

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1. Tinjauan Umum

Pembangunan suatu waduk dimaksudkan untuk menyimpan air. Demikian pula halnya dengan pembangunan Waduk Wadaslintang bertujuan untuk menampung dan kemudian mendayagunakan air yang melimpah pada musim hujan untuk keperluan pertanian dan berbagai keperluan lainnya pada saat musim kemarau.

Dalam satu tahun, persediaan air di alam khususnya di Indonesia berubah – ubah, pada musim penghujan air sangat melimpah sedangkan pada saat musim kemarau tiba air sangat langka. Dengan kapasitas tampungan yang besar dan elevasi muka air yang tinggi, sebuah waduk selain dapat mengatur besar aliran sungai di sebelah hilirnya agar menjadi lebih merata sepanjang tahun, juga dapat berfungsi sekaligus sebagai sarana pengendali banjir yang efektif dan berbagai manfaat lainnya.

2.2. Jenis dan Manfaat Waduk

Waduk atau bendungan mempunyai bermacam – macam jenis dan berbagai manfaat. Beberapa macam jenis bendungan diantaranya adalah :

1. Tipe bendungan berdasarkan tujuan pembangunannya :
 - a. Bendungan dengan tujuan tunggal (*single purpose dam*) adalah bendungan yang dibangun untuk memenuhi satu tujuan saja, misalnya untuk pembangkit tenaga listrik, irigasi, pengendali banjir, atau tujuan lainnya tetapi hanya untuk satu tujuan saja
 - b. Bendungan serbaguna (*multipurpose dam*) adalah bendungan yang dibangun untuk memenuhi beberapa tujuan, misalnya : pembangkit tenaga listrik (PLTA) dan irigasi, pengendali banjir dan PLTA, air minum dan irigasi, air baku, PLTA dan irigasi dan lain sebagainya.
2. Tipe bendungan berdasarkan penggunaannya :
 - a. Bendungan penampung air (*storage dam*) adalah bendungan yang digunakan untuk menyimpan air pada masa surplus dan dipergunakan pada masa

- kekurangan, termasuk dalam bendungan penampung adalah tujuan rekreasi, perikanan, pengendali banjir dan lain – lain.
- b. Bendungan pembelok (*diversion dam*) adalah bendungan yang digunakan untuk meninggikan muka air, biasanya untuk keperluan mengalirkan air ke dalam sistem aliran menuju ke tempat yang memerlukan.
 - c. Bendungan penahan (*detention dam*) adalah bendungan yang digunakan untuk memperlambat dan mengusahakan seminimal mungkin efek aliran banjir yang mendadak. Air ditampung secara berkala / sementara, dialirkan melalui pelepasan (*outlet*). Air ditahan selama mungkin dan dibiarkan meresap di daerah sekitarnya.
3. Tipe bendungan berdasarkan jalannya air
- a. Bendungan untuk dilewati air (*overflow dam*) adalah bendungan yang dibangun untuk dilimpasi air pada bangunan pelimpah (*spillway*).
 - b. Bendungan untuk menahan air (*non overflow dam*) adalah bendungan yang sama sekali tidak boleh dilimpasi air.
4. Tipe bendungan berdasarkan material pembentuknya
- a. Bendungan urugan (*rock fill dam, embankment dam*) adalah bendungan yang dibangun dari hasil penggalian bahan (material) tanpa tambahan bahan lain yang bersifat campuran secara kimiawi, jadi betul – betul bahan pembentuk bangunan asli. Bendungan ini masih dibagi lagi menjadi dua yaitu bendungan urugan serba sama (*homogeneous dam*) adalah bendungan apabila bahan yang membentuk tubuh bendungan tersebut terdiri dari tanah yang hampir sejenis dan mempunyai gradasi (susunan ukuran butiran) hampir seragam. Kedua adalah bendungan zonal, adalah bendungan apabila timbunan yang membentuk tubuh bendungan terdiri dari batuan dengan gradasi (susunan ukuran butiran) yang berbeda – beda dalam urutan – urutan pelapisan tertentu.
 - b. Bendungan beton (*concrete dam*) adalah bendungan yang dibuat dari konstruksi beton baik dengan tulangan maupun tidak. Kemiringan permukaan hulu dan hilir tidak sama pada umumnya bagian hilir lebih landai dan bagian hulu mendekati vertikal dan bentuknya ramping. Bendungan ini dibagi lagi menjadi dua yaitu bendungan beton berdasarkan berat sendiri stabilitas tergantung pada massanya, bendungan beton dengan penyangga (*buttress dam*) dimana permukaan hulu

menerus dan di hilirnya pada jarak tertentu ditahan, bendungan berbentuk lengkung serta bendungan beton kominasi.

