

**EVALUASI PENGGUNAAN
LENGKUNG LAJU DEBIT-SEDIMEN
(*SEDIMENT-DISCHARGE RATING
CURVE*) UNTUK MEMPREDIKSI
SEDIMEN LAYANG¹**

Oleh:

Dyah Ari Wulandari¹; Suripin², Syafrudin²

ABSTRACT

Sediment-discharge rating curve is well known method in predicting suspended sediment discharge. The correlation is usually developed as a relationship between suspended sediment load and discharge. Ideally, the measured of discharge and sediment concentration are carried out continuously, as suspended sediment load is more depended on the sources, i.e. the erosion rate on the catchment rather than the river hydraulic. In practice, the discharge and sediment concentration are carried out intermittently or in spot, as it is time and cost consuming. Therefore, the use of sediment-discharge rating curve to predict suspended sediment may generate an error.

This study is stressed to evaluate the accuracy of sediment-discharge rating curve in predicting suspended sediment. The estimated sediment was compared to measured reservoir sedimentation. Sediment was estimated based on various sediment-discharge rating curves.

The result showed that the present sediment-discharge rating curve (year 2002) produced a higher sediment reservoir estimation than that was measured. By using continue daily discharge the error was less than using the daily discharge from average three point measurement. The different varies from 13.53 % to 24.44%.

Latar Belakang

Sedimen layang adalah sedimen yang bergerak melayang diatas dasar sungai terbawa bersama aliran air. Laju sedimen layang sangat dipengaruhi oleh laju erosi lahan di bagian hulu daerah aliran sungainya, pada daerah hilir keberadaan sedimen layang akan menimbulkan

dampak negatif seperti penurunan kualitas air, pendangkalan sungai, pengurangan kapasitas waduk dan lain sebagainya. Besar kecilnya debit sedimen layang juga dapat digunakan sebagai tolok ukur adanya kerusakan pada suatu Daerah Pengaliran Sungai (DPS).

Untuk memprediksi besarnya sedimen layang biasanya dilakukan pengambilan sampel berupa debit aliran dan konsentrasi sedimen. Dari data sampel yang ada dapat dihitung debit sedimen layangnya yang merupakan hasil perkalian dari konsentrasi sedimen dengan debit aliran. Kemudian dicari hubungan antara debit aliran dan debit sedimen layang dengan menggunakan persamaan regresi, hubungan ini dikenal dengan lengkung laju debit - sedimen (*sediment - discharge rating curve*).

Idealnya pengambilan sampel debit aliran dan konsentrasi sedimen ini dilakukan secara menerus/ kontinu karena besarnya sedimen layang lebih ditentukan dari sumbernya (laju erosi lahan di bagian hulu daerah aliran sungainya) bukan kapasitas sungainya (erosi di sungai, sepanjang pengalirannya), tetapi pada prakteknya pengambilan sampel dilakukan secara tidak kontinu/ insidental mengingat biayanya yang mahal. Dengan adanya keterbatasan ini pemakaian lengkung laju debit-sedimen dalam memprediksi besarnya sedimen layang akan menunjukkan adanya kesalahan-kesalahan dan mempengaruhi akurasi. Sehingga dalam memprediksi besarnya sedimen layang perlu kiranya ada suatu pendekatan yang lebih baik dalam pemakaian lengkung laju debit-sedimen, untuk mendapatkan hasil yang mendekati benar.

Walling (1977) dalam Fan dan Morris (1997), menyatakan bahwa pemakaian *rating curve* yang diturunkan dari data konsentrasi sedimen dan debit aliran sesaat digabungkan dengan rangkaian data debit harian rata-rata akan menghasilkan perkiraan hasil sedimen (*sediment yield*) lebih kecil 50 persen untuk aliran yang terkecil. Hal ini dikarenakan aliran harian rata-rata tidak mewakili debit puncak.

Suripin (2000), menyatakan bahwa penerapan metode lengkung laju debit – sedimen ini pada tiga sungai (sungai Dolok, sungai lusi dan sungai Kedungwaru) menunjukkan bahwa kesalahan yang cukup signifikan dapat timbul dari kurang hati-hatian penggunaan debit harian rata-rata. Penggunaan debit harian rata-rata dapat menyebabkan kesalahan 50 % atau lebih.

Tujuan Penelitian

Penelitian ini ditekankan untuk mengevaluasi tingkat akurasi dalam memprediksi besarnya debit sedimen layang dengan menggunakan lengkung laju debit - sedimen (*flow duration – sediment rating curve technique*) serta merumuskan metode perbaikannya.

Hasil penelitian bermanfaat untuk memperbaiki cara memprediksi sedimen layang yang selama ini berlaku.

Metode dan Pendekatan

Pada dasarnya sedimen yang masuk ke dalam waduk dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

- Sedimen yang masuk ke dalam waduk dihitung berdasarkan sedimen layang yang masuk melalui alur-alur sungai dengan menggunakan data debit berupa kurva massa debit (lengkung waktu aliran) bersama-sama dengan lengkung laju debit-sedimen layang.
- Sedimen yang masuk ke dalam waduk dihitung berdasarkan selisih kapasitas waduk antara dua periode pengukuran yang menggunakan metode *echo sounding*.

Dengan membandingkan antara dua cara diatas maka akan didapat tingkat akurasinya, dimana cara b dianggap lebih akurat.

Diskripsi Wilayah Studi

Waduk Panglima Besar Sudirman terletak di daerah aliran sungai Serayu bagian hulu, di Kecamatan Bawang Kabupaten Banjarnegara, Propinsi Jawa Tengah. Waduk Panglima Besar Sudirman digenangi untuk yang pertama kali (*first impounding*) pada bulan April 1988, dengan luas genangan 8.258.253 m² pada ketinggian muka air waduk + 231 m diatas muka air laut. Kapasitas waduk awal adalah 148,287 juta m³ sedang kapasitas pada periode pengukuran tahun 2002 sebesar 83,946 juta m³ (Laporan Pelaksanaan Penyelidikan Sedimentasi Waduk P.B. Sudirman, 2002).

