

Analisis Volume Sedimen yang Mengendap Setelah T-Tahun Waduk Beroperasi (Studi Kasus: Waduk Cirata)

Welstien Herma Tatipata

Program Doktor Teknik Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No 10 Bandung, 40132, E-mail: whtatipata@yahoo.com

Indratmo Soekarno

Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No 10 Bandung, 40132, E-mail: indratmosoekarno@si.itb.ac.id

Arwin Sabar

Kelompok Keahlian Pengelolaan Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No 10 Bandung, 40132, E-mail: arwinsabar@yahoo.com

Sri Legowo

Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No 10 Bandung, 40132, E-mail: srilegowo@si.itb.ac.id

Abstrak

Indonesia mempunyai dua musim dalam satu tahun yaitu musim hujan dan musim kemarau, Agar persediaan air dapat dimanfaatkan secara optimal baik di musim penghujan maupun di musim kemarau, dilakukan sistem pengoperasian waduk, Waduk dapat juga dimanfaatkan untuk pengairan, pembangkit tenaga listrik, pariwisata, pengendali sungai dan banjir, Dalam melestarikan waduk, masalah erosi dan sedimentasi yang akan memenuhinya, dikhawatirkan tidak akan mencapai umur waduk yang direncanakan. Penelitian dilakukan di Waduk Cirata yang berada pada dalam Wilayah Sungai Citarum, Provinsi Jawa Barat yang meliputi sebagian dari tiga wilayah kabupaten yaitu Kabupaten Bandung, Purwakarta dan Cianjur. Metode pengumpulan data meliputi data Primer dan data sekunder yang dikumpulkan dari PT Pembangkitan Jawa Bali Badan Pengelola Waduk Cirata Cirata, Hasil Kesimpulan adalah dengan masuknya sedimentasi ke dalam waduk akan mengakibatkan pengendapan dan pendangkalan yang akan mempengaruhi kapasitas tampung waduk juga semakin lama waduk beroperasi, maka semakin banyak sedimen yang mengendap didalam waduk, perbandingan antara volume sedimen yang mengendap setelah 10 tahun dan setelah 200 tahun adalah $10215287,18 \text{ m}^3$ dan $193953499,6 \text{ m}^3$, setelah menganalisis volume sedimen yang mengendap setelah T-tahun pada waduk yang beroperasi maka akan dipikirkan rencana umur waduk selanjutnya.

Kata-kata Kunci: Volume waduk, Waduk, Erosi, Sedimentasi, Umur waduk.

Abstract

Indonesia has two seasons of the year: the rainy season and the dry season, So that the water supply can be optimally used both in the rainy season and dry season, made the operating system of reservoirs. Reservoirs can also be used for irrigation, power generation, tourism, controllers rivers and floods, in preserving the reservoir, the problem of erosion and sedimentation will comply, it is feared will not reach the age of the planned reservoir. The study was conducted in Cirata located on the CRB, West Java Province that covers most of the three districts namely Regency Bandung, Purwakarta and Cianjur. Methods of data collection includes data Primary and secondary data collected from PT Generation Java Bali Cirata Cirata Basin Management Board, Results The conclusion is by the entry of sediment into the reservoir will result in sedimentation and silting that would affect the capacities of reservoirs also the longer the dam operates, the more sediment that settles in the reservoir, the ratio between the volume of sediment that settles after 10 years and after 200 years was $10215287,18 \text{ m}^3$ and $193953499,6 \text{ m}^3$, after analyzing the volume of sediment that settles after T years at the reservoir operating plan will be considered next dam age.

Keywords: Volume reservoirs, Dams, Erosion, Sedimentation, Age of dam.

1. Pendahuluan

Indonesia mempunyai dua musim dalam satu tahun yaitu musim hujan dan musim kemarau. Dengan tidak meratanya hujan selama satu tahun sehingga menyebabkan persediaan air akan berlebih pada musim hujan dan berkurang pada musim kemarau. Oleh karena itu akan menjadi suatu tantangan bagaimana supaya persediaan air tersebut dapat dimanfaatkan secara optimal baik dimusim penghujan maupun dimusim kemarau melalui sistem pengoperasian waduk. Sumber-sumber air yang berlimpah diberbagai daerah dapat dimanfaatkan baik untuk keperluan pengairan, pembangkit tenaga listrik, industri, penyediaan air minum yang ditampung pada sebuah waduk yang cukup besar. Selain itu waduk juga dapat dimanfaatkan sebagai pengendali sungai dan banjir, pariwisata dan olahraga air dan juga tempat menampung limbah industri. Dalam melestarikan waduk sebagai salah satu sarana sumber air ada beberapa masalah yang dihadapi yaitu masalah erosi dan sedimentasi yang akan memenuhi waduk, sehingga dikhawatirkan tidak akan mencapai umur waduk yang direncanakan. Akibat erosi lokal maupun penggerusan yang terjadi pada sungai dihilu waduk mengakibatkan pengendapan di waduk. Hasil erosi tersebut bergerak bersama air pada sungai, baik berupa *bed load* (angkutan dasar) maupun *suspended load* (angkutan layang) yang akan mengendap pada waduk.

