

**KAJIAN EFISIENSI TANGKAPAN SEDIMEN
PADA BEBERAPA WADUK DI JAWA**

TESIS

Disusun untuk Memenuhi Persyaratan
Program Magister Teknik Sipil

Oleh :

Edy Susilo
L 4A 098019



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

LEMBAR PENGESAHAN

**KAJIAN EFISIENSI TANGKAPAN SEDIMEN
PADA BEBERAPA WADUK DI JAWA**

Oleh :

Edy Susilo

L 4A 098019

Disetujui oleh :

Pembimbing I



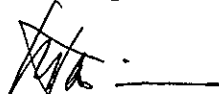
DR. IR. SURIPIN, M. ENG.

Pembimbing II



IR. DWI KURNIANI, MS

Pembimbing Utama :



DR. MARYONO BONY, DIPL. WRD, M. ENG

ABSTRAKSI

Sedimentasi sangat berpengaruh pada perencanaan umur waduk. Prediksi jumlah sedimen yang akan mengendap di dalam *dead storage* (tampungan mati) sangat tergantung pada prakiraan efisiensi tangkapan (*trap efficiency*) sedimen untuk waduk tersebut.

Efisiensi tangkapan sedimen didefinisikan sebagai prosentase sedimen yang mengendap terhadap sedimen yang masuk ke dalam sebuah waduk. Metoda prakiraan efisiensi tangkapan sedimen telah dikembangkan secara empiris oleh Brown (1944), Churchill (1947) dan Brune (1953) berdasarkan data yang diperoleh di Amerika Serikat. Mengingat bahwa metoda yang dikembangkan berdasarkan data empiris, maka penggunaannya di luar daerah dimana model tersebut dikembangkan perlu penyesuaian.

Studi ini mengevaluasi tingkat akurasi metoda prediksi tangkapan sedimen yang telah ada yakni; Brown, Churchill dan Brune, dengan menggunakan data dari 13 waduk yang ada di Jawa. Selanjutnya dilakukan penyesuaian-penyesuaian terhadap metoda-metoda tersebut jika perlu.

Dari hasil evaluasi diperoleh bahwa metoda Brown memberikan hasil yang cukup baik sehingga layak untuk digunakan dengan pembatasan luas daerah aliran sungai lebih dari 160 km^2 dan rasio kapasitas terhadap luas DAS lebih dari 0,005 ($10 \text{ Mm}^3/\text{km}^2$). Metoda Churchill baik yang berupa kurva maupun persamaan hasilnya kurang memuaskan, sehingga perlu penyesuaian. Sedangkan metoda Brune masih memberikan hasil yang cukup baik, namun penyesuaian diperlukan untuk mendapatkan hasil yang lebih baik. Dari semua metoda prediksi efisiensi tangkapan sedimen waduk, metoda Brune yang telah dimodifikasi adalah metoda terbaik.

ABSTRACT

The life time of reservoir is determined by the rate of deposition, particularly that fill up the dead storage. The prediction of the deposition rate in the dead storage is really depended on the trap efficiency of the reservoir.

Sediment trap efficiency is defined as the percentage of deposited sediment to the total sediment inflow in the reservoir. Empirical methods of trap efficiency prediction have been developed by Brown (1944), Churchill (1947) and Brune (1953), based on data obtained from the US. As they are empirical, their application is limited on where they were developed. The application outside of the area, the model need to be adjusted.

This study presents the evaluation of these three models based on data obtained from 13 reservoirs in Java. Furthermore, modification is carried out when is needed.

The evaluation found that Brown method gives acceptable prediction, particularly for watershed greater than 160 km^2 , with ratio of capacity to catchment area more than 0,005 ($10 \text{ Mm}^3/\text{km}^2$). Churchill method, on the other hand, gives less accurate prediction, therefore, adjustment is needed. Brune method also produce acceptable prediction, however its modification gives better estimation. All of the trap efficiency sediment prediction methods of the reservoir, the modification Brune is the best.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT dengan telah tersusunnya tesis mengenai efisiensi tangkapan sedimen beberapa waduk di Jawa yang merupakan salah satu syarat yang harus ditempuh untuk menyelesaikan studi di Program Studi Magister Teknik Sipil Program Pasca Sarjana Universitas Diponegoro.

Ucapan terima kasih penulis haturkan kepada Bapak Prof. Ir. Soediro selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro. Terima kasih pula kepada Bapak DR. Maryono Bony, Dipl. WRD, M. Eng. selaku Pembimbing Utama atas pengarahannya dalam penulisan tesis ini. Juga penulis haturkan terima kasih kepada Bapak DR. Ir. Suripin, M. Eng. selaku Pembimbing I dan Ibu Ir. Dwi Kurniani, MS. selaku Pembimbing II atas petunjuk, bimbingan dan sarannya. Demikian pula terima kasih penulis ucapkan kepada Bapak/Ibu Dosen Pengajar di Magister Teknik Sipil dan staf administrasi atas bantuannya untuk kelancaran penulisan tesis ini. Terakhir terima kasih penulis ucapkan kepada Bapak Rektor dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Semarang yang telah memberikan kesempatan dan bantuan kepada penulis untuk mengikuti pendidikan di Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro ini.

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 yang akan datang.

Semarang, 25 Juni 2001

Penulis

DAFTAR ISI

JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAKSI	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR NOTASI	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian	2
1.4. Kontribusi Penelitian	2
BAB II PENDEKATAN TEORI DAN METODOLOGI PRAKIRAAN	
EFISIENSI TANGKAPAN SEDIMEN	3
2.1. Tinjauan Umum	3
2.2. Efisiensi Tangkapan Sedimen (<i>Trap Efficiency</i>)	4
2.3. Sedimentasi pada waduk	5
2.3.1. Pendekatan Berdasar Survei Hidrografi	6
2.3.2. Pendekatan Berdasar Studi Sedimentologi	10
2.3.3. Pendekatan Hidrologi	15
2.4. Metoda Penentuan Efisiensi Tangkapan Sedimen	25
2.4.1. Metoda Brown	25
2.4.2. Metoda Churchill	26
2.4.3. Metoda Brune	28
2.5. Studi Sedimentasi yang Pernah Dilakukan	28

BAB III ANALISIS DAN PENGEMBANGAN METODA PRAKIRAAN	
EFISIENSI TANGKAPAN	34
3.1. Prosedur Umum	34
3.2. Evaluasi dan Verifikasi	42
3.3. Data Teknis Waduk	43
3.4. Perhitungan Sedimentasi Waduk	44
3.4.1. Pengendapan Sedimen dalam Waduk	44
3.4.2. Masukan Sedimen (<i>Sediment Inflow</i>)	44
3.5. Debit Aliran Masuk ke dalam Waduk	45
3.6. Efisiensi Tangkapan Sedimen Observasi	45
3.7. Evaluasi dan Verifikasi Metoda yang Ada	47
3.7.1. Menentukan Parameter yang Baik	47
3.7.2. Evaluasi Metoda yang Ada	50
3.7.3. Pengembangan/Modifikasi Metoda yang Ada	58
3.8. Pemilihan Model terbaik	66
BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN	68
DAFTAR PUSTAKA	70
LAMPIRAN	
Lampiran I : Data teknis waduk	73-75
Lampiran II : Pengendapan sedimen dalam waduk	76
Lampiran III-1 s/d III-13 : Sedimentasi waduk	77-141
Lampiran IV : Evaluasi parameter	142-144
Lampiran V : Modifikasi model Brown	145-148
Lampiran VI : Modifikasi model Churchill	149-150
Lampiran VII : Modifikasi model Brune	151-154

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 :	Tipe operasi waduk	8
Tabel 2.2 :	Berat jenis material menurut type operasional waduk	9
Tabel 2.3 :	Nilai faktor konsolidasi lempung, lumpur dan pasir	10
Tabel 2.4 :	Debit aliran dan sedimen inflow rata-rata	14
Tabel 2.5 :	Prosentase sedimen dasar menurut Borland dan Maddock	15
Tabel 2.6 :	Faktor tanaman dan pengelolaan	21
Tabel 2.7 :	Nilai Faktor P untuk berbagai tindakan konservasi tanah khusus	23
Tabel 2.8 :	Nilai faktor P dan batas panjang lereng	24
Tabel 2.9 :	Beberapa persamaan yang menyatakan hubungan antara karakteristik daerah tangkapan air (DTA) dan <i>sediment delivery ratio (SDR)</i>	24
Tabel 2.10 :	Penelitian terdahulu yang pernah dilakukan	29
Tabel 3.1. :	Hasil perhitungan sedimen inflow	45
Tabel 3.2. :	Efisiensi tangkapan sedimen	46
Tabel 3.3 :	Parameter-parameter yang mempengaruhi efisiensi tangkapan sedimen waduk	48
Tabel 3.4 :	Beberapa alternatif model dan koefisien korelasinya	49
Tabel 3.5 :	Data parameter untuk analisis kurva Brown	51
Tabel 3.6 :	Indeks perbedaan kurva Brown	52
Tabel 3.7 :	Data parameter untuk analisis persamaan/kurva Churchill	53
Tabel 3.8 :	Indeks perbedaan persamaan/kurva Churchill	55
Tabel 3.9 :	Data parameter untuk analisis kurva Brune	57
Tabel 3.10 :	Indeks perbedaan kurva Brune	57
Tabel 3.11 :	Indeks perbedaan pengembangan kurva Brown	59
Tabel 3.12 :	Indeks perbedaan modifikasi/pengembangan persamaan/kurva Churchill	62
Tabel 3.13 :	Indeks perbedaan modifikasi/pengembangan kurva Brune	66
Tabel 3.14 :	Indeks perbedaan rata-rata untuk semua metoda	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 :	Skema pengendapan sedimen di waduk dan metoda Perhitungannya	5
Gambar 2.2 :	Nomogram erodibilitas tanah K	20
Gambar 2.3 :	Nomogram faktor LS	21
Gambar 2.4 :	Efisiensi tangkapan sedimen menurut Brown	24
Gambar 2.5 :	Efisiensi tangkapan sedimen menurut Churchill	27
Gambar 2.6 :	Efisiensi tangkapan sedimen menurut Brune	28
Gambar 3.1 :	Diagram alur metodologi kajian efisiensi tangkapan sedimen	35
Gambar 3.2 :	Kurva efisiensi tangkapan sedimen Brown dan plotting data	51
Gambar 3.3 :	Double plotting observasi terhadap prediksi kurva Brown	52
Gambar 3.4 :	Double plotting observasi terhadap prediksi persamaan/kurva Churchill	55
Gambar 3.5 :	Double plotting observasi terhadap prediksi kurva Brune	56
Gambar 3.6 :	Efisiensi tangkapan sedimen observasi dan prediksi Churchill	61
Gambar 3.7 :	Double plotting observasi terhadap prediksi modifikasi persamaan/ Kurva Churchill	61
Gambar 3.8 :	Efisiensi tangkapan sedimen observasi dan modifikasi Brune	63
Gambar 3.9 :	Kurva median Brune dan modifikasi Brune	63
Gambar 3.10 :	Double plotting observasi terhadap prediksi modifikasi kurva Brune	65

DAFTAR NOTASI

γ_0	berat jenis endapan
γ_c	berat jenis lempung
γ_m	berat jenis lumpur
γ_o	berat jenis endapan
γ_s	berat jenis pasir
γ_T	berat jenis rata-rata endapan setelah T tahun
A	luas penampang melintang rata-rata
Ad	luas daerah aliran sungai
A_i	luas bidang kontur ke i
A_{i+1}	luas bidang kontur ke i+1
Br	<i>bifurcation ratio</i>
C	volume/kapasitas tampungan waduk
c	konsentrasi sedimen
C'	faktor tanaman penutup lahan dan manajemen tanaman, yaitu nisbah antara besarnya erosi dari suatu lahan dengan penutup tanaman dan manajemen tanaman tertentu terhadap lahan yang identik tanpa tanaman, tidak berdimensi.
CN	rata-rata jangka panjang dari kurva SCS
Csed	prosentase clay dalam sedimen
Csoil	prosentase clay dalam tanah
E	total energi kinetis hujan
E_A	banyaknya tererosi per satuan luas waktu, yang dinyatakan sesuai dengan satuan K dan periode R yang dipilih, dalam praktek dipilih ton/ha/tahun.
EI_{30}	intensitas energi kinetis dengan intensitas hujan
$EI_{30, \text{bulanan}}$	besarnya indeks erosi hujan bulanan
F_1	prosentase hutan
F_w	prosentase sawah.
g	percepatan gravitasi

H_i	elevasi garis kontur ke i
H_{i+1}	elevasi garis kontur ke $i+1$
I	debit aliran masuk ke dalam waduk tahunan
I_{30}	intensitas maksimum selama 30 menit
IK	indeks kesalahan
IS	indeks sedimentasi
I_s	Sedimen masuk waduk tahunan
K	faktor konsolidasi yang tergantung dari prosentase endapan
k	konstanta sedimen
K'	faktor erodibilitas tanah, yaitu laju erosi per indeks erosi hujan (R) untuk suatu tanah yang diperoleh dari petak percobaan yang panjangnya 22,13 m dan kemiringan 9 % tanpa tanaman
K_c	faktor konsolidasi untuk lempung
K_m	faktor konsolidasi untuk lumpur
K_s	faktor konsolidasi untuk pasir
L	panjang basin
L	panjang waduk
L'	faktor panjang lereng
$L'S$	faktor panjang-kemiringan lereng, yaitu nisbah antara besarnya erosi per indeks erosi dari suatu lahan dengan panjang dan kemiringan lahan tertentu terhadap besarnya erosi dari plot lahan dengan panjang 22,13 m dan kemiringan 9 % di bawah keadaan yang identik, tidak berdimensi.
m	tetapan yang harganya tergantung kemiringan lereng;
N	jumlah hari kejadian hujan dalam 1 bulan
P	faktor tindakan konservasi praktis, yaitu nisbah antara besarnya erosi dari lahan dengan tindakan konservasi praktis dengan besarnya erosi dari tanah yang diolah searah lereng dalam keadaan yang identik, tidak berdimensi.
p_e	prosentase lempung
p_m	prosentase lumpur
p_s	prosentase pasir
Q_s	debit sedimen

Q_w	debit air
Q_{wa}	runoff tahunan
R	faktor erosivitas hujan dan aliran permukaan, yaitu jumlah satuan indeks erosi hujan, yang merupakan perkalian antara energi hujan total (E) dan intensitas hujan maksimum 30 menit (I_{30}) tahunan
R_b	curah hujan bulanan
R_b'	relief basin
R_b'/L	rasio antara relief dan panjang basin
R_c	kerapatan gully
R_{max}	hujan maksimum 24 jam dalam 1 bulan
S	faktor kemiringan lereng
s	nilai kemiringan lereng
S	slope rata-rata DTA
SDR	<i>sediment Delivery Ratio</i>
S_{LS}	% slope saluran utama
S_y	produksi sedimen tiap tahun
T	waktu pengendapan
T_e	efisiensi tangkapan sedimen
T_{eo}	efisiensi tangkapan sedimen observasi
T_{ep}	efisiensi tangkapan sedimen prediksi
T_r	periode penahanan
V_{T1}	volume genangan pada pengukuran T_1
V_{T2}	volume genangan pada pengukuran T_2
$V_{\Delta T}$	volume sedimen dalam selang waktu ΔT
v	kecepatan rata-rata aliran masuk
V	Volume tampungan antara garis kontur ke i dan i + 1
X	panjang lereng

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Waduk adalah bangunan persungai terbesar yang dibuat manusia. Bangunan ini berfungsi menampung air untuk berbagai macam keperluan. Sayangnya aliran yang masuk tidak hanya air, tetapi juga membawa sedimen.

Sedimentasi merupakan salah satu permasalahan yang sangat penting dalam perencanaan bendungan, karena umur suatu waduk yang berkaitan dengan bendungan ditentukan oleh berapa lama volume tampungan mati (*dead storage*) akan terisi oleh material sedimen yang terendap. Dalam menentukan umur rencana bendungan, tidak hanya perlu mengetahui berapa banyak material sedimen dan jenisnya yang masuk ke dalamnya tetapi juga berapa banyak sedimen tersebut yang akan mengendap. Perhitungan pengendapan sedimen di dalam waduk dapat didekati dengan konsep efisiensi tangkapan (*trap efficiency*) sedimen dari suatu waduk.

Tiap waduk memiliki efisiensi tangkapan sedimen yang berbeda. Pergerakan sedimen di dalam waduk banyak dipengaruhi oleh aliran sungai, angin dan panas matahari (Evrard, J, 1985). Pada umumnya prediksi pengendapan sedimen waduk di Indonesia didasarkan pada kurva efisiensi tangkapan sedimen Brune (1953). Prediksi ini pada kenyataannya tidak sepenuhnya sesuai dengan pengendapan sedimen yang terjadi. Kesalahan kemungkinan dapat terjadi karena adanya sedimen masuk yang tidak terukur, metoda pengambilan sampel sedimen yang tidak benar atau prediksi pengendapan sedimen yang salah. Oleh sebab itu pengetahuan tentang efisiensi tangkapan sedimen ini sangat penting.

UPT-PUSTAKA-UNDIP

1.2. Perumusan Masalah

Efisiensi tangkapan (*trap efficiency*) sedimen sebuah waduk didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah sedimen yang mengendap di dalam waduk dengan jumlah sedimen yang masuk ke dalamnya. Selama ini prediksi umur waduk di Indonesia didasarkan pada hasil penelitian efisiensi tangkapan sedimen waduk di luar negeri khususnya di USA. Besarnya efisiensi tangkapan sedimen waduk menurut Brown (1944) dipengaruhi oleh parameter kapasitas waduk dan luas daerah aliran sungai. Churchill (1947) memilih parameter kapasitas waduk, debit aliran masuk dan panjang waduk. Sedangkan Brune (1953) memandang efisiensi tangkapan sedimen lebih ditentukan oleh kapasitas waduk dan debit aliran yang masuk. Semua prediksi efisiensi tangkapan sedimen waduk tersebut didasarkan pada data empiris masing-masing waduk. Adanya perbedaan karakteristik waduk tersebut dengan waduk-waduk yang ada di Jawa pada khususnya ditinjau dari parameter-parameter yang mempengaruhinya masih dimungkinkan untuk melakukan penelitian efisiensi tangkapan sedimen. Diharapkan penelitian masalah ini akan memberi manfaat yang cukup signifikan.

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji metoda penentuan efisiensi tangkapan sedimen yang ada (kurva Brown, Churchill dan Brune) untuk beberapa waduk di Jawa dan melakukan modifikasi untuk memperoleh hasil yang lebih baik.

1.4. Kontribusi Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat merumuskan/menggambarkan pola efisiensi tangkapan sedimen yang sesuai/cocok untuk diterapkan di Pulau Jawa pada khususnya.

BAB II

PENDEKATAN TEORI DAN METODOLOGI PRAKIRAAN EFISIENSI TANGKAPAN SEDIMEN

2.1. Tinjauan Umum

Terjadinya muatan sedimen pada badan air diawali dengan proses pelepasan butiran dari massa tanah oleh pukulan air hujan, selanjutnya butiran-butiran tanah tersebut dibawa oleh aliran permukaan ke dalam saluran hingga menuju alur sungai. Pada kondisi di mana energi aliran yang tersedia tidak lagi cukup untuk mengangkut partikel, maka akan terjadi pengendapan baik pada permukaan tanah, alur saluran dan sungai maupun muara. Aliran permukaan dalam perjalanannya menuju saluran juga akan mengikis permukaan tanah. Sesampainya di sungai, partikel-partikel tanah tersebut bergerak di dalam aliran menuju daerah hilir yang dapat berupa waduk, danau atau laut.

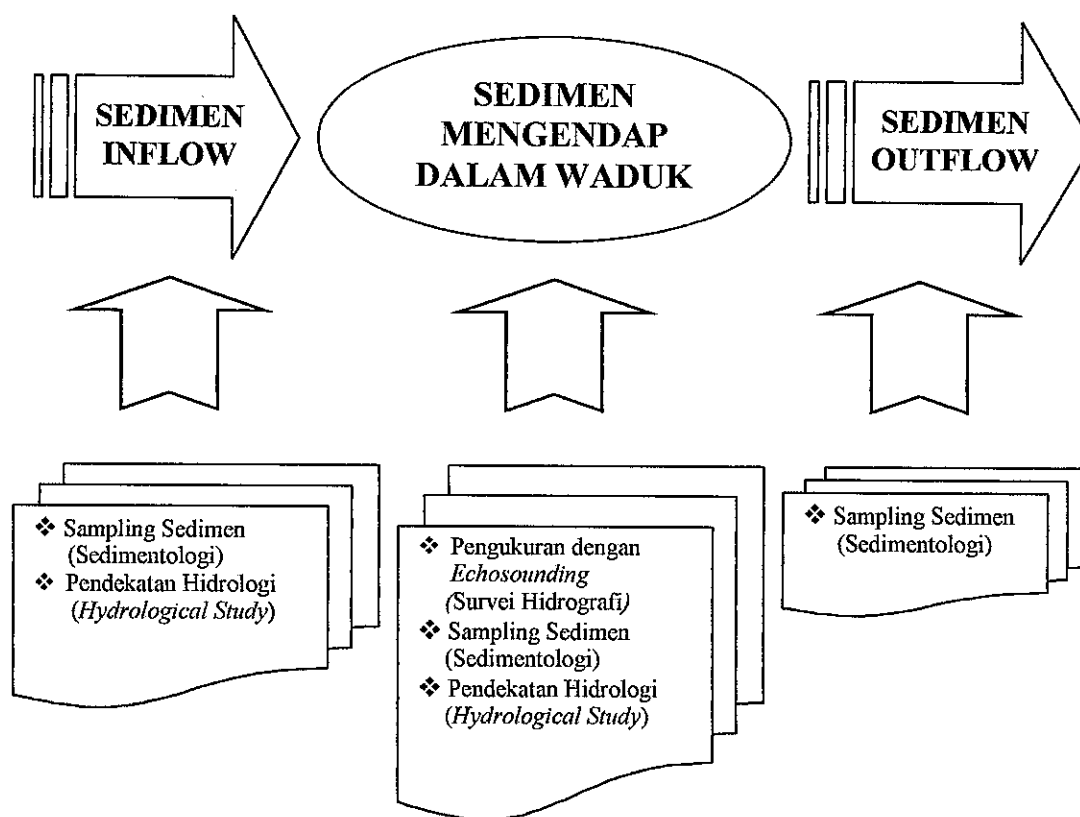
Partikel-partikel tanah yang selanjutnya akan menjadi muatan sedimen ini kemudian masuk ke dalam waduk, baik berupa muatan tersuspensi (*suspended load*) maupun muatan dasar (*bed load*). Berat ringannya erosi tergantung pada kuantitas suplai material yang terlepas dan kapasitas media pengangkut. Jika media pengangkut mempunyai kapasitas lebih besar dari pada suplai material yang terlepas, proses erosi dibatasi oleh pelepasan (*detachment limited*). Sebaliknya jika kuantitas suplai material melebihi kapasitas, proses erosi dibatasi oleh kapasitas (*capacity limited*) (Suripin, 2000). Air sungai yang mengandung sedimen mencapai suatu waduk, kecepatan dan turbulensinya akan jauh berkurang. Sedimen dasar akan mengendap sebagai suatu delta di bagian hulu waduk. Sedangkan sedimen tersuspensi (layang) dapat terbawa sampai bendungan dan akhirnya akan mengendap tersebar hampir di seluruh dasar waduk. Sebagian sedimen suspensi yang lain akan melewati bendungan bersama dengan air melalui pintu pengambilan, alur pembuangan, turbin atau pelimpah (*spill way*).

Semua waduk baik buatan maupun alamiah yang menampung air dari satu atau beberapa daerah aliran sungai yang masuk ke dalamnya, mempunyai masalah sedimentasi. Proses sedimentasi di waduk berlangsung secara terus-menerus sampai batas waktu tertentu.