Luas daerah tangkapan Waduk P.B. Sudirman adalah 956,91 km² yang terdiri dari :

- DPS Serayu meliputi sungai Serayu, sungai Tulis dan sungai Begaluh seluas 678, 31 km²
- DPS Merawu meliputi sungai Merawu dan sungai Urang seluas 218,60 km²
- DPS Lumajang seluas 8,00 km²

- DPS Waduk meliputi daerah sekitar waduk dan sungai-sungai kecil di sekitar waduk seluas 52,00 km²

DASAR TEORI

Sedimen merupakan hasil proses erosi, baik berupa erosi permukaan, erosi parit atau jenis erosi tanah lainnya. Karena adanya transpor sedimen dari tempat yang lebih tinggi (hulu) ke daerah hilir dapat menyebabkan pendangkalan waduk, sungai, saluran irigasi dan terbentuknya tanah baru di pinggir-pinggir dan di delta-delta sungai. Dengan demikian proses sedimentasi dapat memberikan dampak yang menguntungkan dan merugikan. Menguntungkan karena pada tingkat tertentu adanya aliran sedimen ke daerah hilir dapat menambah kesuburan tanah serta terbentuknya tanah garapan baru di daerah hilir, dan pada saat yang bersamaan aliran sedimen juga dapat menurunkan kualitas perairan dan pendangkalan badan perairan. Hasil sedimen biasanya diperoleh dari pengukuran sedimen layang dalam sungai (*suspended sediment*) atau dengan pengukuran langsung di dalam waduk.

Dengan didapatnya konsentrasi sedimen rata-rata pada bagian penampang melintang sungai, maka debit sedimen melayang dapat dihitung sebagai hasil perkalian antara konsentrasi dan debit air yang dirumuskan sebagai berikut :

$$Q_s = 0,0864CQ_w \quad (1)$$

Dimana :

Q_s = debit sedimen (ton/hari)

C = konsentrasi sedimen (mg/liter)

Q_w = debit aliran (m³/detik)

0,0864 merupakan faktor perubahan unit

Lengkung Laju Debit Sedimen

Pengambilan sampel sedimen dilakukan bersama-sama dengan pengambilan data debit aliran, sehingga dapat dibuat hubungan antara keduanya (*suspended sediment-discharge rating curve*). Dalam pembuatan lengkung laju debit-sedimen (*sediment discharge rating curve*), yang perlu diperhatikan adalah sedapat mungkin diperoleh data debit dan muatan sedimen yang mewakili keadaan dengan aliran besar, aliran normal dan aliran kecil. Untuk daerah tropis umumnya pengambilan data dilakukan pada musim kemarau dan musim hujan (Asdak, 1995).Lengkung laju debit sedimen biasanya dinyatakan dalam dua bentuk yaitu dalam korelasi antara konsentrasi sedimen dan debit aliran atau debit sedimen layang dengan debit aliran, pada kedua bentuk tersebut debit aliran

selalu terletak pada sumbu X. Plotting data lapangan menggambarkan rangkaian data konsentrasi –debit aliran sesaat tetapi kurva juga diplot untuk menunjukkan rata-rata debit sedimen layang sebagai fungsi dari rata-rata debit aliran harian, bulanan dan periode waktu lainnya. Hubungan antara konsentrasi sedimen atau debit sedimen layang dengan debit aliran sesaat yang dikarakteristikan dengan hubungan tunggal log-log, apabila terdapat hubungan yang tidak baik maka dapat dibuat kurva-kurva terpisah menurut ukuran partikel, menurut musim dan menurut tahapan datangnya banjir dan turunnya banjir. Untuk mendapat hasil yang baik maka menurut Fan dan Morris (1995) data yang ada harus :

- meliputi seluruh rangkaian data debit dari rendah sampai tinggi
- meliputi tahapan datangnya banjir atau turunnya banjir
- kondisi hidrologinya tidak menyimpang
- Untuk debit yang tinggi, sampel lebih dari satu kejadian

Efisiensi Tangkapan Sedimen (*Trap Efficiency*)

Efisiensi tangkapan sedimen (*trap efficiency*) dari waduk didefinisikan sebagai perbandingan antara besarnya sedimen yang mengendap di dalam waduk dengan aliran sedimen yang masuk ke dalam waduk. Efisiensi tangkapan sedimen (*trap efficiency*) sangat dipengaruhi oleh kecepatan jatuh partikel sedimen, kapasitas dan bentuk waduk serta besarnya aliran yang masuk ke dalam waduk.

Metode yang biasa digunakan untuk mengestimasi efisiensi tangkapan sedimen (*trap efficiency*) suatu waduk adalah metode yang diusulkan oleh Brune. Metode Brune didasarkan pada data pengukuran sejumlah waduk yang ada di banyak negara. Dari data lapangan ini didapatkan suatu set kurva untuk menentukan besarnya sedimen yang mengendap di dalam waduk, yaitu dengan menggunakan data masukan berupa perbandingan antara kapasitas waduk dengan aliran air rata-rata yang masuk ke dalam waduk tiap tahun. Secara teoritis, efisiensi tangkapan sedimen (*trap efficiency*) dari suatu waduk, dari tahun ke tahun akan berkurang secara kontinu dengan berkurangnya kapasitas waduk karena bertambahnya endapan sedimen.

Perhitungan Sedimentasi Waduk

Sedimen yang mengendap di dalam waduk dapat dihitung dengan pendekatan survei hidrografi yaitu dengan melakukan dua kali pengukuran volume tampungan waduk pada waktu yang berbeda. Pengukuran dapat dilakukan sebelum penggenangan dan setelah waduk dioperasikan atau kedua pengukuran tersebut dilakukan setelah waduk dioperasikan. Selisih kapasitas hasil pengukuran merupakan volume sedimen yang mengendap selama selang waktu kedua pengukuran tersebut. Metode yang dipakai adalah metode *Echo Sounding* (volume genangan waduk diukur dengan pantulan suara).

Persamaan Regresi Linier

Analisis statistik yang sering dimanfaatkan untuk melihat hubungan antara dua atau lebih variabel yang saling berkorelasi adalah analisis regresi. Dengan mengetahui bentuk persamaan regresi antara dua variabel maka besarnya variabel tidak bebas (*dependent variable*) dapat diperkirakan dari angka pengukuran variabel bebas (*independent variable*). Analisis regresi dibedakan menjadi dua yaitu analisis regresi linier sederhana (*simple linear regression*) dan analisis regresi ganda (*multiple regression*). Analisis regresi sederhana menunjukkan hubungan linier antara variabel tidak bebas y dan satu variabel bebas x. Persamaan regresi liniernya adalah sebagai berikut :

$$y = a + b x \quad \dots\dots\dots(2)$$

Dimana :

- y = variabel tidak bebas
- x = variabel bebas
- a, b = koefisien regresi

Selain linier, analisis regresi sederhana juga memungkinkan terbentuknya hubungan non-linier seperti tersebut dibawah ini :

- Kurva eksponensial $y = a e^{bx}$
- Kurva logaritma $y = a + b \ln x$
- Kurva berpangkat $y = a x^b$

Koefisien Determinasi dan Korelasi

Sesuai atau tidaknya model matematis regresi sederhana dengan data yang digunakan dapat ditunjukkan dengan mengetahui besarnya nilai r^2 atau juga disebut sebagai koefisien determinasi (*coefficient of determination*). Koefisien determinasi menunjukkan seberapa jauh kesalahan dalam memprakirakan besaran y dapat direduksi dengan menggunakan informasi yang dimiliki variabel x. Model persamaan regresi dianggap sempurna apabila nilai $r^2 = 1$. Sebaliknya apabila variasi yang ada pada nilai y

tidak ada yang bisa dijelaskan oleh model persamaan regresi yang diajukan maka nilai $r^2 = 0$.