Sedimen yang diangkut oleh air dari penggerusan dibagian udik sungai dan dasar maupun pada tepi sungai dan merupakan hasil penggerusan di *cathment area* (daerah tangkapan air). Dengan kondisi lahan tersebut dan juga curah hujan yang cukup tinggi mengakibatkan banyak sedimen terangkut ke sungai sehingga menjadi sumber sedimentasi di waduk. Bagi waduk yang sedang beroperasi bahaya sedimen akan mempengaruhi umur waduk. Untuk penelitian ini maka direncanakan menghitung volume sedimen yang mengendap setelah beberapa tahun waduk beroperasi

Setelah beroperasi selama 25 tahun kondisi Waduk Cirata mengalami perubahan. Berdasarkan laporan akhir pengukuran 5 tahunan sedimentasi Waduk Cirata, tingkat sedimentasi atau pengendapan di Waduk Cirata semakin meningkat. Laju sedimen rata-rata Waduk Cirata sampai dengan tahun 2012 mencapai 7,30 juta meter³/tahun. Pada pengukuran bathimetri yang dilakukan Badan Pengelola Waduk Cirata pada tahun 2012, laju sedimen mencapai 7,566 juta meter³/tahun. Angka ini melampaui asumsi desain yang hanya 5,67 juta meter³/tahun. Tingginya tingkat sedimentasi di Waduk Cirata ini disebabkan oleh kerusakan di sepanjang DAS Citarum serta menjamurnya jaring terapung (japung) di tengah waduk. Waduk Cirata dirancang untuk 100 sampai 236 tahun, namun karena berbagai persoalan seperti

sedimentasi, membuat waduk ini berkurang sekitar 60 tahun. Melihat kondisi ini, maka asumsi yang dapat ditimbulkan bahwa kondisi hutan, tata guna lahan didaerah aliran sungai citarum hulu dan wilayah sabuk hijau (*green belt*) disekelilingi waduk Cirata tidak lebih buruk dari kondisi sekarang.

Masalah yang dihadapi dengan banyaknya sedimen yang mengendap di waduk, antara lain adalah:

1. Mempengaruhi kapasitas tampung waduk
2. Masuknya sedimen kedalam pembangkit tenaga listrik, sehingga akan mempengaruhi kerja turbin.
3. Menimbulkan proses abrasi pada bangunan.
4. Berkurangnya suplay air irigasi dengan masuknya angkutan sedimen kedalam saluran.

Dengan masuknya sedimen pada waduk yang akan mengakibatkan pengendapan dan pendangkalan, sehingga akan mempengaruhi kapasitas tampung waduk dalam mensuplay air, baik untuk kebutuhan air minum, sebagai pembangkit tenaga listrik maupun kebutuhan air minum serta keperluan irigasi. Dari hal-hal tersebut di atas, maka hanya akan diadakan pembahasan adalah menghitung volume sedimen yang mengendap setelah beberapa tahun waduk beroperasi.

Tujuan dari penelitian ini adalah menghitung volume sedimen yang mengendap dengan menggunakan formula-formula, antara lain:

1. Mengetahui besarnya kepadatan sedimen.
2. Mengetahui koefisien konsolidasi sedimen.
3. Mengetahui kepadatan sedimen yang mengendap setelah T tahun waduk beroperasi.
4. Mengetahui volume sedimen yang mengendap setelah T tahun waduk beroperasi.

Sedimen adalah suatu Kepingan atau potongan yang terbentuk oleh proses fisik dan kimia dari batuan atau tanah. Bentuk dari material beraneka ragam dan tidak terbatas dari mulai yang berbentuk bulat sampai berbentuk tajam. Juga bervariasi dalam kerapatan dan komposisi materialnya dengan kuarsa yang dominan dimana sedimen tersebut terbawa hanyut oleh aliran air yang dapat dibedakan sebagai endapan dasar (*bed load*) dan muatan melayang (*suspended load*). Muatan dasar bergerak dalam aliran sungai dengan cara bergulir, meluncur dan meloncat-loncat di atas permukaan dasar sungai. Sedangkan muatan melayang terdiri dari butir-butir halus yang ukuran lebih kecil dari 0,1 mm dan senantiasa melayang didalam aliran air, lebih-lebih butiran yang sangat halus walaupun air tidak mengalir, tetapi butiran tersebut tetap tidak mengendap serta airnya tetap tidak keruh dan sedimen semacam ini disebut muatan kikisan (*wash load*).

Karena muatan dasar senantiasa bergerak, maka permukaan dasar sungai kadang-kadang naik dan kadang-kadang turun. Muatan melayang tidak

berpengaruh pada naik turunnya dasar sungai, tetapi dapat mengendap didasar waduk yang menimbulkan pendangkalan pada waduk dan menyebabkan timbulnya berbagai masalah.