Beberapa manfaat yang mampu diberikan sebuah bendungan diantaranya adalah :

1. Irigasi

Pada saat musim hujan, air hujan yang turun di daerah tangkapan air sebagian besar akan mengalir ke sungai-sungai, air itu dapat ditampung sehingga pada musim kemarau air yang tertampung tersebut dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, antara lain untuk irigasi lahan pertanian.

2. Penyediaan Air Baku

Waduk selain sebagai sumber untuk pengairan persawahan juga dimanfaatkan sebagai bahan baku air minum dimana diperkotaan sangat langka dengan air bersih.

3. Sebagai PLTA

Dalam menjalankan fungsinya sebagai PLTA, waduk dikelola untuk mendapatkan kapasitas listrik yang dibutuhkan. Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) adalah suatu sistem pembangkit listrik yang biasanya terintegrasi dalam bendungan dengan memanfaatkan energi mekanis aliran air untuk memutar turbin, diubah menjadi energi listrik melalui generator.

4. Pengendali Banjir

Sungai dengan debit air yang besar jika tidak dikendalikan dengan cermat maka akan membahayakan masyarakat sekitar sungai itu sendiri, maka permasalahan itu dapat dijadikan sebagai latarbelakang dari pendirian waduk. Pada saat musim hujan, air hujan yang turun di daerah tangkapan air sebagian besar akan mengalir ke sungai-sungai yang pada akhirnya akan mengalir ke hilir sungai yang tidak jarang mengakibatkan banjir di kawasan hilir dari sungai tersebut, apabila kapasitas tampung bagian hilir sungai tidak memadai. Dengan dibangunnya bendungan-bendungan di bagian hulu sungai maka kemungkinan terjadinya banjir pada musim hujan dapat dikurangi dan pada musim kemarau air yang tertampung tersebut dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, antara lain untuk pembangkit listrik tenaga air, untuk irigasi lahan pertanian, untuk perikanan, untuk pariwisata dan lain sebagainya.

5. Perikanan

Untuk mengganti mata pencaharian para penduduk desa yang desanya ditenggelamkan untuk pembuatan waduk yang dulu bermata pencaharian sebagai petani sekarang beralih ke dunia perikanan dengan memanfaatkan waduk ini para penduduk dapat membuat rumah apung yang digunakan untuk peternakan ikan air tawar jadi ikan - ikan itu dipelihara di dalam jaring apung ataupun dalam karamba – karamba.

6. Pariwisata dan Olahraga Air

Dengan pemandangan yang indah waduk juga dapat dimanfaatkan sebagai tempat rekreasi dan selain tempat rekreasi juga dimanfaatkan sebagai tempat olahraga air maupun sebagai tempat latihan para atlet olahraga air.

2.3.Pengusahaan Waduk

Pengusahaan waduk pada hakekatnya adalah suatu kegiatan dalam hal mengatur / menentukan besarnya pengeluaran air waduk (O) untuk mendapatkan manfaat yang sebesar-besarnya, dengan memperhatikan kondisi air (I) serta karakter / kemampuan tampung dari waduk yang bersangkutan (S), secara berkesinambungan.

Definisi tersebut biasa dinyatakan dalam bentuk rumus keseimbangan yang telah berlaku, yaitu :

$$O = I - \Delta S.$$

Dari bentuk formula tersebut terlihat sepintas sangat sederhana dan mudah untuk diterapkan. Namun pada kenyataannya tidak demikian halnya, mengingat keterbatasan dari unsur (S), ditambah dari sifat unsur (I) yang tidak menentu (sangat bervariasi), juga adanya persyaratan “harus berkesinambungan”. Sedangkan manfaat / hasil dari unsur (O) dituntut untuk sedapat mungkin mencapai optimal. Oleh karena itu dalam pelaksanaannya, disamping menggunakan pedoman “rencana tahunan” yang telah biasa dan umum dibuat, akan lebih baik bila juga dilengkapi dengan perangkat lunak lain, yaitu apa yang disebut sebagai “Batas-Batas Ketinggian Muka Air Waduk” (*Rule Curve*).

