

**ANALISA KEANDALAN WADUK  
DALAM PEMENUHAN KEBUTUHAN AIR BERSIH  
(Studi Kasus: Waduk Paya Bener Takengon)**

**Azmeri<sup>1</sup>, Ziana<sup>2</sup>, Ampera<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup> *Jurusan Teknik Sipil, Universitas Syiah Kuala Banda Aceh, Jl. Syech Abdurrauf No. 7 Banda Aceh  
Email: azmeri73@yahoo.com, ziana.zulkifli@yahoo.co.id*

<sup>3</sup> *Program Magister Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala Banda Aceh  
Email: ampera\_pera@yahoo.com*

**ABSTRAK**

Tahun 1980 pada Sungai Arul Pestak telah dibangun sebuah intake untuk memenuhi kebutuhan air bersih kota Takengon. Namun dari hasil pengamatan dan kejadian dari tahun ke tahun debit sungai Arul Pestak terus menurun sampai mencapai batas kritis intake. Untuk menghadapi fenomena kekurangan debit maka dilakukan analisa untuk merencanakan sebuah waduk di hulu sungai Arul Pestak serta melihat keandalannya dalam pemenuhan kebutuhan air. Site waduk tersebut direncanakan pada hulu sungai Arul Pestak dengan ketinggian 1500 meter dari permukaan laut. Beda tinggi antara waduk dan kota Takengon sebagai daerah layanan mencapai 300 meter dan berjarak 6 km. Luas Daerah Aliran Sungai (DAS) Arul Pestak yang diharapkan memiliki debit andalan adalah seluas 4 km<sup>2</sup>. Dalam menganalisa keandalan waduk dalam pemenuhan kebutuhan air bersih Kota Takengon menggunakan teknik optimasi non linier. Pengoperasian waduk dianalisa pada tahun normal dan kering. Hasil analisa memperoleh informasi bahwa pada jenis tahun normal, release waduk yang optimal dapat memenuhi kebutuhan total air dihilir waduk sampai dengan tahun 2023, namun pada tahun kering terjadi penurunan yang diakibatkan terjadinya peningkatan kebutuhan di hilir waduk.

Kata kunci: Arul Pestak, Keandalan, Waduk, Optimasi, Air Bersih

**1. Pendahuluan**

Kota Takengon terintegrasi dari Kecamatan Bebesen, Kecamatan Kebayakan dan Kecamatan Lut Tawar, dengan jumlah penduduk pada tahun 2008 sebesar 68.929 jiwa. Pemenuhan kebutuhan air bersih bulanan kota Takengon hanya 59,63% yaitu kebutuhan air sebesar 212.987,52 m<sup>3</sup>/bulan sementara ketersediaan air hanya 127.008,00 m<sup>3</sup>/bulan. Laju pertumbuhan penduduk cenderung bertambah seiring dengan permintaan atas kebutuhan dasar air bersih yang semakin meningkat, sementara ketersediaan debit sungai adalah konstan. Hal ini dikhawatirkan menimbulkan konflik kebutuhan air bersih.

Menghadapi fenomena kekurangan debit air bersih tersebut, pada tahun 1980 pemerintah daerah berupaya membangun intake pada Sungai Arul Pestak untuk kebutuhan air bersih kota Takengon. Sungai Arul Pestak mengalir dari Paya Bener Kecamatan Bebesen dari arah barat ke timur dan bermuara ke Krueng Peusangan Takengon Aceh Tengah. Menurut pengamatan debit sungai Arul Pestak tersebut tidak dapat lagi memenuhi kebutuhan air bersih akibat meningkatnya jumlah penduduk kota Takengon. Menghadapi kekurangan tersebut di hulu Sungai Arul Pestak direncanakan Waduk Paya Bener. Site waduk berada pada ketinggian 1500 meter dari permukaan laut, dengan beda tinggi antara kota dan waduk mencapai 300 meter, jarak antara kota dengan waduk adalah 6 km, serta luas daerah aliran sungai (DAS) seluas 4 km<sup>2</sup> (Anonim, 2009).

Tujuan studi adalah menerapkan fungsi tujuan memaksimalkan release air dari waduk dengan memperhatikan fungsi kendala terhadap karakteristik waduk yang ada untuk menentukan tingkat keandalan Waduk Paya Bener dalam menyediakan air bersih kota Takengon. Hasil studi ini diharapkan dapat membantu manajemen Waduk Paya Bener dalam menentukan rencana pengoperasian untuk pelayanan kebutuhan air bersih kepada masyarakat kota Takengon.