Analisis korelasi adalah bentuk analisis statistik yang menunjukkan kuatnya hubungan antara dua variabel. Besarnya korelasi berkisar antara -1 sampai dengan 1 . Nilai r sama dengan atau mendekati 0 menunjukkan bahwa hubungan antara variabel x dan variabel y sangat kecil atau tidak ada korelasi linier sama sekali. Apabila nilai r mendekati 1 maka menunjukkan korelasi positif antara kedua variabel x dan variabel y , artinya besarnya variabel y meningkat dengan meningkatnya variabel x . Dan bila nilai r mendekati -1 maka menunjukkan korelasi negatif antara kedua variabel x dan variabel y , artinya besarnya variabel y menurun dengan meningkatnya variabel x . Secara umum dapat ditentukan bahwa korelasi antara dua variabel adalah lemah apabila $0 \leq |r| \leq 0,5$ dan mempunyai korelasi kuat apabila $0,8 \leq |r| \leq 1$

Pengujian Hasil

Untuk mengetahui tingkat akurasi antara hasil perhitungan dan data pengukuran lapangan, maka dihitung kesalahannya dengan rumus sebagai berikut :

$$E = \frac{|Q_{sd} - Q_{sp}|}{Q_{sd}} \cdot 100\% \quad (3)$$

Dimana : E = kesalahan/ *Error*, Q_{sd} = debit sedimen layang data pengukuran lapangan, Q_{sp} = debit sedimen layang hasil perhitungan

Data Yang Digunakan

Pada penelitian ini digunakan data sekunder berupa debit aliran dan konsentrasi sedimen hasil survei lapangan dari Waduk PB Sudirman.

Data-data yang dipergunakan pada penelitian ini diperoleh dari PT. Indonesia Power bagian Monitoring Geoteknik dan Hidrologi, Unit Pembangkit Mrica berupa :

- a. Data Pengambilan Sampel Sedimen Layang
Pengambilan sampel Sedimen Layang dilakukan oleh CV. Widha Konsultan Semarang (Pebruari 1988 s/d Oktober 1988) dan Pusat Penelitian dan Pengembangan Pengairan (Desember 1988 s/d Januari 1989). Pengambilan sampel dilakukan pada dua sungai utama yang dipertimbangkan sebagai medium terhadap masuknya sedimen ke dalam Waduk PB Sudirman yaitu sungai Serayu di Pos Banjarnegara dan Sungai Merawu di Pos Clangap, serta satu sungai kecil yaitu sungai Lumajang di Pos Linggasari. Cara pengambilan sampel

dengan metode *depth integrated* pada tiga sub bagian penampang melintang.

- b. Data Debit Aliran Harian
Pengukuran debit aliran harian dilakukan secara rutin oleh bagian monitoring Geoteknik dan Hidrologi, Unit Pembangkit Mrica. Pada bulan Pebruari 1988 sampai dengan Januari 1989 belum ada pengukuran data debit aliran harian secara rutin sehingga untuk penelitian ini dipakai debit aliran harian dari Bulan Nopember 1989 sampai dengan Oktober 1990 mengikuti periode pengukuran sedimentasi waduk yang terdekat dengan pengambilan sampel konsentrasi sedimen dan debit aliran. Debit aliran didapat dari nilai rata-rata pada tiga waktu pengukuran yaitu pukul 07.00, pukul 12.00 dan pukul 17.00. Untuk data pengukuran ketinggian muka air dari AWLR digunakan data dari sungai Serayu di pos Banjarnegara pada tahun 2000 karena sebelum tahun ini belum ada pengukuran dengan AWLR.
- c. Data pengukuran Kapasitas Waduk
Pengukuran kapasitas waduk dilakukan secara rutin oleh bagian monitoring Geoteknik dan Hidrologi Unit Pembangkit Mrica menggunakan alat ukur kedalaman (*echosounder*). Pada penelitian ini dipakai hasil pengukuran pada periode yang terdekat dengan periode pengambilan sampel konsentrasi sedimen dan debit aliran, yaitu pada periode Nopember 1989 sebesar 144,904 juta m^3 dan periode Oktober 1990 sebesar 141,463 m^3 .
- d. Data lain yang diperlukan
Sungai pada DAS Mrica mempunyai karakteristik seperti sungai-sungai di pegunungan, alirannya deras, tetapi jenis material dasarnya relatif halus. Jenis bahan dasar sungainya adalah pasir, tekstur dari material suspensinya sebagian besar pasir dan berat jenis kering (*dry density*) sedimennya adalah 0,75 t/m^3 .
Persamaan regresi yang sekarang (tahun 2002) digunakan untuk menghitung sedimen layang adalah sebagai berikut :

$$\text{Sungai Serayu} \\ Q_s = 0,756 Q_w^{2,084} \quad (4)$$

$$\text{Sungai Merawu} \\ Q_s = 26,525 Q_w^{1,745} \quad (5)$$

$$\text{Sungai Lumajang} \\ Q_s = 11,7372 Q_w^{2,8864} \quad (6)$$

Persamaan regresi diatas diturunkan dari data sampel yang diambil di alur sungai di daerah genangan waduk pada bulan Januari tahun 1989.