Endapan sedimen di dalam waduk tidak hanya akan mengurangi kapasitasnya, tetapi juga dapat mempengaruhi pengoperasian bangunan di bawah seperti pintu pengambilan, pintu pembilas serta turbin. Akibat yang ditimbulkan akan berdampak pada fungsi waduk, terutama menyangkut kualitas air, pembangkit tenaga listrik serta untuk kepentingan rekreasi. Oleh karena itu masalah sedimentasi perlu diperhitungkan dengan cermat dalam hal perencanaan, desain, operasional serta pemeliharaan bendungan dan waduk.

2.2. Efisiensi Tangkapan Sedimen (*Trap Efficiency*)

Efisiensi tangkapan sedimen suatu waduk didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah sedimen yang tertahan di dalamnya dengan jumlah sedimen yang masuk. Umur sebuah waduk ditentukan oleh sedimen yang mengendap di dalam *dead storage* (tampungan mati). Jika angkutan sedimen sangat besar dibandingkan dengan kapasitas tampungan mati waduk, maka volume tampungan mati akan cepat penuh sehingga umur waduk akan cepat habis. Volume sedimen yang terendapkan di dalam waduk tergantung pada efisiensi tangkapan sedimen dan kepadatannya. Efisiensi tangkapan sedimen pada umumnya tergantung pada kecepatan jatuh partikel sedimen, kapasitas dan bentuk waduk, serta aliran yang masuk (Yang, 1996). Metoda empiris untuk memperkirakan efisiensi tangkapan sedimen didasarkan pada pengukuran sedimen yang masuk dan yang mengendap pada sejumlah waduk. Efisiensi tangkapan sedimen (T_e) akan semakin kecil sejalan dengan berkurangnya kapasitas waduk yang disebabkan oleh akumulasi pengendapan sedimen. Pemenuhan waduk oleh sedimen membutuhkan waktu yang panjang. Secara teoritis umur waduk akan habis ketika kapasitas tampungan matinya penuh. Konsep dasar perhitungan efisiensi tangkapan sedimen pada waduk adalah dengan mengukur sedimen yang masuk ke dalam waduk dan sedimen yang keluar. Dalam bentuk skema dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.1. Skema pengendapan sedimen di dalam waduk dan metoda perhitungannya

2.3. Sedimentasi pada Waduk

Perhitungan sedimen meliputi debit sedimen yang masuk, debit sedimen yang keluar dan pengendapan sedimen di dalam waduk. Sedimen yang mengendap di dalam waduk dapat dihitung dengan salah satu cara :

- Melakukan dua kali pengukuran volume tampungan waduk pada waktu yang berbeda dengan pendekatan survei hidrografi. Pengukuran dapat dilakukan sebelum dan setelah penggenangan. Atau kedua pengukuran tersebut dilakukan setelah waduk dioperasikan. Selisih kapasitas hasil pengukuran merupakan volume sedimen yang mengendap selama dalam selang waktu kedua pengukuran tersebut.
- Dengan mengurangkan sedimen yang masuk (*inflow*) dan sedimen yang keluar dari waduk (*outflow*).

Sedimen yang masuk ke dalam waduk dihitung dengan pendekatan sedimentologi atau hidrologi (*hydrological study*). Sedangkan sedimen yang keluar dihitung dengan pendekatan sedimentologi.

2.3.1. Pendekatan berdasar Survei Hidrografi

Metoda ini menghasilkan pengukuran yang lebih pasti dibandingkan dengan cara lain. Dengan metoda ini waduk diukur volume genangannya dengan pantulan suara (*echosounding*).

Daerah genangan waduk dibagi menjadi beberapa penampang lintang pada lokasi yang sesuai dengan kondisi lapangan dan dianggap dapat mewakili untuk perhitungan volume. Lokasi penampang ini akan digunakan pada pengukuran bentuknya. Pada setiap penampang lintang dilakukan pengukuran kedalaman terhadap suatu titik ikat. Dari hasil pengukuran ini dibuat peta kontur dengan beda elevasi tertentu, misalnya 2,50 m dengan skala peta 1:10.000. Perhitungan volume dengan menggunakan metoda luas kontur peta genangan. Dengan metoda ini 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 V.T., 1964) :

$$V = \frac{1}{3}(H_{i+1} - H_i)(A_i + A_{i+1} + \sqrt{A_i \cdot A_{i+1}}) \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$C = \sum V \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

- V = Volume tampungan antara garis kontur ke i dan i + 1 (m³)
- C = Volume tampungan waduk (m³)
- H_i = Elevasi garis kontur ke i (m)
- H_{i+1} = Elevasi garis kontur ke i+1 (m)
- A_i = Luas bidang kontur ke i (m²)
- A_{i+1} = Luas bidang kontur ke i+1 (m²)

Volume genangan seluruhnya (ΣV) dihitung dengan menjumlahkan seluruh volume di antara garis kontur ke i dan garis kontur $i+1$. Perhitungan volume dilakukan sebelum dan setelah waduk mengalami sedimentasi, misalnya dalam selang waktu ΔT . Volume sedimen yang diendapkan di dalam waduk pada selang waktu (ΔT) adalah selisih volume genangan sebelum dan setelah waktu ΔT tersebut.

$$V_{\Delta T} = V_{T_1} - V_{T_2} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana :

$V_{\Delta T}$ = Volume sedimen dalam selang waktu ΔT (m^3)

V_{T_1} = Volume genangan pada pengukuran T_1 (m^3)

V_{T_2} = Volume genangan pada pengukuran T_2 (m^3)

$\Delta T = T_2 - T_1$

Hasil perolehan pengukuran waduk dengan pendekatan survei hidrografi berupa volume sedimen, sedangkan hasil perhitungan sedimen yang masuk berupa berat. Untuk merubah volume menjadi berat perlu dihitung kepadatan endapan sedimen dari waktu ke waktu akibat pengaruh konsolidasi.

Kepadatan endapan sedimen dipengaruhi oleh (Yang, C.T. 1996) :

- Cara pengoperasian bendungan
- Susunan dan ukuran partikel endapan sedimen
- Jangka waktu pemadatan

Pengoperasian waduk dapat diklasifikasikan ke dalam 4 macam tipe (U.S.B.R, 1987) :

Tabel 2.1. Tipe operasi waduk

Tipe	Operasi Waduk
1	Sedimen selalu atau hampir selalu terendam
2	Surutan muka air waduk sedang sampai cukup besar
3	Dalam keadaan normal waduk kosong
4	Waduk dengan sedimen pada alur sungai

Sumber : Yang, C.T., 1996

Bila elevasi muka air waduk rata-rata sepanjang tahun hampir selalu penuh, waduk tergolong tipe operasi 1. Waduk tergolong tipe operasi 3, bila pada kondisi normal elevasi

muka air surut dan waduk kosong. Elevasi muka air waduk tipe operasi 2 mengalami pasang dan surut sedang sampai cukup besar sepanjang tahun atau dengan kondisi di antara tipe 1 dan tipe 3. Tipe operasi 4 bila dasar waduk sangat curam dan bentuk waduk sesuai dengan alur sungai. Setelah bendungan ditentukan tipe operasinya, kepadatan sedimen dihitung berdasarkan prosentase masing-masing butiran dan berat jenisnya. Menurut diameter butirannya material sedimen yang mengendap di dalam waduk diklasifikasikan menjadi : (Strand, R. I., 1974)

- Lempung : < 0.004 mm
- Lumpur : 0.004 - 0.0625 mm
- Pasir : 0.062 - 2.000 mm

Berat jenis endapan dihitung dengan rumus :

$$\gamma_o = \gamma_c p_c + \gamma_m p_m + \gamma_s p_s \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

- γ_o = berat jenis endapan awal (kg/m^3)
- γ_c = berat jenis lempung (kg/m^3)
- γ_m = berat jenis lumpur (kg/m^3)
- γ_s = berat jenis pasir (kg/m^3)
- p_c = prosentase lempung (%)
- p_m = prosentase lumpur (%)
- p_s = prosentase pasir (%)

γ_c , γ_m dan γ_s dilihat dari tabel berikut ini :

Tabel : 2.2. Berat jenis material menurut type operasi waduk

Tipe Operasi	Berat Jenis Material (kg/m^3)		
	γ_c	γ_m	γ_s
1	416	1120	1550
2	561	1140	1550
3	641	1150	1550
4	61	1170	1550

Sumber : Yang, C.T., 1996

Untuk menentukan kepadatan sedimen setelah T tahun dioperasikan, Miller (1953) merumuskan :

$$\gamma_T = \gamma_0 + 0,4343K \left(\frac{T}{T-1} \ln(T) - 1 \right) \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana :

γ_0 = berat jenis endapan awal (kg/m^3)

γ_T = berat jenis rata-rata endapan setelah T tahun (kg/m^3)

T = waktu pengendapan (tahun)

K = faktor konsolidasi yang tergantung dari prosentase endapan

$$K = K_c p_c + K_m p_m + K_s p_s \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

K = faktor konsolidasi endapan

K_c = faktor konsolidasi untuk lempung

K_m = faktor konsolidasi untuk lumpur

K_s = faktor konsolidasi untuk pasir.

p_c = prosentase lempung (%)

p_m = prosentase lumpur (%)

p_s = prosentase pasir (%)

Nilai K_c , K_m dan K_s didapat dari tabel berikut ini.

Tabel 2.3. Nilai faktor konsolidasi untuk lempung, lumpur dan pasir

Type Operasi	Nilai Faktor K (Satuan Metrik)		
	K_s	K_m	K_c
1	0	91	256
2	0	29	135
3	0	0	0
4	0	0	0

Sumber : Yang, C. T., 1996

2.3.2. Pendekatan berdasar Studi Sedimentologi

1) Masukan Sedimen (*Inflow*)

Setiap partikel sedimen yang melewati penampang melintang sungai merupakan hasil pengikisan permukaan tanah di atasnya dan/atau badan sungai yang kemudian diangkut oleh aliran air. Sedimen yang masuk ke dalam waduk terdiri dari sedimen layang dan sedimen dasar.

a) Sedimen layang (*Suspended Load*)

Sedimen ini bergerak melayang di atas dasar saluran. Secara umum pengumpulan data sedimen layang dapat dilakukan secara periodik atau harian. Pengumpulan data dan analisis sampel sedimen merupakan kegiatan yang sangat mahal. Hasil dari pengumpulan sampel dan debit aliran pada saat itu digunakan untuk mengembangkan suatu hubungan antara muatan sedimen dengan debit air. Data tersebut biasanya digambarkan pada kertas skala logaritma dengan debit air pada sumbu mendatar dan debit sedimen pada sumbu vertikal. Sebuah garis yang diperoleh dari persamaan regresi kemudian digambarkan melewati sebaran titik-titik yang telah diplotkan pada grafik tersebut. Data percobaan yang dilakukan secara periodik sering tidak memberikan gambaran yang sesuai untuk kondisi debit banjir dalam hal jumlah sedimen yang telah terangkut, karena sulitnya pengambilan sampel pada kondisi tersebut.

Debit air biasanya dicatat pada stasiun atau pos duga air yang tersedia untuk periode yang lama dan umumnya lebih lengkap daripada data sedimen. Data tersebut digunakan untuk menyusun sebuah kurva waktu aliran yang merupakan frekuensi kumulatif yang menunjukkan bahwa prosentase waktu pada debit tertentu sama atau lebih besar sesuai dengan periode yang diberikan. Untuk menyiapkan sebuah kurva waktu aliran, debit aliran harian yang telah dicatat, kemudian disusun menurut urutan dari besar ke kecil. Demikian juga prosentase waktu dimana alirannya sama atau melebihi harga tertentu. Kurva waktu aliran hanya menggambarkan aliran sebuah sungai untuk periode tertentu dimana data tersebut digunakan. Jika data aliran harian merupakan aliran jangka panjang dari suatu arus, maka kurva tersebut bisa dipertimbangkan sebagai kurva probabilitas dan dapat digunakan untuk memperkirakan besarnya aliran pada masa yang akan datang.

Untuk mendapatkan debit sedimen diperlukan debit air dan konsentrasi sedimen yang dikandung aliran pada debit tersebut di lokasi pos duga air. Bila data didapat dari AWLR, dengan bantuan grafik lengkung aliran (*discharge rating curve*), debit aliran dapat diketahui. Sedangkan konsentrasi sedimen diperoleh dengan mengambil sampel sedimen. Dengan anggapan partikel-partikel sedimen layang diangkut dengan kecepatan sama dengan kecepatan aliran, debit sedimen dapat dinyatakan sebagai hasil perkalian antara debit aliran dengan konsentrasi sedimen. Sehingga debit sedimen harian dinyatakan dengan persamaan :

$$Q_s = k \times c \times Q_w \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

$$\begin{aligned} k &= 0,0864 \\ c &= \text{konsentrasi sedimen (mg/l)} \\ Q_w &= \text{debit air (m}^3\text{/detik)} \\ Q_s &= \text{debit sedimen (ton/hari)} \end{aligned}$$

Dengan *power regression* untuk harga logaritma debit air ($\log Q_w$) dan logaritma debit sedimen ($\log Q_s$) diperoleh persamaan :

$$Q_s = a Q_w^b \quad (2.8.)$$

atau

$$\text{Log } (Q_s) = \text{log } (a) + b \text{ log}(Q_w) \quad (2.9.)$$

Dimana :

$$\begin{aligned} Q_w &= \text{debit aliran (m}^3\text{/dt)} \\ Q_s &= \text{debit sedimen (ton/hari)} \end{aligned}$$

a dan b adalah konstanta yang diperoleh dari persamaan regresi.

Koefisien korelasi (r) menunjukkan kekuatan hubungan antara kedua besaran tersebut. Koefisien korelasi antara variabel bebas (x) dan variabel bergantung (y) didefinisikan sebagai rasio antara kovariansi sampel dengan variansi masing-masing variabel bebas (x) dan variabel bergantung (y) dan dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan (Suryadi P.A., 1980) :

$$r(x, y) = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

$$r(x, y) = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

\bar{x} = variabel bebas rata - rata

\bar{y} = variabel bergantung rata - rata

x = variabel bebas

y = variabel bergantung

x_i = variabel x ke i

y_i = variabel y ke i

n = jumlah data

r = koefisien korelasi antara variabel x dan y

Pada hakekatnya nilai koefisien korelasi (r) bervariasi antara -1 hingga $+1$. Bila r sama dengan 0 atau mendekati 0 , maka hubungan antara kedua variabel sangat lemah atau tidak ada hubungan sama sekali. Bila r sama dengan $+1$ atau mendekati $+1$, maka korelasi antara kedua variabel tersebut dikatakan positif, sangat kuat dan bersifat sebanding atau searah. Kenaikan variabel x akan diikuti kenaikan variabel y , demikian pula sebaliknya. Dan bila r sama dengan -1 atau mendekati -1 , maka korelasinya dikatakan negatif, sangat kuat dan bersifat terbalik. Kenaikan variabel x akan diikuti turunnya variabel y , demikian pula sebaliknya. Dengan bentuk formula yang sama koefisien korelasi antara $\log Q_w$ dan $\log Q_s$ dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$r(\log Q_w, \log Q_s) = \frac{n(\sum \log Q_w)(\sum \log Q_s) - (\sum \log Q_w)(\sum \log Q_s)}{\sqrt{[n \sum \log Q_w^2 - (\sum \log Q_w)^2][n \sum \log Q_s^2 - (\sum \log Q_s)^2]}} \quad (2.12)$$

Bila harga $r(\log(Q_w), \log(Q_s))$ mendekati +1, berarti korelasi antara $\log Q_w$ dan $\log Q_s$ mendekati sempurna, tetapi sebaliknya bila harga r sangat jauh dari nilai +1, hubungan antara kedua variabel tersebut sangat lemah.

Dengan persamaan regresi untuk debit sedimen dan data debit aliran harian rata-rata, dapat dihitung inflow sedimen waduk rata-rata tahunan.

Pembuatan grafik *sediment rating curve* (lengkung debit sedimen) dan grafik *flow-duration curve* (lengkung waktu aliran) dilakukan dengan langkah-langkah berikut ini :

- Plotkan pengukuran sedimen layang (*suspended load*) terhadap debit air dari hasil pengamatan sungai pada kertas logaritma. Jika hasil dari plot titik-titik ini terlalu menyebar, untuk mendapatkan lengkung debit sedimen tunggal maka data seharusnya dikelompokkan menurut tipe aliran seperti aliran yang berdasarkan musim.
- Buat *flow-duration curve* (lengkung waktu aliran) selama periode waktu tertentu berdasarkan *sediment rating curve* (lengkung debit sedimen) yang menggunakan data pencatatan arus sungai.
- Buatlah tabel yang memuat interval waktu yang terlampaui (kolom 1), interval tengah (kolom 2) dan interval waktu (kolom 3) sebagaimana Tabel 2.4.
- Masukkan harga debit aliran Q_w (kolom 4) dan debit sedimen Q_s (kolom 5) dengan menggunakan grafik *flow-duration curve* (lengkung waktu aliran) dan grafik *sediment rating curve* (lengkung debit sedimen) sesuai harga interval tengah (kolom 2)
- Hitung total debit aliran (kolom 6) dengan cara mengalikan kolom 3 dengan kolom 4 dan total debit sedimen (kolom 7) dengan cara mengalikan kolom 3 dengan kolom 5
- Hitung debit rata-rata (m^3/dt) dengan menjumlahkan kolom 6 dan debit sedimen tahunan rata-rata (ton/tahun) dengan menjumlahkan kolom 7.
- Untuk mendapatkan debit aliran tahunan rata-rata ($m^3/tahun$), debit rata-rata dikalikan dengan 31.557.600 detik.
- Tambahkan sedimen dasar (*bed load*) dari hitungan yang menggunakan tabel Borland dan Maddock atau rumus sedimen dasar yang lain.

Tabel 2.4. Debit aliran dan sedimen *inflow* rata-rata

Kelas Interval Prosen Waktu (%)	Interval Prosen Waktu (%)	Interval Tengah (%)	Debit Aliran Q_w (m^3/dt)	Debit Sedimen Q_s (ton/hari)	Total Q_w (2)*(4)	Total Q_s (2)*(5)
1	2	3	4	5	6	7
0,00-0,02	0,01	0,02				
0,02-0,10	0,06	0,08				
0,1-0,5	0,3	0,4				
0,5-1,5	1,0	1,0				
1,5-5,0	3,25	3,5				
5,0-15	10	10				
15-25	20	10				
25-35	30	10				
35-45	40	10				
45-55	50	10				
55-65	60	10				
65-75	70	10				
75-85	80	10				
85-95	90	10				
95-98,5	96,75	3,5				
Total debit harian rata-rata					(m^3/dt)	(ton/hari)

b) Sedimen Dasar (*bed load*)

Sedimen ini bergerak di dasar saluran dengan cara menggelinding (*rolling*), menggeser (*sliding*) dan meloncat (*jumping*). Pengukuran sedimen dasar (*bed load*) secara langsung sangat sulit dilakukan. Di samping itu penelitian secara intensif dalam masalah ini masih sangat kurang. Pengukuran sedimen dasar (*bed load*) biasanya dilakukan dengan pengambilan sampel dengan alat penangkap sedimen. Bila pengukuran sedimen dasar (*bed load*) tidak dilakukan, besarnya sedimen tersebut dapat diperkirakan dengan menggunakan tabel Borland dan Maddock (1951) yang tergantung pada konsentrasi dan gradasi butiran sedimen layang (*suspended load*) berupa clay, silt dan pasir.

Tabel 2.5. Prosentase sedimen dasar menurut Borland dan Maddock

Konsentrasi Sed. Layang	Jenis Bahan Sed. Dasar	Bahan Asal Sed. Layang	Prosentase Sed. Dasar Terhadap Sed. Layang
Kecil 1000 ppm ke bawah	Pasir	Sama dengan bahan bed load	50%
	Kerikil dan batu	Clay, silt dengan sedikit pasir	5%
Sedang 1000 - 7500 ppm	Pasir	Sama dengan bahan bed load	10 - 20 %
	Kerikil dan batu	Clay, silt, 25 % pasir atau kurang	5 - 10 %
Besar 7500 ppm ke atas	Pasir	Sama dengan bahan bed load	10 - 20 %
	Kerikil dan batu	Clay, silt, 25 % pasir atau kurang	2 - 8 %

Sumber : Puslitbang PU (1989) di dalam Borland dan Maddock (1951)

2) Sedimen Keluar (*Outflow*)

Sedimen yang keluar dari waduk hanya terdiri dari sedimen layang yang dapat diketahui dengan melakukan pengukuran atau mengambil sampel sedimen dari aliran yang keluar melalui pintu pengambilan maupun pelimpah (*spill way*).

2.3.3. Pendekatan Hidrologi

Jika data sedimentasi tidak tersedia, maka masukan sedimen dapat diperkirakan dengan pendekatan hidrologi, yaitu menggunakan persamaan umum kehilangan tanah yang disebut dengan *Universal Soil Loss Equation (USLE)* dikombinasikan dengan nisbah pengangkutan sedimen atau *Sediment Delivery Ratio (SDR)*.

1) *Universal Soil Loss Equation (USLE)*

Persamaan umum kehilangan tanah (*USLE*) dapat dirumuskan dalam bentuk :

$$E_A = R \times K \times LS \times C \times P \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana : (Suripin, 2000)

- E_A = banyaknya tanah tererosi per satuan luas waktu, yang dinyatakan sesuai dengan satuan K dan periode R yang dipilih, dalam praktek dipilih ton/ha/tahun.
- R = faktor erosivitas hujan dan aliran permukaan, yaitu jumlah satuan indeks erosi hujan, yang merupakan perkalian antara energi hujan total (E) dan intensitas hujan maksimum 30 menit (I_{30}) tahunan dalam KJ/ha.
- K = faktor erodibilitas tanah, yaitu laju erosi per indeks erosi hujan (R) untuk suatu tanah yang diperoleh dari petak percobaan yang panjangnya 22,13 m dan kemiringan 9 % tanpa tanaman, satuan ton/KJ
- LS = faktor panjang-kemiringan lereng, yaitu nisbah antara besarnya erosi per indeks erosi dari suatu lahan dengan panjang dan kemiringan lahan tertentu terhadap besarnya erosi dari plot lahan dengan panjang 22,13 m dan kemiringan 9 % di bawah keadaan yang identik, tidak berdimensi.
- C = faktor tanaman penutup lahan dan manajemen tanaman, yaitu nisbah antara besarnya erosi dari suatu lahan dengan penutup tanaman dan manajemen tanaman tertentu terhadap lahan yang identik tanpa tanaman, tidak berdimensi.
- P = faktor tindakan konservasi praktis, yaitu nisbah antara besarnya erosi dari lahan dengan tindakan konservasi praktis dengan besarnya erosi dari tanah yang diolah searah lereng dalam keadaan yang identik, tidak berdimensi.

a) Faktor Erosivitas Hujan (R)

Penyebab erosi tanah adalah pengaruh pukulan air hujan pada tanah. Hujan menyebabkan erosi tanah melalui dua jalan; yaitu pelepasan butiran tanah oleh pukulan air hujan pada permukaan tanah dan kontribusi hujan terhadap aliran. Faktor erosivitas hujan, R, didefinisikan sebagai jumlah satuan indeks erosi hujan dalam setahun (Suripin, 2000).

Menurut Kohnke dan Bertrand (1959) dalam hubungannya dengan hujan, erosi tanah dapat terjadi bila dipenuhi beberapa syarat :

- Lereng cukup miring untuk menggeser tanah
- Ada lapisan yang cukup kedap beberapa sentimeter di bawah permukaan tanah
- Cukup air untuk membuat tanah di atas lapisan kedap menjadi jenuh.

Jumlah curah hujan rata-rata yang tinggi dalam suatu periode ada kemungkinan tidak mengakibatkan erosi jika intensitasnya rendah. Demikian juga halnya hujan dengan intensitas besar tetapi terjadi pada periode waktu yang sangat singkat. Sifat-sifat hujan yang dianalisis adalah jumlah curah hujan, intensitas hujan, energi kinetik hujan dan intensitas maksimum selama 30 menit. Menurut Wischmeier (1959) terdapat korelasi yang erat antara intensitas hujan maksimum selama 30 menit dengan erosi, dibandingkan dengan intensitas hujan maksimum selama 5, 15 maupun 60 menit.