Lingkup studi ini adalah untuk menganalisa keandalan air Waduk Paya Bener terhadap kapasitas rencana waduk untuk menyediakan air bersih domestik, air non domestik, dan pemeliharaan biota sungai (*maintenance flow*). Kebutuhan air bersih kota Takengon akan diproyeksikan dari tahun 2010 sampai 2030.

## 2. Studi Literatur

### 2.1 Teknik optimasi

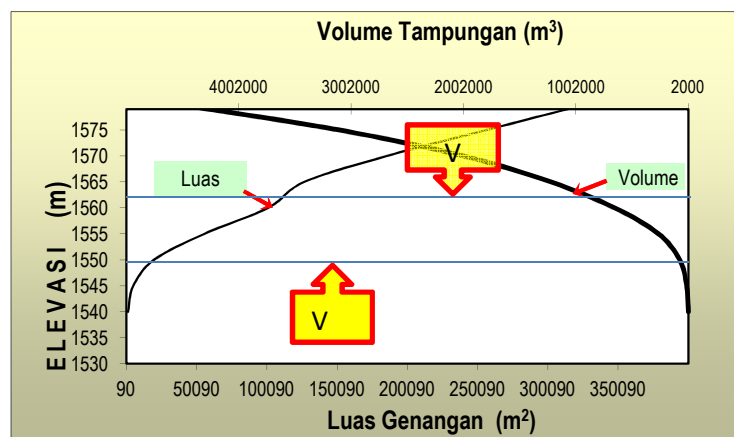
Mengoptimalkan suatu kondisi dalam pengelolaan sumber daya air diperlukan suatu evaluasi model pengoperasian waduk dengan berbagai modifikasi. Sistem pengoperasian waduk secara optimal memiliki peranan penting dalam memenuhi kebutuhan air di hilir (Azmeri, 2004). Terdapat tiga tahap yang perlu dilaksanakan untuk memecahkan suatu masalah kedalam bentuk model optimasi yang benar yaitu:

- Mengidentifikasi fungsi objektif, merupakan fungsi yang dioptimasi, sebagai  $f(x)$
- Mengidentifikasi *decision variabel* secara kuantitatif dan menentukan ketelitiannya, sebagai variabel keputusan ( $x$ ).
- Mengidentifikasi faktor-faktor tertentu mebatasi *decision variabel* maupun sumberdaya lainnya. Tahapan ini menghasilkan persamaan kendala (*constraints*) yaitu persamaan aljabar atau ketidaksamaan, sebagai  $g(x)$

Optimasi memiliki ungkapan matematika yang menjelaskan sistem dan responnya terhadap input untuk berbagai parameter desain. Ketiga elemen dasar dalam analisa sistem disusun dalam bentuk model matematik menjadi fungsi tujuan (*objective function*), variable keputusan (*decision variable*) dan fungsi kendala (*constraint function*). Beberapa model teknik optimasi antara lain: Program Linier, Program Non Linier dan Program Dinamik (Azmeri, 2008).

### 2.2 Volume tampungan waduk

Volume tampungan alamiah berdasarkan hasil pengukuran topografi, sehingga diperoleh bentuk hubungan elevasi waduk, luas genangan permukaan, dan volume tampungan. Gambar 1 merupakan kurva hubungan antara nilai elevasi/TMA (*water surface elevation*), volume tampungan (*storage volume*), dan luas genangan air (*water surface area*) Waduk Paya Bener. Elevasi dasar waduk Paya Bener berada pada elevasi 1540 m di atas permukaan laut.



