan berdasarkan prosentase dari total volume sedimen pada area kapasitas mati (kantong lumpur) dan area kapasitas efektif. Kapasitas aktual ditentukan dari hasil pengukuran lapangan pada tiap tahun pengukuran. Volume sedimen merupakan hasil pengurangan kapasitas aktual terhadap kapasitas area mula-mula.

Pada Tabel 4.9 perkembangan distribusi endapan sedimen kapasitas mati (kantong lumpur) terjadi peningkatan yang semula pada tahun 1992 prosentase yang mengendap di kapasitas mati (*dead storage*) sebesar 16,40 % dari total volume sedimen sebesar 15,40 juta m³ menjadi 34,30 % pada tahun 2000 dari total volume sedimen sebesar 50,397 juta m³.

Sedangkan pada area kapasitas efektif prosentase yang mengendap semakin berkurang yang semula pada tahun 1992 sebesar 83,60 % dari total volume sedimen 15,40 juta m³ menjadi 65,70 % dari 50,397 juta m³ sedimen yang mengendap. Ini mengindikasikan bahwa volume sedimen cenderung mengendap di area kapasitas mati (*dead storage*). Secara visual hasil perhitungan dalam tabel 4.8 dapat divisualisasikan dalam Gambar.4.7. mengenai perkembangan distribusi sedimentasi pada area *dead storage* dan *effective storage*.



Gambar 4.7. Perkembangan distribusi sedimentasi pada *area dead storage* dan *effective storage*.

Tabel 4.9. Distribusi sedimentasi pada area dead storage dan effective storage.

No	Tahun	Dead Storage			Effective Storage			Flood Control Storage					
		Kap.Awal (Juta M3)	Kap.Aktual (Juta M3)	Sedimen (Juta M3)	Persen %	Kap.Awal (Juta M3)	Kap.Aktual (Juta M3)	Sedimen (Juta M3)	Persen %	Kap.Awal (Juta M3)	Kap.Aktual (Juta M3)	Sedimen (Juta M3)	Persen %
1	1992	30.600	28.075	2.525	16.4	110.647	97.772	12.875	83.6	37.940	37.940	0.000	0.0
2	1993	30.600	27.028	3.572	20.2	110.647	96.575	14.072	79.8	37.940	37.940	0.000	0.0
3	1994	30.600	24.719	5.881	28.0	110.647	95.497	15.150	72.0	37.940	37.940	0.000	0.0
4	1996	30.600	23.376	7.224	28.1	110.647	92.180	18.467	71.9	37.940	37.940	0.000	0.0
5	1997	30.600	21.618	8.982	32.2	110.647	91.764	18.883	67.8	37.940	37.940	0.000	0.0
6	1998	30.600	19.589	11.011	32.5	110.647	87.793	22.854	67.5	37.940	37.940	0.000	0.0
7	1999	30.600	16.380	14.220	32.8	110.647	81.497	29.150	67.2	37.940	37.940	0.000	0.0
8	2000	30.600	13.313	17.287	34.3	110.647	77.537	33.110	65.7	37.940	37.940	0.000	0.0

4.6 Pengaruh Penggelontoran sedimen waduk Mrica

Pelaksanaan *flushing* dilaksanakan agar sedimentasi penyumbatan power intake dapat dihindarkan. Pelaksanaan *flushing* tersebut dilaksanakan bilamana sedimen yang mengendap sudah mencapai permukaan dasar saluran intake *draw down culvert*. Sedimentasi di depan intake *draw down culvert* (tahun 1998) baru mencapai elevasi +181.16 m sedangkan elevasi dasar saluran menuju pintu + 182.00 m sehingga sedimen dasar belum bisa dibuang. Yang perlu diperhatikan agar *draw down culvert* terbebas dari sumbatan sedimen maka frekuensi pelaksanaan penggelontoran perlu ditingkatkan, tanpa mengurangi produksi listrik.

