

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Menurut Ernawan Setyono (2011) dalam jurnal berjudul Kajian distribusi sedimentasi waduk Wonorejo, Tulungagung - Jawa Timur oleh dengan metode *The Empirical Area Reduction method and Area increment method* pada tahun 2008 dan 2011 menghasilkan data nilai distribusi sedimen yang lebih besar dengan menggunakan *Area increment method* dan metode yang paling sesuai untuk memprediksi distribusi sedimen di waduk Wonorejo yaitu *Empirical Area Reduction* karena memiliki selisih simpangan yang lebih kecil dibandingkan dengan *Area increment method*, baik tahun 2008 maupun 2011. Penelitian ini hanya sampai mengkaji di bagian distribusi sedimennya saja maka dari itu dilanjutkan dengan memprediksikan usia layanan waduk berdasarkan metode tersebut yaitu *Empirical Area Reduction* saja.

Menurut Niayesh Fendreski, Samaneh A, Mohammad G, & Sajjad Roshandel (2014) dalam jurnal berjudul *Investigation and Calibration of Area-Reduction and Area-Increment Empirical Methods in Sediment Distribution Type of Maroon reservoir dam in Khizestan, Irak* diperoleh persamaan untuk mencari nilai m yaitu $y = 0.32032x + 1.1711$ dimana nilai $slope$ (n) adalah $0.32032x$ maka waduk diklasifikasikan sebagai waduk tipe II. Usia layanan waduk yang diperoleh berdasarkan metode yang digunakan yaitu 30 tahun dan 50 tahun.

Menurut Atiek Noer Widayanti (1999) dalam jurnal berjudul Prediksi Laju Sedimentasi dan Distribusi Pengendapan menggunakan "EMPIRICAL AREA REDUCTION METHOD" pada Waduk Gajah Mungkur Wonogiri Jawa Tengah oleh diperoleh hasil bahwa Waduk Gajah Mungkur termasuk tipe II dengan nilai $m = 3.1$ dan usia guna waduk berdasarkan laju sedimentasi yaitu 32 tahun sedangkan usia guna waduk berdasarkan *Empirical Area Reduction Method* yaitu 121 tahun.

Menurut Jannatul mawa, Ussy Andawayanti, dan Pitojo Tri Juwono (2007) dalam jurnal berjudul Studi Pendugaan Sisa Usia Guna Waduk Sengguh

Dengan Pendekatan Erosi dan Sedimentasi, melakukan perhitungan berkurangnya usia guna waduk dengan menggunakan dua metode yaitu dari hasil erosi menggunakan USLE (*Universal Soil Loss Equation*) sehingga nanti bisa diketahui besarnya SDR (*Sediment Delivery Ratio*) dan laju sedimen yang masuk. Setelah itu membandingkan hasilnya dengan pengukuran *echosounding* yang dilakukan Perum Jasa Tirta I, Malang. Dari kedua metode yang digunakan didapatkan bahwa tidak terjadi perbedaan sisa usia guna waduk yang terlalu besar sehingga disimpulkan sisa usia guna waduk Sengguruh hanya sekitar 1 tahun.

Menurut Ni Arum Linggarjati (2009) dengan penelitian Perbandingan Metode Area Increment, Empirical Area Reduction dan Moody's Modification untuk Analisa Volume Sedimentasi (Studi Kasus Waduk Sampean Baru). Dari hasil perhitungan ketiga metode empiris tersebut, didapat kesamaan yaitu volume sedimen terhenti pada elevasi 116 m. Volume sedimen pada elevasi 116 m menurut metode Area Increment adalah 97.859,83 m³ , menurut Empirical Area Reduction adalah 184.812 m³ dan menurut Moody's Modification adalah 97.859 m³ . Dari hasil di atas diketahui bahwa hasil metode Area Increment relatif dekat atau memiliki selisih yang kecil dengan hasil metode Moody's Modification. Hal ini karena secara matematis volume sedimen pada metode Area Increment sama dengan metode Moody's Modification yaitu volume sedimen total dikurangi volume waduk, sedangkan metode Empirical Area Reduction secara matematis menkomulatifkan volume sedimen akibat luasan relatifnya.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Usia Waduk

Sebuah waduk dibangun untuk memberikan manfaat sesuai dengan fungsi utama dibangunnya waduk tersebut apakah sebagai waduk satu fungsi atau waduk multi fungsi, dalam jangka waktu sampai tercapainya usia ekonomisnya. Oleh karena itu, terdapat beberapa istilah tentang usia waduk yaitu usia layanan (*usefull life*), usia ekonomi (*economic life*), usia manfaat (*usable life*), usia rencana (*design life*) dan usia penuh (*full life*). Definisi usia waduk tersebut adalah sebagai berikut :

a) Usia layanan

Usia layanan waduk adalah suatu periode dari mulai beroperasinya suatu waduk yang dapat memberikan layanan secara penuh dan baik terhadap fungsi utama pembangunannya. Untuk waduk yang diambil airnya melalui bangunan pengambilan bawah, usia layanan waduk biasanya disamakan dengan periode dari tahun pertama dioperasikannya waduk tersebut sampai dengan terpenuhinya tampungan mati dan tertutupnya bangunan pengambilan tersebut oleh sedimen. Sedangkan untuk waduk yang diambil airnya melalui pemompaan maka usia layanan waduk akan sama dengan periode dari tahun pertama dioperasikannya waduk tersebut sampai dengan terpenuhinya tampungan efektif oleh sedimen. Apabila waduk sudah tidak dapat memberikan layanan sesuai fungsinya maka waduk tersebut dinamakan waduk mati.

b) Usia ekonomi

Usia ekonomi waduk dikaitkan dengan nilai kelayakan waduk, yang di hitung dari mulai beroperasinya waduk tersebut sampai diperolehnya keuntungan atau manfaat ekonomi yang sebanding dengan biaya pembangunan waduk termasuk biaya operasi dan pemeliharaannya.

c) Usia manfaat

Usia manfaat waduk adalah suatu periode dari mulai beroperasinya dan dimanfaatkan suatu waduk sampai waduk tersebut dinyatakan mati. Matinya

waduk tidak selalu disebabkan oleh sedimentasi tetapi dapat disebabkan oleh hal-hal lain seperti kering karena adanya bocoran, kerusakan pada struktur bendungan atau bangunan pelengkap lainnya, tidak dioperasikan karena membahayakan lingkungan.

d) Usia rencana

Usia rencana waduk adalah usia patokan suatu waduk direncanakan untuk dapat difungsikan atau dioperasikan secara penuh, misal 50 tahun atau 100 tahun. Usia rencana sering digunakan untuk menghitung nilai kelayakan waduk, apakah usia rencana berada diatas usia ekonomi (layak) atau dibawah usia ekonomi (tidak layak). Usia rencana juga digunakan sebagai dasar untuk mendesain usia teknis infrastruktur yang harus dibangun dengan melihat tingkat keamanannya.