Penghasil sedimen terbesar adalah erosi permukaan lereng pegunungan, erosi sungai (dasar dan tebing alur sungai). Pada saluran aliran air mengikis material yang ada di tebing atau dasar saluran sedemikian banyak butiran yang akan dapat mengangkutnya.

Sedimentasi merupakan proses pengendapan bahan yang terangkut oleh air di alur sungai pada waduk sebagai akibat terjadinya erosi. Kepadatan sedimen setelah mengendap akan berubah dari waktu ke waktu. Untuk waduk besar hampir seluruh sedimen mengendap setelah proses sedimentasi, sehingga kapasitas waduk berkurang, maka sebahagian sedimen akan terbuang melalui *spillway*.

1.1 Sedimen dan angkutan sedimen

Sedimen di sungai baik terlarut maupun tidak terlarut merupakan produk dari pelapukan batuan yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan, terutama perubahan iklim. Hasil pelapukan batuan disebut sebagai partikel-partikel tanah. Pengaruh tenaga kinetis air hujan dan aliran air permukaan (pada daerah tropis), partikel-partikel tanah tersebut dapat terkelupas dan terangkut ke tempat yang lebih rendah dan kemudian masuk ke sungai yang disebut sedimen.

Angkutan sedimen dari tempat yang lebih tinggi ke daerah hilir dapat menyebabkan pendangkalan waduk, sungai, saluran irigasi dan terbentuknya tanah-tanah baru di pinggir-pinggir dan di delta-delta sungai. Proses sedimentasi dapat memberikan dampak yang menguntungkan dan merugikan. Dikatakan menguntungkan karena pada tingkat tertentu adanya aliran sedimen ke daerah hilir dapat menambah kesuburan tanah serta terbentuknya tanah garapan baru di daerah hilir. Tetapi, pada saat bersamaan aliran sedimen juga dapat menurunkan kualitas perairan dan pendangkalan badan perairan seperti pada waduk dan sungai.

Berdasarkan pada jenis sedimen dan ukuran partikel-partikel tanah serta komposisi mineral dari bahan inti yang menyusunnya, dikenal bermacam jenis sedimen seperti pasir, liat dan lain sebagainya dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Apabila ditinjau dari keadaan asalnya, angkutan sedimen di sungai pada umumnya dibedakan antara angkutan muatan material dasar (*bed material transport*) dan angkutan muatan kikisan (*wash load*). Angkutan muatan material dasar merupakan material dengan ukuran butir tertentu yang terangkut dari dasar sungai. Angkutan muatan material dasar sangat penting pada morfologi sungai dan mempengaruhi prediksi respon sungai terhadap setiap perubahan-perubahan yang terjadi pada sistem sungai.

Ditinjau dari cara pergerakannya, angkutan sedimen dibedakan menjadi angkutan muatan dasar (*bed load*) dan angkutan muatan layang (*suspended load*).

1.2 Hasil sedimen

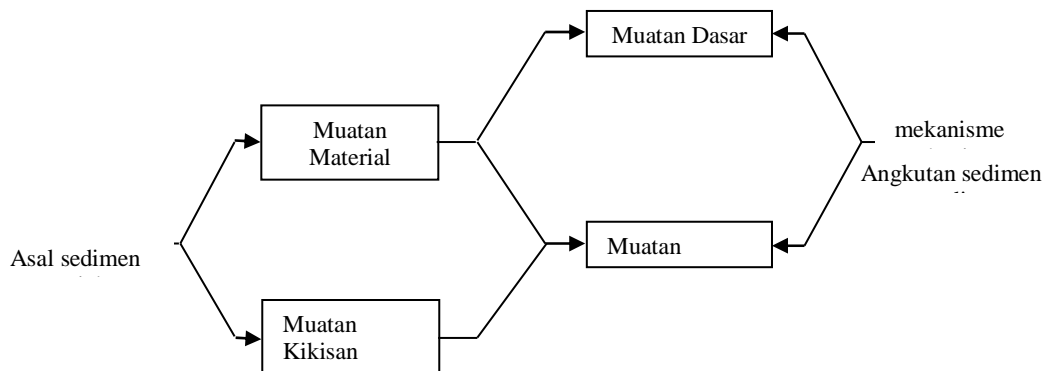
Hasil sedimen (*sediment yield*) adalah besarnya sedimen yang berasal dari erosi yang terjadi di daerah tangkapan air yang diukur pada periode waktu dan tempat tertentu. Hasil sedimen biasanya diperoleh dari pengukuran sedimen kikisan di sungai (*wash load*) atau dengan pengukuran langsung di waduk.