Gambar 1. Kurva Hubungan Elevasi, Volume, dan Luas Genangan Waduk Paya Bener

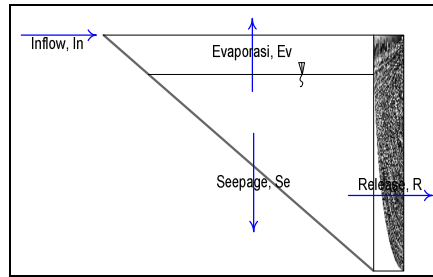
### 2.3 Kestimbangan Air Waduk Tunggal

Kesetimbangan air pada sebuah sistem waduk pada prinsipnya adalah penerapan dari teori *mass balance* atau hukum kekekalan massa. Penerapan teori *mass balance* diperlukan untuk analisa kesetimbangan air di waduk tunggal. Perhitungan simpanan air waduk pada bulan ke- $t+1$  ( $V_{t+1}$ ) ialah sama dengan simpanan air waduk pada bulan ke- $t$  ( $V_t$ ) ditambah dengan jumlah air yang masuk ke waduk selama bulan ke- $t$  ( $I_t$ ) dikurangi dengan jumlah air yang dilepaskan/dikeluarkan dari waduk selama bulan ke- $t$  ( $R_t$ ), dan dikurangi juga dengan kehilangan air yang terjadi di waduk selama bulan ke- $t$  (Azmeri dan Saputra, M., 2011)

Besaran kehilangan air yang terjadi di waduk selama bulan ke- $t$  terdiri dari kehilangan air di waduk akibat evaporasi selama bulan ke- $t$  ( $Ev_t$ ) dan kehilangan air di waduk akibat rembesan/*seepage* selama bulan ke- $t$  ( $Se_t$ ). Ilustrasi dari teori kesetimbangan air di waduk tunggal tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.

Secara matematis, teori kesetimbangan air di waduk tunggal tersebut dapat ditulis dalam bentuk Persamaan di bawah ini.

$$V_{t+1} = V_t + I_t - R_t - Ev_t - Se_t \quad (1)$$



Gambar 2. Keseimbangan Air Waduk Tunggal

#### 2.4 Keandalan waduk (*reliability*)

Menurut Wurbs (1996), keandalan waduk adalah ukuran tingkat (*level*) yang dapat diandalkan dalam berbagai tingkatan hasil yang diberikan oleh sebuah waduk. Ukuran tingkatan (*persentase*) keandalan tergantung dari kemampuan untuk memenuhi pasokan air terhadap berbagai kebutuhan. Variabel tingkatan keandalan dipengaruhi oleh variasi volume, periode waktu dan periode resiko kegagalan. Dalam pengoperasian waduk, tingkat keandalan waduk dihitung dengan persamaan:

$$R_p = (n/N) 100\% \quad (2)$$

$$R_v = (v/V) 100\% \quad (3)$$

$$F_p = (f/n) 100\% \quad (4)$$

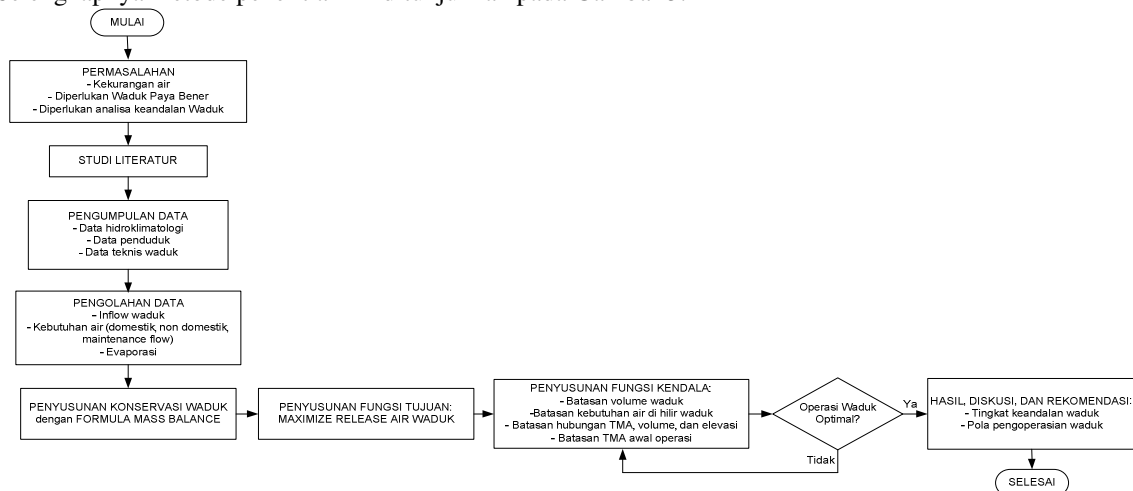
$$F_p = 100\% - R_p \quad (5)$$

Volume keandalan ( $R_v$ ) adalah rasio dari volume air yang disediakan ( $v$ ) terhadap volume yang diminta ( $V$ ). Periode keandalan ( $R_p$ ) adalah rasio jumlah periode waktu ( $n$ ) untuk yang menuntut dapat dipenuhi dengan jumlah total periode waktu ( $N$ ) dalam simulasi. Periode risiko kegagalan ( $F_p$ ) adalah rasio jumlah periode waktu ( $f$ ) tuntutan yang tidak dapat dipenuhi dengan jumlah total periode waktu ( $N$ ) dalam optimasi.