2.3.1. Rencana Tahunan

Hal-hal pokok yang perlu mendapat perhatian dan dijadikan dasar perhitungan dalam membuat “Rencana Tahunan”.

1. Asumsi atau perkiraan kondisi aliran sungai (dalam hal ini air masuk ke waduk).
2. Kondisi awal simpangan air waduk atau DMA (Duga Muka Air) awal tahun.
3. Rencana minimum pengeluaran air dari waduk (misalnya untuk mencukupi kebutuhan pengairan).
4. Sasaran atau suatu target yang mungkin ada atau ingin dicapai pada tahun itu (misalnya target produksi listrik, target DMA akhir tahun, target maksimum / minimum DMA pada suatu saat).
5. Kemampuan / kesiapan unit-unit PLTA serta prasarana lainnya.

Dengan kelima hal pokok tersebut selanjutnya dapat dibuat rencana pengeluaran air dari waduk dan hasil produksi listriknya. Perlu diperhatikan bahwa dalam mengatur / menentukan besarnya pengeluaran air agar diusahakan.

1. Bila tanpa suatu target, harus direncanakan sedemikian rupa sehingga DMA waduk pada akhir musim hujan mencapai maksimum, dan pada akhir tahun kembali seperti kondisi awal tahun. Dalam hal waduk seri, pencapaian ketinggian maksimum dari DMA masing-masing waduk harus dibuat secara seimbang sebanding dengan kebutuhan dan tersedianya air.
2. Jalannya pengisian dan penurunan air waduk sebaiknya melintasi / membentuk garis cembung. Hal ini dimaksudkan untuk memperbesar tinggi jatuh (*head*) rata-ratanya, yang selanjutnya akan memperbesar produksi listrik yang dihasilkan.

Batas-Batas Ketinggian Muka Air Waduk (*Rule Curve*)

Rencana tahunan yang dibuat berdasarkan kaidah-kaidah seperti tersebut di atas sebenarnya adalah sudah merupakan suatu *rule curve* juga, yaitu apa yang biasa disebut sebagai *optimal rule curve*.

Seperti diketahui ada tiga macam *rule curve* yang telah biasa digunakan sebagai pedoman pengusahaan waduk, yaitu :

1. *upper rule curve*
2. *lower rule curve*
3. *optimal rule curve*

Rule curve mana yang paling cocok untuk pedoman pengoperasian suatu waduk, tergantung dari sifat dan fungsi dari waduk yang bersangkutan.

Upper rule curve biasa digunakan sebagai pedoman pengoperasian waduk yang mempunyai fungsi sebagai “Pengendali banjir”, dan *lower rule curve* untuk waduk yang direncanakan sebagai penjamin dalam pemenuhan akan suatu kebutuhan, misalnya untuk air minum, irigasi, air baku untuk industri dan sebagainya. Sedang *optimal rule curve* sangat cocok untuk waduk yang dimanfaatkan sebagai PLTA.

Dengan demikian bagi waduk yang mempunyai berbagai fungsi sebaiknya menggunakan pedoman kombinasi dua atau bahkan tiga-tiganya dari *rule curve* tersebut.

Sekalipun bagi waduk yang dibangun khusus untuk PLTA sebenarnya cukup menggunakan *optimal rule curve*, namun akan lebih baik bila juga menerapkan penggunaan kombinasi ketiga-tiganya. Hal ini disebabkan karena bagaimanapun dalam menetapkan / membuat *optimal rule curve*, masih didasarkan pada beberapa hal yang bersifat asumsi (misalnya debit aliran sungai), dimana dalam pelaksanaan dan kenyataan sering ditemui penyimpangan / ketidakcocokan. Bila terjadi demikian dengan sendirinya diperlukan tindakan penyesuaian. Untuk penyimpangan yang tidak terlalu besar atau hanya terjadi setahun sekali, tidak akan menimbulkan masalah. Tetapi tidak demikian halnya bila penyimpangannya cukup besar dan sering terjadi, kadang-kadang akan sulit untuk diadakan penyesuaian (karena keterbatasan sarana dan prasarana). Untuk itu akan sangat bermanfaat bila ada pedoman lain untuk pembatasan lain, yaitu dengan diadakannya *upper* dan *lower rule curve*.