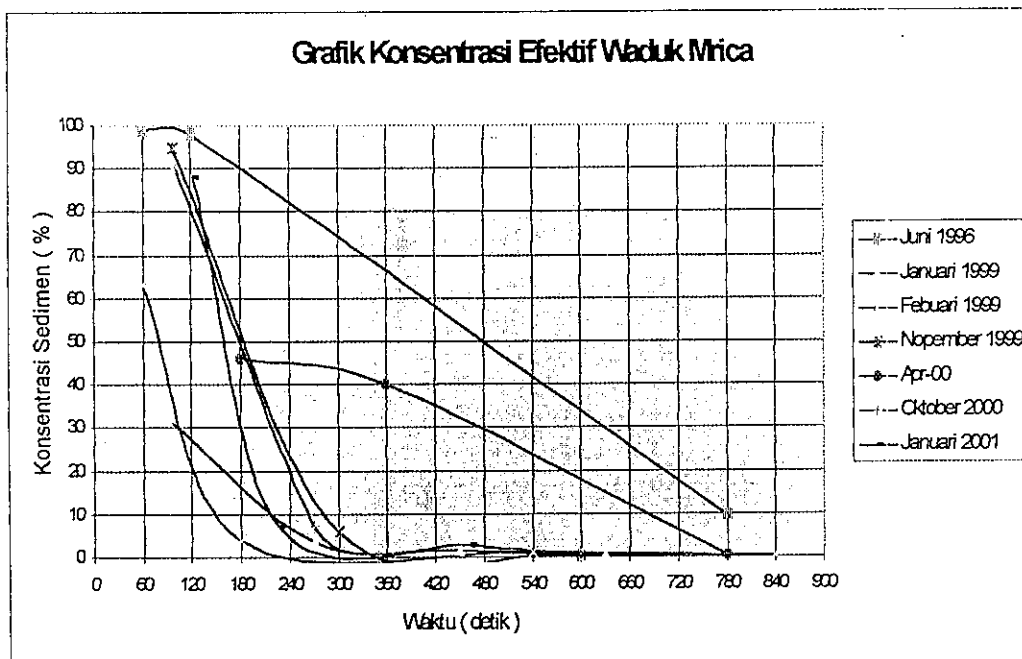
Pelaksanaan *flushing* yang dilaksanakan tahun 1996 selama dua kali penggelontoran (bulan Februari dan Juni) menekan laju sedimentasi waduk sebesar 0,156 juta m³, dari laju sedimen tahun 1996 sebesar 2.330 m³ menjadi 2.174 m³. Sedangkan pada tahun 1999 yang dilaksanakan tiga kali penggelontoran (bulan Januari, Februari, November) menekan laju sedimentasi waduk sebesar 2.447 m³ dari laju sedimen tahun 1999 sebesar 9.504 m³ menjadi 7.027 m³.

Tabel 4.10. Volume sedimen *flushing* pada *drawdown culvert*.