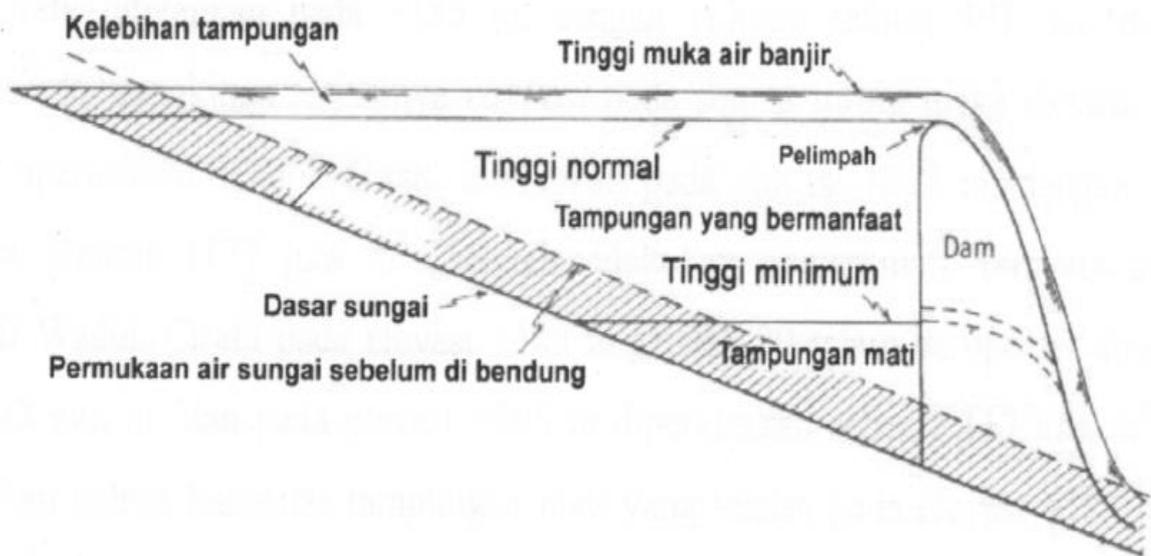
e) Usia penuh

Usia penuh adalah suatu periode atau jumlah tahun dari mulai beroperasinya waduk sampai kapasitas tampungan total terpenuhi oleh sedimen.

2.2.2 Kapasitas Tampungan Efektif (*Effective Storage*)

Untuk sebuah waduk biasanya batas air tertinggi disebut dengan tinggi muka air normal (*normal pool level*) sedangkan batas air terendah disebut dengan tinggi muka air minimum (*minimum pool level*). Pada tinggi normal, permukaan air waduk tepat mencapai mercu bangunan pelimpah (*spillway*). Dan pada tinggi minimum, permukaan air tepat mencapai dasar dari bangunan penyadap (*intake*).

Ruang antara tinggi normal sampai pada tinggi minimum disebut dengan kapasitas tampungan efektif yaitu air yang dapat dimanfaatkan untuk operasi waduk selama musim kemarau.



Gambar 2.1 Struktur Umum Waduk

2.2.3 Kapasitas Tampungan Mati (*Dead Storage*)

Seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.1 bahwa di bawah tinggi minimum terdapat sebuah ruang yang disebut dengan tampungan mati (*dead storage*). Dalam sebuah waduk, ruang tersebut harus disediakan untuk menampung kadar lumpur yang tersuspensi pada saat masuk ke dalam waduk. Besarnya kapasitas tampungan mati suatu waduk didasarkan pada data kadar sedimen melayang dari semua sungai yang masuk ke waduk pada saat perencanaan. Semakin besar kadar sedimen melayang dari sungai-sungai yang direncanakan masuk ke waduk, semakin besar pula kapasitas tampungan mati yang harus disediakan.