Interaksi energi dan intensitas hujan yang diutarakan oleh Wischmeier dan Smith (1959) adalah perkalian antara total energi kinetik dengan intensitas maksimum selama 30 menit. Walaupun perhitungan ini dikembangkan di Amerika Serikat tetapi menurut berbagai penelitian ternyata cukup memuaskan untuk diterapkan di Indonesia (Barus dan Suwardjo, 1977)

Energi kinetik tersebut dihitung dengan rumus :

$$E = 210,3 + 89 \log I \quad \dots\dots\dots (2.14.)$$

Dimana :

E = Energi kinetik (ton-meter/ha/cm hujan)

I = Intensitas hujan (cm/jam)

Faktor erosivitas dapat didekati dengan rumus :

$$EI_{30} = E (I_{30} \cdot 10^{-2}) \quad \dots\dots\dots (2.15.)$$

Dimana :

- EI_{30} = Intensitas energi kinetis dengan intensitas hujan sebagai indeks erosivitas hujan
 E = Total energi kinetis hujan (Joule/m²)
 I_{30} = Intensitas maksimum selama 30 menit

Hudson (1977) dalam penelitiannya di Afrika menyatakan intensitas hujan yang terlalu kecil tidak berpengaruh terhadap erosi. Ia mendapatkan bahwa batas intensitas ini adalah 1 inchi/jam, maka ia mengusulkan bahwa rumus-rumus di atas dapat digunakan untuk I lebih besar dari 1 inchi per jam.

Kemudian Lenvein (1975) dan Bols (1978) telah membuat suatu pendekatan terhadap besar EI_{30} selama penelitiannya di Indonesia.

Formula Lenvein digambarkan dalam bentuk :

$$EI_{30, \text{harian}} = 2,60 R_{\text{harian}}^{1,88} \quad (r^2 = 0,93) \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

$$EI_{30, \text{bulanan}} = 2,21 R_{\text{bulanan}}^{1,36} \quad (r^2 = 0,87) \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

Di Indonesia pada umumnya akan banyak mengalami kesulitan dalam menggunakan EI_{30} , karena fasilitas penakar hujan otomatis sulit diperoleh pada stasiun penakar hujan yang ada dan hanya dapat dijumpai pada stasiun iklim tertentu. Bols (1978) telah mengadakan pendekatan dalam menghitung EI_{30} dengan menggunakan data hujan harian, banyaknya hari hujan dan hujan bulanan. Dengan demikian besarnya erosivitas dihitung dengan rumus Bols (1978) dalam formula :

$$EI_{30, \text{bulanan}} = 6,119 R_b^{1,211} N^{-0,474} \cdot R_{\text{max}}^{0,526} \quad \dots\dots (2.18)$$

Dimana :

- $EI_{30, \text{bulanan}}$ = besarnya indeks erosi hujan bulanan (KJ/ha)
 R_b = curah hujan bulanan (cm)
 N = jumlah hari kejadian hujan dalam 1 bulan
 R_{max} = hujan maksimum 24 jam dalam 1 bulan (cm)

Apabila hujan maksimum harian selama 24 jam yang akan dihitung erosivitasnya tidak ada, maka dapat digunakan formulasi :

$$EI_{30,bulanan} = 2,21 R_b^{1,36} \dots\dots\dots (2.19)$$

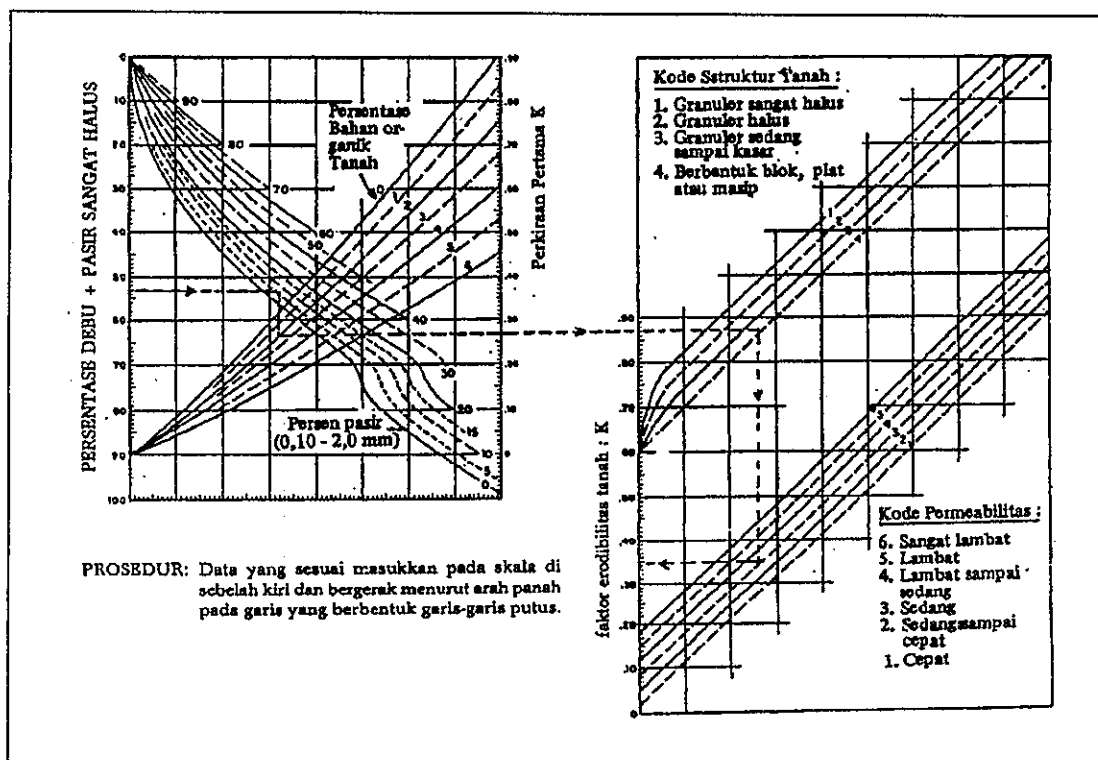
Dimana :

- $EI_{30,bulanan}$ = besarnya indeks erosi hujan bulanan (KJ/ha)
- R_b = curah hujan bulanan (cm)

Pada lokasi-lokasi tertentu di Jawa untuk mendapatkan R dapat diperoleh dari peta erosivitas hujan. Peta tersebut umumnya telah dibuat untuk DAS utama di Jawa.

b) Faktor Erodibilitas Tanah (K)

Erodibilitas menyatakan laju erosi per indeks erosi hujan (R) untuk suatu tanah yang didapat dari petak percobaan standar, yaitu petak percobaan yang panjangnya 72,6 kaki (22 m) terletak pada lereng 9 % tanpa tanaman. Pengukuran indeks erodibilitas tanah dapat dilakukan di laboratorium atau di lapangan. Nilai erodibilitas tanah diperoleh dengan nomogram (Wischmeier, 1971) sebagaimana pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Nomogram erodibilitas tanah K (Wischmeier, 1971)

c) Faktor Panjang-Kemiringan Lereng (LS)

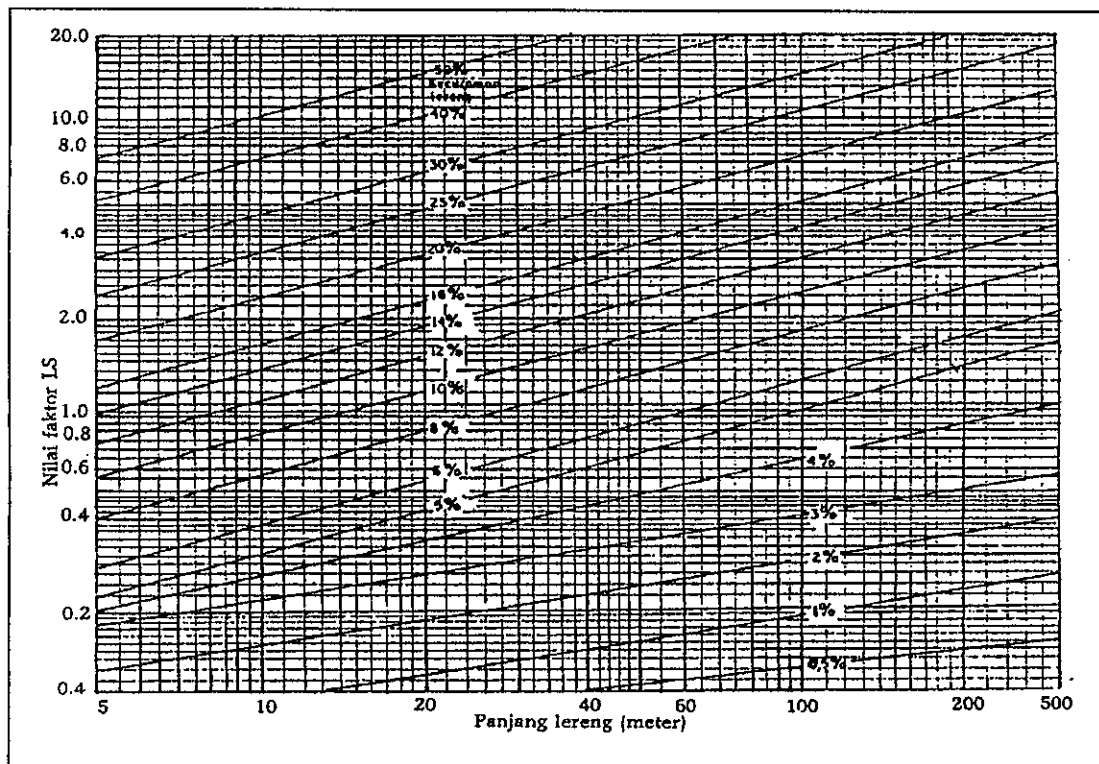
Faktor panjang-kemiringan lereng (LS) dapat dihitung dengan mencari panjang lereng L dan kemiringan S. Panjang lereng diukur dari tempat mulai terjadinya aliran air di atas permukaan tanah sampai ke tempat mulai terjadinya pengendapan (berkurangnya kecuraman lereng) atau ke tempat aliran air permukaan masuk ke dalam saluran. Faktor panjang lereng dihitung dengan persamaan (Wischmeier dan Smith, 1978) :

$$LS = (L/22,1)^m (0,065 + 0,045 s + 0,0065 s^2) \dots\dots\dots (2.20)$$

Dimana :

- LS = Faktor panjang-kemiringan lereng
s = Nilai kecuraman lereng (%)

Faktor panjang lereng LS dapat juga diperoleh dengan nomogram (Wischmeier dan Smith, 1965) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Nomograf faktor LS (Wischmeier dan Smith, 1965)

d) Faktor Tanaman Penutup Lahan dan Manajemen Tanaman (C)

Nilai faktor tanaman atau faktor C itu adalah nisbah atau perbandingan antara besarnya erosi atau tanah yang hilang dari lahan yang ditanami dengan tanaman tertentu, dengan besarnya erosi tanah yang terjadi pada lahan yang sama tetapi tanpa tanaman dan dengan panjang dan kemiringan lereng yang sama. Sebenarnya faktor tanaman ini merupakan pengaruh gabungan dari jenis tanaman, tingkat kesuburan, pengelolaan sisa-sisa tanaman, dan waktu serta cara pengelolaan tanah. Nilai faktor pengelolaan tanaman yang umum dipakai dapat dilihat dalam Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Faktor tanaman dan pengelolaan

No.	Macam Penggunaan Lahan	Nilai Faktor C
1	2	3
1.	Tanah terbuka, tanpa tanaman	1,0
2.	Hutan atau semak belukar	0,001
3.	Savana dan prairie dalam kondisi baik	0,01
4.	Savana dan prairie yang rusak untuk gembalaan	0,1
5.	Sawah	0,01
6.	Tegalan tidak dispesifikasi	0,7
7.	Ubikayu	0,8
8.	Jagung	0,7
9.	Kedelai	0,399
10.	Kentang	0,4
11.	Kacang tanah	0,2
12.	Padi gogo	0,561
13.	T e b u	0,2
14.	Pisang	0,6
15.	Akar wangi (sereh wangi)	0,4
16.	Rumput Bede (tahun pertama)	0,287
17.	Rumput Bede (tahun kedua)	0,002
18.	Kopi dengan penutup tanah buruk	0,2
19.	T a l a s	0,85
20.	Kebun campuran :	
	- Kerapatan tinggi	0,1
	- Kerapatan sedang	0,2
	- Kerapatan rendah	0,5

1	2	3
21.	Perladangan	0,4
22.	Hutan alam :	
	- Serasah banyak	0,001
	- Serasah kurang	0,005
23.	Hutang produksi :	
	- Tebang habis	0,5
	- Tebang pilih	0,2
24.	Semak belukar/padang rumput	0,3
25.	Ubi kayu + Kedelai	0,181
26.	Ubi kayu + Kacang tanah	0,195
27.	Padi - Sorghum	0,345
28.	Padi - Kedelai	0,417
29.	Kacang tanah + gude	0,495
30.	Kacang tanah + kacang tunggak	0,571
31.	Kacang tanah + mulsa jerami 4 ton/ha	0,049
32.	Padi + mulsa jerami 4 ton/ha	0,096
33.	Kacang tanah + mulsa jagung 4 ton/ha	0,128
34.	Kacang tanah + mulsa crotalaria 3 ton/ha	0,136
35.	Kacang tanah+ mulsa kacang tunggak	0,259
36.	Kacang tanah + mulsa jerami 2 ton/ha	0,377
37.	Padi + mulsa crotalaria 3 ton/ha	0,387
38.	Pola tanam tumpang gilir **) + mulsa jerami	0,079
39.	Pola tanam berurutan***) + mulsa sisa tanaman	0,357
40.	Alang-alang murni subur	0,001
41.	Padang rumput (steпа dan savana)	0,001
42.	Rumput brachiaria	0,002
*)	Data Pusat Penelitian Tanah (1973 - 1981 tidak dipublikasikan	
**)	Pola tanam tumpang gilir : jagung + padi + ubikayu setelah panen padi ditanami kacang tanah.	
***)	Pola tanam berurutan : padi - jagung - kacang tanah.	

Sumber : Dari berbagai sumber yang dihimpun dalam Sarief (1985), Arsyad (1989)

e) Faktor Tindakan Pengendalian Erosi (P)

Nilai faktor kegiatan manusia dalam pengawetan tanah (P) adalah nisbah atau perbandingan antara besarnya erosi atau tanah yang hilang pada lahan dengan tindakan pengawetan tertentu terhadap besarnya erosi tanah pada lahan tanpa tindakan pengawetan tanah sama sekali, pada keadaan panjang dan kemiringan yang sama.

Tabel 2.7. Nilai Faktor P untuk berbagai tindakan konservasi tanah khusus

No.	Tindakan Khusus Konservasi Tanah	Nilai P
1.	Terras bangku :	
	- Konstruksi baik	0,04
	- Konstruksi sedang	0,15
	- Konstruksi kurang baik	0,35
2.	Terras tradisional	0,4
	Strip tanaman rumput Bachiaria :	0,4
3.	Pengolahan tanah dan Penanaman menurut garis kontur :	
	- Kemiringan 0 - 8%	0,5
	- Kemiringan 9 - 20%	0,75
4.	- Kemiringan lebih dari 20 %	0,9
	Tanpa tindakan konservasi	1

Sumber : Arsyad, S. (1989) dan Seto, A.K. (1991)

Nilai faktor P dan batas panjang lereng untuk penanaman dalam strip (A), penanaman/ pengolahan menurut kontur (B) dan terras berdasar lebar (C) dinyatakan dalam tabel berikut (Wischmeier dan Smith, 1978) :

Tabel 2.8. Nilai faktor P dan batas panjang lereng

Kemiringan Tanah (%)	Penanaman dalam Strip			Penanaman Menurut Kontur		Terras Berdasar Lebar
	(1)	(2)	P	(2)	P	P
1 - 2	40	240	0,3	120	0,6	0,12
3 - 5	30	180	0,25	90	0,5	0,1
6 - 8	30	120	0,25	60	0,5	0,1
9 - 12	24	70	0,3	36	0,6	0,12
13 - 16	24	48	0,35	24	0,7	0,14
17 - 20	18	36	0,4	18	0,8	0,16
21 - 25	15	30	0,45	15	0,9	0,18

Keterangan :
 - (1) = Lebar strip (m)
 - (2) = Panjang lereng maksimum (m)
 - P = Nilai faktor P
 - Penanaman dalam Strip antara tanaman semusim dengan rumput (dengan ratio pergiliran : 4 - 2)

Sumber : Wischmeier dan Smith (1978) di dalam Arsyad S. (1989)

f) *Sediment Delivery Ratio (SDR)*

Dalam kenyataannya hanya sebagian kecil material sedimen hasil erosi di lahan mencapai *outlet* basin tersebut atau sungai/saluran terdekat. Hasil erosi yang mencapai saluran/sungai atau *outlet* basin biasa disebut produksi sedimen. Dalam perjalanannya dari tempat terjadinya erosi lahan sampai *outlet*, terjadi pengendapan baik pengendapan permanen ataupun sementara. Lokasi pengendapan terutama di daerah cekungan, daerah landai, dataran banjir dan di saluran itu sendiri. Perbandingan antara sedimen yang terukur di *outlet* dan erosi di lahan disebut nisbah pengangkutan sedimen (NPS) atau *Sediment Delivery Ratio (SDR)* (Suripin, 2000). Dengan demikian produksi sedimen dalam setahun untuk daerah aliran sungai seluas A dapat dirumuskan :

$$S_Y = SDR \cdot E_A \cdot A \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

Dimana :

- S_Y = Produksi sedimen tiap tahun (ton/th)
- SDR = *Sediment Delivery Ratio*
- E_A = Besar erosi tiap satuan luasan tiap tahun (ton/ha/tahun)
- A = Luas daerah aliran sungai (ha)

Besarnya *Sediment Delivery Ratio* sangat bervariasi antara satu daerah tangkapan air (DTA) dengan daerah tangkapan air lainnya dan bervariasi dari tahun ke tahun. SDR tidak hanya dipengaruhi oleh faktor luas DTA tapi juga faktor-faktor lain diantaranya geomorfologi, faktor lingkungan, lokasi sumber sedimen, karakteristik relief dan kemiringan, pola drainase dan kondisi saluran, penutup lahan, tataguna lahan dan tekstur tanah (Suripin, 2000). *Sediment Delivery Ratio (SDR)* dapat dihitung dengan beberapa rumus di bawah ini :

Tabel 2.9. Beberapa persamaan yang menyatakan hubungan antara karakteristik daerah tangkapan air (DTA) dan *sediment delivery ratio (SDR)*

No	Pengarang	Daerah Studi	Persamaan
1	Maner (1958)	Kansas, USA	$\log SDR = 2,962 + 0,869 \log R_b - 0,854 \log L$
2	Roehl (1962)	Southeastern USA	$\log SDR = 4,5 - 0,23 \log A - 0,510 \log (R/L) - 2,786 * \log B_r$
3	Williams & Berndt (1972)	Brushy Creek, Texas USA	$SDR = 0,627 SLP^{0,403}$
4	Mutchler dan Bowie (1975)	Pigeon Roost Creek, Miss; USA	$SDR = 0,488 - 0,006 A + 0,010 Q_{wa}$

5	Boyce (1975)		$SDR = 0,41 \cdot A^{-0,3}$
6	Williams (1977)	Texas, USA	$SDR = 1,366 \times 10^{-11} A^{-0,100} (R_b/L)^{0,363} CN^{5,444}$
7	Williams (1977)	Little Elm Creek, USA	$SDR = 4,40 \times 10^{-12} A^{-0,217} \times (R_b/L)^{0,3940} \times (CN)^{5,680}$
8	Mou & Meng (1980)	Dali River Basin, Shaan Xi, China	$SDR = 1,29 + 1,37 \ln R_c - 0,025 \ln A$
9	Walling (1983)	USA	$SDR (\%) = C_{soil}(\%) / C_{sed}(\%)$
10	Auerswald (1992)	Bavarian Watersheds	$SDR = -0,02 + 0,385 A^{-0,2}$
11	Suripin	Upper Solo	$\text{Log SDR} = 2,31 + 3,07 \log R_b + 0,41 \log S - 1,26 \log (F_l + F_w)$

Dimana : SDR=*Sediment Delivery Ratio*, R_b =relief basin, L=panjang basin, A=Luas basin, R_b/L =rasio antara relief dan panjang basin, B_f =*bifurcation ratio*, S_{LS} =% slope saluran utama, CN=rata-rata jangka panjang dari kurva SCS, Q_{wa} =runoff tahunan, R_c =kerapatan gully, C_{soil} dan C_{sed} adalah prosentase clay dalam tanah dan dalam sedimen, S=slope rata-rata DTA, (F_l dan F_w) adalah prosentase hutan dan sawah.

Catatan : satuan bervariasi antara satu persamaan dengan persamaan lainnya.

Sumber : Suripin (2000) dari beberapa sumber : Walling (1983), Williams (1977), Auerswald (1992), Yulien (1995)

Sedimen yang masuk ke dalam waduk besarnya sesuai dengan periode waktu yang ditentukan dan produksi sedimen tahunan.

g) Erosi Parit dan Alur

Beberapa studi tentang erosi tanah tidak membedakan antara pengaruh erosi alur dan erosi aliran permukaan (Suripin, 2000). Dengan demikian perhitungan erosi lahan dengan formula USLE tercakup di dalamnya erosi parit maupun alur.

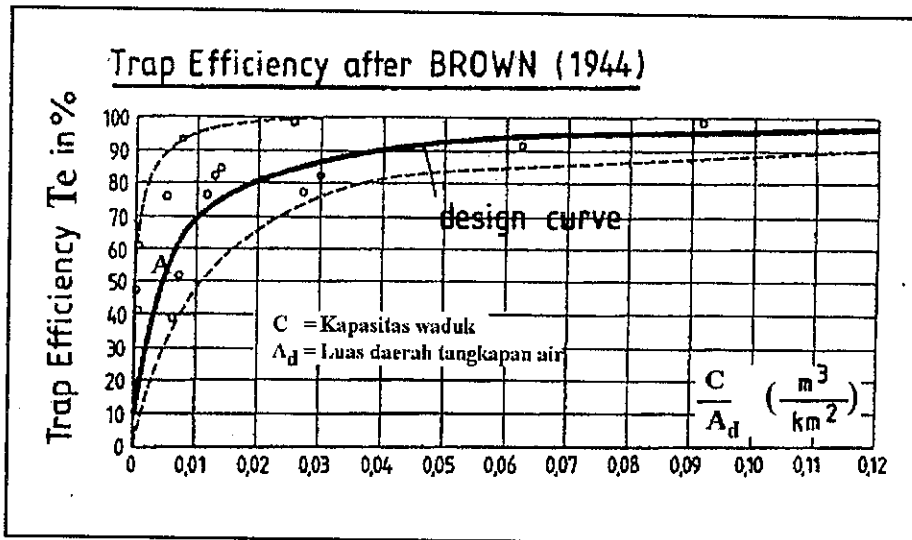
2.4. Metoda Penentuan Efisiensi Tangkapan Sedimen

2.4.1. Metoda Brown

Menurut Brown (1944), efisiensi tangkapan sedimen (T_e) sebanding dengan rasio kapasitas waduk dan luas daerah aliran sungai. (C/A_d). Pada umumnya daerah aliran sungai yang lebih luas akan menghasilkan debit inflow yang besar pada sebuah waduk. Namun Brown tidak memperhitungkan bentuk waduk, debit maupun kecepatan aliran yang masuk ke dalamnya. Dari gambar 2.4. terlihat bahwa kurva penutup hasil pengamatan efisiensi tangkapan sedimen beberapa waduk oleh Brown cukup lebar.

UPT-PUSTAK-UNDIP

Dengan hanya berdasarkan pada kurva desain, penyimpangan prediksi efisiensi tangkapan sedimen yang terjadi pada suatu waduk bisa sangat besar terutama untuk harga C/A_d kecil.