Hasil sedimen tersebut dinyatakan dalam satuan berat (ton) atau satuan volume (mpk atau *acre-feet*) dan merupakan fungsi luas dari daerah pengaliran. Perbandingan data hasil sedimentasi, pada umumnya didasarkan atas hasil per satuan luas daerah pengaliran yang dinamakan laju produksi sedimen (*sediment production rate*) yang dinyatakan dalam ton/ha, ton/km² atau *acre-feet/sq*.

Tabel 1. Jenis sedimen berdasar ukuran partikel

Jenis Sedimen	Ukuran partikel (mm)
Liat	< 0,0039
Debu	0,0039 – 0,0625
Pasir	0,0625 – 2,0
Pasir Besar	2,0 – 64,0

Sumber: Asdak, 2004.



Gambar 1. Asal dan cara Bergeraknya sedimen di sungai

Sumber: Mohammad, 2009.

Hasil sedimen tergantung pada besarnya erosi total di DAS/Sub-DAS dan tergantung pada angkutan partikel-partikel tanah yang tererosi tersebut keluar dari daerah tangkapan air DAS/Sub-DAS. Produksi sedimen umumnya mengacu kepada besarnya laju sedimen yang mengalir melewati satu titik pengamatan tertentu dalam suatu sistem DAS. Besarnya hasil sedimen biasanya bervariasi mengikuti karakteristik fisik DAS/Sub-DAS.

Hasil sedimen dan hasil erosi kotor (*gross erosion*) yang dihasilkan oleh erosi lempeng ditambah erosi alur atau oleh sebab lain adalah saling bergantung. Hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai rasio hasil sedimen terhadap erosi kotor, rasio ini dinamakan rasio pengangkutan sedimen (*Sedimen Delivery Ratio*, SDR). Hasil sedimen dari suatu daerah pengaliran tertentu dapat ditentukan dengan pengukuran pengangkutan sedimen pada titik kontrol alur sungai, atau dengan menggunakan rumus-rumus empiris.

Pengukuran besarnya sedimen yang paling memadai adalah melalui pengukuran sedimen yang dilakukan di dasar waduk. Cara lain yang dapat digunakan adalah dengan pembuatan kurva hubungan (*rating curve*), yaitu kurva yang menghubungkan laju angkutan sedimen (*dependent variable*) dengan besarnya debit (*independent variable*).

Pengukuran sedimen langsung di dalam waduk dilakukan dengan menggunakan perahu yang dilengkapi dengan tali kawat panjang yang dilengkapi alat pengambil sampel tanah di bagian ujungnya. Tali kawat ini diturunkan secara vertikal di beberapa tempat di dalam waduk sesuai dengan prosedur pengambilan sampel yang baku. Di dasar waduk dengan lapisan deposit sedimen yang tipis, ujung kawat yang telah dilengkapi alat pengambilan tanah tersebut akan mencapai lapisan tanah bukan sedimen.

Lapisan tanah ini umumnya berwarna lebih gelap dibandingkan dengan endapan sedimen dan dengan adanya perubahan warna dan tekstur yang terbawa oleh alat tersebut dapat dipastikan bahwa dasar atau kedalaman endapan sedimen di dalam waduk telah dapat ditentukan. Posisi perahu dalam pengukuran endapan sedimen ini perlu dicatat untuk membantu pembuatan peta kedalaman endapan sedimen untuk selanjutnya dapat ditentukan besarnya volume endapan sedimen di dalam waduk tersebut. Dengan mengetahui pembuatan waduk, maka dapat diperkirakan laju rata-rata akumulasi sedimen di daerah tersebut. Untuk mengkonversi volume sedimen menjadi satuan berat, perlu diketahui terlebih dahulu kerapatan sedimen rata-rata di daerah tersebut. Cara memperkirakan hasil sedimen dari suatu DAS adalah melalui perhitungan Nisbah Pelepasan Sedimen (*Sedimen Delivery Ratio*, SDR). Perhitungan besarnya SDR dianggap penting

dalam menentukan besarnya prakiraan realistis besarnya hasil sedimen total berdasarkan perhitungan erosi yang berlangsung pada suatu DAS. Variabilitas angka SDR dari suatu DAS/Sub-DAS akan ditentukan oleh pengaruh faktor-faktor tersebut adalah sebagai berikut:

1. Sumber sedimen

Tebing sungai sebagai sumber sedimen, akan memberikan hasil sedimen (volume dan kecepatan) berbeda dari sedimen yang berasal dari hasil erosi yang terjadi di DAS. Jumlah sedimen yang tersedia untuk proses angkutan sedimen dan jarak antara sumber sedimen dan sungai/anak sungai.

2. Besar sedimen

Besarnya sedimen yang dihasilkan dari proses erosi yang terjadi di tempat yang jauh dari alat angkutan sedimen akan memberikan nisbah pelepasan sedimen atau SDR yang lebih kecil daripada jumlah sedimen yang lebih sedikit tetapi dihasilkan di tempat yang lebih dekat dari alat angkutan sedimen. Ketika jumlah sedimen yang tersedia lebih besar daripada kapasitas sistem angkutan sedimen yang ada, maka akan meningkatkan laju deposisi sedimen dan menurunkan SDR.