Pola Operasi Waduk

Pola operasi waduk adalah suatu acuan / pedoman pengaturan air untuk pengoperasian waduk-waduk yang disepakati bersama oleh para pemanfaat air dan pengelola melalui Panitia Tata Pengaturan Air (PTPA).

2.4.1. Maksud dan Tujuan

Pola pengoperasian suatu waduk dimaksudkan sebagai pedoman pengaturan air untuk memenuhi berbagai kebutuhan air dan pengendali banjir. Bertujuan untuk memanfaatkan air secara optimal dengan cara mengalokasikan secara proporsional sedemikian rupa sehingga tidak terjadi konflik antar kepentingan.

2.4.2. Jenis Pola Operasi

Dalam satu tahun dibuat 2 (dua) jenis pola operasi waduk yaitu :

- a. Pola Operasi waduk musim hujan, berlaku saat pengisian waduk (Desember sampai dengan Mei).
- b. Pola operasi waduk musim kemarau, berlaku saat pengosongan waduk (Juni sampai November)

2.4.3. Faktor – Faktor yang Berpengaruh

Pengoperasian waduk secara efisien dan optimal merupakan permasalahan yang kompleks karena melibatkan beberapa faktor seperti :

1. *Operational Policy*, pola kebijakan pengoperasian waduk
2. Debit *inflow* yang akan masuk ke waduk yang tergantung dari ketepatan perencanaan debit yang akan masuk ke waduk tersebut
3. *Demand*, kebutuhan air untuk irigasi, air baku, PLTA, pelestarian lingkungan, dan kebutuhan pengendalian banjir
4. Ketepatan perkiraan akan besarnya debit banjir yang akan terjadi
5. Keandalan peralatan monitoring tinggi muka waduk, debit aliran, dan curah hujan
6. Koordinasi antara instansi yang terkait
7. Kemampuan operator
8. Koordinasi pengoperasian jangka pendek, jangka menengah dan jangka panjang, serta pengoperasian *real time*.

2.5. Kebijakan Pola Pengoperasian Waduk

Kebijakan pola pengoperasian waduk dapat dibedakan menjadi 5, yaitu:

1. *Standard Operating Policy (SOP)*
2. *Dinamik Program Deterministik Ataupun Implisit Stokastik*
3. *Dinamik Program Stokastik*
4. *Linear Program*
5. *Rule Curve*

Penjelasan masing-masing kebijakan pola pengoperasian waduk adalah sebagai berikut :

1. *Standard Operating Policy (SOP)*

Kebijakan pola pengoperasian waduk berdasarkan SOP adalah dengan menentukan *outflow* terlebih dahulu berdasarkan ketersediaan air di waduk dikurangi kehilangan air. Se jauh mungkin *outflow* yang dihasilkan dapat memenuhi seluruh kebutuhan / *demand* dengan syarat air berada dalam zona kapasitas / tampungan efektif.

2. *Dinamik Program Deterministik ataupun Implisit Stokastik*

Asumsi bahwa semua para meter atau variabel yang terdapat dalam model program linear dapat diperkirakan dengan pasti (*nonstochastic*), meskipun tidak dengan tepat (*Buras, 1975; Asri, 1984*). Pada model *Deterministik*, debit *inflow* pada masing – masing interval waktu tertentu. Secara sederhana, model ini menggunakan nilai harapan (*expected value*) dari sebuah variabel acak yang diskrit.

3. *Dinamik Program Stokastik*

Pada model *stokastik*, debit *inflow* diperoleh sebagai suatu proses *stokastik* dari data-data yang ada dan cara pendekatannya adalah sebagai suatu proses yang ditampilkan dengan sebuah matrik probabilitas transisi. Dapat disimpulkan bahwa, program dinamik *stokastik* menggunakan probabilitas *inflow* bersyarat yang diperoleh dari matrik probabilitas transisi dan nilai yang diharapkan yang diperoleh dari fungsi tujuan yang berulang perhitungannya (*recursive objective function*).