ANALISIS DATA

Perhitungan Debit Aliran Rata-rata Harian Kontinu

Data debit aliran dari Bulan Nopember 1989 sampai dengan bulan Oktober 1990 didapat dari nilai rata-rata data pengukuran yang tidak kontinu yaitu tinggi muka air diukur sebanyak tiga kali sehari pada pukul 07.00, pukul 12.00 dan pukul 17.00 sehingga besarnya debit kurang menggambarkan keadaan yang sesungguhnya terutama apabila terjadi banjir diluar jam pengukuran tersebut. Pada penelitian ini untuk mendapatkan data debit yang kontinu adalah dengan mengalikan data debit aliran harian rata-rata tiga waktu pengukuran dengan koreksi debit. Koreksi debit didapat dengan menghitung debit harian rata-rata tiga waktu pengukuran dan debit harian rata-rata 24 jam dari data pengukuran tinggi muka air dengan AWLR, kemudian dari kedua nilai debit ini dicari selisih prosentasinya. Prosentasi inilah yang dipakai sebagai koreksi debit. Pada penelitian ini digunakan data pengukuran tinggi muka air sungai Serayu dengan AWLR pada tahun 2000.

Berdasarkan perhitungan maka koreksi debit sungai Serayu berkisar antara 3,49 % sampai dengan 14,64% dengan koreksi rata-rata sebesar 8,89 %. Karena tidak adanya data pengukuran tinggi muka air dengan AWLR di sungai Merawu dan Lumajang maka koreksi debit untuk sungai Merawu dan Lumajang dianggap sama dengan koreksi debit untuk sungai Serayu. Sungai Merawu dan Lumajang masih satu Induk sungai dengan sungai Serayu sehingga koreksi debitnya dapat dianggap sama.

Penurunan Persamaan Regresi (Lengkung Laju Debit-Sedimen)

Untuk membuat persamaan regresi (lengkung laju debit-sedimen) antara debit aliran dengan debit sedimen terlebih dahulu dilihat sebaran datanya dengan membuat diagram sebaran data (*scatter plots*), dari diagram sebaran data akan terlihat bentuk hubungan antara variabel debit aliran dan debit sedimen kemudian dihitung parameter-parameter statistiknya.

Ada tiga bentuk persamaan regresi yang akan digunakan yaitu :

- Persamaan regresi kurva berpangkat
- Persamaan regresi kurva eksponensial
- Persamaan regresi kurva logaritma

Dari ketiga persamaan ini akan dipilih satu yang mempunyai hubungan yang kuat dengan dilihat nilai koefisien korelasi dan koefisien determinasinya. Masing-masing persamaan regresi akan dibuat dengan data yang dibagi menjadi dua versi sebagai berikut :

1. Semua data yang ada dalam periode pengukuran dipergunakan untuk membuat persamaan regresi (lengkung laju debit-sedimen) sehingga masing-masing sungai akan mempunyai satu persamaan regresi. Dari pengolahan data ini persamaan regresi yang terpilih adalah persamaan regresi kurva berpangkat sebagai berikut :

$$\text{Sungai Serayu} \\ Q_s = 0,08.Q_w^{2,36} \quad (7)$$

$$\text{Sungai Merawu} \\ Q_s = 0,67.Q_w^{2,40} \quad (8)$$

$$\text{Sungai Lumajang} \\ Q_s = 10,87.Q_w^{2,75} \quad (9)$$

2. Data yang ada dalam periode pengukuran dibagi menjadi dua periode berdasarkan musim yaitu periode musim penghujan dan periode musim kemarau sehingga untuk masing-masing sungai akan mempunyai dua persamaan regresi (lengkung laju debit-sedimen). Dari pengolahan data ini, persamaan regresi yang terpilih adalah persamaan regresi kurva berpangkat sebagai berikut :

$$\text{Sungai Serayu :} \\ \text{periode musim hujan} \\ Q_s = 0,17.Q_w^{2,21} \quad (10)$$

$$\text{periode musim kemarau} \\ Q_s = 0,04.Q_w^{2,44} \quad (11)$$

$$\text{Sungai Merawu :} \\ \text{periode musim hujan} \\ Q_s = 0,79.Q_w^{2,37} \quad (12)$$

$$\text{periode musim kemarau} \\ Q_s = 0,06.Q_w^{3,27} \quad (13)$$

$$\text{Sungai Lumajang :} \\ Q_s = 10,87.Q_w^{2,75} \quad (14)$$

Perhitungan Sedimen Layang

Besarnya sedimen layang dihitung dengan menggunakan persamaan regresi (lengkung laju debit-sedimen) yang didapat berdasarkan besarnya debit aliran rata-rata harian yang terjadi tiap bulan dengan enam cara sebagai berikut :

- Sedimen layang dihitung dengan menggunakan persamaan regresi (4) sampai (6) berdasarkan besarnya debit aliran rata-rata harian yang belum dikoreksi (debit harian rata-rata tiga waktu pengukuran), untuk selanjutnya diberi simbol Q_{sps1} .
- Sedimen layang dihitung dengan menggunakan persamaan regresi kurva berpangkat (7) sampai (9) berdasarkan besarnya debit aliran rata-rata harian yang belum dikoreksi (debit harian rata-rata tiga waktu pengukuran), untuk selanjutnya diberi simbol Q_{sps2} .
- Sedimen layang dihitung dengan menggunakan persamaan regresi kurva berpangkat persamaan (10) sampai (14) berdasarkan besarnya debit aliran rata-rata harian yang belum dikoreksi (debit harian rata-rata tiga waktu pengukuran), untuk selanjutnya diberi simbol Q_{sps3} .
- Sedimen layang dihitung dengan menggunakan persamaan regresi (4) sampai (6) berdasarkan besarnya debit aliran rata-rata harian yang sudah dikoreksi (debit harian kontinu), untuk selanjutnya diberi simbol Q_{spt1} .
- Sedimen layang dihitung dengan menggunakan persamaan regresi kurva berpangkat (7) sampai (9) berdasarkan besarnya debit aliran rata-rata harian yang sudah dikoreksi (debit harian kontinu), untuk selanjutnya diberi simbol Q_{spt2} .
- Sedimen layang dihitung dengan menggunakan persamaan regresi kurva berpangkat persamaan (10) sampai (14) berdasarkan besarnya debit aliran rata-rata harian yang sudah dikoreksi (debit harian kontinu), untuk selanjutnya diberi simbol Q_{spt3} .

Untuk mendapatkan debit rata-rata harian yang terjadi tiap bulan dari data pengukuran debit aliran harian digunakan kurva massa debit (lengkung waktu aliran) yaitu kurva hubungan antara debit dengan durasi yang merupakan frekwensi kumulatif.