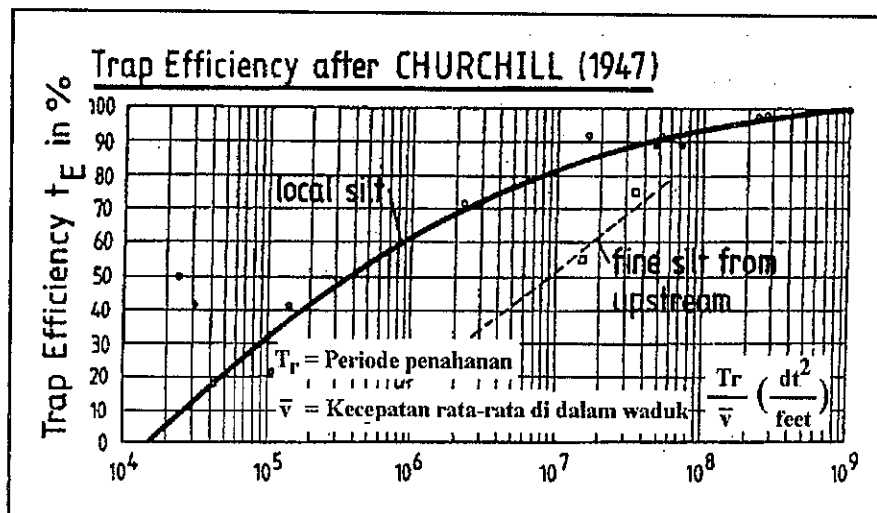


Sumber : Shuerlein, H. (1987)

Gambar 2.4. Efisiensi tangkapan sedimen menurut Brown (1953)

2.4.2. Metoda Churchill

Dari hasil penelitian Churchill (1947) dengan menggunakan data dari *Tennessee Valley Authority Reservoirs*, dan data yang ditambahkan oleh *United State Bureau of Reclamation* (USBR, 1987) menemukan hubungan antara indeks sedimentasi waduk



Sumber : Sheuerlein, H. (1987)

Gambar 2.5. Efisiensi tangkapan sedimen menurut Churchill (1947)

dengan prosentase sedimen yang keluar. Indeks sedimentasi waduk adalah rasio periode penahanan dengan kecepatan rata-rata aliran masuk. Periode penahanan diperoleh dari kapasitas waduk dibagi dengan debit aliran. Kecepatan rata-rata aliran didapat dari debit aliran masuk dibagi dengan luas penampang melintang rata-rata waduk. Luas penampang melintang rata-rata waduk merupakan rasio antara kapasitas waduk dengan panjangnya pada kondisi air penuh. Efisiensi tangkapan sedimen waduk besarnya 100 % dikurangi persentase sedimen yang keluar dari waduk. Dengan demikian sedimen yang berada dalam waduk merupakan fungsi dari waktu penahanan air waduk. Perhitungan dengan metoda Churchill dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$A = \frac{C}{L} \dots\dots\dots (2.22)$$

$$v = \frac{I}{A} \dots\dots\dots (2.23)$$

$$Tr = \frac{C}{I} \dots\dots\dots (2.24)$$

$$IS = \frac{Tr}{v} \dots\dots\dots (2.25)$$

$$k = IS \times g \dots\dots\dots (2.26)$$

$$Te = 100 - (1600 k^{-0,2} - 12) \dots\dots\dots (2.27)$$

Dimana :

C = Kapasitas waduk (feet³)

L = Panjang waduk (feet)

I = Debit aliran masuk (feet³/detik)

A = Luas penampang melintang rata-rata (feet²)

v = Kecepatan rata-rata aliran masuk (feet/detik)

Tr = Periode penahanan (detik)

IS = Indeks sedimentasi (detik²/feet)

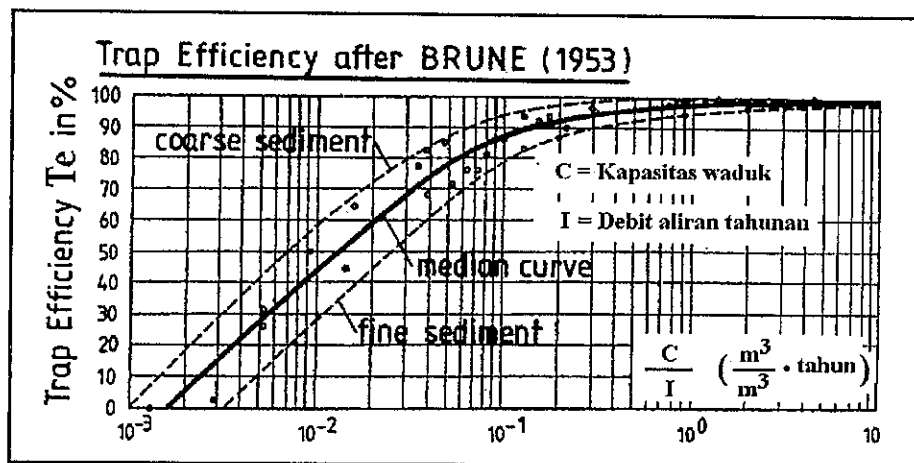
g = Percepatan gravitasi (feet/detik²)

k = Konstanta sedimen

T_e = efisiensi tangkapan sedimen (%)

2.4.3. Metoda Brune

Menurut Brune (1953) prosentase aliran sedimen yang ditahan di dalam sebuah waduk merupakan fungsi perbandingan kapasitas waduk dengan total aliran masuk tahunan (Linsley, 1972). Waduk kecil dengan inflow besar akan dilalui arus cepat sehingga menghanyutkan sedimen halus ke hilir. Pada keadaan lain waduk yang besar dapat menahan air selama beberapa tahun dan akan mengendapkan hampir semua sedimen layang (*suspended load*). Pengendapan sedimen di dalam waduk akan terus berlangsung dan berakibat akan menurunkan kapasitasnya. Hubungan efisiensi tangkapan sedimen (T_e) dengan rasio kapasitas dan inflow tahunan (T_e vs C/I) terlihat pada gambar 2.6 berdasarkan data dari hasil penelitian terhadap 41 kasus dari 35 waduk (Brune, 1953).



Sumber : Sheuerlein, H. (1987)

Gambar 2.6. Efisiensi tangkapan sedimen menurut Brune (1953)

2.5. Studi Sedimentasi yang Pernah Dilakukan

Beberapa lembaga maupun instansi pemerintah, swasta dan perguruan tinggi telah melakukan penelitian beberapa waduk di Jawa. Ringkasan hasil penelitian yang pernah dilakukan untuk masing-masing waduk dapat dilihat pada Tabel 2.10

Tabel 2.10. Penelitian terdahulu yang pernah dilakukan

No.	Nama Waduk	Sumber		Deskripsi Hasil Penelitian
1	2	3	4	5
1	Jailuhur/Juanda	1	ITB, 1987	Kapasitas waduk pada kondisi air normal hasil pengukuran tahun 1987 adalah 2,556 juta m ³ . Berarti terjadi pengurangan volume setelah 20 tahun waduk beroperasi sebesar 414 juta m ³ atau 20,7 juta m ³ /tahun.
				Persamaan luas genangan dan kapasitas waduk sebagai berikut : $L = 5,54 H^2 + 257,97 H - 13.244,2$ $V = 0,52 H^2 - 38,7 H + 743$ Dimana : H = kedalaman waduk
		2	Puslitbang Pengairan PU, 1995	Kapasitas waduk pada kondisi air normal hasil pengukuran tahun 1995 adalah 2,458 juta m ³ . Berarti terjadi pengurangan volume setelah 28 tahun waduk dioperasikan sebesar 512 juta m ³ atau 18,29 juta m ³ /tahun
2	Cirata	1	Hegar Daya, 1996	Grain size analisis Pengukuran dan penggambaran waduk 3 dimensi
		2	New JEC, 1985	Sedimen layang sungai Cisokan dan Cikundul Grain size analisis
		3	Unit Pemeliharaan Cirata, 2000	Hasil pengukuran kapasitas waduk tahun 1997 sebesar 1.925,50 juta m ³ , tahun 2000 sebesar 1.910,19 juta m ³ dari semula (1984) sebesar 1.973 juta m ³ . Terjadi pengendapan sedimen sebesar 62,810 m ³ juta .
3	Saguling	1	Unit Pembangkitan Saguling, 1999	Pengendapan sedimen pada waduk dalam periode waktu : Peb 1985-Juni 1987 : 2.940.246 m ³ Des 1987-Des 1988 : 1.583.463 m ³ Des 1988-Des 1989 : 3.992.651 m ³ Des 1989-Des 1990 : 3.269.853 m ³ Des 1990-Des 1991 : 3.019.621 m ³ Des 1991-Des 1992 : 3.234.036 m ³ Des 1992-Des 1993 : 4.076.992 m ³ Des 1993-Des 1994 : 4.205.095 m ³ Des 1994-Des 1995 : 4.139.966 m ³ Des 1995-Des 1996 : 4.226.388 m ³ Des 1992-Des 1997 : 4.035.755 m ³ Des 1992-Des 1993 : 4.521.803 m ³

1	2	3	4	5
		2	Puslitbang Pengairan PU, 2000	<ul style="list-style-type: none"> -Tingkat erosi DAS Citarum Hulu 21,7 ton/ha/tahun -Dengan kondisi tingkat erosi tersebut, maka umur waduk berkurang sebesar 8 % per tahun -Persamaan debit sedimen untuk Sungai Citarum Hulu : $Q_s = 6,23 Q_w^{1,561}$
4	Wadas Lintang		Geodeco Engineering Consultan, 1994	<ul style="list-style-type: none"> -Hasil pengukuran kapasitas waduk tahun 1993 dengan echo sounding adalah 439.779.739 m³ -Laju sedimentasi rata-rata dari penggenangan tahun 1996 sampai 1993 berdasarkan pengukuran 460.037 m³/tahun -Berdasarkan perhitungan angkutan sedimen layang erosi sub DAS Kali Tritik 1,9 mm/th. dan sub DAS Kali Medono 0,9 mm/th.
5	Sutami	1	Biro Litbang, 1998	<ul style="list-style-type: none"> -Sedimentasi pada waduk 1977-1982 → 40.382.505 m³ 1977-1987 → 69.267.129 m³ 1977-1994 → 76.407.316 m³ 1977-1997 → 78.253.862 m³
		2	KPRI Bhakti Adiguna, 1997 dan Biro Litbang, 1998	<ul style="list-style-type: none"> -Sedimentasi pada waduk 1973-1974 → 9.662.026 m³ 1974-1975 → 11.593.700 m³ 1975-1976 → 12.621.850 m³ 1976-1977 → 4.663.830 m³ 1977-1982 → 10.255.000 m³ 1983-1984 → 172.700 m³ 1984-1985 → 1.387.000 m³ 1985-1987 → 4.871.320 m³ 1987-1994 → 16.313.850 m³ 1994-1995 → 2.563.035 m³ 1995-1997 → 4.781.476 m³ 1997-1999 → 13.542.987 m³
6	Mrica/ Soedirman	1	Puslitbang PU, 1989	<ul style="list-style-type: none"> -Debit aliran harian rata-rata tahun 1988 S. Serayu (11,5-126 m³/dt), Merawu (3,4-75 m³/dt) dan Lumajang (0,47-2,6 m³/dt) -Debit sedimen harian rata-rata tahun 1988 S. Serayu (28,1-2645 ton/hari), Merawu (18,8-7585 ton/hari) dan Lumajang (1,42-134 ton/hari) -Hasil pengukuran kapasitas waduk tahun 1988 adalah 141.247.087,5 m³, (Catatan : kapasitas waduk awal penggenangan 140.685.337 m³)

1	2	3	4	5
		2	Unit Pembangkitan Mrica, 1998	<p>- Hasil pengukuran kapasitas waduk tahun 1998 sebesar $107.382.276 \text{ m}^3$</p> <p>- Debit aliran tahun 1998 sebesar $2.531.024.928 \text{ m}^3$</p> <p>- Angkutan sedimen layang yang masuk ke dalam waduk sebesar $7.502.702 \text{ m}^3$</p> <p>- Persamaan debit sedimen layang untuk sungai :</p> <p>Serayu : $Q_s = 0,756 Q_w^{2,084}$</p> <p>Merawu : $Q_s = 26,525 Q_w^{1,745}$</p> <p>Lumajang : $Q_s = 11,737 Q_w^{2,8864}$</p>
		3	Sudjarwadi, dkk, 1994	<p>- Laju erosi DAS waduk Mrica/ Soedirman sebesar $3,08 \text{ mm/thn}$</p> <p>- Nilai erosi sebesar itu setara dengan produksi sedimen inflow sebesar $4,715 \text{ juta ton/ tahun}$, sehingga kapasitas waduk berkurang sebesar $6,548 \text{ juta m}^3/\text{tahun}$</p>
7	Gajah Mungkur	1	Direktorat Penyelidikan Masalah Air Dep. PU, 1982	<p>- Erosi DAS waduk Gajah Mungkur berdasarkan perhitungan dengan metoda USLE sebesar $255.164.656,40 \text{ ton/tahun}$, yang setara dengan $7,37 \text{ mm/tahun}$.</p> <p>- Sedimentasi yang akan terjadi dengan erosi tersebut adalah $7.461.050 \text{ ton/tahun}$</p>
		2	Ilyas A, dkk 1986	- Sedimen transport selama 5 tahun (1981-1985) yang masuk ke waduk berdasarkan hasil perhitungan dengan metoda USLE sebesar $5,64 \text{ juta m}^3/\text{tahun}$ atau $4,47 \text{ mm/tahun}$
		3	Budiharja D, 1989	- Total sedimen transport yang masuk ke dalam waduk $2,8 \text{ juta ton/th}$ atau setara dengan erosi sebesar $3,8 \text{ mm}$
		4	PT. Citra Mandala Agitrans, 1993	<p>- Hasil pengukuran kapasitas waduk dengan echo sounding pada elevasi $+138 \text{ m}$ sebagai berikut :</p> <p>$7,18 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ (Nippon Koei Co, 1981)</p> <p>$6,59 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ (Geografi UGM, 1984)</p> <p>$5,24 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ (Proyek Brantas, 1985)</p> <p>$6,25 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ (Geografi UGM, 1985)</p> <p>$5,18 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ (Proyek. B. Solo, 1986)</p> <p>$5,20 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ (Proyek. B. Solo, 1987)</p> <p>$5,58 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ (Geografi UGM, 1985)</p> <p>$4,76 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ (Virma Karya, 1992)</p> <p>$4,72 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ (Citra Mandala A 1993)</p>

1	2	3	4	5
8	Selorejo	1	KPRI Bhakti Adiguna, 1997 dan Workshop Pengairan Unibraw 1999	<p>Sedimentasi pada waduk</p> <p>1970-1977 → 3.098.530 m³</p> <p>1977-1982 → 1.073.000 m³</p> <p>1982-1988 → 1.492.775 m³</p> <p>1988-1993 → 7.762.293 m³</p> <p>1993-1997 → 1.186.779 m³</p> <p>1997-1999 → 4.877.438 m³</p>
		2	Brabben, 1979	<p>Debit aliran dan debit sedimen Kali Kwayangan tahun 1979</p> <p>Debit aliran dan debit sedimen Kali Pinjal tahun 1979</p> <p>Debit aliran dan debit sedimen Kali Kunto tahun 1977, 1978, 1979.</p>
9	Sempor	1	Geodeco Engineering Consultan, 1994	<p>Laju sedimentasi pada waduk berdasarkan penelitian Fak. Geografi UGM tahun 1981, 1982 dan 1984 adalah :</p> <p>(1977-1981) 1.160.368 m³/th</p> <p>(1977-1982) 821.608 m³/th</p> <p>(1977-1984) 699.325 m³/th</p> <p>(1977-1993) 548.283 m³/th</p> <p>(1977-1981) 540.374 m³/th</p> <p>(1977-1981) 305.253 m³/th</p> <p>Persamaan debit sedimen :</p> $Q_s = 32,185 Q_w^{1,362}$ <p>Berdasarkan perhitungan angkutan sedimen layang, erosi sub DAS Kali sampang 6,2 mm/th. dan sub DAS Kali Kedung Waringin 9,6 mm/th.</p> <p>Hasil pengukuran kapasitas waduk dengan echo sounding tahun 1994 sebesar 34.923.924,48 m³</p> <p>Laju sedimentasi rata-rata dari penggenangan bln. Nopember 1977 sampai Januari 1984 berdasarkan pengukuran 76.222,56 m³/tahun</p>
10	Lahor	1	KPRI Bhakti Adiguna, 1997 dan Workshop Pengairan Unibraw 1999	<p>Sedimentasi pada waduk</p> <p>1977-1994 → 3.223.298 m³</p> <p>1994-1995 → 740.000 m³</p> <p>1995-1997 → 253.208 m³</p> <p>1997-1999 → 1.018.099 m³</p>
11	Sermo	1	Indra Karya PT., 1990	<p>Total Sedimen yang masuk ke dalam waduk sebesar 12.581 m³/tahun</p> <p>Laju erosi pada daerah aliran sungai waduk Sermo berdasarkan sedimen yang masuk diasumsikan sebesar 1mm/tahun</p>

1	2	3	4	5
		2	Tatareka Paradya, 1999	Sedimen layang dan dasar yang masuk ke dalam waduk sebesar 16.826,37 ton/tahun Debit aliran yang masuk ke dalam waduk sebesar 25,772 juta m ³ /tahun. Laju erosi 8,422 mm/tahun atau setara dgn. 162.487,34 m ³ /tahun. Pengendapan sedimen berda-sarkan pengukuran waduk selama periode oktober 1996 – okt 1998 sebesar 190.742 m ³ atau 95.371 m ³ /tahun
12	Wlingi	1	Brabben, 1979	Debit aliran dan debit sedimen Kali Brantas di Glondong tahun 1977 dan 1978
		2	KPRI Bhakti Adiguna, 1997 dan Workshop Pengairan Unibraw 1999	Sedimentasi pada waduk 1977-1979 → 582.780 m ³ 1977-1982 → 5.683.000 m ³ 1977-1985 → 9.555.770 m ³ 1982-1986 → 4.064.713 m ³
13	Sengguruh	1	Brabben, 1979	Debit aliran dan debit sedimen Kali Brantas di Sengguruh tahun 1977 dan 1978 Debit aliran dan debit sedimen Kali Brantas di Gadang tahun 1977, 1978 dan 1979
		2	Biro Litbang, 1998	Sedimentasi pada waduk 1988-1993 → 17.020.335 m ³ 1988-1996 → 19.026.361 m ³
13	Sengguruh	1	Brabben, 1979	Debit aliran dan debit sedimen Kali Brantas di Sengguruh tahun 1977 dan 1978 Debit aliran dan debit sedimen Kali Brantas di Gadang tahun 1977, 1978 dan 1979
14	Kedung Ombo ^{*)}	1	Puslitbang Pengairan PU, 1989	Total erosi aktual DAS Waduk Kedung Ombo 63.631,965 ton/tahun. Debit aliran sedimen layang untuk masing-masing sub DAS waduk : S. Serang : Qw = 137,51.10 ⁶ m ³ /th Qs = 832.641,63 ton/th. S. Laban : Qw=1,6*10 ⁸ m ³ /th Qs = 540.844,72 ton/th. S. Wonosari : Qw=308,78*10 ⁶ m ³ /th Qs = 310.191,05 ton/th. Total sedimen setelah ditambah sedimen dasar 10 % adalah 1.872.247 ton/th. Total debit aliran tahunan sebesar 6,063.10 ¹⁰ m ³ /th.
		2	Tera Buana Manggala Jaya, 1994	Kapasitas waduk dari hasil pengukuran echosounding tahun 1994 adalah 711.288.300 m ³ /th. Sedimentasi yang terjadi pada waduk setelah 5 tahun dioperasikan 11.932.582,20 m ³ atau 2.386.516,44 m ³ /th

^{*)} Waduk Kedung Ombo tidak dilakukan analisis lebih lanjut karena adanya perbedaan yang menyolok, yaitu sedimen yang mengendap jauh lebih besar daripada sedimen yang masuk. Lihat uraian pada halaman 47.

BAB III

ANALISIS DAN PENGEMBANGAN METODA PRAKIRAAN EFISIENSI TANGKAPAN

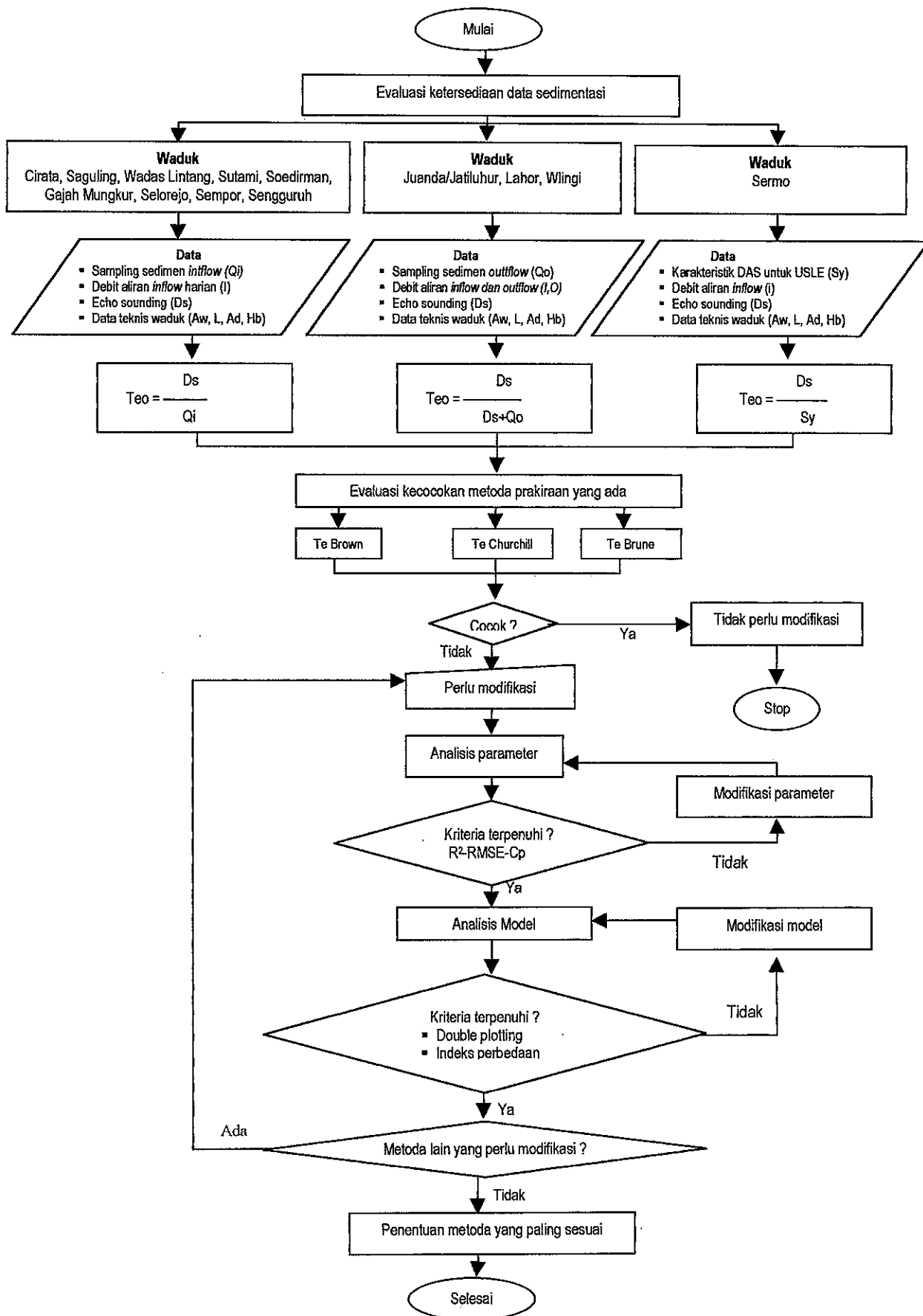
3.1. Prosedur Umum

Langkah-langkah penelitian prakiraan efisiensi tangkapan sedimen 13 waduk di Jawa dilakukan sebagaimana digambarkan pada diagram alur Gambar 3.1.