2. *Linear Program*

Program linear banyak dipakai dalam optimasi pendayagunaan sumberdaya air, baik untuk permasalahan operasi dan pengelolaan yang sederhana sampai permasalahan yang kompleks. Teknik program linier dapat dipakai apabila tercatat hubungan linier antara variabel – variabel yang dioptimasi, baik dalam fungsi tujuan (*objective function*).

Apabila permasalahan yang ditinjau bersifat non linier, seperti yang umum dijumpai dalam sumberdaya air, maka hubungan antara variabel diubah menjadi bentuk linier atau persamaan – persamaan non linier pada fungsi sasaran dan kendala dipecah menjadi beberapa persamaan linier dan diselesaikan dengan metode iterasi dan aproksimasi (*Yeh, 1985*).

Keunggulan program linier adalah kemudahannya untuk penyelesaian permasalahan optimasi bedimensi besar, sedangkan kelemahannya adalah kemungkianan terjadinya kesalahan dan kekeliruan dari hasil program ini sangat besar karena pendekatan yang dilakukan dalam melinierisasi fenomena non linier pada beberapa variabel tidak tepat (*Makrup, 1995; Goulter, 1981*). Oleh karena itu, keandalan program linier tergantung pada tingkat pendekatan dalam linierisasi hubungan antara variabel.

3. *Rule Curve*

Rule curve adalah suatu ilmu yang menunjukkan keadaan waduk pada akhir periode pengoperasian yang harus dicapai untuk suatu nilai *outflow* tertentu (*Mc. Mahon, 1978*). *Rule curve* pengoperasian waduk adalah kurva/grafik yang menunjukkan hubungan antara elevasi muka air waduk, debit *outflow* dan waktu dalam satu tahun (*Indra Karya, 1993*). *Rule curve* ini digunakan sebagai pedoman pengoperasian waduk dalam menentukan pelepasan yang diizinkan dan sebagai harapan memenuhi kebutuhan. Akan tetapi pada kenyataannya, kondisi muka air waduk pada awal operasi belum tentu akan sama *rule curve* rencana. Untuk mencapai elevasi awal operasi yang direncanakan, mungkin harus lebih banyak volume air yang dibuang. Sebaliknya apabila debit terjadi dari tahun – tahun kering, rencana pelepasan harus disesuaikan dengan kondisi air yang ada.

Ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam pemenuhan kebutuhan suplesi untuk kebutuhan irigasi, air baku dan PLTA dari operasi waduk, antara lain :

1. Dalam hal target untuk PLTA tidak lebih kecil dari target irigasi, maka kapasitas waduk akhir ditentukan berdasarkan pelepasan waduk untuk PLTA, jika sebaliknya maka kapasitas waduk akhir berdasarkan pelepasan target irigasi.
2. Seandainya dengan pelepasan tersebut diatas, kapasitas akhir periode waduk yang dihasilkan tidak lebih kecil dari kapasitas minimum waduk maka energi listrik yang dibangkitkan dan jika lebih kecil dari kapasitas minimum maka target pemenuhan kebutuhan diturunkan (gagal).
3. Jika kapasitas akhir ternyata melebihi kapasitas maksimum, maka kapasitas kelebihannya akan dilimpahkan.

Pelepasan untuk irigasi dan air baku dipenuhi melalui katup *release* waduk untuk PLTA. Jika kebutuhan irigasi tidak dapat terpenuhi melalui katup tersebut maka katup irigasi dapat dibuka (total pelepasan lebih dari kapasitas pengalihan turbin maksimum).