Tabel 1
Hasil perhitungan sedimen layang melalui alur sungai Serayu

| Bulan | Debit Sedimen Layang | | | | | |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Q_{sps1} ton/bulan | Q_{sps2} ton/bulan | Q_{sps3} ton/bulan | Q_{spt1} ton/bulan | Q_{spt2} ton/bulan | Q_{spt3} ton/bulan |
| Nopember 1989 | 55.474,17 | 18.575,00 | 21.037,86 | 69.691,48 | 24.051,42 | 26.796,70 |
| Desember 1989 | 85.935,30 | 28.290,70 | 32.404,48 | 102.625,33 | 34.588,79 | 39.115,47 |
| Januari 1990 | 172.995,87 | 61.921,22 | 67.768,16 | 214.863,49 | 79.146,61 | 85.279,28 |
| Pebruari 1990 | 337.919,50 | 139.131,31 | 141.008,35 | 413.341,45 | 174.786,67 | 174.594,51 |
| Maret 1990 | 283.857,33 | 121.953,17 | 120.462,13 | 375.990,05 | 167.662,83 | 162.295,91 |
| April 1990 | 163.736,76 | 60.203,61 | 43.331,89 | 194.677,35 | 73.239,78 | 53.066,17 |
| Mei 1990 | 40.873,88 | 11.852,34 | 7.943,57 | 46.378,36 | 13.675,42 | 9.209,97 |
| Juni 1990 | 44.418,06 | 15.126,68 | 10.686,34 | 50.776,21 | 17.601,07 | 12.498,40 |
| Juli 1990 | 12.540,91 | 3.220,76 | 2.086,90 | 14.182,38 | 3.702,15 | 2.410,17 |
| Agustus 1990 | 7.318,43 | 1.841,19 | 1.188,37 | 8.096,88 | 2.064,49 | 1.337,68 |
| September 1990 | 10.567,94 | 2.571,64 | 1.638,28 | 11.351,12 | 2.788,50 | 1.781,31 |
| Oktober 1990 | 9.746,44 | 2.342,54 | 3.185,14 | 12.956,94 | 3.233,85 | 4.307,86 |
| JUMLAH | 1.225.384,60 | 467.030,17 | 452.741,47 | 1.514.931,06 | 596.541,58 | 572.693,44 |

Tabel 2
Hasil perhitungan sedimen layang melalui alur sungai Merawu

| Bulan | Debit Sedimen Layang | | | | | |
|----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | Q _{sps1} ton/bulan | Q _{sps2} ton/bulan | Q _{sps3} ton/bulan | Q _{spt1} ton/bulan | Q _{spt2} ton/bulan | Q _{spt3} ton/bulan |
| Nopember 1989 | 160.648,00 | 36.243,13 | 38.569,96 | 94.466,85 | 47.134,57 | 49.996,16 |
| Desember 1989 | 182.909,27 | 37.494,84 | 40.136,97 | 12.216,81 | 45.998,40 | 9.114,09 |
| Januari 1990 | 888.574,30 | 453.371,97 | 464.167,84 | .065.391,44 | 81.907,75 | 93.908,48 |
| Pebruari 1990 | 392.979,93 | 110.360,16 | 16.462,30 | 5.193,16 | 9.179,45 | 46.449,75 |
| Maret 1990 | 630.290,15 | 305.259,14 | 12.664,30 | 97.551,74 | 21.944,67 | 30.435,22 |
| April 1990 | 196.129,30 | 42.263,92 | 69.111,35 | 26.717,01 | 1.586,62 | 90.677,04 |
| Mei 1990 | 200.710,31 | 66.985,34 | 253.666,01 | 223.107,25 | 77.476,36 | 309.284,32 |
| Juni 1990 | 71.040,79 | 10.383,78 | 10.055,05 | 79.461,60 | 12.113,40 | 12.403,66 |
| Juli 1990 | 44.979,45 | 5.399,39 | 4.005,39 | 49.859,12 | 6.221,08 | 4.858,10 |
| Agustus 1990 | 33.844,95 | 3.616,89 | 2.295,53 | 36.834,31 | 4.063,42 | 2.690,09 |
| September 1990 | 53.104,53 | 7.144,46 | 6.394,81 | 56.380,54 | 7.757,57 | 7.153,94 |
| Oktober 1990 | 51.201,80 | 8.319,79 | 8.976,89 | 64.987,05 | 11.548,33 | 12.409,45 |
| JUMLAH | 2.906.412,76 | 1.086.842,81 | 1.326.506,39 | 3.472.166,89 | 1.406.931,62 | 1.709.380,29 |

Tabel 3
Hasil perhitungan sedimen layang melalui alur sungai Lumajang

| Bulan | Debit Sedimen Layang | | | |
|----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | Q _{sps1} ton/bln | Q _{sps2} ton/bln | Q _{spt1} ton/bln | Q _{spt2} ton/bln |
| Nopember 1989 | 1,89 | 1,95 | 2,59 | 2,63 |
| Desember 1989 | 211,65 | 174,55 | 270,63 | 220,62 |
| Januari 1990 | 29,41 | 26,82 | 39,71 | 35,70 |
| Pebruari 1990 | 24,96 | 22,77 | 32,99 | 29,70 |
| Maret 1990 | 13,01 | 12,25 | 19,21 | 17,75 |
| April 1990 | 0,20 | 0,23 | 0,25 | 0,28 |
| Mei 1990 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| Juni 1990 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Juli 1990 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Agustus 1990 | 1,29 | 1,36 | 1,49 | 1,55 |
| September 1990 | 3,84 | 3,82 | 4,24 | 4,20 |
| Oktober 1990 | 0,11 | 0,13 | 0,16 | 0,19 |
| JUMLAH | 286,37 | 243,89 | 371,28 | 312,65 |

Perhitungan Angkutan Sedimen Layang Yang Mengendap di Waduk

Jumlah angkutan sedimen layang yang masuk waduk melalui alur sungai Serayu, Merawu dan Lumajang tidak semuanya akan mengendap di dalam waduk, tetapi ada sebagian yang akan keluar waduk yaitu melalui turbin, outlet, pelimpah ataupun bangunan pengambilan. Untuk mengetahui seberapa besar sedimen layang yang mengendap di waduk harus dicari nilai *Trap*

efficiency-nya, dalam penelitian ini *Trap Efficiency* dihitung dengan Metode Brune.

Metode Brune menggunakan data masukan berupa perbandingan antara kapasitas waduk (C) dengan aliran air rata-rata yang masuk ke dalam waduk pada periode yang ditinjau (I). Kapasitas waduk yang digunakan adalah kapasitas waduk pada periode pengukuran Oktober 1990 yaitu sebesar 141.463.00 m³.