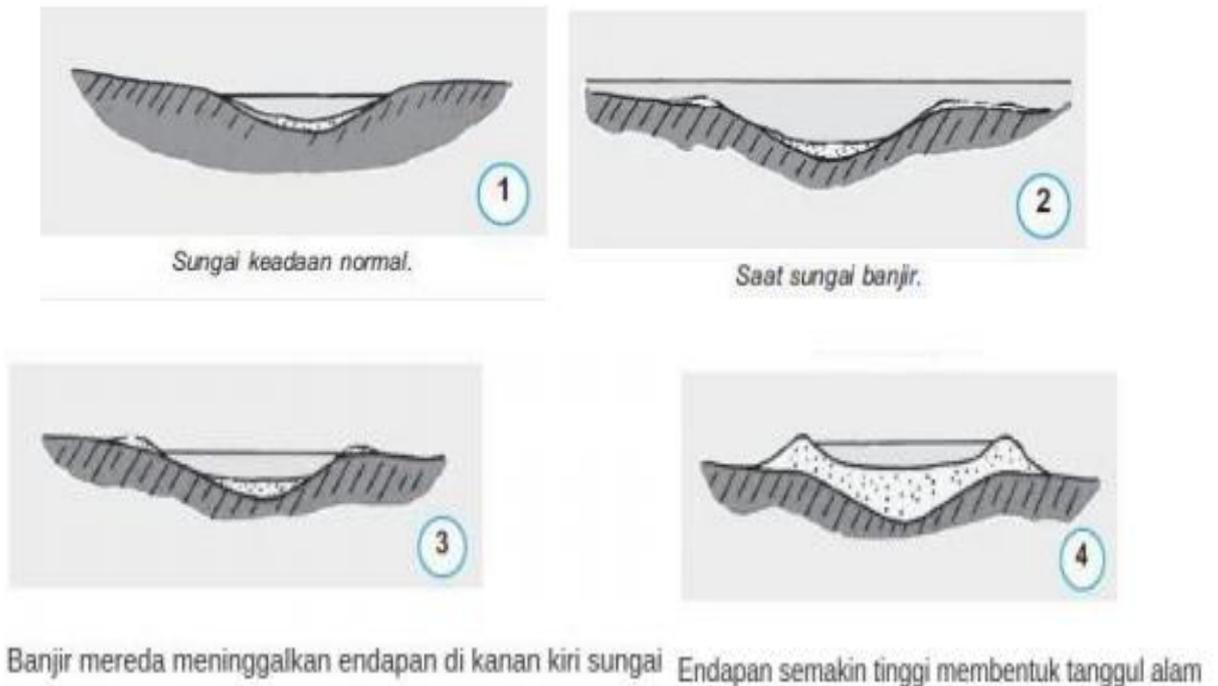
2.2.4 Erosi

Erosi adalah pindahnya atau terangkutnya tanah atau bagian-bagian tanah dari suatu tempat ke tempat lain oleh media alami. Erosi juga dapat disebut pengikisan atau pelongsoran, sesungguhnya merupakan proses penghanyutan tanah oleh desakan-desakan atau kekuatan air atau angin, baik yang berlangsung secara alamiah ataupun sebagai akibat/tindakan perbuatan manusia (Kartasapoetra, 1991).

Faktor-faktor penting yang mempengaruhi erosi tanah adalah curah hujan, tumbuh-tumbuhan yang menutupi permukaan tanah, jenis tanah dan kemiringan tanah. Penyebab utama terjadinya erosi di daerah tropis seperti Indonesia adalah

air. Hal ini disebabkan oleh daerah tropis kelembaban dan rata-rata curah hujan per tahun yang cukup tinggi. Proses erosi tanah yang disebabkan oleh air melalui 3 tahap, yaitu :

- a. Pelepasan atau pengelupasan (*Detachment*) yaitu terlepasnya dan terlemparnya butiran tanah atau partikel tanah dari bongkah agregat tanah ke udara oleh air.
- b. Pemindahan atau pengangkutan (*Transportasion*) yaitu butiran tanah yang telah terlepas diangkut media pengangkut, yaitu air.
- c. Pengendapan butiran tanah dimana butiran tanah tidak dapat diangkut lagi oleh media pengangkut.



Gambar 2.2 Proses Erosi Mengendapkan Sedimentasi

(Sumber Perbaikan dan Pengaturan Sungai, Suyono Sudarsono dan Masateru Tominaga, 2008)

Erosi yang disebabkan oleh air dapat berupa :

- a. Erosi lempeng (*sheet erosion*), yaitu butiran-butiran diangkut lewat permukaan atas tanah oleh selapis tipis limpasan permukaan, yang dihasilkan oleh intensitas hujan yang merupakan kelebihan dari infiltrasi.

- b. Pembentukan polongan (*gully*), yaitu erosi lempeng terpusat pada polongan tersebut. Kecepatan airnya jauh lebih besar dibandingkan dengan kecepatan limpasan permukaan. Polongan tersebut cenderung menjadi lebih dalam, yang menyebabkan terjadinya longsoran-longsor. Polongan tersebut tumbuh kearah hulu. Ini dinamakan erosi kearah belakang (*backward erosion*)
- c. Longsor massa tanah yang terletak di atas batuan keras atau lapisan tanah liat. Longsor ini terjadi setelah adanya curah hujan panjang, yang lapisan tanahnya menjadi jenuh oleh air tanah.
- d. Erosi tebing sungai, terutama pada saat banjir, yaitu tebing tersebut mengalami penggerusan air yang dapat menyebabkan longornya tebing-tebing pada belokan-belokan sungai.

2.2.5 Sedimentasi

Sedimentasi dapat didefinisikan sebagai pengangkutan, melayangnya (*suspense*), mengendapnya material fragmental oleh air. Sedimentasi merupakan akibat dari adanya erosi dan memberi dampak banyak, yaitu :

- a. Di sungai, pengendapan sedimen didasar sungai yang menyebabkan naiknya dasar sungai, kemudian mengakibatkan tingginya muka air sehingga berakibat sering terjadi banjir yang menimpa lahan-lahan yang tidak di lindungi (*unprotected land*). Hal tersebut diatas dapat pula menyebabkan aliran *meandering*.
- b. Di saluran, jika saluran irigasi di aliri air yang penuh sedimen, maka akan terjadi pengendapan sedimen di saluran. Sudah tentu akan diperlukan biaya yang cukup besar untuk pengerukan sedimen tersebut. Pada keadaan tertentu pelaksanaan pengerukan menyebabkan terhentinya operasi saluran.
- c. Di waduk-waduk, pengendapan sedimen di waduk-waduk akan mengurangi volume aktifnya. Sebagian besar jumlah sedimen yang di alirkan oleh waduk adalah sedimen yang di alirkan oleh sungai-sungai yang mengalir kedalam waduk, hanya sebagian kecil yang berasal dari longsor tebing-tebing waduk oleh limpasan permukaan. Butir-butir yang kasar akan diendapkan di

bagian hulu waduk, sedangkan yang harus di endapkan di dekat bendungan. Jadi sebagian besar akan diendapkan di bagian volume aktif waduk. Sebagian daripadanya dapat dibilas ke bawah, apabila terjadi banjir pada saat permukaan air waduk masih rendah.

- d. Di Bendungan atau pintu-pintu air yang menyebabkan kesulitan dalam mengoperasikan pintu-pintu tersebut. Adanya pembentukan pulau-pulau pasir (*sand bars*) di sebelah hulu bendungan atau pintu air akan mengganggu aliran air yang melalui hilir bendungan atau pintu air. Bahaya penggerusan terhadap bagian hilir bangunan terjadi jika beban sedimen di sungai tersebut berkurang karena pengendapan di bagian hulu bendungan, maka air dapat mengangkut material alas sungai.
- e. Di daerah sepanjang sungai, sebagaimana yang telah diuraikan diatas, banjir akan lebih sering terjadi di daerah yang tidak di lindungi. Daerah yang di lindungi oleh tanggul akan aman selama tanggulnya selalu dipertinggi sesuai dengan kenaikan dasar sungai, dan muka airnya akan mempengaruhi drainase sekitarnya. Lama kelamaan drainase dengan cara gravitasi tidak memungkinkan lagi.