Risiko kegagalan ( $F$ ) adalah komplemen dari periode keandalan ( $R_p$ ). Masa kehandalan ( $R_p$ ) mencerminkan persentase waktu yang ditentukan penggunaan air terpenuhi dari probabilitas persyaratan dipenuhi dalam setiap periode. Risiko kegagalan ( $F_p$ ) adalah persentase waktu atau probabilitas bahwa persyaratan penggunaan air akan tidak sepenuhnya terpenuhi.

### 3. Metode Penelitian

Penelitian ini mencakup pengoperasian waduk dengan menerapkan prinsip mass balance antara komponen input dan output pada Waduk Paya Bener. Metode dan analisa yang digunakan dalam penelitian antara lain analisa debit aliran rata-rata menggunakan metode Mock untuk kemudian dihitung debit andalan dengan probabilitas, dan analisa kebutuhan air bersih ditentukan berdasarkan perkiraan jumlah penduduk. Kehilangan air pada permukaan waduk dihitung berdasarkan persamaan yang dikemukakan oleh Harbeck (Triadmodjo, 2009). Metode optimasi sistem pengoperasian waduk dilakukan dengan menggunakan program non-linier dengan Solver pada Microsoft Excel sebagai tools penelitian. Dari pemodelan tersebut diharapkan akan diperoleh rekomendasi untuk mengoptimalkan sumber daya air dari Waduk Paya Bener. Selengkapnya metode penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 . Bagan Alir Metode Penelitian

Penyusunan kerangka optimasi sistem pengoperasian Waduk Paya Bener menggunakan prinsip sebagai berikut (Miller, 2000):

**a. Fungsi tujuan (*objective function*)**

Fungsi tujuan adalah memaksimalkan total release air waduk tahunan

**b. Fungsi kendala (*constraints*)**

**1. Batasan Volume**

Pada pengoperasian Waduk Bener volume tampungan waduk harus berada di antara nilai batas volume maksimum dan volume minimum waduk tersebut. Batasan tersebut diberlakukan untuk volume waduk di tiap awal bulan, dari bulan kedua ( $t = 2$ ) sampai dengan akhir periode pengoperasian ( $t = 13$ ).

$$V_{\min} \leq V_t \leq V_{\max} \quad t = 2, \dots, 13 \quad (6)$$

dengan:  $V_{\min}$  = Volume minimum waduk ( $m^3$ ) pada elevasi 1550 mdpl dan  $V_{\max}$  = Volume maksimum waduk ( $m^3$ ) pada elevasi 1562 mdpl.

Sedangkan nilai volume waduk di awal periode pengoperasian V1 (bulan  $t=1$ ) merupakan nilai yang sudah ditentukan sebelumnya sebagai nilai awal (initial value). Besarnya volume waduk bergantung dari debit air yang masuk dan keluar pada waduk tersebut.

**2. Kebutuhan air di hilir waduk**

*Release* air yang keluar harus lebih besar atau sama dengan kebutuhan air di hilir waduk. Kebutuhan air di hilir waduk terdiri dari kebutuhan air bersih Kota Takengon dan kebutuhan *maintenance flow*.

$$R_t \geq Q_{ht} \quad (7)$$

dengan:  $Q_{ht}$  = Kebutuhan total di hilir pada bulan  $t$  ( $m^3$ ).