Untuk mendapatkan debit rata-rata harian yang masuk waduk yang terjadi tiap bulan dari data pengukuran debit aliran harian digunakan kurva massa debit. Dari perhitungan debit aliran harian rata-rata yang masuk waduk pada tiap bulan dapat dihitung besarnya aliran air yang masuk waduk dari bulan Nopember 1989 sampai dengan Oktober 1990. Dengan menggunakan grafik dari Brune (Gambar 4) untuk nilai perbandingan antara kapasitas waduk dengan aliran air yang masuk waduk akan didapat nilai *Trap Efficiency* seperti pada Tabel 4 berikut ini.

Tabel 4
Perhitungan *Trap Efficiency*

| Uraian | Debit aliran belum dikoreksi | Debit aliran sudah dikoreksi |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Kap. waduk (m ³) | 141.463.000,00 | 141.463.000,00 |
| Inflow (m ³) | 2.354.049.071,54 | 2.581.311.543,94 |
| C/I | 0,06 | 0,055 |
| <i>Trap Efficiency</i> | 80 % | 76,25 % |

Sedimen layang yang akan mengendap di waduk berdasarkan angkutan sedimen layang yang masuk waduk melalui alur sungai dan nilai *Trap*

Efficiency-nya dapat dilihat pada Tabel 5 perhitungan berikut ini.

Tabel 5
Perhitungan sedimen layang yang mengendap di Waduk

| Sungai | Q _{sps1} (ton) | Q _{sps2} (ton) | Q _{sps3} (ton) | Q _{spt1} (ton) | Q _{spt2} (ton) | Q _{spt3} (ton) |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Serayu | 1.225.384,60 | 467.030,17 | 452.741,47 | 1.514.931,06 | 596.541,58 | 572.693,44 |
| Merawu | 2.906.412,76 | 1.086.842,81 | 1.326.506,39 | 3.472.166,89 | 1.406.931,62 | 1.709.380,29 |
| Lumajang | 286,37 | 243,89 | 243,89 | 371,28 | 312,65 | 312,65 |
| Jumlah | 4.132.083,73 | 1.554.116,87 | 1.779.491,75 | 4.987.469,23 | 2.003.785,85 | 2.282.386,38 |
| <i>Trap efficiency</i> | 80 % | 80 % | 80 % | 76,25 % | 76,25 % | 76,25 % |
| Sedimen layang yang mengendap di waduk | 3.305.666,98 | 1.243.293,50 | 1.423.593,40 | 3.802.945,29 | 1.527.886,71 | 1.740.319,62 |

Perhitungan Sedimen Dasar

Kondisi sungai dan jenis material dasar di Waduk PB Sudirman sangat spesifik, sungai-sungainya mempunyai karakteristik seperti sungai-sungai di daerah pegunungan, alirannya deras, tetapi dengan jenis material dasar yang relatif halus. Berdasarkan penelitian yang telah ada (Fakultas Teknik UGM,1994) Jenis bahan dasar sungainya adalah pasir dan tekstur dari material suspensi sebagian besar berupa pasir. Untuk selanjutnya dalam memprediksi besarnya sedimen dasar digunakan perkiraan sedimen dasar berdasarkan prosentase dari hasil hitungan angkutan sedimen layang yang masuk waduk.

Dari hasil perhitungan didapatkan pada sungai Serayu dan Lumajang konsentrasi sedimen suspensinya dibawah 1000 mg/liter sementara pada sungai Merawu konsentrasi sedimen suspensinya di atas 1000 mg/liter. Berdasarkan konsentrasi sedimen layang, jenis bahan dasar sungai dan tekstur dari material suspensinya maka besarnya sedimen dasar sungai Serayu dan sungai Lumajang adalah sebesar 25% - 150 % dari muatan sedimen layangnya sedangkan sedimen dasar sungai Merawu adalah sebesar 10% - 35 % dari muatan sedimen layangnya. Perhitungan sedimen dasar yang masuk ke dalam waduk dapat dilihat pada Tabel 6 berikut ini.

Tabel 6
Perhitungan sedimen dasar yang masuk waduk

| Sungai | % thd sed. layang | Q _{sps1} (ton) | Q _{sps2} (ton) | Q _{sps3} (ton) | Q _{spt1} (ton) | Q _{spt2} (ton) | Q _{spt3} (ton) |
|----------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Serayu | 25- 150 | 306.346,15 | 116.757,54 | 113.185,37 | 378.732,77 | 149.135,40 | 143.173,36 s/d |
| | | s/d | s/d | s/d | s/d | s/d | 859.040,16 |
| Merawu | 10 - 35 | 1.838.076,90 | 700.545,26 | 679.112,21 | 2.272.396,59 | 894.812,37 | 170.938,03 |
| | | 290.641,28 | 108.684,28 | 132.650,64 | 347.216,69 | 140.693,16 | s/d |
| Lumajang | 25-150 | 1.017.244,47 | 380.394,98 | 464.277,24 | 1.215.258,41 | 492.426,07 | 598.283,10 |
| | | 71,59 | 60,97 | 60,97 | 92,82 | 78,16 | s/d |
| Jumlah | | 429,56 | 365,84 | 365,84 | 556,92 | 468,98 | 468,98 |
| | | 597.059,02 | 225.502,79 | 245.896,98 | 726.042,28 | 289.906,72 | 314.189,55 |
| | | s/d | s/d | s/d | s/d | s/d | s/d |
| | | 2.855.750,93 | 1.081.306,08 | 1.143.755,29 | 3.488.211,92 | 1.387.707,42 | 1.457.792,24 |

Perhitungan Sedimen Yang Mengendap di Waduk

Volume sedimen yang mengendap di dalam waduk antara dua periode pengukuran didapat

dengan mengurangi kapasitas waduk hasil pengukuran antara dua periode. Volume sedimen yang mengendap di Waduk PB Sudirman periode Nopember 1989 – Oktober 1990 adalah :

Volume sedimen waduk = $(144,904 \text{ juta} - 141,463 \text{ juta}) \text{ m}^3 = 3,441 \text{ juta m}^3$

Sehingga sedimen yang mengendap di dalam waduk berdasarkan pengukuran sedimentasi waduk adalah = $3,441 \text{ juta} \times 0,75 = 2.580.750 \text{ ton}$.

Besarnya sedimen yang mengendap di dalam waduk berdasarkan perhitungan angkutan sedimen layang melalui alur sungai dapat dilihat pada Tabel 7 berikut ini.