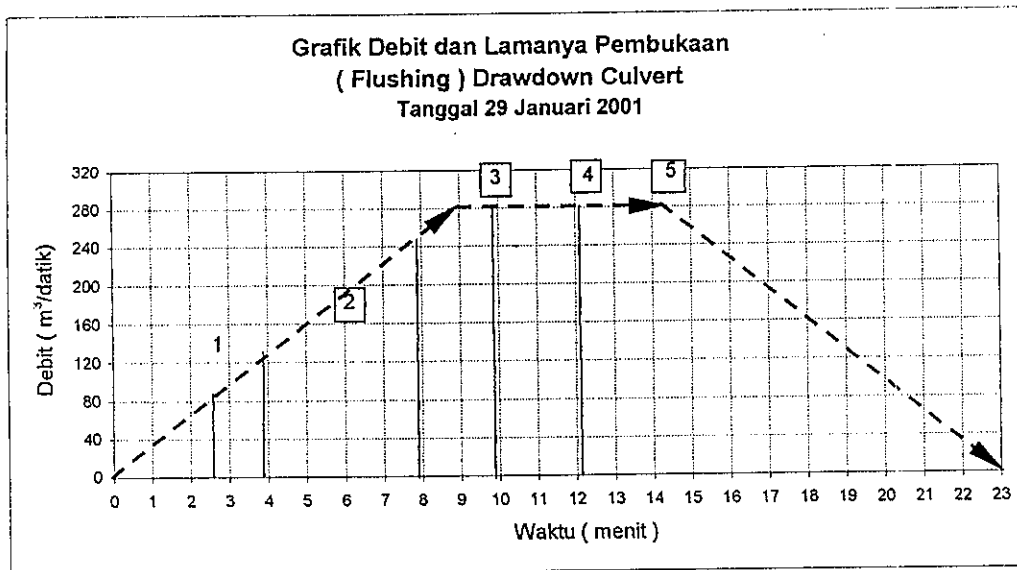
No	Tanggal	Waktu (menit)	Volume Air (M3)	Volume Sedimen (M3)	Ket
1	15 Februari 1996	50	840000	5147.68	
2	17 Juni 1996	14	235200	69101.55	
3	04 Januari 1999	55	924000	7390.32	
4	24 Februari-1999	22	369600	5646.44	
5	10-Nov-99	72	1209600	17981.41	
6	11-Apr-00	22	369600	38650.50	
7	31 Okt 2000	14	235200	10314.41	
8	29-Jan-01	14	235200	10278.00	

Volume sedimen hasil penggelontoran tergantung prosentase konsentrasi dalam volume air yang keluar dari *draw down culvert*. Konsentrasi sedimen menjadi minimum bilamana t waktu untuk *flushing* melebihi 13 menit. Pelaksanaan penggelontoran tidak mendapatkan hasil volume sedimen yang keluar bilamana waktu *flushing* yang dikeluarkan melebihi 13 menit.

Perhitungan volume sedimen ditentukan berdasarkan prosentase kandungan sedimen terhadap debit air yang keluar dari *draw down culvert* dalam satuan waktu (menit). Debit yang keluar diperhitungkan terhadap luas grafik yang dibatasi 2 waktu pengambilan sedimen terhadap lama waktu pembukaan pintu *draw down culvert*.



Gambar 4.8. Grafik konsentrasi flushing sedimen waduk Mrica.



Gambar 4.9. Grafik debit dan T waktu pembukaan *drawdown culvert*.

Gambar.4.9 mendiskripsikan waktu t pembukaan dan penutupan yang membutuhkan masing-masing 9 menit. Volume air diperhitungkan dari luas grafik tersebut yang dibatasi garis pengambilan sedimen. Hasil perhitungan selengkapnya pada lampiran Tabel D.1.2 dan D.1.3.

Tabel 4.11. Perhitungan volume debit

No	Nomor Sample	Waktu (Menit)	Waktu (detik)	Konsentrasi (%)	Volume Air (M3)	Volume Sedimen (M3)
1	1	2'2"	122	88	7894	6946
2	2	3'47"	227	7	22965	1607
3	3	7'43"	463	2.9	40872	1185
4	4	9'49"	589	0.8	35929	285
5	5	12'0"	720	0.2	127540	255
Jumlah					235200	10278

BAB V

Kesimpulan dan saran

5.1. Kesimpulan

Studi ini menerapkan metode pengurangan luas sedimen yang merupakan salah satu metode prediksi distribusi sedimen untuk diterapkan pada beberapa waduk di pulau Jawa. Dari hasil analisis metode tersebut dengan metode pengukuran aktual (*hydrographic Survey*) selanjutnya dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Evaluasi validitas hasil pengukuran sedimen beberapa waduk di Jawa, hanya waduk Mrica yang memenuhi uji kelayakan data sedimen dibandingkan waduk lainnya. Kriteria yang memenuhi persyaratan evaluasi validitas data sedimen sebagai berikut:
 - a. Frekuensi pengukuran aktual di lapangan dalam tiap tahun.
 - b. Memenuhi ketentuan teori umum yaitu $(\Delta V_{\text{sed (h)}} = \Delta Q_{O(h)} - \Delta Q_{T(h)})$.
2. Terdapat penyimpangan hasil distribusi sedimen antara metode pengukuran dan metode empiris, hal tersebut menunjukkan bahwa metode empiris pengurangan luas tidak dapat diterapkan untuk memprediksi pola distribusi sedimen waduk di pulau Jawa.
3. Validitas data diperlukan untuk menilai kelayakan hasil pengukuran sedimentasi waduk, sehingga dapat digunakan untuk memprediksi umur waduk secara lebih baik.