**3. Hubungan elevasi/TMA, volume dan luas genangan waduk**

Hubungan antara TMA dan volume waduk adalah sebagai berikut:

$$TMA_t = a \cdot V_t^b + H_{tr} \quad (8)$$

Dan hubungan genangan dan volume waduk adalah sebagai berikut :

$$A_t = c \cdot V_t^d \quad (9)$$

dengan:  $TMA_t$  = Tinggi muka air pada bulan  $t$  (m);  $H_{tr}$  = Tinggi *tail race* turbin (m);  $v_t$  = volume waduk pada bulan  $t$  (million meter kubik, MCM);  $a \cdot V_t^b = H$  = Tinggi jatuh air (m);  $a, b$  = Konstanta, harga  $a$  dan  $b$  diperoleh dengan melakukan regresi antara nilai  $H$  dan  $V$ ;  $A_t$  = Luas genangan pada bulan  $t$  ( $km^2$ );  $c, d$  = Konstanta, harga  $c$  dan  $d$  diperoleh dengan melakukan regresi antara nilai  $A$  dan  $V$ .

**4. Batasan TMA awal pengoperasian waduk**

Periode awal pengoperasian Waduk Paya Bener ditetapkan pada bulan Januari. Setelah menetapkan periode awal pengoperasian waduk, maka perlu ditentukan TMA awal waduk. TMA awal di bulan Januari pada model pengoperasian Waduk Paya Bener adalah 1560 m. TMA tersebut dijadikan pedoman dalam mengoperasikan waduk. Agar air waduk dapat mencukupi untuk kebutuhan air bersih tahun berikutnya, maka perlu diupayakan agar muka air waduk pada awal pengoperasian (bulan Januari) tahun berikutnya lebih besar atau sama dengan tinggi muka air pada awal pengoperasian (bulan Januari) tahun sebelumnya.

$$TMA_{13} \geq TMA_1 \quad (10)$$

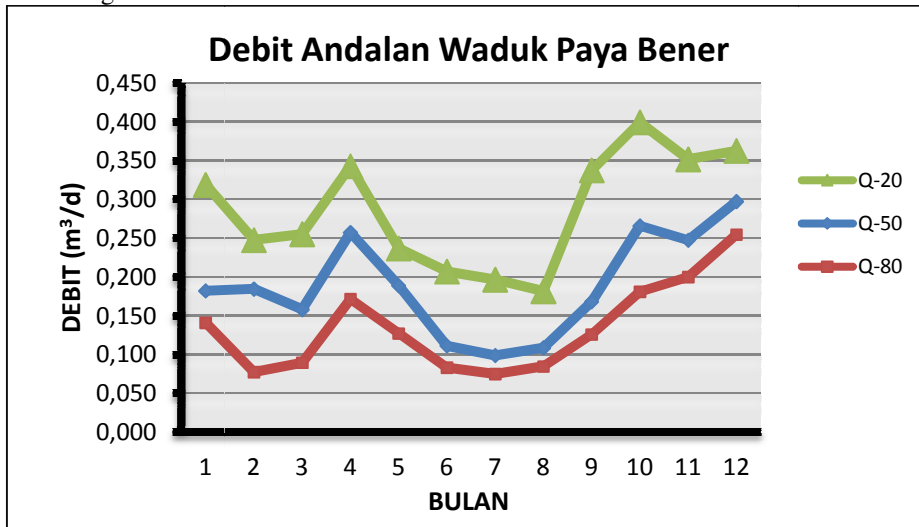
dengan:  $TMA_1$  = Tinggi muka air pada awal pengoperasian (bulan Januari) (m); dan  $TMA_{13}$  = Tinggi muka air pada bulan Januari tahun berikutnya (m).

Taraf muka air minimum sedapat mungkin tidak dilampaui lebih rendah, hal ini dimaksudkan sebagai tindakan pembatasan pada waktu debit inflow waduk kurang. Taraf muka air maksimum sedapat mungkin tidak dilampaui lebih tinggi, hal ini untuk menjaga agar apabila terjadi banjir tidak akan menimbulkan bahaya.

#### 4. Hasil, Diskusi, dan Rekomendasi

##### 4.1 Debit andalan (*Dependable Flow*)

Debit andalan diperoleh dengan mengurutkan debit bulanan dari urutan besar ke urutan kecil (*Probability*). Dari probabilitas dipilih debit keandalan tahun basah 20%, debit andalan tahun normal 50% dan debit andalan tahun kering 80%.