2.6. Skenario Pola Debit Inflow Waduk

Untuk pertimbangan pemakaian debit *inflow* waduk terhadap berbagai kemungkinan dari kondisi air berlebih sampai dengan air kurang, sehingga kebutuhan air yang disuplai dari waduk dapat diperhitungkan atas dasar skenario pola debit *inflow* andalan, misalnya untuk kondisi tahun basah, tahun normal dan tahun kering (Indra Karya, 1993). Skenario pola debit *inflow* dapat membantu dalam evaluasi akibat pengaruh perubahan infrastruktur bangunan air, misalnya penambahan waduk, bendung, saluran irigasi / air baku dan atau pengembangan luas daerah irigasi. Skenario kelompok pola debit *inflow* dilakukan sebagai berikut (Subarkah, 1980; Sosrodarsono, 1987; Pranoto, 1994) :

1. Dari rangkaian debit *inflow* rata – rata tahunan diurutkan dari terbesar sampai terkecil dengan persentase waktu disamai atau terlampaui dapat dirumuskan :

$$P = \frac{n}{N+1} \times 100 \%$$

Dimana :

P = persentase waktu disamai atau terlampaui

N = jumlah data

N = nomor urut data

(Subarkah, 1980)

2. Setelah diurutkan, diplot dalam bentuk grafik dan dibagi menjadi kelompok pola debit *inflow* tahunan misalnya pada kondisi debit *inflow* tahun basah, debit *inflow* tahun normal dan debit *inflow* tahun kering (secara visual) dengan batasan debit *inflow* antar kelompok tersebut.
3. Debit rata – rata bulanan yang sama setiap kelompok merupakan debit *inflow* bulanan untuk masing – masing kelompok skenario.

2.7. Simulasi dan Tujuan Operasi Waduk

Dalam permasalahan pendayagunaan sumberdaya air, simulasi merupakan suatu teknik permodelan untuk menirukan perilaku suatu sistem ke dalam suatu model. Model simulasi digunakan untuk mengevaluasi apa yang akan terjadi di dalam sistem jika diberikan masukan – masukan tertentu. Dengan demikian pola pengelolaan sistem dapat dievaluasi dengan mempelajari perilaku sistem terhadap masukan berbagai skenario pada sistem. Akan tetapi, perlu diketahui bahwa simulasi bukan merupakan prosedur optimasi (Loucks dkk, 1981), namun untuk menentukan tingkat keandalan / kegagalan terhadap perilaku pengoperasian diperlukan simulasi operasi waduk.

Metode Simulasi ada beberapa tipe, diantaranya (Hall, 1975) :

1. Simulasi dalam bentuk fisik, misalnya model skala fisik hidraulik.
2. Simulasi rangkaian dalam bentuk analog, misalnya model simulasi yang mewakilkan dengan bentuk rangkaian listrik.
3. Simulasi dalam bentuk digital, yaitu dengan menggunakan persamaan matematis, misalnya hukum keseimbangan air untuk simulasi waduk.

Simulasi digunakan untuk mengevaluasi hasil pola pengoperasian waduk (data debit eksisting, *SOP*, *Rule Curve – outflow*, maupun *Rule Curve – Elevasi*).

Tinjauan kegagalan atau keberhasilan pengoperasian tersebut dievaluasi dengan simulasi melalui kajian tentang unjuk kerja (*performance*) dari waduk. Unjuk kerja yang dianalisis adalah keandalan (*reliability*), kelentingan (*resiliency*), kerawanan (*vulnerability*).

Simulasi operasi waduk bertujuan untuk meninjau sejauh mana tingkat keandalan atau kegagalan yang terjadi dari perilaku sistem pengoperasian waduk dalam memenuhi kebutuhan pelayanannya. Model simulasi akan menganalisis probabilitas keandalan atau kegagalan rencana operasi yang telah ditetapkan. Kegagalan tersebut muncul akibat penyederhanaan masukan *stokastik* menjadi *deterministik*. Prinsip dasar simulasi merupakan pengembangan dari persamaan kontinuitas, yaitu :

$$Inflow - outflow = \frac{ds}{dt}$$

Dimana :

Inflow = aliran masuk (juta m³/bulan), merupakan data debit historis.

Outflow = aliran keluar (juta m³/bulan), merupakan pengalihragaman *inflow* untuk memenuhi kebutuhan.

$\frac{ds}{dt}$ = perubahan tampungan terhadap waktu.