Proses sedimentasi diawali dengan masuknya partikel-partikel dan juga zat-zat yang masuk ke sungai dari hulu ke hilir dan berakhir menjadi sedimen. Sedimen yang dihasilkan oleh proses erosi akan terbawa oleh aliran dan diendapkan pada suatu tempat yang kecepatannya melambat atau terhenti. Berdasarkan pada jenis dan ukuran partikel-partikel tanah serta komposisi bahan, sedimen dapat dibagi atas beberapa klasifikasi yaitu *graves* (kerikil), *medium sand* (pasir), *silt* (lanau), *clay* (liat) dan *dissolved* material (bahan terlarut). Ukuran partikel memiliki hubungan dengan kandungan bahan organik sedimen. Sedimen dengan ukuran partikel halus memiliki kandungan bahan organik yang lebih tinggi dibandingkan dengan sedimen dengan ukuran partikel yang lebih kasar.

2.2.5.1 Jenis Sedimen

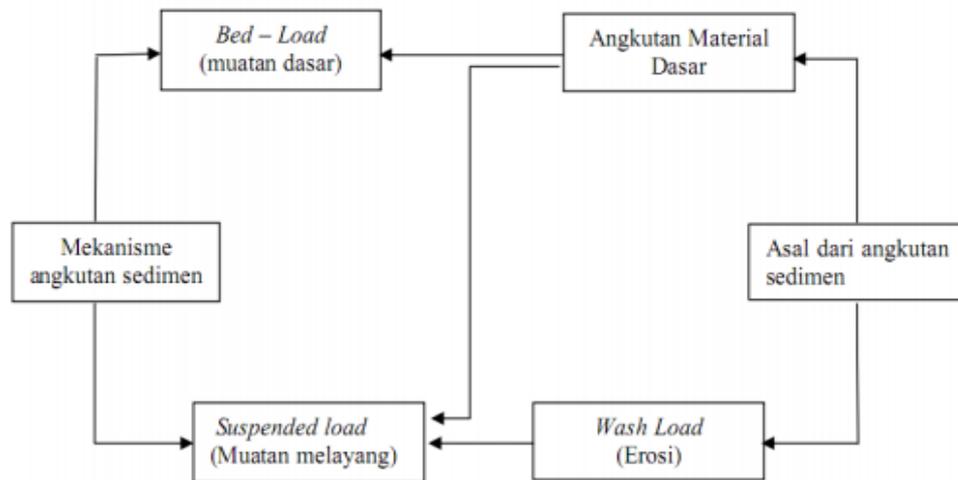
Faktor-faktor yang mempengaruhi gerakan sedimen (*transport sedimen*) di sungai adalah berat jenis butiran, kecepatan aliran dan morfologi sungai. Perencanaan waduk selalu memperhitungkan kapasitas volume tampungan mati (*dead storage*) untuk menampung sedimentasi yang masuk ke waduk selama usia layanan waduk. Selama sedimen masih mengisi volume mati maka waduk masih bisa beroperasi normal.

Dilihat dari mekanisme angkutannya, sedimen dapat dibagi menjadi :

- a. *Suspendend load* (angkutan melayang) yaitu partikel-partikelnya bergerak melayang dalam aliran air. Bahan *suspended load* terjadi dari pasir halus yang bergerak akibat pengaruh turbulensi aliran, debit, dan kecepatan aliran. Semakin besar debit maka semakin besar pula angkutan *suspended load*.
- b. *Bed load* (angkutan dasar) yaitu partikel-partikelnya yang bergerak secara menggelinding (*rolling*), mendorong (*pushing*) dan menggeser (*sliding*).

Berdasarkan asal sedimennya dibagi menjadi :

- a. *Bed material transport* yaitu asal material berasal dari saluran itu sendiri (dapat terdiri dari *Suspendend load* dan *Bed load*) dan ditentukan oleh kondisi dan dasar aliran.
- b. *Wash Load Transport* yaitu material yang berasal dari pelapukan lapisan permukaan tanah yang lepas dari berupa debu-debu halus selama musim kering. Debu halus ini selanjutnya masuk ke sungai oleh angin maupun air hujan pertama pada musim hujan sehingga jumlah sedimen pada awal musim hujan lebih banyak dibandingkan dengan keadaan yang lain.



Gambar 2.3 Skema angkutan sedimen

(Sumber : Laporan pengukuran sedimentasi PSDA Semarang, 2004)

2.2.6 Sedimentasi Waduk

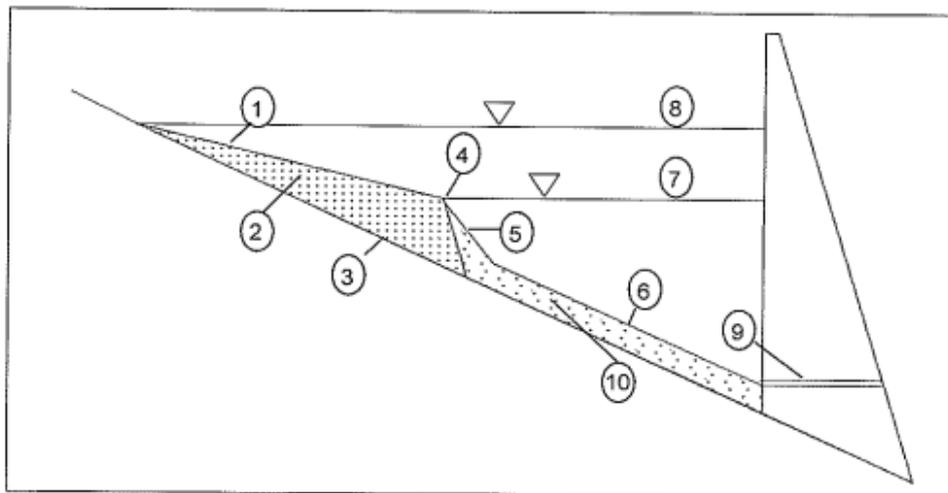
Waduk menurut pengertian umum adalah tempat pada permukaan tanah yang digunakan untuk menampung air saat terjadi kelebihan air / musim penghujan sehingga air itu dapat dimanfaatkan pada musim kering. Sumber air waduk terutama berasal dari aliran permukaan ditambah dengan air hujan langsung.