3. Sistem angkutan

Umumnya dalam bentuk air permukaan dan kerapatan drainase. Semakin cepat dan besar volume air permukaan, maka semakin besar pula jumlah hasil sedimen.

4. Tekstur partikel tanah-tanah yang tererosi.

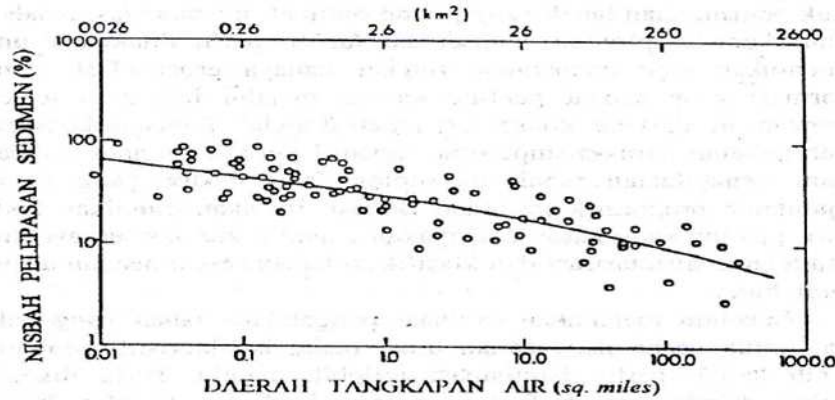
Tekstur sedimen akan menentukan dimana sedimen dengan tekstur tertentu tersebut akan terdeposisi di dalam dan/atau di luar sistem angkutan sedimen. Seringkali material sedimen yang agak besar atau kasar merupakan hasil sedimen yang berasal dari erosi tebing sungai, sedang material yang lebih halus berasal dari erosi permukaan.

5. Lokasi deposisi sedimen

Sedimen seringkali terdeposisi di kaki-kaki bukit, di cekungan-cekungan permukaan daerah tangkapan air, di sepanjang sungai atau di dalam waduk bagian atas. Terjadinya deposisi sedimen akan menurunkan angka SDR dari DAS yang bersangkutan.

6. Karakteristik DAS

Karakteristik fisik DAS yang paling menentukan besarnya SDR adalah luas daerah tangkapan air termasuk topografi dari daerah tangkapan air, kemiringan dan panjang lereng akan menentukan besarnya erosi yang terjadi di daerah tersebut dan juga menentukan besarnya angka Sediment Delivery Rate (SDR)



Gambar 2. Besarnya angka SDR yang ditentukan berdasarkan luas DAS
 Sumber: Asdak, 2004.

Menurut *SCS National Engineering Handbook*, besarnya prakiraan hasil sedimen dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$Y = E \times SDR \times Ws \tag{1}$$

dengan Y = Hasil sedimen per satuan luas, (ton/tahun), E = Erosi total, (ton/ha/tahun), SDR = Sedimen Delivery Ratio, Ws = Luas daerah tangkapan air, (ha)

Besarnya angka SDR dalam perhitungan-perhitungan erosi atau hasil sedimen untuk suatu daerah aliran sungai umumnya ditentukan dengan menggunakan grafik hubungan antara luas DAS dan besarnya SDR seperti dalam pada **Gambar 2**. Gambar grafik hubungan luas DAS dan nilai SDR tersebut dikembangkan dari hasil penelitian empiris yang dilakukan dalam kurun waktu panjang dan melibatkan puluhan DAS di Amerika Utara. Hal yang perlu diperhatikan dalam pembacaan grafik tersebut adalah karena satuan luas daerah tangkapan air yang digunakan dalam satuan mil persegi, maka untuk luas DAS dengan satuan luas km² atau ha perlu terlebih dahulu dikonversi menjadi mil persegi (1 km² = 0,386 sq.miles).

Selain itu besarnya angka SDR tersebut tergantung dari luas daerah pengaliran, kemiringan dan faktor-faktor yang mempengaruhi erosi, dapat pula digunakan perkiraan SDR dari tabel USLE, *present and future SSSA Special Publication Number 8*, Hubungan antara daerah aliran dan *Sediment Delivery Ratio* (SDR) :

Tabel 2. Hubungan luas DAS dan SDR

Luas DAS (km ²)	Sediment delivery ratio (%)
0,1	53
0,5	39
1,0	35
5,0	27
10,0	24
50,0	15
100,0	13
200,0	11
500,0	8,5
26.000,0	4,9

Sumber: Hidrologi dan Pengelolaan DAS, Asdak, 2004.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini direncanakan selama 1,5 tahun (2013-2015) di Waduk Cirata yang berada pada posisi 6°42'2" Lintang Selatan dan 107°22'3" Bujur Timur, termasuk dalam Wilayah Sungai Citarum, Provinsi Jawa Barat Daerah genangannya yaitu Waduk Cirata meliputi sebagian dari 3 (tiga) wilayah kabupaten yaitu Kabupaten Bandung, Purwakarta dan Cianjur. Waduk Cirata berada di antara Waduk Saguling dan Waduk Jatiluhur. Lokasi Waduk Cirata (tiga waduk kaskade).