Beberapa pendekatan simulasi waduk dapat dilakukan sebagai berikut :

1. Simulasi berdasarkan data debit *inflow* historis dan diasumsikan sudah mewakili proses yang sebenarnya.
2. Kehilangan air bulanan (evaporasi dan rembesan) merupakan fungsi dari luas genangan waduk.
3. Tampungan pada awal tahun pengoperasian waduk dianggap penuh (*McMahon dan Mein, 1978*).
4. Volume tampungan awal tahun pengoperasian dan volume tampungan akhir tahun pengoperasian diasumsikan sama, $S_0 = S_{12}$ (*Wurbs, 1996*).
5. Tampungan waduk di akhir bulan tidak diperkenankan kurang dari kapasitas minimum dan melebihi kapasitas maksimum.

6. Air yang melimpas melalui bangunan pelimpah tidak diperhitungkan sebagai sumberdaya yang dapat dimanfaatkan atau diasumsikan sebagai kelebihan (Martsanto, 1990).

7. Hukum kesetimbangan air waduk adalah :

$$I_t = RL_t + Le_t + SP_t + S_t - S_{t-1}$$

$$S_{0 \text{ (awal)}} = S_{12}$$

dimana :

I_t = debit *inflow* waduk pada bulan ke – t (juta m³/tahun)

RL_t = *release* waduk pada bulan ke – t (juta m³/bulan)

Le_t = limpasan yang terjadi pada bulan ke – t (juta m³/bulan)

SP_t = kehilangan air waduk pada akhir bulan ke – t (juta m³/bulan)

S_{t-1} = tampungan waduk awal bulan ke – t (juta m³/bulan)

t = 1, 2, 3,....., 12

2.8. Evaluasi Kinerja Pengoperasian Waduk

Kinerja pengoperasian waduk merupakan indikator waduk dalam pengoperasiannya untuk memenuhi kebutuhan. Beberapa indikator untuk menilai besarnya performance operasi waduk dapat meliputi keandalan (*reliability*), kelentingan (*reciliency*) dan kerawanan (*vulnerability*) (Suharyanto, 1997).

2.8.1. Keandalan (reliability)

Keandalan merupakan indikator seberapa sering waduk untuk memenuhi kebutuhan yang ditargetkan selama masa pengoperasiannya. Untuk pengoperasiannya waduk paling tidak ada dua macam definisi keandalan yaitu : (McMohan dan Russel, 1978 dalam Suharyanto, 1997)

1. Prosentase keadaan dimana waduk mampu memenuhi kebutuhannya. Seringkali pada definisi keandalan ini dapat dikaitkan dengan kegagalan. Dalam hal ini, waduk dianggap gagal jika tidak dapat memenuhi kebutuhannya secara total.

2. Rerata persentase pelepasan waduk dibanding dengan kebutuhannya, dalam definisi ini, meskipun suplai waduk tidak dapat memenuhi kebutuhannya, waduk keseluruhannya, tidak dianggap gagal total. Tetapi dianggap waduk hanya dapat mensuplai sebagian dari kebutuhannya.

Pada kondisi seperti misalnya pada waduk yang digunakan sebagai sarana pembangkitan listrik dimana ada batas minimum debit pembangkitan listrik, maka definisi pertama akan lebih sesuai. Hal ini dapat diterangkan bahwa jika waduk hanya mampu melepaskan debit yang lebih kecil daripada batas debit pembangkitan listrik minimum, maka untuk tidak mengakibatkan kerusakan pada turbin diputuskan untuk sama sekali tidak membangkitkan listrik.

Secara sistematis, definisi di atas dapat dituliskan dengan variabel “Zt” yang nilainya ditentukan sesuai dengan dua definisi di atas dan disajikan dalam persamaan berikut.

$$\begin{aligned} Z_t^1 &= 1 \text{ untuk } R_t \geq D_t, 0 \text{ untuk } R_t \leq D_t \\ Z_t^2 &= 1 \text{ untuk } R_t \geq D_t, R_t / D_t \text{ untuk } R_t \leq D_t \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

Dalam jangka panjang, nilai keandalan sistem untuk definisi keandalan yang pertama dapat ditulis sebagai berikut :

$$\alpha_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Z_t^1 \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