Tabel 7
Perhitungan sedimen yang mengendap di waduk

| Uraian | Sedimen layang (ton) | Sedimen dasar (ton) | Sedimen yang mengendap di waduk (ton) | Error (%) |
|-------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------|
| Q _{sps1} | 3.305.666,98 | 597.059,02 s/d 855.750,93 | 3.902.726,00 s/d 6.161.417,91 | 51,22 s/d 138,74 |
| Q _{sps2} | 1.243.293,50 | 225.502,79 s/d 1.081.306,08 | 1.468796,29 s/d 2.324.599,58 | 9,93 s/d 43,09 |
| Q _{sps3} | 1.423.593,40 | 245.896,98 s/d 1.143.755,29 | 1.669.490,38 s/d 2.567.348,69 | 0,52 s/d 35,31 |
| Q _{spt1} | 3.802.945,29 | 726.042,28 s/d 3.488.211,92 | 4.528.987,57 s/d 7.291.157,21 | 75,49 s/d 182,52 |
| Q _{spt2} | 1.527.886,71 | 289.906,72 s/d 1.387.707,42 | 1.817.793,43 s/d 2.915.594,13 | 12,97 s/d 29,56 |
| Q _{spt3} | 1.740.319,62 | 314.189,55 s/d 1.457.792,24 | 2.054.509,17 s/d 3.198.111,86 | 20,39 s/d 23,92 |

Untuk mengetahui tingkat akurasi dari hasil hitungan sedimen yang mengendap di waduk pada Tabel 7 diatas maka perlu dihitung kesalahan (*Error*) antara hasil perhitungan berdasarkan angkutan sedimen layang melalui alur sungai dan hasil perhitungan berdasarkan pengukuran sedimentasi waduk sesuai dengan persamaan (3) yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 7 diatas.

Pembahasan

Berdasarkan Tabel 7 diatas perhitungan sedimen waduk dengan menggunakan lengkung laju debit-sedimen yang biasa digunakan (persamaan (4) sampai (6)) yaitu Q_{sps1} dan Q_{spt1} akan menghasilkan sedimen yang lebih besar dari sedimen waduk hasil pengukuran, berkisar antara 51,22 % sampai 182,52 % baik dengan debit sebelum dikoreksi (debit harian rata-rata tiga waktu pengukuran) ataupun sesudah dikoreksi (debit harian kontinu). Perhitungan sedimentasi waduk dengan menggunakan lengkung laju debit-sedimen persamaan (7) sampai (9) dan debit yang belum dikoreksi (debit harian rata-rata tiga waktu pengukuran) yaitu Q_{sps2} dan Q_{sps3} menghasilkan sedimen waduk yang lebih kecil 0,52 % sampai 43,09 % dari sedimen waduk hasil pengukuran. Sedang penggunaan lengkung laju debit-sedimen persamaan (7) sampai (9) dan debit yang sudah dikoreksi (debit harian kontinu) yaitu Q_{spt2} dan Q_{spt3} menghasilkan sedimen waduk yang lebih kecil hingga 29,56% dan lebih besar hingga 23,92 % dari sedimen waduk hasil pengukuran tergantung dari besarnya prosentase sedimen dasar terhadap sedimen layang. Penggunaan lengkung laju debit-sedimen yang

dikembangkan dengan menggunakan seluruh data periode 11 bulan (persamaan (7) sampai (9)), dalam perhitungan Q_{sps2} dan Q_{spt2}, menghasilkan kesalahan maksimum yang lebih besar yaitu sebesar 45,09 % daripada penggunaan lengkung laju debit-sedimen yang dikembangkan dengan menggunakan data yang dibagi menjadi dua periode musim (persamaan (10) sampai (14)), dalam perhitungan Q_{sps3} dan Q_{spt3}, sebesar 35,31 %. Demikian juga dengan pemakaian debit sebelum dikoreksi akan menghasilkan kesalahan yang lebih besar daripada debit yang sudah dikoreksi dengan perbedaan 13,53 % s/d 22,9 % untuk Q_{sps2} dibanding Q_{spt2} dan 14,92 % s/d 24,44 % untuk Q_{sps3} dibanding Q_{spt3}.

Hasil perhitungan sedimen waduk yang didapatkan ternyata masih ada kesalahan, kesalahan yang ada ini dapat disumbangkan dari data debit aliran dan konsentrasi sedimen yang digunakan untuk menurunkan persamaan regresi. Untuk melengkapi analisa maka data perlu dicek sehingga diketahui :

- jumlah data yang ada telah memenuhi syarat atau belum
- homogenitas datanya
- data *outlier*

Dari hasil pengolahan data, maka kesalahan yang disebabkan dari data yang digunakan untuk analisa adalah sebagai berikut :

- Pengambilan sampel konsentrasi sedimen dan debit dilakukan dengan menggunakan alat konvensional sehingga akan memberikan hasil yang lebih kecil karena ada bagian yang

tidak dapat diukur oleh alat yaitu antara ujung alat dimana sampel diambil sampai dengan dasar sungai.

- Adanya sedimen yang langsung masuk ke dalam waduk yang tidak tercatat pada pos pengukuran.
- Waktu pengukuran kurang terwakili, kejadian pada malam hari tidak tercatat.
- Diskritisasi waktu untuk hitungan mungkin kurang pendek.
- Data pengambilan sampel konsentrasi sedimen yang ada merupakan data berkala yang tidak kontinu, interval waktu tidak sama.
- Data tidak homogen yang disebabkan karena pengambilan sampel dilakukan dalam jangka waktu 11 bulan sehingga kemungkinan adanya perubahan kondisi daerah pengaliran sungainya cukup besar, faktor kesalahan alat dan prosedur dalam pengambilan sampel.
- Terdapat data *outlier*

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan analisa data yang telah dilakukan maka dapat ditarik kesimpulannya sebagai berikut :

1. Data yang digunakan untuk menurunkan persamaan regresi (lengkung laju debit-sedimen) yang digunakan sekarang (tahun 2002) menghasilkan prakiraan sedimen waduk yang lebih besar dari sedimen waduk pengukuran, hal ini dikarenakan data sampel yang digunakan periode pengambilannya kurang panjang karena hanya dilakukan pada bulan Januari saja selain itu pengambilan sampel sedimen pada daerah genangan waduk akan memberikan konsentrasi yang lebih besar.
2. Persamaan regresi hasil pengembangan (lengkung laju debit-sedimen) adalah sebagai berikut :
 - a. Persamaan regresi dengan menggunakan semua data yang ada (periode 11 bulan) Untuk sungai Serayu persamaannya $Q_s = 0,08.Q_w^{2,36}$, untuk sungai Merawu persamaannya $Q_s = 0,67.Q_w^{2,40}$ dan untuk sungai Lumajang : $Q_s = 10,87.Q_w^{2,75}$
 - b. Persamaan regresi dengan menggunakan data yang dibagi menjadi dua periode musim