Waduk merupakan suatu bangunan air yang berfungsi untuk menampung air pada saat musim hujan dan melepaskan debit air pada musim kemarau. Sayangnya debit yang masuk tidak hanya berupa air tetapi membawa kandungan sedimen. Dengan kata lain bahwa tidak ada satupun waduk yang bebas dari sedimentasi. Besar kecilnya kandungan sedimen berdampak langsung atau tak langsung terhadap sedimentasi waduk (USBR dalam Prabowo 2001:1).

Berdasarkan fungsinya, waduk di klasifikasikan menjadi dua jenis yaitu waduk eka guna (*single purpose*) yang dioperasikan untuk memenuhi satu kebutuhan saja dan waduk multi guna (*multi purpose*) yang berfungsi untuk memenuhi berbagai kebutuhan.

Fungsi dari berbagai macam waduk diantaranya adalah untuk peredam debit banjir dalam penanggulangan banjir, penampungan sedimen, keperluan

irigasi, penyediaan sarana air baku untuk masyarakat, pembangkit listrik, sarana rekreasi, navigasi, konversi sumber daya air, dan juga untuk menjaga kualitas air. Fungsi waduk tersebut dapat berkurang atau bahkan mati karena terjadinya sedimentasi di dalam daerah genangan waduk. Sedimentasi di waduk merupakan proses alami dan penumpukan sedimen yang terbawa ke dalam waduk dan faktor ini mempengaruhi usia layanan dari waduk.



Keterangan :

- | | |
|--|--|
| (1) Kemiringan formasi endapan bagian hulu (<i>Topset slope</i>) | (6) Kemiringan dasar (<i>bottom set slope</i>) |
| (2) Endapan Sedimen dengan Butiran kasar | (7) Muka Air Normal |
| (3) Kemiringan palung asli (<i>Original Thalweg Slope</i>) | (8) Muka Air Maksimum |
| (4) Titik perubahan kemiringan endapan (<i>Pivot Point</i>) | (9) Fasilitas Pengeluaran (<i>Outlets</i>) |
| (5) Kemiringan formasi endapan bagian hilir (<i>Foreset slope</i>) | (10) Endapan sedimen dengan butiran halus |

Gambar 2.4 Profil Tipikal Pengendapan Sedimen (Strand and Pemberton,1982)

Strand and Pemberton (1982) menjelaskan faktor yang mempengaruhi proses sedimentasi waduk adalah :

- a. Fluktuasi hidrologis air dan *inflow* sedimen
- b. Variasi ukuran partikel sedimen
- c. Fluktuasi operasi waduk
- d. Ukuran dan bentuk waduk

Faktor lain yang berpengaruh selain keempat faktor diatas menurut Strand dan Pemberton (1982) adalah :

- a. Keadaan vegetasi waduk
- b. Turbulensi dan atau arus kecepatan

- c. Erosi dari sedimen terendam
- d. Operasi pembilasan waduk

Akibat sedimen terhadap fungsi waduk (Varshey ,1974) adalah :

- a. Mengurangi usia guna waduk secara langsung mempengaruhi manfaat waduk
- b. Distribusi sedimen di waduk mengatur letak pintu pengeluaran (*outlet*) untuk menghindari kecepatan sedimentasi
- c. Sedimen di daerah delta diatas elevasi puncak waduk dapat menyebabkan aggradasi (pengendapan) dibagian hulu waduk. Endapan ini mengurangi kapasitas masukan (*inflow capacity*) saluran.
- d. Pengerusan atau degradasi di tepi atau tebing dan dasar saluran bagian hilir waduk.

Tingkat dimana kapasitas waduk berkurang dapat dipengaruhi oleh sedimen yaitu jumlah sedimen yang masuk, presentase dari masukan sedimen yang tertangkap dan kerapatan sedimen yang mengendap.

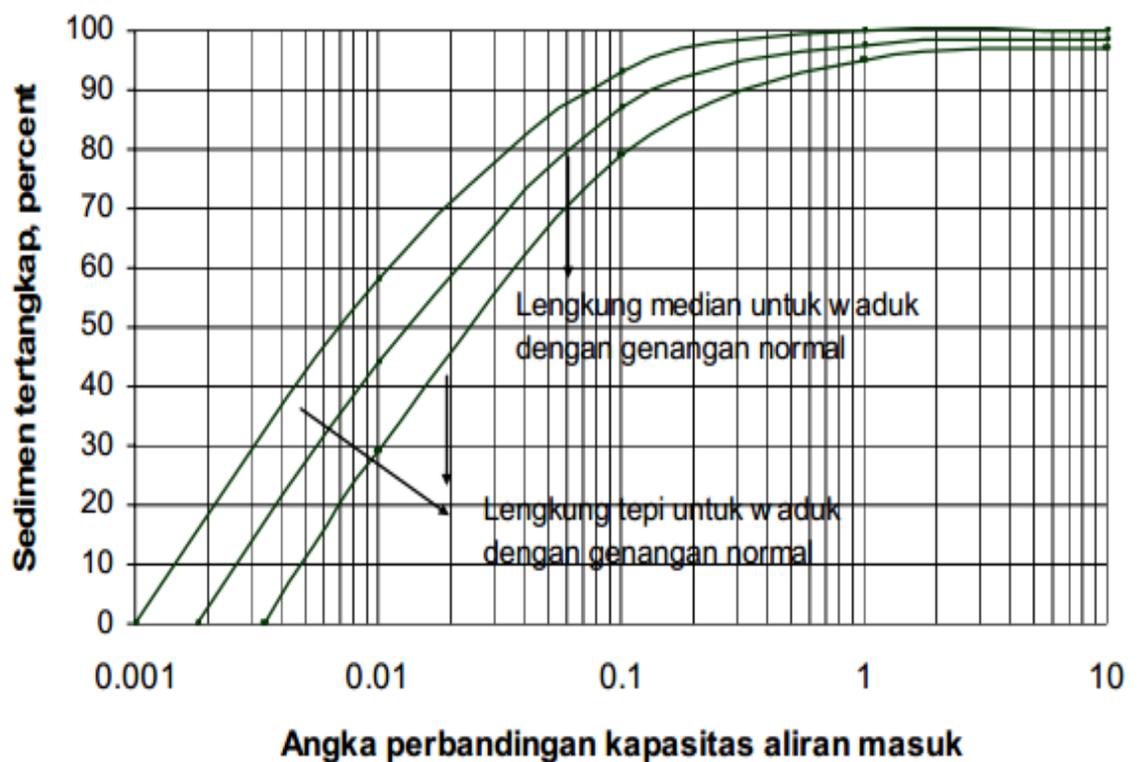
2.2.7 Pengendapan Sedimen di Waduk

Dalam perencanaan pembangunan waduk selalu diperhitungkan kapasitas tampungan matinya. Bila kapasitas sedimen yang masuk lebih besar dari pada kapasitas tampungan volumenya maka akan mengakibatkan usia waduk akan lebih pendek dari usia perencanaan dan hilangnya manfaat waduk yang sebenarnya. Pengendapan sedimen di waduk di pengaruhi oleh :