4. Tidak didapatkan kecocokan atau terjadi penyimpangan antara metode aktual dan empiris mengenai elevasi nol baru sedimen, untuk mendistribusikan akumulasi sedimen tiap elevasi waduk.
5. Pelaksanaan penggelontoran pada waduk Mrica tidak mengurangi akumulasi volume sedimen di *area kapasitas mati* tetapi pada proses sedimentasi menunjukkan bahwa terjadi peningkatan volume sedimen di area kapasitas mati (kantong lumpur) dibandingkan pada area kapasitas efektif.

5.2. Saran

Kajian pola distribusi sedimentasi beberapa waduk di Jawa menunjukkan hasil yang bervariasi namun demikian hasil pada umumnya menunjukkan tingkat sedimentasi yang tinggi. Dari hasil penelitian ini dapat direkomendasikan hal-hal sebagai berikut:

1. Diperlukan data yang lengkap untuk mendapatkan prediksi pola distribusi sedimentasi waduk di pulau Jawa mengenai:
 - a. Frekuensi tahun pengukuran.
 - b. Ketersediaan data hasil pengukuran lapangan (aktual).
 - c. Kelayakan data pengukuran mula-mula kapasitas tiap elevasi waduk.
 - d. Data gradasi butiran sedimen tiap pengukuran.
 - e. Data teknis waduk lainnya.
2. Data-data tersebut diklarifikasikan dalam bentuk formula tertentu untuk memprediksi pola distribusi sedimentasi waduk di Jawa baik mengenai estimasi nilai luas sedimen relatif dan penentuan elevasi yang menganggap penuh sedimen (*New zero-capacity elevation*).

3. Pengendalian sedimen di daerah hulu mendapatkan prioritas utama dalam pengendalian sedimen dan penerapan pola operasi waduk untuk menekan perkembangan laju sedimen di *area dead storage*.
4. Perlu pelaksanaan *flushing* yang bersifat effective agar mendapatkan jumlah sedimen yang keluar secara optimal.
5. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dari data yang valid terhadap beberapa waduk selain enam waduk tersebut di Jawa untuk dikaji pola distribusi sedimen sehingga mendapatkan hasil yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

1. Citra Mandala Agitrans PT, Survey, investigasi, dan desain berupa monitoring sedimentasi waduk Wonogiri dan bendung Colo, Jakarta, 1993
2. Direktorat Penyelidikan Masalah Air, Pengukuran perencanaan dan penelitian erosi/sedimentasi di catchment area waduk Wonogiri, Direktorat Jenderal Pengairan Departemen Pekerjaan Umum, Mei, 1982
3. Fakultas Geografi Universitas Gadjah mada, Laporan utama monitoring dan penelitian sedimentasi waduk Wonogiri, Yogyakarta, 1991
4. Geodeco Engineering Consultan, Laporan akhir pekerjaan pengukuran sedimentasi waduk Sempor dan Wadas Lintang, Semarang, 1994
5. Gregory L Morris, Jiahua Fan, Reservoir sedimentation hand book, Mc Graw-Hill, New York, 1997
6. Hegar Daya, Pekerjaan penataan patok, pemetaan, penyelidikan, serta penggambaran kedalaman waduk Cirata dengan *echo sounding*, Bandung, 1996
7. Ilyas Arif, Aplikasi model distribusi "answers" dalam upaya penanggulangan sedimentasi di waduk Sempor Propinsi Jawa tengah, Pertemuan Ilmiah Tahunan HATHI, XIII Volume I, hal 222-229, 1996
8. Iwan K. Hadihardaja, Konsep pengoperasian waduk untuk pengendalian sedimen, Media komunikasi Teknik Sipil edisi XVI/April, Universitas Diponegoro, 2000
9. Julien, P. Y. Erosion and Sedimentation, 1st ed .New York : Cambridge University, 1995
10. Puslitbang, Pengairan PU, Bendungan besar di Indonesia, Badan Penelitian dan Pengembangan Pekerjaan Umum Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta, 1995
11. Puslitbang, Pengairan PU, Pengukuran sedimentasi untuk waduk Mrica, Departemen Pekerjaan Umum, Bandung, 1989
12. Puslitbang, Pengairan PU, Monitoring Erosi DAS waduk Wonogiri, Departemen Pekerjaan Umum, Bandung, 1986
13. Puslitbang, Pengairan PU, Monitoring erosi/sedimentasi berupa pengukuran, perencanaan dan penelitian erosi/sedimentasi di catchment area waduk Wonogiri-Final report : Badan Penelitian dan Pengembangan Pekerjaan Umum Departemen Pekerjaan Umum, 1986