Gambaran rata-rata debit aliran harian yang terjadi dalam masa perhitungan data diperoleh dengan membuat *flow duration curve* (kurva waktu aliran). Kurva tersebut pada prinsipnya hanya berlaku dalam periode waktu pencatatan data yang digunakan untuk membuat kurva. Tetapi jika data aliran merupakan data dalam periode yang panjang maka kurva dapat dianggap sebagai kurva probabilitas dan dapat digunakan untuk estimasi di masa mendatang. Karena itu semakin panjang data pengukuran yang tersedia kurva waktu aliran yang terbentuk akan semakin baik, yang berarti dapat lebih mewakili karakteristik aliran sungai yang sebenarnya. Debit aliran dapat pula diperoleh dengan menjumlahkan debit harian selama beberapa tahun kemudian diambil harga rata-rata tahunannya.

Untuk mengetahui debit sedimen yang diangkut oleh suatu sungai, baik yang masuk, maupun yang keluar dari waduk, pendekatan sedimentologi dengan pengambilan sampel merupakan cara yang paling baik. Perhitungan sedimen layang didasarkan pada anggapan bahwa partikel-partikel sedimen tersebut diangkut bersama debit sungai dengan kecepatan sama dengan kecepatan aliran.

Perhitungan volume sedimen suspensi yang masuk ke dalam waduk melalui alur-alur sungai, menggunakan data debit berupa kurva waktu aliran bersama-sama dengan persamaan regresi lengkung debit sedimen suspensi. Secara teoritis untuk memperoleh lengkung debit sedimen suspensi dengan baik, setidaknya diperlukan data pengukuran, baik data aliran maupun data sedimen yang panjang agar dapat lebih menggambarkan



Gambar 3.1 Diagram alur metodologi kajian efisiensi tangkapan sedimen

fluktuasi aliran sedimen dari tahun ke tahun. Namun hal ini jarang sekali didapat, sehingga lengkung debit sedimen suspensi dibuat berdasarkan data yang ada, walaupun masih mengandung ketidakpastian cukup besar. Mengingat fluktuasi aliran dari tahun ke tahun tidak selalu sama, maka hubungan antara debit aliran dengan debit sedimen layang yang diperoleh pada tahun itu kurang tepat bila dipergunakan untuk memprediksi sedimen layang pada jangka waktu yang lebih panjang. Data pengukuran debit aliran pada stasiun-stasiun pengukuran pada umumnya tersedia pada waktu yang lebih panjang dibandingkan dengan data pengukuran sedimen layang. Selanjutnya total sedimen didapat dengan menambahkan sedimen layang dan sedimen dasar yang besarnya sesuai dengan prosentase lempung, lumpur dan pasir dengan menggunakan tabel Borland dan Maddock (Tabel 2.5).

Pendekatan hidrologi dilakukan bila tidak ada data sampel sedimen dan aliran baik yang masuk ke dalam waduk maupun yang keluar dari waduk. Pendekatan hidrologi mengandung ketidakpastian yang lebih tinggi daripada pendekatan sedimentologi karena parameter yang berpengaruh dalam perhitungan sedimen yang masuk ke dalam waduk cukup banyak. Dengan pendekatan ini sedimen *inflow* dihitung berdasarkan perkiraan besarnya erosi yang terjadi pada DAS waduk dengan formula *Universal Soil Loss Equation (USLE)* atau persamaan umum kehilangan tanah. Karena tidak semua hasil erosi masuk ke dalam waduk, besarnya sedimen inflow tergantung pada nisbah pengangkutan sedimen atau *Sedimen Delivery Ratio (SDR)*.

Volume sedimen di dalam waduk merupakan selisih dua kali pengukuran kapasitasnya dalam suatu periode pengamatan. Volume ini didapat dari hasil pengukuran dengan *echosounding*. Volume sedimen yang mengendap diubah menjadi berat dengan dibagi berat jenisnya. Penentuan berat jenis sedimen harus memperhitungkan jumlah masing-masing jenis material, lama waktu pengendapan dan tipe operasi waduk. Dalam penelitian ini tipe operasi waduk 1, 2 dan 3 ditentukan berdasarkan tinggi muka air waduk rata-rata terhadap kedalamannya pada kondisi normal (*elevasi ambang spill way*), dengan kriteria sebagai berikut :

- Tipe operasi 1 $80 \% < (H_{rata-rata}/H_{normal}) * 100 \%$
- Tipe operasi 2 $50 \% < (H_{rata-rata}/H_{normal}) * 100 \% < 80 \%$
- Tipe operasi 3 $(H_{rata-rata}/H_{normal}) * 100 \% < 50 \%$

Mengingat bahwa dalam penelitian ini menggunakan data sekunder, maka metoda yang digunakan dalam perhitungan efisiensi tangkapan sedimen, khususnya sedimen yang masuk ke dalam waduk (*inflow*) disesuaikan dengan data yang tersedia. Karena itu data dikelompokkan sesuai dengan kelompok data yang diperlukan oleh suatu metoda. Perhitungan efisiensi tangkapan sedimennyaapun dilakukan sesuai dengan pengelompokkan data tersebut.

Secara umum perhitungan sedimen *inflow* dilakukan dengan 3 cara :

- Berdasarkan perhitungan sedimen yang masuk dengan pendekatan sedimentologi.

Efisiensi tangkapan sedimen dihitung dengan persamaan :

$$Teo = \frac{Ds}{Qi} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

Dimana:

- Teo = efisiensi tangkapan sedimen observasi (%)
- D_s = deposit sedimen (ton), penjelasan pada sub bab 2.3.1
- Q_i = sedimen *inflow* (ton), penjelasan pada sub bab 2.3.2

- Berdasarkan perhitungan sedimen yang masuk dengan pendekatan hidrografi.

Efisiensi tangkapan sedimen dihitung dengan persamaan :

$$Teo = \frac{Ds}{Sy} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

Dimana:

- Teo = efisiensi tangkapan sedimen observasi (%)
- D_s = deposit sedimen (ton), penjelasan pada sub bab 2.3.1
- S_Y = produksi sedimen (ton), penjelasan pada sub bab 2.3.3

- Dengan menjumlahkan sedimen yang keluar berdasarkan pendekatan sedimentologi, dengan sedimen yang mengendap menurut hasil pengukuran kapasitas waduk berdasarkan pendekatan hidrografi.

Efisiensi tangkapan sedimen dihitung dengan persamaan :

$$Teo = \frac{D_s}{D_s + Q_o} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

Dimana:

- Teo = efisiensi tangkapan sedimen observasi (%)
- D_s = deposit sedimen (ton), penjelasan pada sub bab 2.3.1
- Q_o = sedimen yang keluar/*outflow* (ton), penjelasan pada sub bab 2.3.2

Selama ini ada tiga buah metoda untuk perkiraan sedimen yang mengendap di dalam waduk, yaitu metoda Brown (1944), metoda Churchill (1947) dan Brune (1953). Masing-masing metoda menggunakan parameter yang berbeda. Dengan hasil perhitungan efisiensi tangkapan sedimen 13 waduk di Jawa ini, dapat dilakukan evaluasi kecocokan metoda prakiraan yang ada tersebut.

Analisis parameter yang paling berpengaruh terhadap efisiensi tangkapan sedimen waduk dan persamaan regresi dilakukan dengan menggunakan program NCSS 1997. Menu program yang dipilih adalah sebagai berikut :

1) *All Possible Regressions*

Dengan menu ini akan didapatkan korelasi setiap variabel bebas yang ada terhadap variabel terikat. Jumlah data harus lebih banyak daripada jumlah variabel bebas, tetapi biasanya minimal untuk tiap lima buah data dapat menggunakan satu variabel bebas yang paling baik. Kekuatan korelasi setiap variabel akan tersusun dari yang paling kuat sampai yang lemah. Selanjutnya dibentuk suatu basis model dengan dua variabel, tiga variabel dan seterusnya. Variabel yang lemah atau sangat jauh akan dinyatakan dengan koefisien yang kecil, sebaliknya variabel yang kuat dengan koefisien besar. Dengan demikian akan diperoleh suatu model yang sangat sesuai dengan variabel yang ada. Suatu model dinyatakan sebagai model yang terbaik berdasarkan kriteria statistik yang sangat populer dan dapat digunakan untuk menilai sebuah model yaitu : *R-square*, *Root Mean square error (RMSE)* dan *Cp*. Dengan kriteria ini dapat ditentukan sebuah model terbaik yang dibentuk oleh variabel yang sesuai. Output dari menu ini tidak langsung menyatakan bentuk model, tetapi hanya variabel yang baik untuk membentuk sebuah model.

Masing-masing kriteria tersebut dinyatakan dengan rumus sebagai berikut :

a) *R-square*

$$R^2 = \frac{SS_{\text{model}}}{SS_{\text{total}}} \dots\dots\dots (3.4)$$

$$SS_{\text{model}} = \sum (Y_{pi} - \hat{Y}_o)^2 \dots\dots\dots (3.5)$$

$$SS_{\text{total}} = \sum (Y_{oi} - \hat{Y}_o)^2 \dots\dots\dots (3.6)$$

Dimana :

- \hat{Y}_o = nilai observasi rata-rata
- Y_{oi} = nilai observasi ke i
- Y_{pi} = nilai prediksi ke i
- SS model = *sum of square* model
- SS total = *sum of square* total
- R^2 = *R-square*

b) *Root Mean Square Error (RMSE)*

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{oi} - Y_{pi})^2}{n}} \dots\dots\dots (3.7)$$

Dimana :

- Y_{oi} = nilai observasi ke i
- Y_{pi} = nilai prediksi ke i
- n = jumlah data
- RMSE = *Root Mean Square Error*

Penyimpangan efisiensi tangkapan prediksi dapat dilihat dari harga akar rata-rata kuadrat kesalahan (*Root Mean Square Error* atau *RMSE*). Untuk memilih suatu model yang terbaik, *RMSE* seringkali lebih dipertimbangkan daripada kuadrat koefisien korelasi (R^2). Semakin kecil harga *Root MSE* model akan semakin baik.

c) *Kapabilitas (Cp)*

Kriteria lain untuk menentukan suatu model adalah dengan melihat nilai kapabilitas model (*Cp*). Sebuah model yang optimum memiliki harga *Cp* mendekati $p+1$, dimana p

adalah jumlah variabel bebas. Cp yang lebih besar dari p+1 menunjukkan regresi model tersebut kurang baik (*overspecified*), karena variabel bebas terlalu banyak dibandingkan dengan data yang ada. Cp yang kurang dari p+1 menunjukkan bahwa regresi model juga kurang baik (*underspecified*) karena paling tidak ada satu variabel bebas yang diabaikan. Rumus untuk menghitung Cp dinyatakan dalam persamaan (NCSS, 1997) :

$$Cp = \left[\frac{MSE_p}{MSE_k} \right] (n - p - 1) - \{n - 2(p + 1)\} \dots\dots\dots (3.8)$$

Dimana :

MSE_p	=	Mean Square Error dengan p variabel
MSE_k	=	Mean Square Error dengan k' variabel
p	=	jumlah variabel bebas pembentuk model
k'	=	jumlah total variabel bebas yang ada
n	=	jumlah data
Cp	=	kapabilitas model

Dengan tiga buah kriteria tersebut, yaitu *R-square*, *Root Mean square error (RMSE)* dan Cp dapat dipilih variabel bebas yang terbaik untuk membentuk sebuah model. Dengan demikian menu *All Possible Regressions* hanya untuk menentukan parameter terbaik pembentuk sebuah model. Parameter yang digunakan dalam metoda Brown, Churchill maupun Brune dapat dievaluasi dengan menu ini. Bila didapatkan suatu metoda dengan parameter yang tidak sesuai, dapat dilakukan modifikasi berdasarkan hasil analisis parameter tersebut.

Hasil perhitungan efisiensi tangkapan sedimen observasi untuk tiap waduk tidak selalu sama dengan prediksinya yang berdasarkan kurva maupun persamaan yang ada. Efisiensi tangkapan dengan metoda Brown dan Brune berdasarkan kurva yang dibuatnya dari hasil penelitian empiris. Analisis model ke dua metoda ini dengan hasil efisiensi tangkapan observasi juga dilakukan secara grafis pula. Sedangkan metoda Churchill, selain kurva juga dengan persamaan. Sehingga analisis model dari metoda ini selain dapat dilihat secara grafis, dapat pula dihitung dengan persamaan Churchill.

2) *Multivariate Ratio Search*

Menu program ini dapat mencari ratusan kurva potensial yang paling sesuai dengan data yang ada, dengan maksimum empat variabel bebas (U, V, W dan X). Variabel terikat (Y) merupakan variabel tunggal untuk prediksi sebuah model. Baik variabel terikat maupun variabel bebas dapat ditransformasikan ke dalam bentuk yang dimungkinkan, baik bentuk berbanding lurus (yaitu : Y , Y^2 , $\ln Y$, \sqrt{Y} dan X , X^2 , $\ln X$, \sqrt{X}) maupun bentuk berbanding terbalik (yaitu : $1/Y$, $1/Y^2$, $1/\sqrt{Y}$ dan $1/X$, $1/X^2$, $1/\sqrt{X}$). Hasil dari program ini akan memberikan petunjuk bentuk variabel bebas dan bentuk rasio polynomial yang paling cocok untuk mendapatkan sejumlah model yang dikehendaki, dengan mempertimbangkan nilai *R-square* (R^2) yang dirumuskan sebagaimana persamaan 3.4, 3.5 dan 3.6. Semakin tinggi nilai *R-square*, menunjukkan model semakin baik. Dapat pula dipilih jumlah parameter yang diinginkan, tentunya dengan mempertimbangkan kriteria model yang baik. Bentuk model secara sederhana dinyatakan dengan *Numerator* sebagai pembilang dan *Denominator* sebagai penyebut. Output dari menu ini berupa *R-square* (R^2), transformasi variabel terikat dan bebas, jumlah parameter dan bentuk model yang dinyatakan dengan numerator dan denominator. Bila sudah didapatkan output dari menu ini, selanjutnya proses diselesaikan dengan menu *Multivariate Ratio Fit*.

3) *Multivariate Ratio Fit*

Program ini membentuk sebuah model rasio polinomial dengan sebuah variabel terikat dan maksimum empat variabel bebas. Dengan model ini dapat dilakukan pendekatan berbagai bentuk kurva. Model diperoleh dengan cara memilih bentuk variabel terikat (Y) dan variabel bebas (U, V, W dan X) yang sesuai dan menentukan bentuk model yang dinyatakan sebagai *numerator* dan *denominator* seperti yang dihasilkan oleh *Multivariate Ratio Search*. Output dari menu ini berupa estimasi model, *confidence limit lower/upper* dengan tingkat kepercayaan yang dipilih oleh pemakai program, *R-square* (R^2) sebagaimana dirumuskan persamaan 3.4, 3.5, 3.6., analisis variansi, nilai prediksi dan residu.

4) *User Models*

Menu ini digunakan untuk mendapatkan sebuah model dengan bentuk tertentu, dan model tersebut dapat memenuhi variabel bebas yang tersedia. Variabel terikat merupakan

variabel tunggal yang dapat ditransformasi ke dalam beberapa bentuk yang diinginkan (Y , Y^2 , $\ln Y$, \sqrt{Y} , $1/Y$, $1/Y^2$ dan $1/\sqrt{Y}$). Variabel bebas dinyatakan dengan notasi huruf sesuai dengan yang ditulis pada lembar data. Parameter yang akan dicari menggunakan huruf A sampai dengan K, Alpha, Beta, gamma, delta dan lambda. Setiap parameter dapat dibatasi nilainya sesuai dengan yang dikehendaki. Jumlah parameter yang akan dicari maksimum sepuluh dan iterasi yang dapat dilakukan maksimum seribu. Hasil dari menu ini berupa estimasi model, hasil iterasi parameter, analisis varian, nilai aktual, nilai prediksi, residu dan *confidence limit lower/upper* dengan tingkat kepercayaan yang dipilih oleh pemakai program. Baik tidaknya sebuah model dilihat dari nilai *R-square* (R^2) sebagaimana dirumuskan pada persamaan 3.4, 3.5, 3.6. Sebuah model akan semakin baik untuk nilai *R-square* (R^2) mendekati satu.

3.2. Evaluasi dan Verifikasi

Evaluasi meliputi dua hal, yaitu evaluasi terhadap parameter dan evaluasi terhadap model. Evaluasi terhadap parameter didasarkan atas kriteria :

- *R-square* → Semakin mendekati 1, model semakin baik
- *Root Mean Square Error (RMSE)* → Semakin kecil, model semakin baik
- Kapabilitas model (C_p) → Semakin mendekati $p+1$, model semakin baik, dimana p adalah jumlah variabel bebas yang digunakan dalam model

Evaluasi terhadap model, sesuai atau tidaknya kurva/model tersebut untuk data observasi didasarkan pada dua buah kriteria, yaitu :

a) *Double Plotting*

Dengan memplotkan hasil perhitungan efisiensi tangkapan dari observasi (T_{eo}) dengan efisiensi tangkapan menurut prediksi yang ada, baik dengan kurva atau persamaan (T_{ep}), secara visual dapat dilihat penyebaran titik yang semakin dekat dengan garis diagonal dari grafik tersebut menunjukkan adanya kesesuaian efisiensi tangkapan prediksi dengan observasinya. Sebaliknya semakin jauh dari garis ini penyimpangan semakin besar.

b) Indeks Perbedaan

Indeks perbedaan didefinisikan sebagai rasio antara penyimpangan nilai prediksi dan nilai observasi terhadap nilai observasinya, yang dinyatakan dengan persamaan :

$$IP = \left| \frac{(Teo - Tep)}{Teo} \right| \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

Dimana :

- Teo = efisiensi tangkapan sedimen observasi (%)
- Tep = efisiensi tangkapan sedimen prediksi (%)
- IP = indeks perbedaan (%)

Indeks perbedaan menjadi tolok ukur diterima atau tidaknya suatu model, dengan batasan sebagai berikut :

- Indeks perbedaan : $IP < 10 \%$ → baik
- Indeks perbedaan : $10 \% < IP < 20 \%$ → dapat diterima
- Indeks perbedaan : $IP > 20 \%$ → tidak baik

3.3. Data Teknis Waduk

Data teknis yang akan diuraikan meliputi 13 waduk di Jawa yang menjadi obyek penelitian ini dengan sumber dari Pusat Penelitian dan Pengembangan Pengairan Departemen Pekerjaan Umum (1995).

Penjelasan yang akan disajikan mencakup tentang :

- Umum : Lokasi, manfaat, waktu pelaksanaan konstruksi, biaya, pengelola, konsultan perencana dan kontraktor.
- Hidrologi : Sungai, luas daerah aliran sungai dan curah hujan.
- Waduk : Luas dan volume waduk pada elevasi muka air banjir, normal dan minimum, volume mati serta volume efektif.
- Bendungan : tipe, tinggi, panjang, lebar dsb.

Uraian selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran I

3.4. Perhitungan Sedimentasi Waduk

3.4.1 Pengendapan Sedimen dalam Waduk

Data pengendapan sedimen di dalam waduk dari hasil pengukuran echosounding dalam bentuk volume. Untuk merubah volume menjadi berat ditentukan oleh berat jenis endapan setelah mengalami konsolidasi yang tergantung pada tipe operasi waduk, prosentase material sedimen yang mengendap (lempung, lumpur dan pasir) dan lama waktu pengendapan dengan menggunakan rumus Miller (persamaan 2.4, 2.5 dan 2.6). selengkapnya pengendapan sedimen dapat dilihat pada Lampiran II

3.4.2 Masukan Sedimen (*Sediment Inflow*)

Biasanya sedimen yang masuk ke dalam waduk *sediment rating curve-flow duration curve*. Data untuk membuat *sediment rating curve* dan *flow duration curve*, berasal dari data sekunder yang tersedia. Jika data sedimen tidak tersedia, masukan sedimen ke dalam waduk didekati dengan metoda *USLE (Universal Soil Loss Equation)* dan *Sediment Delivery Ratio (SDR)*. Metoda penghitungan masukan sedimen untuk 13 waduk dapat digolongkan menjadi 3 kelompok cara pendekatan, yaitu :

– Pendekatan sedimentologi dan hidrografi

Masukan sedimen yang dihitung dengan pendekatan sedimentologi dan hidrografi ada tiga waduk, yaitu Waduk Juanda/Jatiluhur (Lampiran III-1), Waduk Lahor (Lampiran III-10) dan Waduk Wlingi (Lampiran III-12). Perhitungan masukan sedimen untuk waduk tersebut disajikan pada lampiran masing-masing.

– Pendekatan sedimentologi

Masukan sedimen yang dihitung dengan pendekatan sedimentologi ada sembilan waduk, yaitu Waduk Cirata (Lampiran III-2), Waduk Saguling (Lampiran III-3), Waduk Wadas Lintang (Lampiran III-4), Waduk Sutami (Lampiran III-5), Waduk Soedirman/Mrica (Lampiran III-6) Waduk Gajah Mungjur (Lampiran III-7), Waduk Selorejo (Lampiran III-8), Waduk Sempor (Lampiran III-9), Waduk Sengguruh (Lampiran III-13) dan Waduk Kedung Ombo (Lampiran III-14). Perhitungan masukan sedimen waduk tersebut disajikan pada lampiran masing-masing.

– Pendekatan hidrologi

Masukan sedimen yang dihitung dengan pendekatan hidrologi formula *USLE (Universal Soil Loss Equation)* dan *Sediment Delivery Ratio (SDR)* ada satu, yaitu

Waduk Sermo. Sekalipun menurut beberapa studi erosi tanah tidak membedakan antara pengaruh erosi alur dan erosi yang terjadi pada permukaan, namun akibat debit sungai yang besar akan menimbulkan erosi pada badan sungai. Akan tetapi dalam perhitungan masukan sedimen waduk, erosi jenis ini diabaikan. Perhitungan masukan sedimen untuk waduk tersebut dapat dilihat pada Lampiran III-11.

Tabel 3.1 Hasil perhitungan sedimen inflow

No	Nama Waduk	Periode Pengamatan (bulan)	Deposit Sedimen (ton)	Produksi Sedimen Lahan (ton)	Berat Sedimen		Sedimen Inflow (ton)
					Outflow (ton)	Inflow (ton)	
1	Jailuhur/Juanda	96	$1,04 \times 10^8$	-	$1,13 \times 10^7$	-	$1,16 \times 10^8$
2	Cirata	36	-	-	-	$1,78 \times 10^7$	$1,78 \times 10^7$
3	Saguling	166	-	-	-	$5,54 \times 10^7$	$5,54 \times 10^7$
4	Wadas Lintang	84	-	-	-	$3,97 \times 10^6$	$3,97 \times 10^6$
5	Sutami	144	-	-	-	$5,15 \times 10^7$	$5,15 \times 10^7$
6	Mrica/Soedirman	22	-	-	-	$8,32 \times 10^7$	$8,32 \times 10^7$
7	Gajah Mungkur	26	-	-	-	$4,52 \times 10^6$	$4,52 \times 10^6$
8	Selorejo	23	-	-	-	$1,94 \times 10^7$	$1,94 \times 10^7$
9	Sempor	75	-	-	-	$6,34 \times 10^6$	$6,34 \times 10^6$
10	Lahor	204	$3,77 \times 10^6$	-	$4,74 \times 10^6$	-	$8,51 \times 10^6$
11	Sermo	24	-	$2,73 \times 10^5$	-	-	$2,73 \times 10^5$
12	Wlingi	108	$1,03 \times 10^7$	-	$2,15 \times 10^7$	-	$3,18 \times 10^7$
13	Sengguruh	36	-	-	-	$1,07 \times 10^7$	$1,07 \times 10^7$
14	Kedung Ombo	60	-	-	-	$5,08 \times 10^6$	$5,08 \times 10^6$

3.5. Debit Aliran Masuk ke dalam Waduk

Perhitungan selengkapnya debit aliran yang masuk ke dalam masing-masing waduk disajikan pada Lampiran III-1 sampai dengan Lampiran III-13

3.6. Efisiensi Tangkapan Sedimen Observasi

Dari jumlah angkutan sedimen yang masuk ke dalam waduk ini tidak semuanya akan mengendap di dalam waduk, tetapi ada sebagian yang akan keluar, yaitu melalui turbin, pelimpah, dan bangunan pengambilan. *Trap efficiency* atau efisiensi tangkapan sedimen menyatakan prosentase sedimen yang mengendap di dalam waduk terhadap sedimen yang masuk ke dalamnya. Dengan demikian efisiensi tangkapan sedimen dalam sebuah waduk dapat ditentukan berdasarkan jumlah sedimen yang mengendap dan masukan sedimen.