2.2.7.1 Efisiensi tangkapan sedimen (Trap Efficiency)

Jumlah sedimen yang mengendap di dalam waduk dapat dihitung dengan mencari besarnya Efisiensi tangkapan sedimen (*Trap Efficiency*). *Trap efficiency* didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah sedimen yang mengendap di waduk dengan total angkutan sedimen yang masuk ke dalam waduk (Brune, 1953 dalam USBR, 1973).

Perhitungan penentuan *trap Efficiency*, terlebih dahulu menentukan perbandingan antara kapasitas tampungan (C) dengan *inflow* aliran tahunan (I) kemudian nilai dari perbandingan C/I diplotkan pada grafik *trap Efficiency* (Brune, 1953), hubungan antara *ratio of reservoir capacity to annual inflow* (sumbu x) dengan *sediment trapped percent* (sumbu y). Nilai *trap Efficiency* akan berkurang sejalan dengan operasional waduk karena kapasitas waduk akan terus berkurang akibat sedimen.



Gambar 2.5 Grafik *Trap Efficiency* (Kironoto, 1997)

2.2.7.2 Berat Volume Kering

Berat volume kering adalah massa sedimen kering dalam satuan volume. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi berat volume kering di waduk, yaitu :

1. cara pengoperasian waduk,
2. tekstur atau ukuran partikel sedimen
3. tingkat pemadatan
4. kemiringan dasar sungai

Jenis dari operasi waduk diklasifikasikan dalam tabel dibawah (tabel 2.1) :

Tabel 2.1 Tipe Waduk

Tipe Waduk	Operasi Waduk
1	Sedimen terendam atau hampir terendam
2	Umumnya draw down waduk sedang sampai besar
3	Waduk umumnya kosong
4	Sedimen dasar sungai

Sumber : Strand and Pamberton (1982)

Menurut Pamberton dan Strand (USBR, 1982) mengusulkan rumus integral pendekatan untuk menghitung berat volume kering rata-rata dari semua sedimen yang mengendap di dalam waduk selama waktu T beroperasi.

$$WT = W1 + 0.4343 K \frac{T}{T-1} (NT) - 1 \quad (2.1)$$

Keterangan :

WT = Berat volume kering rata-rata setelah T tahun operasi waduk(kg/m³)

W1 = Berat volume kering awal (kg/m³)

K = Konstanta yang tergantung pada operasi waduk dan jenis material sedimen

$$K = K_C \cdot P_C + K_m \cdot P_m + K_S \cdot P_S \quad (2.2)$$

Keterangan :

K_c, K_m, K_s = Konstanta konsolidasi lempung, lumpur, dan pasir

P_c, P_m, P_s = Persentase lempung, lumpur, dan pasir

Niai K_c, K_m, K_s untuk masing-masing tipe waduk dapat dilihat dalam table dibawah.

Tabel 2.2 Koefisien K untuk Tipe Waduk

Tipe Waduk	K _c	K _m	K _s
1	256	91	0
2	135	29	0
3	0	0	0

Sumber : Strand and Pamberton (1982)

Berat volume kering awal menurut Lara dan Pamberton dapat diestimasi dengan persamaan :

$$W1 = W_C \cdot P_C + W_m \cdot P_m + W_s \cdot P_s \quad (2.3)$$

Keterangan :

W1 = Berat volume kering mula-mula setelah 1 tahun konsolidasi (kg/m³)

P_c, P_m, P_s = Persentase lempung (<0.005 mm, lumpur (0.005-0.0625 mm), pasir (0.0625-2.00 mm)

W_c, W_m, W_s = Konstanta berat volume kering untuk lempung, lumpur, pasir yang nilainya tergantung dari bentuk waduk, yang nilainya seperti tabel berikut :

Tabel 2.3 Koefisien untuk penentuan berat volume kering

Tipe Waduk	W _c	W _m	W _s
1	416	1120	1550
2	561	1140	1550
3	641	1150	1550
4	961	1170	1550

Sumber : Strand and Pamberton (1982)

2.2.7.3 Distribusi Sedimen Waduk

Distribusi sedimentasi waduk adalah penyebaran partikel sedimen pada elevasi permukaan waduk dalam periode tertentu. Tiap-tiap waduk memiliki pola tersendiri dalam distribusi sedimentasi yakni bahwa semua waduk mempunyai karakteristik dan sistem yang berbeda antara satu dengan yang lainnya.

Varshney (1974) menyatakan metode yang digunakan untuk menduga distribusi sedimen didalam waduk yaitu *Empirical Area Reduction Methode* (EARM). Metode ini di dalamnya mengandung perkiraan perubahan dari permukaan asli dasar waduk yang di reflesikan dengan berkurangnya luas permukaan akibat sedimentasi.

Metode ini menerangkan bahwa pola distribusi waduk dipengaruhi oleh :

- a. Cara pengoperasian waduk
- b. Jenis muatan sedimen
- c. Ukuran dan bentuk waduk
- d. Lokasi dan ukuran outlet

1. *Empirical Area Reduction Methode*

Distribusi sedimen di waduk dengan metode *Empirical Area Reduction* di kemukakan oleh Whitney M. Borland dan Carl . Miller (1958) yang kemudian di perbaiki oleh Lara pada tahun 1962. Metode ini menjelaskan bahwa distribusi sedimen di waduk bergantung pada beberapa faktor, yaitu :

1. Cara pengoperasian waduk
2. Tekstur dan ukuran partikel sedimen
3. Bentuk waduk
4. Volume sedimen

Metode ini menunjukkan bahwa deposisi sedimen belum tentu terbatas pada peningkatan penyimpanan yang lebih rendah dari waduk. Faktor yang dianggap paling berpengaruh untuk menentukan distribusi sedimen adalah bentuk waduk. Bentuk waduk ditentukan berdasarkan hubungan antara parameter m seperti pada Tabel 2.4