Gambar 4. Debit Andalan Waduk Paya Bener

##### 4.2 Debit andalan (*Dependable Flow*)

Kebutuhan air diperhitungkan untuk keperluan air bersih baik domestik dan non-domestik, serta kebutuhan *maintenance* sebagai persediaan air untuk keseimbangan ekosistem sungai. Kebutuhan air bersih dihitung berdasarkan proyeksi pertambahan penduduk pada Kecamatan Bebesen, Kecamatan Kebayakan dan Kecamatan Laut Tawar. Dalam perhitungan kebutuhan air bersih diambil 78 ltr/hari/orang. Proyeksi peningkatan kebutuhan air penduduk seiring dengan pertambahan jumlah penduduk. Sedangkan air untuk *maintenance flow* adalah sebesar 10% dari total ketersediaan air tiap-tiap bulan. Disebabkan kebutuhan air yang dilayani hanya air bersih dan *maintenance flow*, maka kebutuhan air memiliki *trend* yang lurus. Besarnya kebutuhan air total untuk jangka waktu pendek, menengah dan panjang sampai tahun 2030 disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kebutuhan Air di Hilir Waduk Paya Bener

Tahun	Kebutuhan Air (m <sup>3</sup> /det)
2012	0,08
2015	0,12
2020	0,14
2030	0,17

##### 4.3 Kehilangan air akibat evaporasi

Besarnya evaporasi pada permukaan waduk dapat dihitung berdasarkan hubungan antara evapotranspirasi potensial dan evaporasi. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa evaporasi maksimum terjadi pada Bulan Maret sebesar 0,097m/bln, evaporasi minimum terjadi pada Bulan Desember sebesar 0,073 m/bln. Hasil perhitungan evaporasi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Evaporasi pada Permukaan Waduk Paya Bener

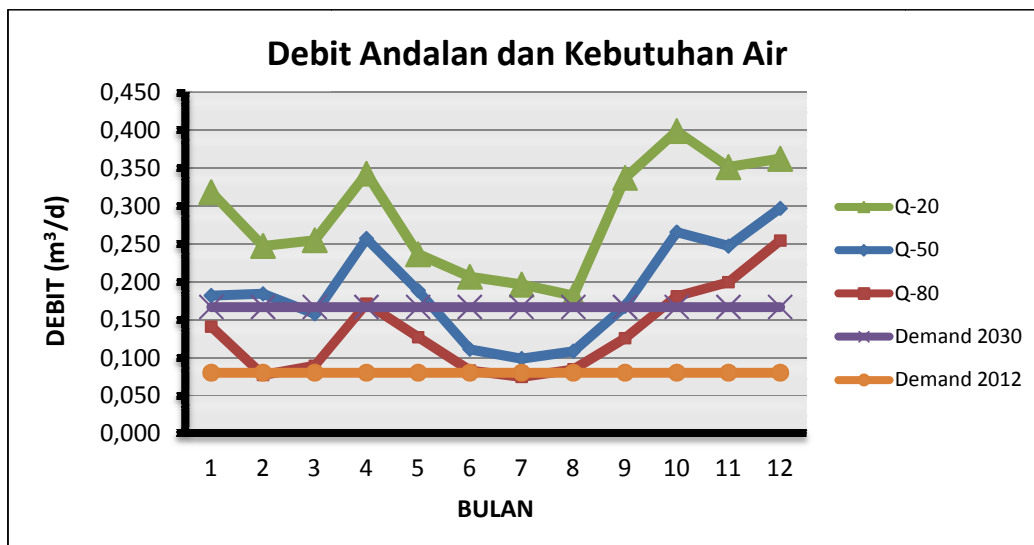
Bulan	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agust	Sept	Okt	Nov	Des
m/bulan	0,085	0,087	0,097	0,092	0,085	0,081	0,086	0,086	0,080	0,079	0,075	0,073

Dari tabel evaporasi Waduk Paya Bener terlihat bahwa mulai bulan Mei, evaporasi yang terjadi mengalami peningkatan, hal ini dikarenakan pada bulan tersebut mulai memasuki musim kemarau. Sedangkan pada bulan September mulai mengalami penurunan dikarenakan pada bulan tersebut mulai memasuki musim hujan.

#### 4.4 Neraca air Waduk Paya Bener berdasarkan jenis tahun basah

Sebagai indikator bahwa diperlukannya pembangunan sebuah waduk untuk memenuhi kekurangan air, maka disusun neraca air di DAS Arul Pestak untuk memberikan informasi bahwa kekurangan air terjadi pada kondisi debit andalan. Ketersediaan air serta kebutuhan air total daerah layanan sebagai neraca air Waduk Paya Bener disajikan pada Gambar 5.