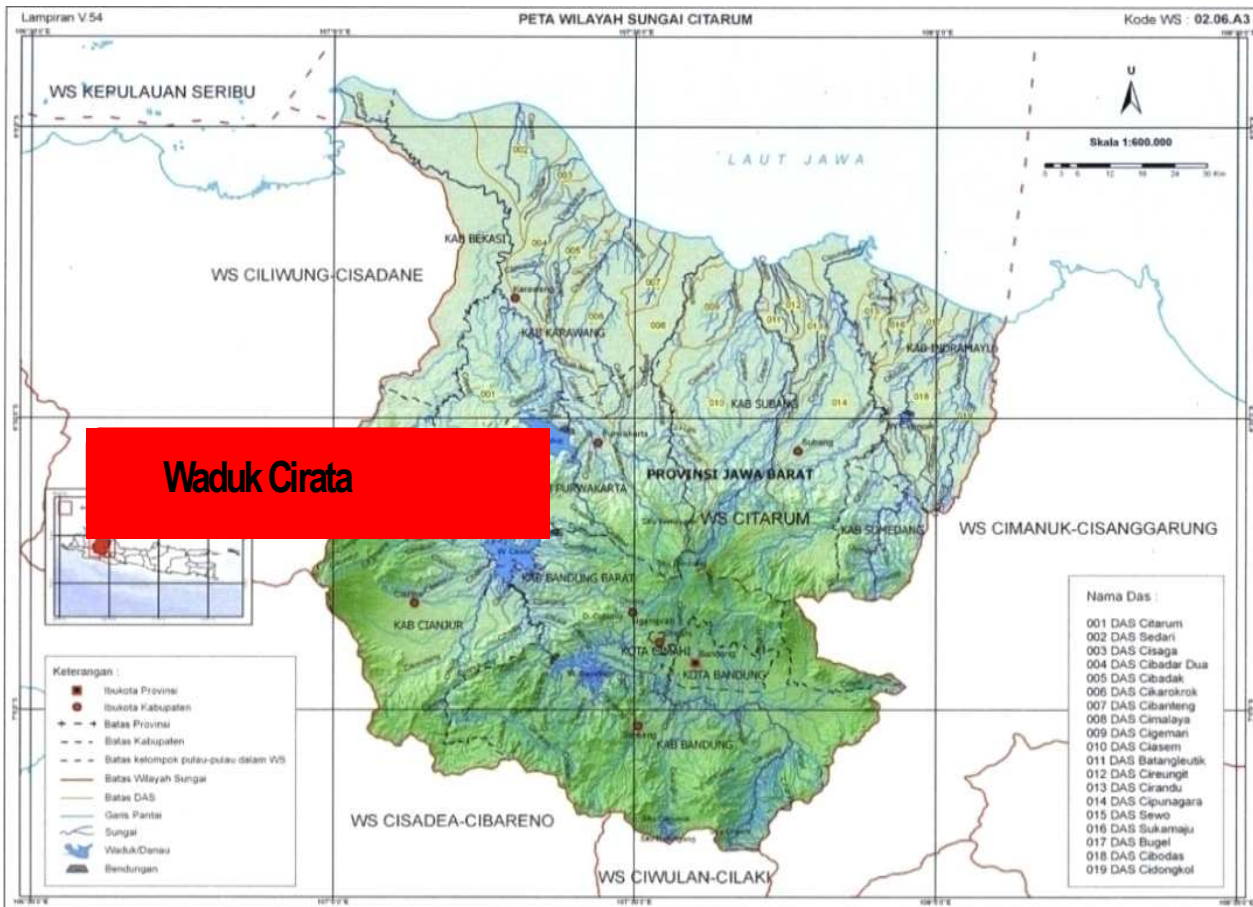
2.1 Metode pengumpulan data

Data Primer dan Data sekunder dikumpulkan dari instansi yang terkait dengan pengelolaan waduk Cirata baik langsung maupun tidak langsung. Instansi yang langsung mengelola waduk Cirata adalah PT. Pembangunan Jawa Bali. Badan Pengelola Waduk Cirata Cirata, Satuan Kerja Pengelola Waduk Cirata, Balai Hidrologi dan Sedimentasi, Balai Pengembangan Sumber Daya Air, Teknis Pengelola Daerah Aliran Sungai, Badan Pengelola Daerah Aliran Sungai, Badan Pengelola Wilayah Sungai Citarum, Satuan kerja Non Vertikal yang terkait dengan Pengembangan Sungai, Biro Pusat Statistik Kabupaten dimana Waduk Cirata berada, Pemda dan Instansi terkait lainnya. Data – data yang dikumpulkan terdiri dari data primer dan data sekunder.