Untuk sungai Serayu persamaannya pada periode musim hujan $Q_s = 0,17.Q_w^{2,21}$ dan pada periode musim kemarau $Q_s = 0,04.Q_w^{2,44}$. Untuk sungai Merawu persamaannya pada periode musim hujan $Q_s = 0,79.Q_w^{2,37}$ dan pada periode musim kemarau $Q_s = 0,06.Q_w^{3,27}$

3. Data yang digunakan untuk mengembangkan persamaan regresi (lengkung laju debit-sedimen) hasil pengembangan diatas meskipun periodenya sudah panjang tetapi data tidak kontinu dan jumlah sampelnya masih sangat terbatas terutama pada saat musim kemarau serta terdapat data outlier.
4. Dengan terbatasnya data yang ada maka persamaan regresi tidak dapat dikembangkan untuk diskritisasi waktu yang pendek (bulanan). Dengan diskritisasi waktu yang panjang (periode 11 bulan dan periode musim hujan dan kemarau) kemungkinan terjadinya perubahan-perubahan pada Daerah Pengaliran Sungainya cukup besar, hal ini akan berakibat pada homogenitas datanya.
5. Perhitungan sedimentasi waduk dengan berbagai variasi menghasilkan kesalahan pada Q_{sps1} antara 51,22 % s/d 138,74 %, pada Q_{sps2} antara 9,93 % s/d 43,09 %, pada Q_{sps3} antara 0,52 % s/d 35,31 %, pada Q_{spt1} antara 75,49 % s/d 182,52 %, pada Q_{spt2} antara 12,97 % s/d 29,56 %, dan pada Q_{spt3} antara 20,39 % s/d 23,92 %.
6. Penggunaan debit harian kontinu (sesudah dikoreksi) menghasilkan kesalahan yang lebih kecil daripada penggunaan debit harian rata-rata tiga waktu pengukuran (sebelum dikoreksi), perbedaannya antara 13,53 % sampai 24,44 %.
7. Pemakaian lengkung laju debit-sedimen dengan diskritisasi waktu yang lebih pendek (data dibagi menjadi dua periode musim) menghasilkan kesalahan yang lebih kecil daripada pemakaian lengkung laju debit-sedimen dengan diskritisasi waktu yang lebih panjang (periode 11 bulan).

Saran

Adapun saran yang dapat disampaikan untuk perbaikan perhitungan dalam memprediksi sedimen layang dengan menggunakan lengkung laju debit-sedimen adalah sebagai berikut :

1. Lengkung laju debit-sedimen yang digunakan saat ini (tahun 2002) tidak dapat

digunakan karena akan menghasilkan nilai prakiraan sedimen waduk yang lebih besar.

2. Data konsentrasi sedimen dan debit hendaknya merupakan data berkala yang kontinu dengan diukur menggunakan alat ukur yang otomatis, karena besarnya sedimen layang lebih ditentukan dari laju erosi lahan di bagian hulu daerah aliran sungainya.
3. Lokasi pengambilan sampel pada alur sungai yang terdekat dengan daerah genangan waduk bukan pada daerah genangan waduk
4. Persamaan regresi (lengkung laju debit-sedimen) dikembangkan untuk periode tiap bulan, dengan diskritisasi waktu yang pendek data sampel akan lebih homogen dan lebih mewakili karakteristik yang ada.
5. Debit aliran rata-rata harian sebaiknya menggunakan data yang kontinu, dengan menggunakan data debit dari nilai rata-rata tiga waktu pengukuran tidak mewakili debit yang sebenarnya terutama apabila terjadi banjir diluar jam-jam pengukuran tersebut.
6. Sedimen di daerah tangkapan waduk dan sungai-sungai kecil di sekitar waduk perlu diperhitungkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ang, Alfredo H.S., dan Wilson H. Tang (1987), *Konsep-konsep Probabilitas Dalam Perencanaan dan Perancangan Rekayasa*, terjemahan Binsar Hariandja, Erlangga, Jakarta
- Chay Asdak (1995), *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Chow, V.T., David R. Maidment and Larry W. Mays (1988), *Applied Hidrology*, McGraw Hill, Singapura.
- Edy Susilo (2001), *Kajian Efisiensi Tangkapan Sedimen Pada Beberapa Waduk di Jawa*, Tesis Magister Teknik Sipil UNDIP.
- Hines, William W., and Douglas C. Montgomery (1990), *Probabilita dan Statistik dalam Ilmu Rekayasa dan Manajemen*, terjemahan Rusdiansyah, UI-Press, Jakarta.
- Morris, Gregory L. and Jiahua Fan (1998), *Reservoir Sedimentation Handbook : Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use*, McGraw-Hill Company.
- Puslitbang Pengairan (1989), *Pengukuran Sedimentasi Untuk Waduk PLTA Mrica*, Departemen Pekerjaan Umum, Indonesia
- Salamun (1998), *Suspended Load : Indikator Kerusakan DAS*, dalam Media Komunikasi Teknik Sipil Edisi X/XI Agustus 1998, hal. 51-55.
- Spiegel, Murray R. (1975), *Probability and Statistics*, McGraw-Hill International Book Co, Singapura.
- Soemarto, C.D. (1995), *Hidrologi Teknik*, Erlangga
- Soewarno (1995), *Hidrologi : Aplikasi Metode Statistik untuk Analisa Data*, Nova, Bandung.
- Sudjana (1986), *Metoda Statistika*, Tarsito, Bandung.
- Sudjarwadi, Rachmad Jayadi, Suharto Tjojudo (1994), *Laporan Akhir Penelitian Sedimentasi Waduk PLTA Panglima Besar Sudirman*, Fak. Teknik UGM
- Tri Antisto (2002), *Laporan Pelaksanaan Penyelidikan Sedimentasi Waduk PLTA PB. Soedirman*, PT. Indonesia Power UPB Mrica.
- Suripin (2000), *Evaluasi Penggunaan Teknik Debit-Lengkung Sedimen dalam Memprediksi Sedimen Layang*, dalam : Jurnal dan Pengembangan Keairan No. 1 tahun 7 Juli 2000, hal. 35-43.
- Widha Konsultan (1988), *Penelitian Erosi dan Sedimentasi DAS Serayu Proyek PLTA Mrica*.
- Yang, C.T. (1996), *Sediment Transport Theory and Practice*, McGraw-Hill Company.