Tabel 2.4 Klasifikasi waduk berdasarkan nilai m

Bentuk Waduk	Klasifikasi	m
1	<i>Lake</i> (Danau)	3.5 – 4.5
2	<i>Food plain - foot hill</i> (Perbukitan Dataran)	2.5 – 3.5
3	<i>Hill</i> (Bukit)	1.5 – 2.5
4	<i>Gorge</i> (Ngarai)	1.0 – 1.5

Sumber : Strand and Pamberton (1982)

Tabel 2.5 *Predominant size* Sedimen berdasarkan tipe waduk

<i>Predominant size</i>	Tipe Waduk
Sand or coarser	I
Silt	II
Clay	III

Sumber: Strand and Pamberton (1982)

Langkah pertama yang harus dilakukan dalam metode ini adalah menentukan bentuk waduk. Penentuan bentuk waduk di dasarkan dari nilai m yang didefinisikan sebagai garis kemiringan yang diperoleh dari penggambaran data kedalaman awal dengan kapasitas waduk awal.

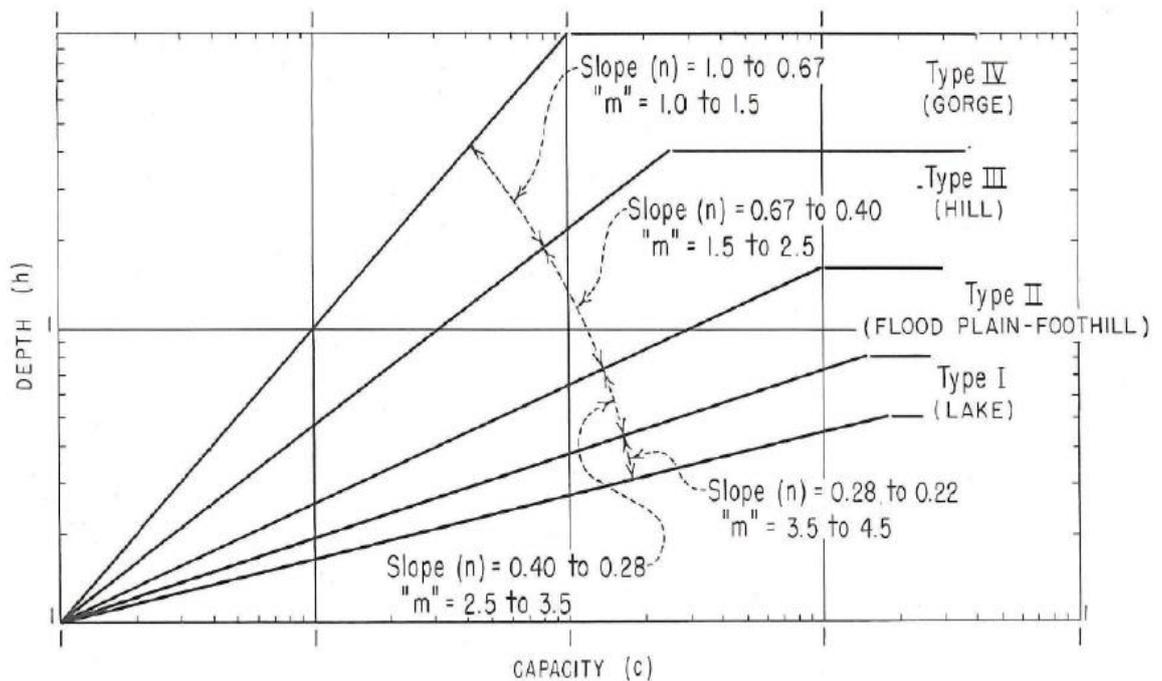


FIGURE 7: DETERMINATION OF THE DIFFERENT TYPES OF RESERVOIRS - (BORLAND W.M. AND MILLER C.R., 1958)

Gambar 2.6 Grafik Klasifikasi waduk dari hubungan kedalaman terhadap kapasitas waduk

(Sumber : TU Delft , Master_Thesis_Koen_Bronsvort - Sedimentation in reservoirs)

Dasar *empirical area reduction method* adalah :

$$S = \int_0^{y_0} A dy + \int_{y_0}^H Ka dy \quad (2.4)$$

Keterangan :

S = Volume sedimen total yang diendapkan didalam waduk

0 = Elevasi dasar (asli) waduk

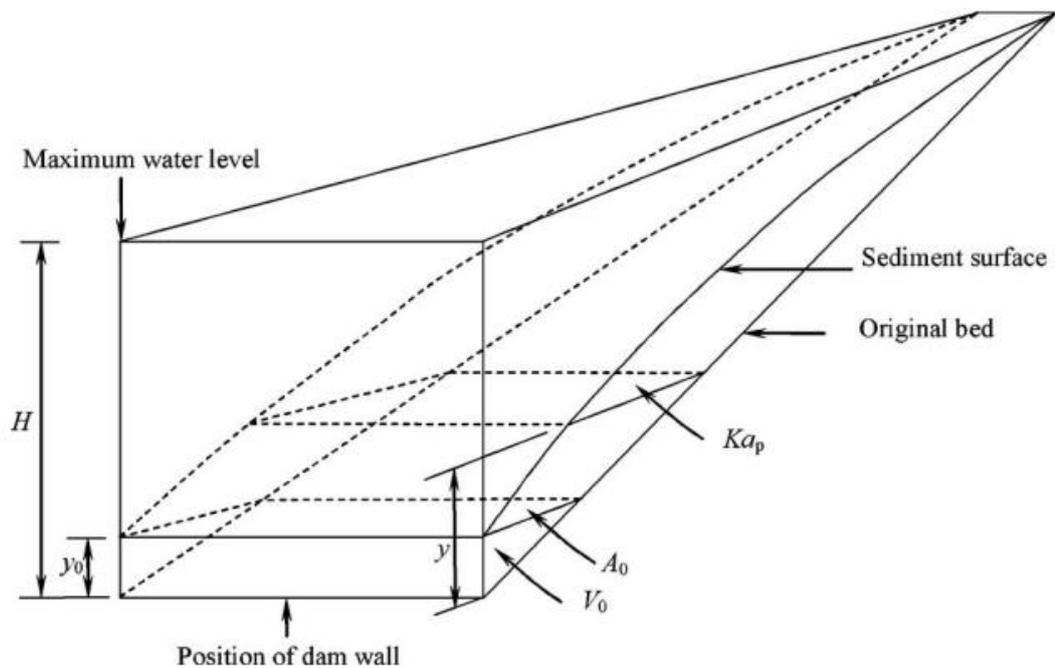
Y_0 = Elevasi dasar waduk setelah T tahun