2.2 Perhitungan sedimentasi pada waduk

Sedimen merupakan suatu keping atau potongan material yang terbentuk oleh proses fisik dan kimia. Bentuk dari material beraneka ragam dan tidak terbatas dari mulai yang berbentuk bulat sampai ke berbentuk tajam, juga bervariasi dalam kerapatan dan komposisi materialnya dengan kuarsa yang paling dominan. Sedimen tersebut terbawa hanyut oleh alirannya.

Sedimentasi merupakan proses pengendapan bahan yang terangkut boleh air dialur sungai pada waduk sebagai akibat terjadinya erosi. Kepadatan sedimen setelah mengendap akan berubah dari waktu ke waktu. Untuk waduk besar hampir seluruh sedimen mengendap



Gambar 3 Lokasi Waduk Cirata di WS Citarum
Sumber : Kepres No. 12 Tahun 2012

setelah proses sedimentasi, sehingga kapasitas waduk berkurang, maka sebagian sedimen akan terbuang melalui *spillway*.

Menurut Soewarno (2013) dikemukakan bahwa endapan sedimen akan tersebar disetiap kedalaman waduk khususnya waduk Cirata.

Sedimen yang melayang mempunyai kepadatan :

$$W_o = W_c \times P_c + W_m \times P_m + W_s \times P_s \quad (2)$$

Dengan W_o = Kepadatan sedimen mengendap (kg/m^3), W_c = Kepadatan awal lempung, P_c = Prosentase lempung, W_m = Kepadatan awal lanau, P_m = Prosentase lanau, W_s = Kepadatan pasir, P_s = Prosentase pasir.

Tabel 2. klasifikasi type operasi reservoir

Type	Operasi Reservoir
1	Sedimen hampir tergenang
2	Sedimen kadang tergenang, kadang kering saat air surut
3	Reservoir dalam kondisi normal kering
4	Sedimen pada bagian dasar sungai

Sumber: Soewarno (2013)

Tabel 3. Jumlah operasi waduk

Operasi	W_o (kg/m^3)	W_m (kg/m^3)	W_s (kg/m^3)
1	416	1120	1550
2	561	1140	1550
3	641	1150	1550
4	961	1170	1550

Koefisien konsolidasi (K) :

$$K = K_c \times P_c + K_m \times P_m + K_s \times P_s \quad (3)$$

Dengan K = Koefisien konsolidasi, K_c = Koefisien konsolidasi lempung, P_c = Prosentase Lempung, K_m = Koefisien konsolidasi lanau, P_m = Prosentase lanau, K_s = Koefisien konsolidasi pasir, P_s = Prosentase pasir.

Tabel 4. Nilai K dari pasir, lanau dan lempung

Operasi Reservoir	Pasir	Lanau	Lempung
1	0	91	256
2	0	29	135
3	0	0	0

Soewarno (2013), mengembangkan formula untuk menghitung kepadatan sedimen setelah T tahun waduk beroperasi :

$$W_T = W_o + 0,4343K \left(\frac{T}{T-1} \ln T - 1 \right) \quad (4)$$

Dengan W_T = Kepadatan rata-rata sedimen yang mengendap setelah T tahun waduk beroperasi (kg/m^3),

W_o : Kepadatan awal sedimen (kg/m^3), K = Koefisien Konsolidasi, T = waktu waduk beroperasi (tahun).

Volume sedimen yang mengendap setelah T tahun waduk beroperasi :

$$V_T = \frac{ET \cdot (\text{sedimen tertahan})}{W_T} \quad (5)$$

Dengan V_T = Volume sedimen setelah T tahun waduk beroperasi, W_T = Kepadatan rata-rata sedimen yang mengendap setelah T tahun waduk beroperasi (kg/m^3), T = Waktu waduk beroperasi (tahun).

3. Hasil dan Pembahasan

Volume Sedimen yang mengendap Setelah T Waduk Beroperasi adalah waduk Operasional Type 2 mengalami sedimentasi dimana terdapat sedimen lempung, sedimen lanau dan sedimen pasir dengan perbandingan 30% : 32% : 38%, volume sedimen yang masuk kedalam waduk rata-rata tahunan adalah $1,2 \times 10^6$ ton/tahun.

Analisa pendataan yang didapatkan adalah berdasarkan perhitungan kepadatan awal sedimen, perhitungan koefisien konsolidasi (K), perhitungan kepadatan sedimen yang mengendap setelah T tahun waduk beroperasi serta perhitungan volume sedimen yang mengendap setelah T tahun Waduk beroperasi.