Hasil perhitungan debit aliran tahunan yang masuk ke dalam waduk, pengendapan sedimen yang terjadi pada waduk dan sedimen yang masuk ke dalamnya selama masa pengamatan sebagaimana telah diuraikan serta besarnya efisiensi tangkapan sedimen pada waduk dapat dilihat pada Tabel 13.2. Periode dan waktu pengamatan debit aliran masuk, pengendapan sedimen dan sedimen yang masuk untuk suatu waduk pada umumnya tidak sama, karena keterbatasan data yang ada.

Tabel 3.2 Efisiensi tangkapan sedimen

No.	Nama Waduk	Periode Pengamatan (bulan)	Deposit Sedimen (Ds) (ton)	Sedimen Inflow (Qi) (ton)	Efisiensi Tangkapan Sedimen (Teo) (%)
1	Jatiluhur/Juanda	96	$1,04 \times 10^8$	$1,16 \times 10^8$	90,22
2	Cirata	36	$1,57 \times 10^7$	$1,78 \times 10^7$	88,46
3	Saguling	166	$4,76 \times 10^7$	$5,54 \times 10^7$	85,97
4	Wadas lintang	84	$3,62 \times 10^6$	$3,97 \times 10^6$	91,13
5	Sutami	144	$4,12 \times 10^7$	$5,15 \times 10^7$	80,00
6	Mrica/Sudirman	22	$6,97 \times 10^6$	$8,32 \times 10^6$	83,79
7	Gajah Mungkur	26	$4,35 \times 10^6$	$4,52 \times 10^6$	96,21
8	Selorejo	23	$1,61 \times 10^7$	$1,94 \times 10^7$	83,08
9	Sempor	75	$5,08 \times 10^6$	$6,34 \times 10^6$	80,19
10	Lahor	204	$3,77 \times 10^6$	$8,01 \times 10^6$	44,31
11	Sermo	24	$2,26 \times 10^5$	$2,73 \times 10^5$	82,76
12	Wlingi	108	$1,03 \times 10^7$	$3,18 \times 10^7$	32,34
13	Sengguruh	36	$2,45 \times 10^6$	$1,07 \times 10^7$	23,02
14	Kedung Ombo	60	$1,91 \times 10^7$	$5,08 \times 10^6$	375,3

Untuk Waduk Kedung Ombo dapat dilihat bahwa efisiensi tangkapan sedimen waduk tersebut sebesar 375,30 %, dengan menggunakan debit aliran sebelum penggenangan

tahun 1984-1988, periode pengamatan sedimen mengendap tahun 1989-1994 dan data sampel sedimen tahun 1986-1989. Hal ini menunjukkan bahwa sedimen yang mengendap lebih besar daripada sedimen yang masuk, sesuatu yang tidak mungkin. Kesalahan dalam penghitungan efisiensi tangkapan sedimen Waduk Kedung Ombo ini kemungkinan disebabkan oleh beberapa hal :

- Data debit aliran harian sungai yang masuk ke dalam waduk diperoleh dari data debit simulasi hujan yang terjadi pada daerah aliran sungai yang belum dikalibrasi dengan data observasi. Hal ini berarti fluktuasi debit simulasi belum menggambarkan dengan benar sesuai debit yang terjadi. Padahal perbedaan debit aliran sangat berpengaruh pada debit sedimen, yang dalam hal ini berakibat sedimen terhitung lebih kecil dari pada debit sedimen sesungguhnya.
- Waktu pengambilan data debit aliran dan debit sedimen tidak sesuai dengan periode pengamatan pengendapan sedimen di dalam waduk. Perubahan tataguna lahan akan berpengaruh pada debit aliran dan debit sedimen.
- Pengukuran kapasitas waduk baru dilakukan dua kali, yaitu sebelum penggenangan dengan menggunakan peta dari foto udara dan setelah penggenangan dengan cara echosounding. Ketelitian dalam pengukuran dengan menggunakan foto udara lebih baik daripada dengan echosounding. Karena itu sedimentasi waduk yang diperoleh dari selisih dua kali pengukuran dengan cara yang berbeda ini kemungkinannya menghasilkan perhitungan volume sedimen yang mengendap dalam periode itu tidak sesuai.

Dengan data yang demikian ini maka untuk Waduk Kedung Ombo tidak disertakan dalam analisis dan evaluasi, sehingga jumlah waduk yang dianalisis dan dievaluasi lebih lanjut berjumlah hanya 13 waduk.

3.7. Evaluasi dan Verifikasi Metoda yang ada

3.7.1. Memilih Parameter

Beberapa parameter yang diasumsikan dapat mempengaruhi besarnya efisiensi tangkapan sedimen pada waduk adalah : kapasitas waduk (C), debit aliran tahunan (I), luas genangan waduk (Aw), luas DAS (Ad), tinggi bendungan (Hb), sedimen inflow tahunan (Is) dan

panjang waduk (L). Data pengukuran dan perhitungan parameter-parameter waduk tersebut dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel 3.3 Parameter-parameter yang mempengaruhi efisiensi tangkapan sedimen waduk

No	Nama Waduk	C (m ³)	I (m ³ /th)	Aw (m ³)	Ad (m ³)	Hb (m)	Is (t/th)	L (m)	Te (%)
1	Juanda/Jatiluhur	2,56.10 ⁹	6,66.10 ⁹	8,21.10 ⁷	4,50.10 ⁹	96	1,45.10 ⁷	8.000	90,22
2	Cirata	1,93.10 ⁹	5,21.10 ⁹	6,23.10 ⁷	4,12.10 ⁹	85	1,06.10 ⁶	8.000	88,46
3	Saguling	9,82.10 ⁸	3,02.10 ⁹	4,87.10 ⁷	2,28.10 ⁹	97,5	4,03.10 ⁶	24.530	85,97
4	Wadas Lintang	4,43.10 ⁸	8,58.10 ⁸	1,28.10 ⁷	1,96.10 ⁸	120	5,60.10 ⁵	10.500	91,13
5	Sutami	2,86.10 ⁸	2,92.10 ⁹	1,50.10 ⁷	2,05.10 ⁹	96	4,29.10 ⁶	21.500	80,00
6	Soedirman/Mrica	1,41.10 ⁸	2,04.10 ⁹	8,03.10 ⁶	1,02.10 ⁹	95	4,54.10 ⁶	9.450	83,79
7	Gajah Mungkur	5,24.10 ⁸	1,33.10 ⁹	6,44.10 ⁷	1,35.10 ⁹	30	2,09.10 ⁶	22.500	96,21
8	Selorejo	6,23.10 ⁷	3,08.10 ⁸	4,00.10 ⁶	2,36.10 ⁸	46	8,38.10 ⁵	4.070	83,08
9	Sempor	4,37.10 ⁷	2,35.10 ⁸	5,20.10 ⁶	4,30.10 ⁷	49	1,01.10 ⁶	7.500	80,19
10	Lahor	3,61.10 ⁷	2,31.10 ⁹	2,60.10 ⁶	1,60.10 ⁸	74	5,00.10 ⁵	7.082,3	44,31
11	Sermo	2,50.10 ⁷	2,58.10 ⁸	1,57.10 ⁶	2,15.10 ⁷	52,6	1,37.10 ⁵	3.500	82,76
12	Wlingi	2,40.10 ⁷	3,29.10 ⁹	3,80.10 ⁶	2,89.10 ⁹	28	3,93.10 ⁶	13.000	32,34
13	Sengguruh	5,48.10 ⁶	1,53.10 ⁹	2,37.10 ⁶	1,66.10 ⁹	33	3,55.10 ⁶	7.746,6	23,02

Keterangan : C : Kapasitas waduk Hb : Tinggi Bendungan
I : Debit aliran masuk tahunan L : Panjang Waduk
Aw : Luas genangan waduk Is : Debit sedimen masuk tahunan
Ad : Luas daerah aliran sungai Teo : Efisiensi tangkapan sedimen observasi

Dengan menggunakan program NCSS-97 dapat diperoleh hubungan parameter-parameter di atas, dimana efisiensi tangkapan sedimen (Te) sebagai variabel terikat dan parameter lain sebagai variabel bebas.

Prosedur untuk menjalankan program ini dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut :

Membuka file data

- Buka program NCSS
- Buka data *subdirectory* dari *directory* NCSS
- Masukkan semua data parameter pada lembar data dan selanjutnya file diberi nama dan *di-save*.

Memilih dan menjalankan menu program

- Pilih menu program berturut-turut : *Analysis-Regression/Correlation-All Possible Regression*.
- Selanjutnya prosedur *All Possible Regression* akan ditampilkan.
- Tentukan variabel terikat T_e dan parameter lain sebagai variabel bebas
- Pilih kriteria untuk model, yang dalam hal ini dipilih *R-squared*.
- Pilih hasil yang ingin ditampilkan (*Descriptive statistic, Selected variables report, R-squared plot, Root MSE plot* dan *Cp plot*).
- Program dijalankan (*Running*)

Hubungan antara efisiensi tangkapan sedimen (T_e) dan parameter lain dicari dalam bentuk normal agar dapat diketahui korelasi yang terbaik dengan beberapa bentuk parameter. Hasil penelusuran model dan koefisien korelasi antara T_e dengan parameter lainnya dari yang paling kuat sampai yang lemah dapat dilihat pada Lampiran IV. Dengan memilih koefisien korelasi yang paling besar dan membatasi maksimal 3 buah parameter model yang baik disajikan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Beberapa alternatif model dan koefisien korelasinya.

No.	Parameter Model	Koefisien Korelasi (R^2)	<i>RMSE</i>	<i>Cp</i>
1.	C dan I	0,5703	17,2788	1,9860
2.	C dan Ad	0,5104	18,4424	3,2370
3.	C dan Hb	0,2964	22,1102	7,7138
4.	C dan Aw	0,2757	22,4317	8,1448
5.	C dan L	0,2190	23,2945	9,3323
6.	C, I dan Hb	0,6689	15,9872	1,9235
6.	C, I dan L	0,6492	16,4563	2,3358
7.	C, Ad dan L	0,6435	16,5885	2,4541
8.	C, Aw dan I	0,5987	17,6005	3,3913
9.	C, Ad dan Aw	0,5962	17,6558	3,4441
10.	C, Ad dan I	0,5854	17,8901	3,6697

Dengan melihat angka koefisien korelasi, *RMSE* dan harga *Cp* dapat disimpulkan bahwa untuk dua variabel bebas, korelasi yang terbaik adalah antara T_e dengan C dan I dengan harga *R-square* terbesar, *RMSE* terkecil dan *Cp* mendekati jumlah variabel bebas ditambah satu ($R^2 = 0,5703$; *RMSE* = 17,2788; dan *Cp* = 1,9860, mendekati 3). Berikutnya adalah C dan Ad, dengan harga *R-square* besar, *RMSE* kecil dan *Cp* mendekati jumlah variabel bebas ditambah

satu ($R^2 = 0,5104$; $RMSE = 18,4424$; dan $C_p = 3,2370$, mendekati 3). Variabel bebas yang membentuk model terbaik tersebut di atas merupakan parameter yang digunakan Brown dan Brune dalam kedua kurvanya. Untuk tiga variabel bebas, dengan melihat harga R -square dan $RMSE$ model yang paling baik adalah C, I dan Hb ($R^2 = 0,6689$; $RMSE = 15,9871$; dan $C_p = 1,9235$). Hanya saja nilai C_p untuk tiga variabel ini lebih kecil dari 4 (jumlah variabel bebas ditambah satu). Adapun parameter yang digunakan Churchill, yaitu C, I dan L masih dianggap memiliki korelasi yang baik ($R^2 = 0,6492$ $RMSE = 16,4563$ dan $C_p = 2,3358$).

Penentuan parameter terbaik dalam analisis ini didasarkan pada R -square, bukan $RMSE$. Sedangkan C_p hanyalah sebagai pembanding untuk memilih dari beberapa model dengan R -square yang sama atau mendekati sama. Selain itu penentuan jumlah variabel bebas pembentuk model dengan harga C_p mendekati $p+1$ harus pula memperhatikan banyaknya data yang tersedia, dimana setiap satu variabel bebas membutuhkan 5 buah data. Pada penelitian ini dengan data sebanyak 13 waduk sebaiknya hanya memilih dua buah variabel bebas dengan korelasi yang paling kuat. Karena itu parameter yang digunakan dalam metoda Brown dan Brune lebih baik daripada parameter yang digunakan Churchill. Sesuai dengan hasil di atas untuk parameter C dan Ad akan dianalisis berdasarkan kurva Brown, untuk parameter C, I dan L akan dianalisis berdasarkan kurva dan persamaan Churchill sedangkan untuk parameter C dan I akan dianalisis berdasarkan kurva Brune.

3.7.2. Evaluasi Metoda yang Ada

1) Kurva Brown

Data yang diperlukan untuk menganalisis kurva Brown adalah kapasitas waduk (C) dan luas daerah aliran sungai (Ad) sebagaimana terdapat pada Tabel 3.5.

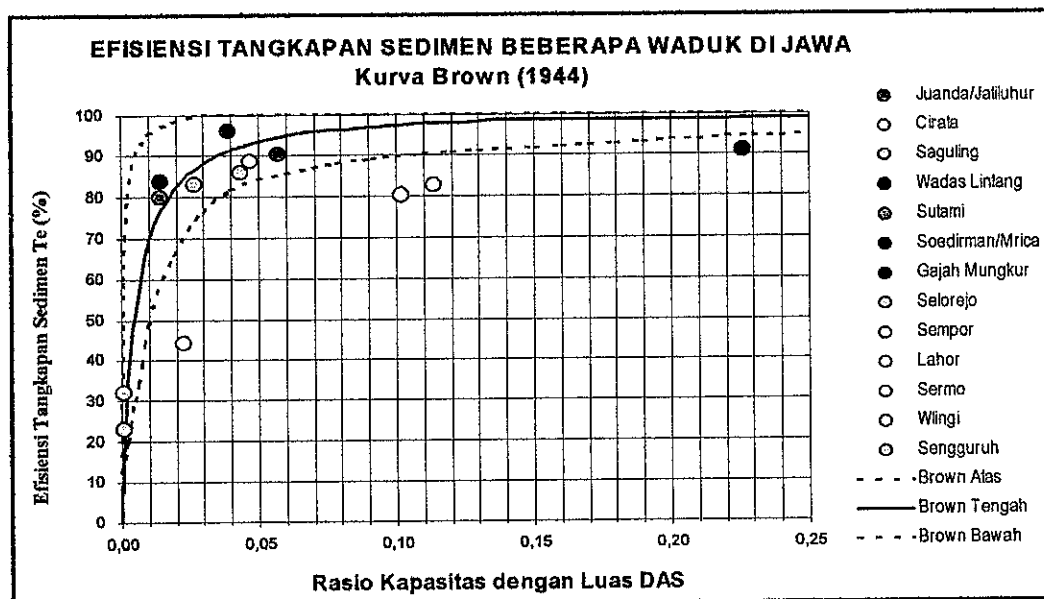
Dari plotting data rasio kapasitas terhadap luas DAS (C/Ad) dengan efisiensi tangkapan sedimen observasi (Teo) pada kurva Brown sebagaimana pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3 dapat dilihat, bahwa penyebaran efisiensi tangkapan sedimen telah mendekati kurva Brown, kecuali lima waduk. Hal ini karena tiga waduk tersebut memiliki luas DAS yang kecil, yaitu Lahor ($Ad = 160 \text{ km}^2$), Sempor ($Ad = 43 \text{ km}^2$) dan Sermo ($Ad = 22 \text{ km}^2$). Dua waduk lain karena memiliki kapasitas kecil dibandingkan luas DAS-nya, seperti Wlingi ($C/Ad = 0,0008$) dan Sengguruh ($C/Ad = 0,0003$). Karena itu kurva Brown masih layak untuk digunakan dengan batasan luas DAS di atas 160 km^2 , dan C/Ad di atas 0,008.

UPT-PUSTAK-UNDIP

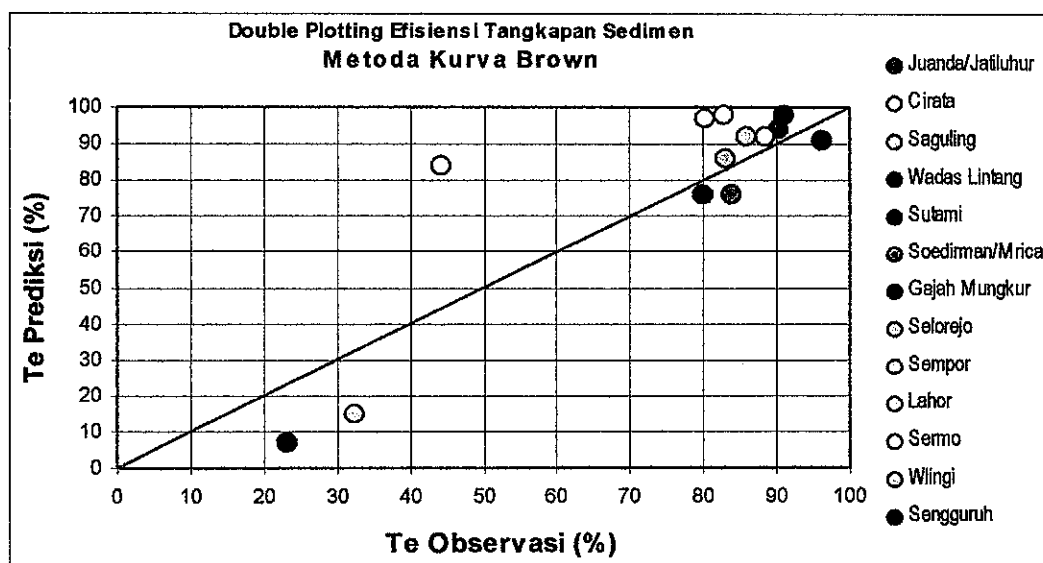
Maka kurva median Brown ini menjadi kurva desain untuk memprediksi efisiensi tangkapan sedimen waduk.

Tabel 3.5 Data parameter untuk analisis kurva Brown

No	Nama Waduk	Kapasitas C (10 Mm ³)	Luas DAS Ad (km ²)	C/Ad	Trap Efisiensi Te (%)
1	Juanda/Jatiluhur	255,60	4.500	0,0568	90,22
2	Cirata	192,55	4.119	0,0467	88,46
3	Saguling	98,20	2.283	0,0430	85,97
4	Wadas Lintang	44,30	196	0,2260	91,13
5	Sutami	28,63	2.050	0,0140	80,00
6	Soedirman/Mrica	14,07	1.022	0,0138	83,79
7	Gajah Mungkur	52,39	1.350	0,0388	96,21
8	Selorejo	6,23	236	0,0264	83,08
9	Sempor	4,37	43	0,1016	80,19
10	Lahor	3,61	160	0,0226	44,31
11	Sermo	2,50	22	0,1136	82,76
12	Wlingi	2,40	2.890	0,0008	32,34
13	Sengguruh	0,55	1.659	0,0003	23,02



Gambar 3.2 Kurva efisiensi tangkapan sedimen Brown dan plotting data



Gambar 3.3 Double plotting observasi terhadap prediksi kurva Brown

Indeks perbedaan antara observasi dan prediksi kurva Brown pada umumnya baik, kurang dari 10 %, kecuali lima buah waduk tersebut di atas, yaitu Sempor (20,97 %), Lahor (89,59 %), Sermo (18,41 %), Wlingi (53,61%) dan Sengguruh (69,59) dengan indeks perbedaan rata-rata 22,94. Dengan mengabaikan lima waduk ini, kurva Brown cukup baik karena indeks perbedaan rata-rata menjadi kecil (5,75 %)

Tabel 3.6 Indeks perbedaan kurva Brown

No	Nama Waduk	Te Observasi (%)	Brown	
			Prediksi (%)	Indeks Perbedaan (%)
1	Juanda/Jatiluhur	90,22	94	4,19
2	Cirata	88,46	92	4,00
3	Saguling	85,97	92	7,02
4	Wadas Lintang	91,13	98	7,54
5	Sutami	80,00	76	5,00
6	Soedirman/Mrica	83,79	76	9,29
7	Gajah Mungkur	96,21	91	5,41
8	Selorejo	83,08	86	3,51
9	Sempor	80,19	97	20,97
10	Lahor	44,31	84	89,59
11	Sermo	82,76	98	18,41
12	Wlingi	32,34	15	53,61
13	Sengguruh	23,02	7	69,59
Indeks perbedaan rata-rata			22,98 %	

2) Kurva dan Persamaan Churchill

Churchill menggunakan parameter yang berbeda dengan Brown. Untuk mengetahui parameter yang digunakannya, perlu diperhatikan persamaan-persamaan yang dipakai untuk menghitung efisiensi tangkapan sedimen menurut Churchill, yaitu sebagai berikut :

$$A = \frac{C}{L} \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

$$v = \frac{I}{A} \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

$$Tr = \frac{C}{I} \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

$$IS = \frac{Tr}{v} \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

$$k = IS \times g \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

$$Te = 100 - (1600 k^{-0.2} - 12) \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

Dimana :

C = Kapasitas waduk (feet³)

L = Panjang waduk (feet)

I = Debit aliran masuk (feet³/detik)

A = Luas penampang melintang rata-rata (feet²)

v = Kecepatan rata-rata aliran masuk (feet/detik)

Tr = Periode penahanan (detik)

IS = Indeks sedimentasi (detik²/feet)

g = Percepatan grafitasi (feet/detik²)

k = Konstanta sedimen

Te = efisiensi tangkapan sedimen (%)

Pada dasarnya Churchill menghitung efisiensi tangkapan sedimen hanya dengan menggunakan parameter kapasitas waduk (C), panjang waduk (L) dan debit aliran masuk

(I). Sedangkan parameter lain, yaitu luas penampang melintang rata-rata (A), kecepatan rata-rata (v), periode penahanan (Tr), Indeks sedimentasi (IS) dan konstanta sedimentasi (K). merupakan penjabaran dari ketiga parameter tersebut. Dengan cara substitusi persamaan 3.14. di atas dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$IS = \frac{C^2}{I^2 L} \dots\dots\dots (3.16)$$

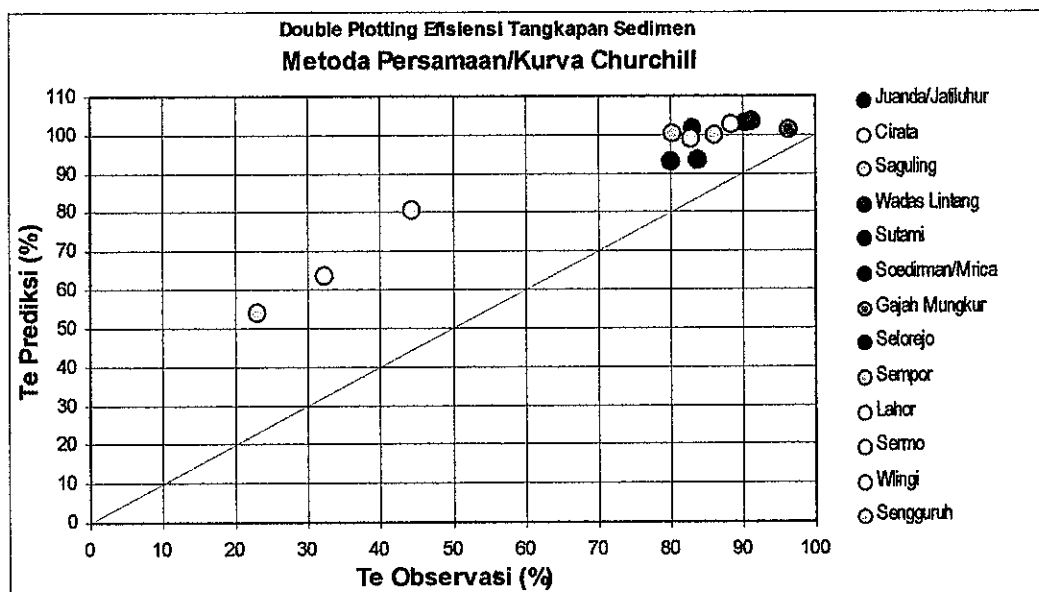
$$k = \frac{C^2}{I^2 L} \cdot g \dots\dots\dots (3.17)$$

$$Te = 100 - (1600k^{-0.2} - 12) \dots\dots\dots (3.18)$$

Data parameter yang diperlukan untuk perhitungan efisiensi tangkapan sedimen menurut Churchill terdapat pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Data Parameter untuk analisis kurva Churchill