A = Luas waduk

H = kedalaman total waduk (pada muka air normal)

K = konstanta untuk mengkonversikan luas sedimen relatif (a) ke dalam luas sedimen sebenarnya

A = Luas sedimen relative



Gambar 2.7 Sketsa sederhana distribusi sedimen *empirical area reduction method*

(Sumber : New Empirical Method For Prediction Of Sediment Distribution In Reservoir)

Metode ini berdasarkan luas area relatif dihitung dengan rumus :

$$Ap = C p^m (1 - p)^n \quad (2.5)$$

Keterangan :

Ap = luas relatif

Dan nilai C, m, n adalah konstanta karakteristik yang ditentukan berdasarkan pada tipe waduk yang telah ditentukan. Jadi sebelum menghitung luas area relatif, terlebih dahulu menentukan tipe waduk agar dapat mengetahui karakteristik waduk tersebut.

Berikut ini adalah tabel persamaan untuk mencari nilai luas relatif :

Tabel 2.6 Rumus mencari nilai luas area relatif

Tipe Waduk	Ap
1	$3.417 p^{1.50} (1-p)^{0.20}$
2	$2.324 p^{0.50} (1-p)^{0.40}$
3	$15.882 p^{1.10} (1-p)^{2.30}$
4	$4.232 p^{0.10} (1-p)^{1.50}$

Sumber : Strand and Pamberton (1982)

Ap (luas relatif) dihitung di tiap kedalaman relatif masing-masing elevasi.

Nilai kedalaman relatif dihitung dengan rumus :

$$p = \frac{\text{kedalaman tiap elevasi}}{\text{kedalaman total}} \quad (2.6)$$

Penentuan elevasi nol baru dicari dengan menentukan nilai K berdasarkan *trial and error* sampai volume sedimen sama dengan volume prediksi sedimen jika hasil *trial and error* volume sedimen dengan volume prediksi sedimen berbeda cukup besar (>1 juta m³) maka nilai K dihitung kembali sampai volume sedimen sama dengan volume prediksi sedimen. Nilai K digunakan untuk menghitung luas sedimen yang berada diatas elevasi nol baru sedangkan untuk dibawah elevasi nol baru untuk luas sedimennya yaitu dianggapsama dengan luas waduk awal.

Nilai K dihitung dengan rumus :

$$k = \frac{\text{luas awal elevasi nol baru}}{\text{luas relatif elevasi nol baru}} \quad (2.7)$$

Dengan menggunakan metode distribusi sedimen (*Empirical Area Reduction Method*) maka dapat diprediksi bagaimana sedimen terdistribusi di dalam waduk pada masa-masa yang akan datang.

Acuan yang digunakan untuk perhitungan usia layanan waduk dengan metode ini adalah berdasarkan hubungan fungsi antara luas genangan dengan elevasi genangan dan kapasitas tampungan. Yang digunakan sebagai patokan elevasi pintu pengambilan sebagai acuannya. Sehingga apabila elevasi pintu pengambilan sudah dicapai oleh elevasi endapan sedimen maka kegiatan operasional waduk akan terganggu dan pada akhirnya secara teknis akan mengakibatkan tidak berfungsinya waduk dengan normal.

2.2.8 Metode Kapasitas Tampungan Mati (*Dead Storage Method*)

Usia layanan waduk merupakan masa penggunaan waduk sesuai dengan usia perencanaannya yaitu sampai kapasitas tampungan matinya (*dead storage*) terisi penuh. Kapasitas Tampungan Mati (*Dead Storage*) merupakan perhitungan usia layanan berdasarkan waktu yang dibutuhkan oleh sedimen untuk mengisi kapasitas tampungan mati (kantong lumpur). Kapasitas tampungan mati (*dead storage*) adalah bagian penting bagi waduk yang digunakan untuk pembangkit listrik tenaga air, apabila kapasitas tampungan mati sudah terisi penuh oleh sedimen maka waduk sudah tidak dapat berfungsi dengan maksimal karena *intake* sudah ditutupi oleh sedimen.

Dengan diketahui besarnya kapasitas tampungan mati dan tingkat laju sedimentasi yang mengendap maka akan diketahui waktu yang dibutuhkan sedimen untuk mengisi volume tampungan mati.

1) Untuk menghitung volume waduk saat ini dapat digunakan rumus :

$$V_s = V_p - V_a \quad (2.8)$$

Keterangan :

V_s dan V_p pada elevasi yang sama

V_s = volume sedimen yang diendapkan, dalam m^3

V_p = Volume waduk pada saat perencanaan, dalam m^3

V_a = Volume volume waduk saat ini (aktual), dalam m^3

2) Laju Sedimentasi dapat dihitung dengan rumus :

$$S_r = \frac{V_s}{t_2 - t_1} \quad (2.9)$$

Keterangan :

S_r = tingkat laju sedimentasi waduk, dalam $m^3/tahun$

V_s = volume sedimen yang diendapkan, dalam m^3

t_2 = tahun terakhir pemeruman, dalam tahun

t_1 = tahun awal perencanaan waduk, dalam tahun

3) Maka untuk menghitung prediksi usia layanan waduk dapat menggunakan rumus :

$$L_t = \frac{V_a}{S_r} \quad (2.10)$$

Keterangan :

L_t = usia layanan waduk

V_a = Volume waduk saat ini (aktual), dalam m^3

S_r = Laju sedimentasi, dalam $m^3/tahun$

Umumnya semakin bertambahnya usia waduk maka semakin berkurang kapasitas tampungan matinya. Hal ini akan berdampak pada kegiatan operasional waduk. Sehingga metode ini dapat dijadikan acuan untuk memprediksi kapan kapasitas tampungan mati akan dipenuhi sedimen.

2.3 Kerangka Pemikiran

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui usia layanan Waduk Cirata dengan menggunakan metode kapasitas tampungan mati (*dead storage method*) dan distribusi sedimen (*The Empirical Area Reduction method*). Data yang diperlukan adalah data sekunder yang didapatkan dari PT PJB Badan Pengelola Waduk Cirata.