1) Perhitungan Kepadatan awal sedimen: Berdasarkan data-data dari tabel di atas (**Persamaan 1**), maka diperoleh W_o adalah :

$$\begin{aligned} W_o &= W_c \times P_c + W_m \times P_m + W_s \times P_s \\ &= (561 \times 0,3) + (1140 \times 0,32) + (1550 \times 0,38) \\ &= 168,3 + 364,8 + 589 \\ &= 1122,1 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

2) Perhitungan Koefisien konsolidasi (K) Berdasarkan tabel di atas (**Persamaan 2**) type 2, maka diperoleh nilai K adalah :

$$\begin{aligned} K &= K_c \times P_c + K_m \times P_m + K_s \times P_s \\ &= (135 \times 0,3) + (29 \times 0,32) + (0 \times 0,38) \\ &= 40,5 + 9,28 + 0,0 \\ &= 49,78 \end{aligned}$$

3) Perhitungan kepadatan sedimen yang mengendap setelah T tahun waduk beroperasi, Dari hasil di atas, maka dapat diperoleh W_T (**Persamaan 3**) .terlihat pada **Tabel 5**. Kepadatan sedimen dan volume sedimen di waduk.

Contoh perhitungan sebagai berikut:

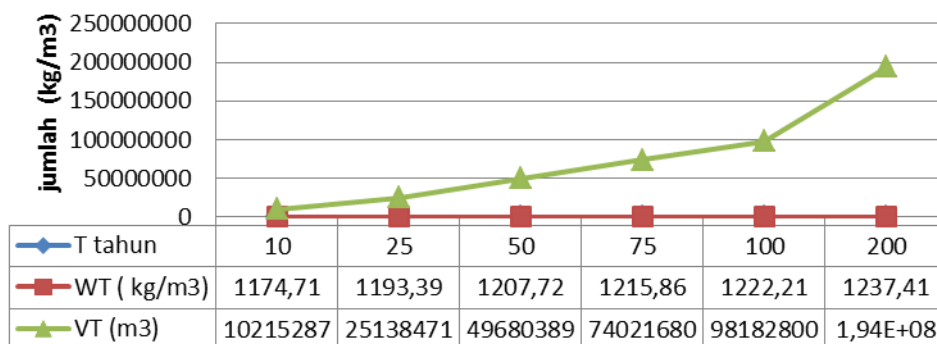
Kepadatan sedimen setelah 10 tahun adalah :

$$\begin{aligned} W_{10} &= 1122,1 + 0,4343 \times 49,78 (1,11 \ln 9) \\ &= 1122,1 + 21,6195 (2,44) \\ &= 1174,71 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Tabel 5. Kepadatan sedimen dan volume sedimen di waduk

T tahun	W_T (kg/m^3)	V_T (m^3)
10	1174,71	10215287,18
25	1193,39	25138471,08
50	1207,72	49680389,49
75	1215,86	74021680,13
100	1222,21	98182800,01
200	1237,41	193953500,6

kepadatan dan volume sedimen yang mengendap setelah T-tahun waduk beroperasi



Gambar 4. Grafik Kepadatan dan Volume Sedimen yang mengendap setelah T tahun Waduk beroperasi

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian, kita dapat menarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Semakin lama waduk beroperasi, maka semakin banyak sedimen yang akan mengendap didalam waduk
2. Semakin lama waduk beroperasi, semakin terjadi pendangkalan waduk atau terjadi berkurangnya volume tampungan waduk
3. Pada waduk yang sedang beroperasi dimana sedimen yang masuk akan mempengaruhi umur waduk.
4. Dari Hasil Analisis, diperoleh besarnya kepadatan sedimen adalah $1122,1 \text{ kg/m}^3$ dan besarnya koefisien konsolidasi sedimen sebesar 49,78.
5. Hasil Analisis yang diperoleh untuk kepadatan sedimen yang mengendap setelah T tahun waduk beroperasi dari awal 10 tahun sebesar $1174,71 \text{ kg/m}^3$ dan pada akhir 200 tahun sebesar $1237,41 \text{ kg/m}^3$
6. Hasil Analisis yang diperoleh untuk Volume sedimen yang mengendap setelah T tahun waduk beroperasi dari awal 10 tahun adalah $10215287,18 \text{ m}^3$ dan pada akhir 200 tahun adalah $193953500,6 \text{ m}^3$.

Dengan menghitung Volume sedimen yang mengendap setelah T-tahun pada waduk yang beroperasi akan dapat dipikirkan rencana-rencana selanjutnya agar umur waduk dapat diperpanjang.

Daftar Pustaka

- Asdak, C., 2004, Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai, Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Keputusan Presiden Nomor 12 Tahun 2012 tentang Penetapan Wilayah Sungai.
- Mohammad, B., 2009, Pengelolaan Daerah Aliran Sungai, Malang: Penerbit Percetakan CV. Asrori.
- Soewarno, 2013, Pengukuran dan Pengolahan Data Aliran Sungai (Hidrometri). Bandung: Nova.