14. Richard H, Mc Cuen, Hidrologic analisis and design, chapter 15, Erosion and Sedimentation, Prentice Hall, New Jersey, 1969
15. Stevan Bruk, Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs, A Contribution to The International Hidrological Programme, IHP-II Project A.2.6.1.Panel, Unesco, Paris, 1985
16. Sampudjo, Ilyas Arief, Errosion and sedimentation monitoring in the upper Citarum river basin, Proccedings of International Symposium on Errosion and Vorcanic Debris Flow Technology, Ministry of Public works, 1989
17. Suripin, Konservasi Tanah Dan Air, Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro, 2000
18. Suripin, The effects of land use alteration and soil conservation measures on sediment yield with reference to reservoirs in tropical areas, Ph.D Dissertation, leopold-Franzens-Universitat, Innsbruck, 1998
19. Tatareka Paradya, Laporan akhir pekerjaan studi sedimentasi waduk Sermo dan penanggulangannya, Yogyakarta, 1999
20. Terra Buana Manggala Jaya, Pengukuran kapasitas waduk Kedung Ombo dengan Echo Sounding, Semarang, 1994
21. United States Departement of The Interior Bureau of Reclamation, 1974, Design of small dams, Second edition, Oxford and IBH
22. Unit Pembangkit Mrica, Pelaksanaan penyelidikan sedimentasi waduk PLTA PB.Soedirman, Banjarnegara, 2000
23. Unit Pembangkit Mrica, Pelaksanaan penyelidikan sedimentasi waduk PLTA PB.Soedirman, Banjarnegara, 1999
24. Unit Pembangkit Mrica, Pelaksanaan penyelidikan sedimentasi waduk PLTA PB.Soedirman, Banjarnegara, 1998
25. Unit Pembangkit Mrica, Pelaksanaan penyelidikan sedimentasi waduk PLTA PB.Soedirman, Banjarnegara, 1997
26. Unit Pembangkit Mrica, Pelaksanaan penyelidikan sedimentasi waduk PLTA PB.Soedirman, Banjarnegara, 1996
27. Unit Pembangkit Mrica, Pelaksanaan penyelidikan sedimentasi waduk PLTA PB.Soedirman, Banjarnegara, 1994

28. Unit Pembangkit Mrica, Pelaksanaan penyelidikan sedimentasi waduk PLTA PB.Soedirman, Banjarnegara, 1993
29. Unit Pembangkit Mrica, Pelaksanaan penyelidikan sedimentasi waduk PLTA PB.Soedirman, Banjarnegara, 1992
30. Unit Pemeliharaan Cirata, Laporan pengukuran sedimentasi waduk Cirata, PT.PLN PJB II, Bandung, 2000
31. Van Rijn. LC, Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport, 1987
32. Vanoni, VA, Sedimentation Engineering, The ASCE Task Committee, New York, 1977
33. Yang, C.T, Sedimen Transport Theory and Practice, Singapore : McGraw-Hill, 1996