No	Nama Waduk	Kapasitas Waduk (C) ft ³	Panjang Waduk (L) feet	Luas Penampang Lintang (A) ft ²	Debit Aliran (I) ft ³ /dt	Kecepatan Aliran (v) ft/dt	Periode Penahanan (Tr) dt	Indeks Sedimentasi (IS) dt ² /ft
1	Juanda/Jatiluhur	9,03.10 ¹⁰	2,62.10 ⁴	3,44.10 ⁶	7,459,30	0,00217	1,21.10 ⁷	5,58.10 ⁹
2	Cirata	6,80.10 ¹⁰	2,62.10 ⁴	2,59.10 ⁶	5,836,59	0,00225	1,17.10 ⁷	5,17.10 ⁹
3	Saguling	3,47.10 ¹⁰	8,05.10 ⁴	4,31.10 ⁵	3,375,81	0,00783	1,03.10 ⁷	1,31.10 ⁹
4	Wadas Lintang	1,56.10 ¹⁰	3,45.10 ⁴	4,54.10 ⁵	959,83	0,00211	1,63.10 ⁷	7,71.10 ⁹
5	Sutami	1,01.10 ¹⁰	7,05.10 ⁴	1,43.10 ⁵	3,267,31	0,0228	3,10.10 ⁶	1,36.10 ⁸
6	Soedirman/Mrica	4,97.10 ⁹	3,10.10 ⁴	1,60.10 ⁵	2,282,22	0,0142	2,18.10 ⁶	1,53.10 ⁸
7	Gajah Mungkur	1,85.10 ¹⁰	7,38.10 ⁴	2,51.10 ⁵	1,485,31	0,00593	1,25.10 ⁷	2,10.10 ⁹
8	Selorejo	2,20.10 ⁹	1,34.10 ⁴	1,65.10 ⁵	344,86	0,00209	6,38.10 ⁶	3,05.10 ⁹
9	Sempor	1,54.10 ⁹	2,46.10 ⁴	6,27.10 ⁴	262,68	0,00419	5,88.10 ⁶	1,40.10 ⁹
10	Lahor	1,28.10 ⁹	2,32.10 ⁴	5,49.10 ⁴	2,586,91	0,0471	4,93.10 ⁵	1,05.10 ⁷
11	Sermo	8,83.10 ⁸	1,15.10 ⁴	7,69.10 ⁴	288,44	0,00375	3,06.10 ⁶	8,16.10 ⁸
12	Wlingi	8,48.10 ⁸	4,27.10 ⁴	1,99.10 ⁴	3,679,15	0,185	2,30.10 ⁵	1,24.10 ⁶
13	Sengguruh	1,94.10 ⁸	2,54.10 ⁴	7,61.10 ³	1,714,37	0,225	1,13.10 ⁵	5,01.10 ⁵



Gambar 3.4 Double plotting observasi terhadap prediksi persamaan/kurva Churchill

Tabel 3.8 Indeks perbedaan persamaan/kurva Churchill

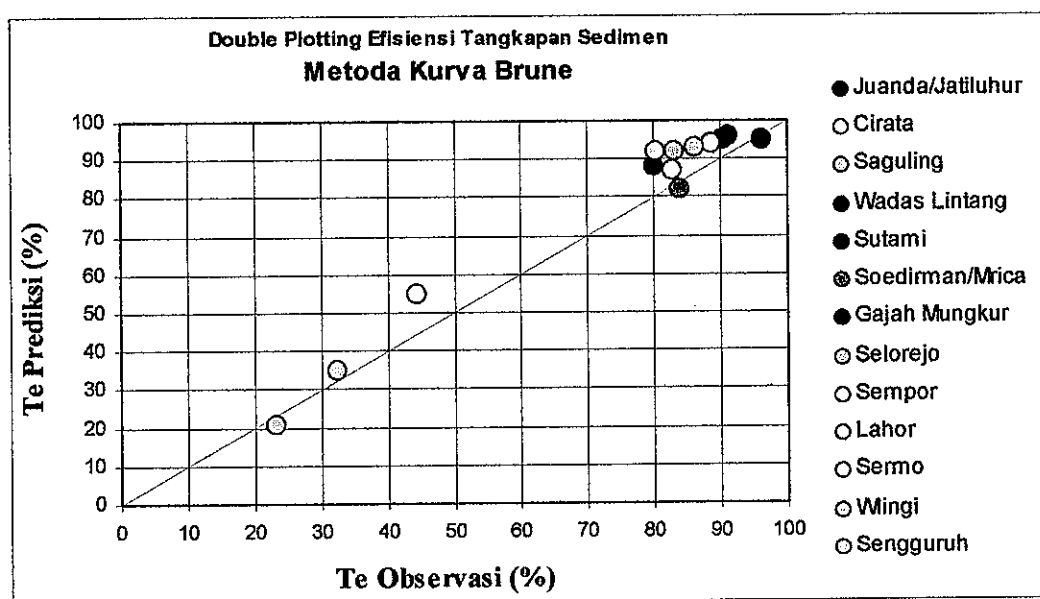
No	Nama Waduk	Konstanta Sedimen k	Te Observasi (%)	Churchill	
				Prediksi (%)	Indeks Perbedaan (%)
1	Juanda/Jatiluhur	$1,80 \cdot 10^{11}$	90,22	103,02	14,19
2	Cirata	$1,64 \cdot 10^{11}$	88,46	102,86	16,27
3	Saguling	$4,22 \cdot 10^{10}$	85,97	100,00	16,33
4	Wadas Lintang	$2,48 \cdot 10^{10}$	91,13	103,58	13,67
5	Sutami	$4,37 \cdot 10^{09}$	80,00	93,12	16,40
6	Soedirman/Mrica	$4,92 \cdot 10^{09}$	83,79	93,56	11,67
7	Gajah Mungkur	$6,77 \cdot 10^{10}$	96,21	101,08	5,07
8	Selorejo	$9,81 \cdot 10^{10}$	83,08	101,87	22,61
9	Sempor	$4,52 \cdot 10^{10}$	80,19	100,17	24,92
10	Lahor	$3,36 \cdot 10^{08}$	44,31	80,47	81,62
11	Sermo	$2,63 \cdot 10^{10}$	82,76	98,81	19,39
12	Wlingi	$4,01 \cdot 10^{07}$	32,34	63,74	97,12
13	Sengguruh	$1,61 \cdot 10^{07}$	23,02	54,12	135,07
Indeks perbedaan rata-rata				36,49 %	

Dari plotting efisiensi tangkapan observasi dan prediksi metoda Churchill menunjukkan hubungan yang sangat jauh dari garis diagonal. Semua prediksi menurut formula

Churchill lebih besar daripada nilai observasinya. Secara kuantitatif, penyimpangan metoda ini dapat dilihat dari indeks perbedaannya sebagaimana disajikan pada Tabel 3.8. Indeks perbedaan semua waduk lebih dari 10 %, dan Indeks perbedaan rata-rata 36,49 %. Ini berarti kurva/persamaan Churchill agar dapat digunakan harus dimodifikasi.

3) Kurva Brune

Korelasi antara T_e dengan C dan I sebagaimana yang ditunjukkan Tabel 3.4 adalah terbaik ($R^2 = 0,5703$; $Root\ MSE = 17,2788$; dan $C_p = 1,9860$) dibandingkan korelasinya dengan parameter lain. Dari Tabel 3.3. dan Lampiran IV juga dapat dilihat bahwa parameter C hampir selalu ada pada setiap bentuk model alternatif, sedangkan parameter I selalu menjadi model terbaik untuk setiap jumlah parameter yang dipakai untuk model. Dengan demikian dapat disimpulkan, bahwa parameter yang paling berpengaruh pada efisiensi tangkapan sedimen waduk adalah kapasitas (C) dan debit aliran tahunan (I). Hal ini sesuai dengan kurva Brune yang menggunakan parameter C dan I untuk memprediksi efisiensi tangkapan sedimen. Data parameter yang diperlukan untuk analisis kurva Brune dapat dilihat pada Tabel 3.9.



Gambar 3.5 Double plotting observasi terhadap prediksi kurva Brune

Dari double plotting antara observasi dan prediksi kurva Brune menggambarkan hasil yang cukup baik sebagaimana pada Gambar 3.5. Indeks perbedaan untuk tiap-tiap waduk maupun harga rata-ratanya pada umumnya kurang dari 10 % dengan rata-rata cukup kecil

(8,48 %) sebagaimana dapat dilihat dapat Tabel 3.9. Namun demikian, untuk waduk dengan harga C/I besar (sekitar satu) efisiensi tangkapan prediksi umumnya lebih besar daripada observasi. Karena itu kurva Brune perlu dimodifikasi.

Tabel 3.9 Data parameter untuk analisis kurva Brune

No	Nama Waduk	Kapasitas C m ³	Debit Inflow M ³ /th	C/I (Tahun)	Te Observasi %
1	Juanda/Jatiluhur	2,56.10 ⁹	6,66.10 ⁹	0,3835	90,22
2	Cirata	1,93.10 ⁹	5,21.10 ⁹	0,3692	88,46
3	Saguling	9,82.10 ⁸	3,02.10 ⁹	0,3256	85,97
4	Wadas Lintang	4,43.10 ⁸	8,58.10 ⁸	0,5166	91,13
5	Sutami	2,86.10 ⁸	2,92.10 ⁹	0,0981	80,00
6	Soedirman/Mrica	1,41.10 ⁸	2,04.10 ⁹	0,0690	83,79
7	Gajah Mungkur	5,24.10 ⁸	1,33.10 ⁹	0,3948	96,21
8	Selorejo	6,23.10 ⁷	3,08.10 ⁸	0,2022	83,08
9	Sempor	4,37.10 ⁷	2,35.10 ⁸	0,1862	80,19
10	Lahor	3,61.10 ⁷	2,31.10 ⁹	0,0156	44,31
11	Sermo	2,50.10 ⁷	2,58.10 ⁸	0,0970	82,76
12	Wlingi	2,40.10 ⁷	3,29.10 ⁹	0,0073	32,34
13	Sengguruh	5,48.10 ⁶	1,53.10 ⁹	0,0036	23,02

Tabel 3.10 Indeks perbedaan kurva Brune

No	Nama Waduk	Te Observasi (%)	Brune	
			Prediksi (%)	Indeks Perbedaan (%)
1	Juanda/Jatiluhur	90,22	95	5,30
2	Cirata	88,46	94	6,26
3	Saguling	85,97	93	8,18
4	Wadas Lintang	91,13	96	5,35
5	Sutami	80,00	88	10,00
6	Soedirman/Mrica	83,79	82	2,13
7	Gajah Mungkur	96,21	95	1,25
8	Selorejo	83,08	92	10,74
9	Sempor	80,19	92	14,73
10	Lahor	44,31	55	24,14
11	Sermo	82,76	87	5,12
12	Wlingi	32,34	35	8,24
13	Sengguruh	23,02	21	8,78
Indeks koreksi rata-rata			8,48 %	

3.7.3. Pengembangan/modifikasi Metoda yang ada

1) Pengembangan Metoda Brown

Mengingat bahwa hasil observasi sudah mendekati prediksi, kecuali beberapa waduk dengan batasan tertentu, maka kurva Brown tidak dimodifikasi. Akan tetapi dengan kurva ini dapat dicari suatu model matematik agar lebih mudah digunakan dengan hasil yang lebih pasti. Dengan program NCSS-97 kurva Brown dapat dibentuk dalam persamaan yang menyatakan hubungan antara efisiensi tangkapan sedimen (T_e) dengan rasio antara kapasitas waduk dan luas daerah aliran sungai (C/Ad). Program dijalankan dengan langkah-langkah dan menu pilihan sebagai berikut :

- Data diperoleh dari absis (C/Ad) dan ordinat (T_e) yang didapat dari grafik kurva desain.
- *Analysis*
- *Curve Fitting*
- *Multivariate Ratio Search*
- Tentukan T_e sebagai variabel terikat, C/Ad sebagai variabel bebas
- Pilih semua bentuk parameter yang dimungkinkan untuk C/Ad

Dari output menu program ini dipilih bentuk variabel terikat dan bebas tanpa transformasi (tetap), jumlah parameter 4, bentuk model H_2/H_2 dengan *R-square* 0,9998. Selanjutnya untuk mendapatkan bentuk model dilakukan langkah-langkah sebagai berikut :

- File data dibuka (C/Ad dan T_e).
- *Analysis*
- *Curve Fitting*
- *Multivariate Ratio Fit*
- Tentukan variabel terikat T_e dan variabel bebas C/Ad .
- Pilih bentuk parameter N (none transformation) untuk variabel terikat T_e dan variabel bebas C/Ad .
- Tentukan numerator H_2 dan denominator H_2
- Program dijalankan (*Running*)

Hasil perhitungan program dapat dilihat pada Lampiran V. Dengan koefisien yang disederhanakan diperoleh bentuk persamaan :

$$Te = \frac{0.584 + 21.524,64*(C/Ad) - 56.028,2*(C/Ad)^2}{1 + 207.94*(C/Ad) - 542,85*(C/Ad)^2} \dots\dots\dots (3.19)$$

Dimana :

C = Kapasitas waduk (10 Mm³)

Ad = Luas daerah aliran sungai (km²)

Te = Efisiensi tangkapan sedimen (%)

Formula persamaan 3.19 di atas bentuknya cukup sederhana, tetapi karena tidak meninjau tiap waduk, penyimpangannya cukup besar. Indeks perbedaan masing-masing waduk dan indeks perbedaan rata-ratanya dari model ini dapat dilihat pada Tabel 3.11.

Tabel 3.11 Indeks perbedaan pengembangan kurva Brown

No	Nama Waduk	Te Observasi (%)	Pengembangan Brown	
			Prediksi (%)	Indeks Perbedaan (%)
1	Juanda/Jatiluhur	90,22	94,26	4,47
2	Cirata	88,46	92,76	4,86
3	Saguling	85,97	92,04	7,06
4	Wadas Lintang	91,13	98,85	8,48
5	Sutami	80,00	76,43	4,47
6	Soedirman/Mrica	83,79	76,14	9,12
7	Gajah Mungkur	96,21	91,07	5,34
8	Selorejo	83,08	86,69	4,34
9	Sempor	80,19	97,39	21,45
10	Lahor	44,31	84,52	90,77
11	Sermo	82,76	97,79	18,17
12	Wlingi	32,34	15,71	51,41
13	Sengguruh	23,02	7,19	68,75
Indeks perbedaan rata-rata			22,94 %	

Dari harga indeks perbedaan rata-rata dapat disimpulkan bahwa pemakaian kurva Brown untuk menentukan efisiensi tangkapan, indeks perbedaan (IP rata-rata = 22,94 %)

terutama untuk waduk dengan kapasitas kecil dan DAS yang besar seperti Wlingi ($C/Ad = 0,0008$, Indeks perbedaan 41,51 %) dan Sengguruh ($C/Ad = 0,0003$ dan Indeks perbedaan 68,75 %) yang dalam hal ini T_e prediksi lebih kecil daripada observasi. Demikian juga kurva Brown tidak baik digunakan untuk waduk dengan DAS kecil seperti Sermo (Indeks perbedaan 18,17 %), Sempor (Indeks perbedaan 21,45 %) dan Lahor (Indeks perbedaan 90,77 %) yang dalam hal ini T_e prediksi lebih besar daripada observasi.

Dengan formula yang telah dirumuskan di atas indeks perbedaan rata-rata 22,94 %, yang tidak jauh berbeda dengan indeks perbedaan dengan kurva (22,98) Bila waduk dengan luas DAS kurang dari 160 km² dan waduk dengan harga C/Ad kurang dari 0,0008 diabaikan, harga indeks perbedaan menjadi 6,05 %. Dengan batasan tersebut kurva Brown masih layak untuk digunakan.

2) Modifikasi Metoda Churchill

Penyimpangan metoda Churchill sangat besar yang ditunjukkan dari indeks perbedaannya (indeks kasalahan rata-rata 36,49 %) Hasil plotting efisiensi tangkapan sedimen pada kurva Churchill, seperti terlihat pada Gambar 3.6 menunjukkan bahwa semua waduk terletak di bawah garis kurva. Karena itu persamaan Churchill (persamaan 3.15) perlu dikoreksi. Untuk memodifikasi persamaan Churchill menggunakan program NCSS-97 dengan pilihan menu sebagai berikut :

- Data
- *Analysis*
- *Curve Fitting*
- *User written models*
- Untuk modifikasi persamaan Churchill tulis persamaan :

$$T_e = (100 - (A * (k^B) - C)$$

Dimana A, B dan C adalah konstanta yang akan dicari dan k adalah konstanta sedimentasi.

- Tentukan T_e sebagai variabel terikat
- Program dijalankan (*Running*)

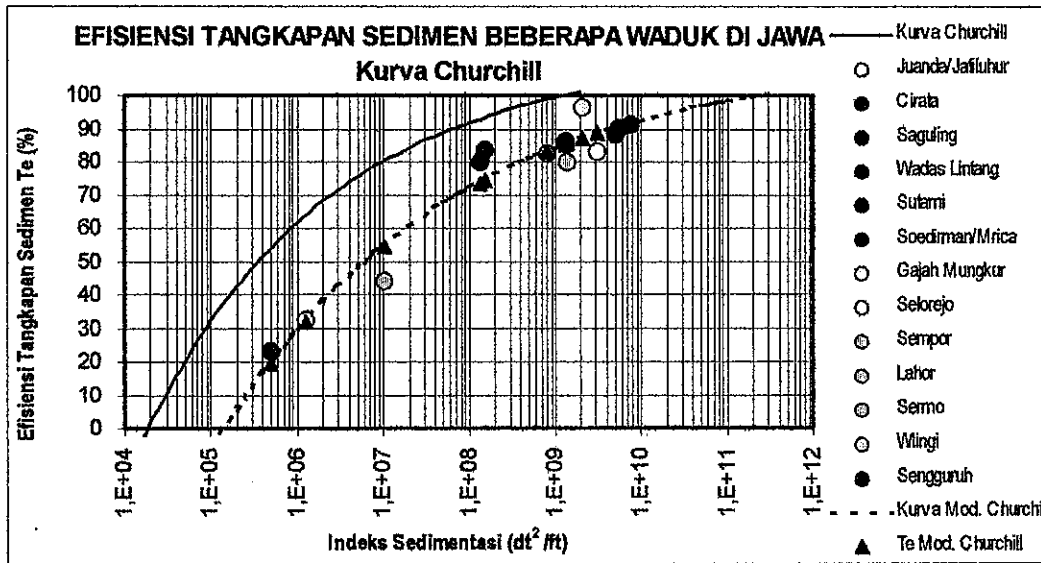
Hasil program berupa model matematik dengan R-square = 0,943894, yang dinyatakan dalam bentuk persamaan :

$$Te = 100 - (1297 k^{-0,16} - 11,22) \dots\dots\dots (3.20)$$

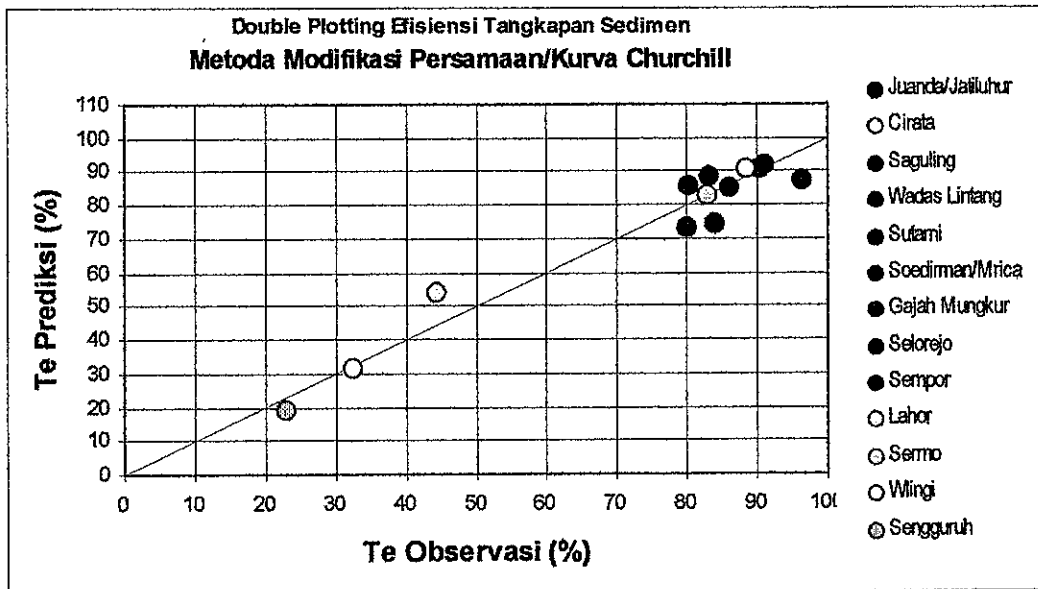
Dimana :

k = Konstanta sedimentasi

Te= efisiensi tangkapan sedimen (%)



Gambar 3.6 Efisiensi tangkapan sedimen observasi dan prediksi Churchill & modifikasinya



Gambar 3.7. Double plotting observasi terhadap prediksi modifikasi persamaan/kurva Churchill

Tabel 3.12 Indeks perbedaan modifikasi persamaan/kurva Churchill

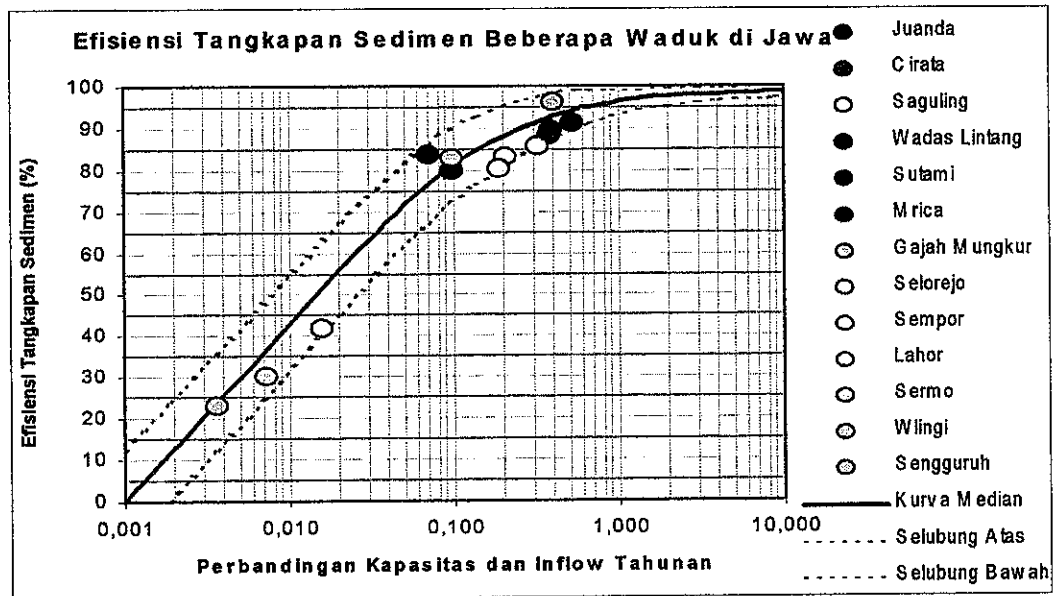
No	Nama Waduk	Konstanta Sedimen k	Te Observasi (%)	Modifikasi Churchill	
				Te Prediksi (%)	Indeks Perbedaan (%)
1	Juanda/Jatiluhur	$1,80 \cdot 10^{11}$	90,22	90,89	1,73
2	Cirata	$1,66 \cdot 10^{11}$	88,46	90,62	2,44
3	Saguling	$4,22 \cdot 10^{10}$	85,97	85,24	0,84
4	Wadas Lintang	$2,48 \cdot 10^{11}$	91,13	91,99	0,95
5	Sutami	$4,37 \cdot 10^9$	80,00	73,49	8,14
6	Soedirman/Mrica	$4,92 \cdot 10^9$	83,79	74,21	11,43
7	Gajah Mungkur	$6,77 \cdot 10^{10}$	96,21	87,22	9,34
8	Selorejo	$9,81 \cdot 10^{11}$	83,08	88,68	6,74
9	Sempor	$4,52 \cdot 10^{10}$	80,19	85,54	6,67
10	Lahor	$3,36 \cdot 10^8$	44,31	54,29	29,35
11	Sermo	$2,63 \cdot 10^{10}$	82,76	83,11	0,42
12	Wlingi	$4,01 \cdot 10^7$	32,34	31,58	4,27
13	Sengguruh	$1,61 \cdot 10^7$	23,02	19,41	15,69
Indeks perbedaan rata-rata				6,79 %	

Output lainnya dapat dilihat pada Lampiran VI. Dari Gambar 3.3 dan Gambar 3.4 menunjukkan hasil plotting efisiensi tangkapan sedimen observasi dan prediksi pada kurva Churchill. Besarnya penyimpangan dan perbedaan antara hasil observasi dan prediksi menurut persamaan Churchill yang sudah dimodifikasi dapat dilihat pada Tabel 3.8. Dengan persamaan yang belum dimodifikasi Te prediksi menurut Churchill bernilai 36,49 % untuk 7 buah waduk. Indeks perbedaan rata-rata mencapai 38,38 %. Setelah persamaan dimodifikasi indeks perbedaan rata-rata menjadi 6,79 %. Double plotting observasi dan prediksi dengan formula yang sudah dimodifikasi lebih mendekati garis diagonal, sebagaimana pada Gambar 3.7.