Dimana :

n = jangka waktu pengoperasian

R_t = pelepasan pada waktu ke - t

D_t = kebutuhan (*demand*) pada waktu ke - t

α₁ = keandalan waduk, gagal total jika kebutuhan tidak terpenuhi

$\sum_{t=1}^n Z_t^2$ = jumlah total waduk mampu memenuhi kebutuhan (R_t ≥ D_t) untuk definisi keandalan ke-2

$\sum_{t=1}^n (1 - Z_t^2)$ = jumlah total waktu waduk tidak mampu memenuhi kebutuhan (R_t ≤ D_t)

Dalam laporan ini dipergunakan definisi keandalan waduk yang pertama. Waduk dianggap gagal jika tidak mampu mensiplai kebutuhan secara total.

Kondisi tersebut dipergunakan untuk mengantisipasi pemenuhan kebutuhan air baku karena jika pemenuhan kebutuhan air baku kurang dari yang ditargetkan maka air baku yang dihasilkan oleh optimasi tidak dijamin untuk dapat terpenuhi. Selain itu simulasi mempunyai nilai keandalan yang lebih kecil dari kondisi yang sebenarnya. Sehingga kondisi keandalan yang pertama diharapkan banyak memberi nilai keamanan terhadap ketersediaan air.

Kelentingan (*resiliency*)

Indikator ini untuk mengukur kemampuan waduk untuk kembali ke kondisi memuaskan dari kondisi gagal. Jika semakin cepat waduk kembali ke keadaan memuaskan maka dapat dikatakan waduk lebih lenting sehingga konsekuensi dari kegagalan lebih kecil. Dengan mempergunakan definisi kegagalan pertama, perhitungan masa transisi dari keadaan gagal menjadi keadaan memuaskan dituliskan dengan variabel “ W_t ” sebagai berikut :

$$W_t = \begin{cases} 1 & \text{jika } R_{t-1} \leq D_{t-1} \text{ dan } R_t \geq D_t \\ 0 & \text{sebaliknya} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

Dalam jangka panjang nilai rerata dari “ W_t ” akan menunjukkan jumlah rerata terjadi transisi waduk dari keadaan gagal menjadi keadaan memuaskan. Jumlah rerata terjadinya transisi ini dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\rho = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum^n W_t \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

Dimana ρ menunjukkan probabilitas (rerata frekuensi) terjadinya transisi waduk dari keadaan gagal ke keadaan memuaskan.

Jangka waktu rerata waduk mengalami kegagalan dibagi dengan frekwensi rerata terjadinya transisi waduk dan secara matematis dapat dituliskan berikut :

$$T_{\text{gagal}} = \frac{\sum_{t=1}^n (1 - Z_t^1)}{\sum_{t=1}^n W_t} \dots\dots\dots (2-5)$$

T_{gagal} adalah jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal secara kontinyu. Dalam jangka panjang, jangka waktu rerata waduk berada dalam kegagalan secara kontinyu dapat dituliskan sebagai berikut :

$$T_{\text{gagal}} = \frac{1 - \alpha_1}{\rho} \dots\dots\dots (2-6)$$

Semakin lama jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal maka semakin kecil kelentingannya sebagai akibatnya maka konsekuensi dari keadaan gagal tersebut juga akan besar. Oleh karenanya indikator kelentingan didefinisikan sebagai γ_1 berikut :

$$\gamma_1 = \frac{1}{T_{\text{gagal}}} = \frac{\rho}{1 - \alpha_1} \dots\dots\dots (2-7)$$

γ_1 = kinerja kelentingan

Kerawanan (*vulnerability*)

Jika terjadi kegagalan, kinerja kerawanan menunjukkan / mengukur seberapa besar (seberapa rawan) suatu kegagalan yang terjadi. Untuk mengukur tingkat kerawanan ini digunakan variabel kekurangan (*deficit*), DEF yang didefinisikan sebagai berikut :

$$\text{DEF} = \begin{cases} D_t - R_t & \text{jika } R_t \leq D_t \\ 0 & \text{jika } R_t \geq D_t \end{cases} \dots\dots\dots (2-8)$$

Sedangkan kinerja kerawanan tersebut dapat dirumuskan dengan berbagai penafsiran sebagai berikut (*Suharyanto, 1997*) :

1. Nilai rerata “*deficit – ratio*”