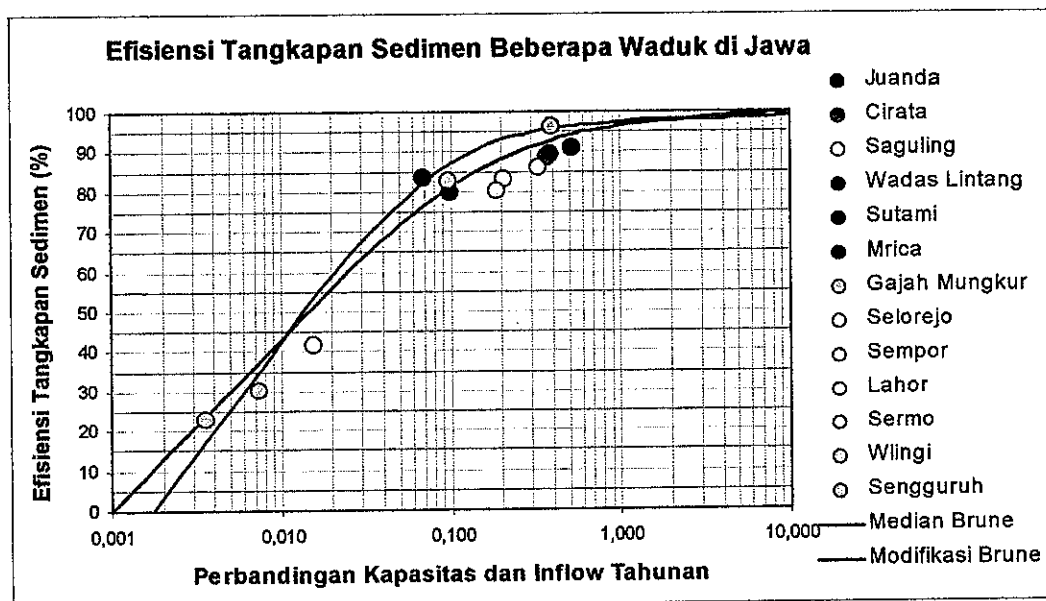
3) Modifikasi Metoda Brune

Hasil plotting efisiensi tangkapan sedimen pada kurva Brune, seperti terlihat pada Gambar 3.9 menunjukkan, bahwa sebagian efisiensi tangkapan observasi sedimen waduk terletak di bawah kurva penutup bawah untuk nilai C/I lebih besar dari 0,1; sedangkan sebagian lainnya masuk di dalam kurva. Karena itu kurva Brune perlu dimodifikasi sesuai dengan data yang ada. Dari data plotting efisiensi tangkapan sedimen observasi yang paling luar

dibuat kurva selubung, sehingga membentuk kurva atas dan kurva bawah. Selanjutnya ditarik kurva median yang terletak di tengah dari dua kurva selubung tersebut sebagaimana terlihat pada Gambar 3.8 Mengingat bahwa data waduk yang ada terbatas dengan harga C/I kurang dari satu, maka untuk menarik garis yang melebihi harga tersebut, kurva median prediksi disambungkan pada kurva median Brune. Hasil modifikasi kurva Brune ini dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar. 3.8 Efisiensi tangkapan sedimen obsevasi dan modifikasi Brune



Gambar 3.9 Kurva median Brune dan modifikasi Brune

Dengan program NCSS-97 akan dicari model matematika yang menyatakan hubungan antara efisiensi tangkapan sedimen (T_e) dengan rasio kapasitas waduk (C) dan debit inflow tahunan (I) dengan cara dan langkah sebagai berikut :

- Data diperoleh dari absis (C/I) dan ordinat (T_e) yang didapat dari kurva median.
- *Curve Fitting*
- *Multivariate Ratio Search*
- Tentukan T_e sebagai variabel terikat, C/I sebagai variabel bebas
- Pilih semua bentuk parameter yang dimungkinkan untuk C/I
- Program dijalankan (*Running*)

Dengan menu ini akan diperoleh bentuk parameter dan model yang terbaik sesuai dengan nilai *R-square* yang ditunjukkan. Dari output program diketahui sebagaimana ada pada Lampiran VII, bahwa untuk mendapatkan model yang baik dengan bentuk yang paling sederhana, dilakukan dengan mentransformasikan variabel bebas dalam bentuk \ln dan memilih numerator H_2 dan denominator H_2 . Bentuk model tersebut yang menyatakan hubungan efisiensi tangkapan sedimen (T_e) dengan rasio antara kapasitas waduk dan debit inflow tahunan (C/I) diperoleh dengan langkah-langkah sebagai berikut :

- Buka program NCSS
- File data disiapkan
- *Analysis*
- *Curve Fitting*
- *Multivariate Ratio Fit*
- Tentukan variabel terikat T_e dan variabel bebas C/I .
- Pilih bentuk parameter N (normal) untuk variabel terikat T_e dan \ln untuk variabel bebas C/I .
- Tentukan numerator H_2 dan denominator H_2
- Program dijalankan (*Running*)

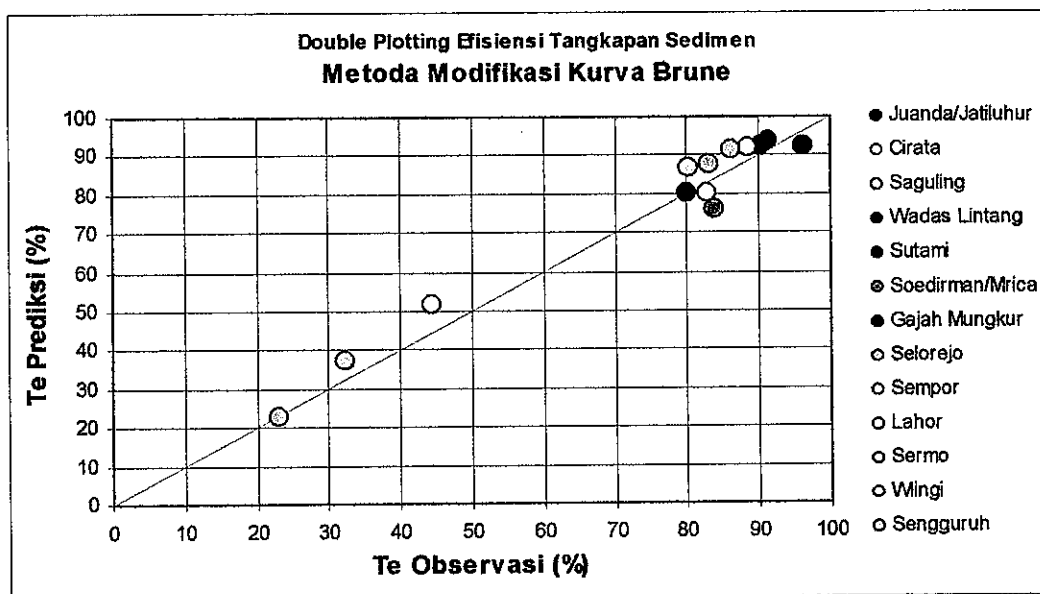
Hasil perhitungan program selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran VII. Dengan koefisien yang disederhanakan diperoleh persamaan :

$$Te = \frac{96,67 + 17,82 * (\ln(C/I)) + (0,569) * (\ln(C/I))^2}{1 + 0,154 * (\ln(C/I)) + (0,0153) * (\ln(C/I))^2} \dots (3.21)$$

Dimana :

- C = Kapasitas waduk (m³)
 I = Debit aliran masuk tahunan (m³/tahun)
 Te = Efisiensi tangkapan sedimen (%)

Indeks perbedaan prediksi Modifikasi Brune terhadap observasi ternyata sedikit lebih kecil dibandingkan dengan menurut kurva median Brune sebagaimana pada Tabel 3.13. Dari double plotting juga dapat dilihat, bahwa penyebaran titik semakin mendekati garis diagonal (Gambar 3.10)



Gambar 3.10 Double plotting observasi terhadap prediksi modifikasi kurva Brune

Tabel 3.13 Indeks perbedaan modifikasi/pengembangan kurva Brune

No	Nama Waduk	Te Observasi (%)	Modifikasi Brune	
			Prediksi (%)	Indeks Perbedaan (%)
1	Juanda/Jatiluhur	90,22	92,47	2,49
2	Cirata	88,46	92,19	4,22
3	Saguling	85,97	91,43	6,36
4	Wadas Lintang	91,13	94,10	3,26
5	Sutami	80,00	80,51	0,64
6	Soedirman/Mrica	83,79	76,11	9,16
7	Gajah Mungkur	96,21	92,64	3,71
8	Selorejo	83,08	87,82	5,71
9	Sempor	80,19	87,11	8,63
10	Lahor	44,31	51,92	17,19
11	Sermo	82,76	80,38	2,88
12	Wlingi	32,34	37,16	14,92
13	Sengguruh	23,02	23,13	0,45
Indeks Perbedaan rata-rata			6,12 %	

3.8. Pemilihan Model Terbaik

Dengan memperhatikan indeks perbedaan rata-rata untuk masing-masing prediksi, baik Prediksi menurut kurva Brown, Persamaan/kurva Churchill dan kurva Brune dapat disimpulkan bahwa penyimpangan pada kurva Brown paling besar dibandingkan dengan metoda yang lain..

Untuk menyimpulkan formula maupun grafis prediksi efisiensi tangkapan sedimen waduk yang terbaik dapat dilihat indeks perbedaan rata-rata dari semua metoda sebagaimana terangkum pada Tabel 3.14. Dari harga indeks perbedaan rata-rata ini terlihat dengan jelas, bahwa untuk masing-masing parameter yang digunakan, indeks perbedaan prediksi hasil modifikasi adalah lebih kecil daripada prediksi dengan grafik maupun formula yang ada yaitu Brown, Churchill maupun Brune. Dengan kurva dan persamaan yang telah dimodifikasi dapat menurunkan indeks perbedaan rata-rata Sedangkan untuk semua metoda, modifikasi kurva Brune (persamaan 3.21) adalah terbaik dengan indeks perbedaan rata-rata 6,12 % yang selanjutnya persamaan modifikasi Churchill (persamaan

3.20) dengan indeks perbedaan 6,79 % dan terakhir modifikasi kurva Brown (persamaan 3.19) dengan indeks perbedaan 22,49 %

Tabel 3.14 Indeks perbedaan rata-rata untuk semua metoda

No.	Metoda	Variabel	Bentuk Model	Indeks Perbedaan Rata-rata (%)
1	Brown	C dan Ad	Kurva Brown	22,94
2	Pengembangan Brown	C dan Ad	Kurva/Persamaan (3.19)	22,94
3	Churchill	C, I dan L	Kurva/persamaan (3.18)	36,49
4	Modifikasi Churchill	C, I dan L	Kurva/persamaan (3.20)	6,79
5	Brune	C dan I	Kurva	8,48
6	Modifikasi Brune	C dan I	Kurva/persamaan (3.21)	6,12

- Formula hasil modifikasi kurva Brown (persamaan 3.19) :

$$Te = \frac{0.584 + 21.524,64*(C/Ad) - 56.028,2*(C/Ad)^2}{1 + 207.94*(C/Ad) - 542,85*(C/Ad)^2}$$

- Formula hasil modifikasi formula Churchill (Persamaan 3.20):

$$Te = 100 - (1297 k^{-0.16} - 11.22)$$

- Formula hasil modifikasi kurva Brune (Persamaan 3.21):

$$Te = \frac{96,67 + 17,82*(\ln(C/I)) + (0,569)*(\ln(C/I))^2}{1 + 0,154*(\ln(C/I)) + (0,0153)*(\ln(C/I))^2}$$

BAB IV

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Studi terhadap efisiensi tangkapan sedimen waduk di Jawa dalam penelitian ini diperoleh dengan menghitung prosentase sedimen yang mengendap terhadap sedimen yang masuk. Sedimen yang mengendap di dalam waduk diperoleh dari dua kali pengukuran dalam suatu periode waktu tertentu berdasarkan pendekatan survei hidrografi. Sedimen yang masuk dihitung dengan salah satu dari tiga cara berikut ini :
 - Pendekatan sedimentologi.
 - Penjumlahan sedimen yang keluar berdasarkan pendekatan sedimentologi dengan sedimen yang mengendap berdasarkan pendekatan hidrografi.
 - Pendekatan hidrologi formula USLE.
2. Perolehan penghitungan efisiensi tangkapan sedimen 13 waduk di Jawa ini digunakan untuk mengevaluasi metoda yang ada, yaitu metoda Brown, Churchill dan Brune. Dari hasil evaluasi terhadap tiga metoda tersebut, perlu dilakukan modifikasi sesuai dengan data yang ada.
3. Untuk Waduk Kedung Ombo perlu dilakukan penelitian ulang terhadap sedimentasi dan efisiensi tangkapan sedimen yang lebih teliti, mengingat hasil penelitian yang sudah ada kurang memadai.
4. Dengan kurva maupun persamaan modifikasi, prediksi efisiensi tangkapan sedimen lebih sesuai dengan kenyataan daripada prediksi yang berdasarkan metoda yang ada. Namun dari tiga metoda tersebut kurva Brune paling mendekati hasil observasi. Karena itu kurva Brune yang telah dimodifikasi (Gambar 3.9), merupakan bentuk yang paling sesuai dibandingkan dengan metoda lain sebagaimana dirumuskan pada persamaan 3.21.

5. Perolehan data yang berasal dari data sekunder menyebabkan studi ini sangat bergantung dengan ketersediaan data. Akibatnya periode waktu studi terhadap sebuah waduk dalam menentukan besarnya pengendapan sedimen dan masukan sedimen tidak sama. Selain itu frekuensi pengukuran hidrografi untuk beberapa waduk masih sangat kurang, demikian juga pengukuran debit aliran tidak dilakukan secara kontinyu.
6. Dengan demikian untuk mendapatkan prediksi efisiensi tangkapan sedimen waduk yang lebih baik dan lebih mendekati kondisi yang ada diperlukan ketersediaan data meliputi :
 - Pengukuran waduk dilakukan selama-lamanya 5 tahun sekali.
 - Data debit aliran yang kontinyu dan panjang untuk setiap sungai yang masuk ke dalam waduk
 - Pengambilan sampel sedimen layang dilakukan secara rutin pada setiap kondisi debit yang ada.
 - Grain size analysis dan data pendukung lain seperti morfologi sungai, aliran dan sebagainya untuk penghitungan sedimen dasar dengan menggunakan beberapa formula yang sesuai.
7. Dengan keterbatasan data yang ada disarankan untuk dilakukan penelitian lanjut, untuk mendapatkan hasil yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Arsyad S. *Konservasi Tanah dan Air*, IPB, Bogor, 1989.
- Barus dan Suwardjo. 1977. *Hubungan antara Sifat-sifat Hujan dengan Erosi*, Kongres Nasional Ilmu Tanah II, Yogyakarta.
- Biro Litbang, *Studi Pendahuluan Sedimentasi waduk-waduk DPS Kali Barantas*, Perum jasa Tirta I, 1998
- Bols, P.L., *The iso-erodent map of Java and Madura*, Belgian Technical Assistance Project ATA 105, Bogor, Soil Res. Ins., 1978.
- Borland dan Maddock, *Congress on Large Dams*, 1951.
- Brabben, *Performance and Use of Turbidity Monitors in the Brantas River Basin, East Java, Indonesia*, Hydraulics Research Station Wallingford, Oxon, 1979
- Brune, G.N., *Trap Efficiency of Reservoirs*, Transaction of the American Geophysical Union, vol. 34, no. 3, 1953
- Chow, V.T., *Hand Book of Applied Hydrologi*, Mc. Graw Hill, Books Company, New York, 1964
- Citra Mandala Agitrans PT., *Survey, Investigasi dan Desain berupa Monitoring Sedimentasi Waduk Wonogiri dan Bendung Colo*, Jakrta, 1993
- Direktorat Penyelidikan Masalah Air, *Pengukuran, Perencanaan dan Penelitian Erosi/Sedimentasi di Catchment Area Waduk Wonogiri* : Direktorat Jenderal Pengairan Departemen Pekerjaan Umum, Mei 1982.
- Evrad, J., *Methods of Computing Sedimentation in Lakes and Reservoirs, Chapter 1 : Technical and Economic Impact of Reservoir Sedimentation*, Belgrade Yugoslavia : Departement of the Jaroslav Cerni Institute for the Development of Water Resources, 1985.
- Fakultas Geografi Universitas Gajah Mada, *Laporan Utama Monitoring dan Penelitian Sedimentasi Waduk Wonogiri*, Yogyakarta, 1991.
- Geodeco Engineering Consultan, *Laporan Akhir Pekerjaan Pengukuran Sedimentasi Waduk Sempor dan Wadas Lintang*, Semarang, 1994
- Hegar Daya, *Pekerjaan Penataan Patok, Pemetaan, Penyelidikan srta Penggambaran kedalaman Waduk Cirata dengan Echo Sounding 3-Dimnesi*, Bandung, 1996.
- Hudson, N.W., *Soil Coservation and Management in the Humid Tropics*, Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 1977.

- Indra Karya PT., *Design Review of Opak Serang Irrigation Rehabilitation Project*, Yogyakarta, 1990
- ITB, *Luas Genangan dan Volume waduk Ir. H. Juanda*, Bandung, 1987
- Julien, P.Y. *Erosion and Sedimentation*, 1st ed. New York : Cambridge University, 1995.
- Kohnke, H. and A.R. Bertrand, *Soil Conservation*, New York, McGraw-Hill, 1959
- KPRI Bhakti Adiguna, *Pekerjaan Pengukuran Echo Sounding Waduk-waduk*, Perum Jasa Tirta I, Malang, 1997
- Lenvein, J., *Kritische Studie van de Universale Erosi Vergelijking en Haar Bruik Baar als Evaluatiemeddel van de Bodemkonditioneerings Techniek in the Vochtige Taropen*, Belgium, Thesis, Agricultural Faculty, Universiteit Ghent, 1975.
- Linsley, *Water-Resources Engineering*, 2nd ed New York : McGraw-Hill, 1972
- New JEC, *Cirata Hydroelectric Power Project, Volume I*, Perusahaan Umum Listruk Negara, 1985
- Puslitbang Pengairan PU, *Bendungan Besar di Indonesia*, Badan Penelitian dan Pengembangan Pekerjaan Umum Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta, 1995.
- Puslitbang Pengairan PU, *Konservasi Air dan Tanah pada DAS Citarum Hulu untuk menjaga Usefull Life Waduk saguling agar tetap efektif*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Sumber Daya Air, Bandung, 2000.
- Puslitbang Pengairan PU, *Monitoring Erosi DAS Waduk Wonogiri*, Departemen Pekerjaan Umum, Bandung, 1989.
- 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.
- Puslitbang Pengairan PU, *Penelitian Sedimentasi di waduk Ir. H. Juanda*, Departemen Pekerjaan Umum, Bandung, 1995.
- Puslitbang Pengairan PU, *Pengukuran Sedimentasi untuk Waduk Mrica*, Departemen Pekerjaan Umum, Bandung, 1989.
- Sarief, E.S. *Konservasi Tanah dan Air*, Cet. III, Bandung : CV. Pustaka Buana, 1985.
- Seta, A.K. *Konservasi Sumber daya Tanah dan Air*, Cet. II Jakarta : Kalam Mulia, Agustus 1991.
- Sheuerlein, H., *Sedimentation of reservoirs Methodes of Prevention, Techniques of Rehabilitation*, First Iranian Symposium on Dam Engineering, p. 5-6, Tehran (1987).

- Strand, R. I. *Sedimentation - Design of Small Dams*, 2nd ed. New Delhi : Oxford & IBH Publishing CO, 1979.
- Strand, R. I., *Design of Small Dams*, U.S. Bureau of Reclamation, Oxford & IBH Publishing Co., New Delhi, 1974.
- Sudjarwadi, dkk, *Penelitian Sedimentasi Waduk PLTA Panglima Besar Sudirman*, Fakultas Teknik Universitas Gajah Mada, 1994
- Suripin, 2000. *Konservasi Tanah dan Air*, Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro, Semarang.
- Suryadi P.A., *Pendahuluan Teori Kemungkinan dan Statistika*, Departemen Matematika ITB, Bandung, 1980.
- Tatareka Paradya, *Laporan Akhir Pekerjaan Studi Sedimentasi Waduk Sermo dan Penanggulangannya*, Yogyakarta, 1999.
- Terra Buana Manggala Jaya, *Pengukuran Kapasitas Waduk Kedungombo dengan Echo Sounding*, Semarang, 1994
- Unit Pembangkitan Mrica, *Pelaksanaan Penyelidikan Sedimentasi Waduk PLTA PB. Soedirman*, Banjarnegara, 1998
- Unit Pembangkitan Saguling, *Pemantauan Sedimentasi Waduk, PLTA Saguling*, PT. PLN PJB I, 1999.
- Unit Pemeliharaan Cirata, *Laporan Pengukuran Sedimentasi Waduk Cirata*, PT. PLN PJB II, Bandung, 2000.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, *Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains*, USDA, Agriculture Handbook No. 282, 1965.
- Wischmeier, W.H., C.B. Johnson, and B.V. Cross, *A Soil Erodibility Nomograph for farmland and Construction Sites*, J. Soil and Water Cons., 1971.
- Workshop Pengairan Unibraw, *Pekerjaan Pengukuran Echo Sounding Waduk-waduk*, Perum Jasa Tirta I, Malang, 1999.
- Yang, C.T. *Sediment Transport Theory and Practice*, Singapore : McGraw-Hill 1996.
- Zingg, A.W, *Degree and Length of Land Slope as it Affects Soil Loss in Run off*, Agric. Eng, 1940