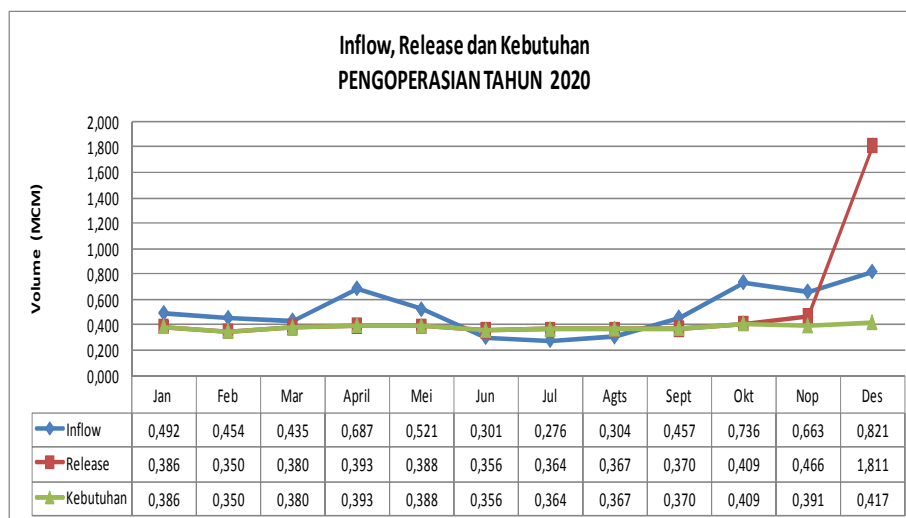
Analisa neraca air dilakukan mulai tahun 2012 sampai 2030. Dari grafik di atas pada tahun kering mulai terjadi kekurangan air pada kondisi eksisting pada bulan-bulan kering. Dengan berjalannya waktu seiring peningkatan kebutuhan air, maka pada tahun selanjutnya kekurangan air semakin tinggi akibat kebutuhan yang semakin meningkat. Kekurangan air tersebut dapat diatasi dengan dibangun waduk untuk menampung air pada waktu terjadi *surplus* air di sungai dan dapat dipakai sewaktu terjadi kekurangan air. Namun pada tahun basah tidak terjadi kekurangan air.



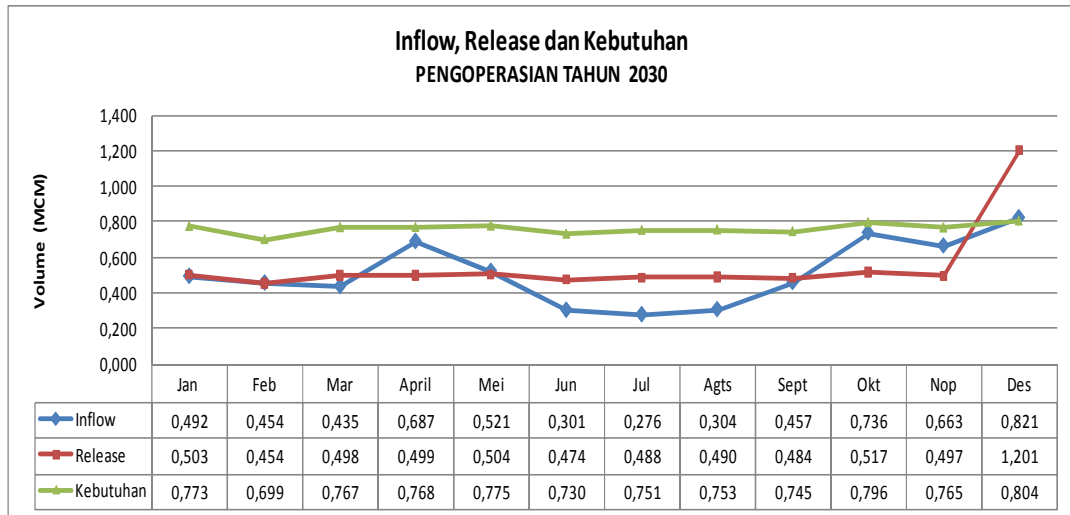
Gambar 5. Grafik Neraca Air DAS Arul Pestak

#### 4.5 Hasil optimasi pengoperasian dan keandalan Waduk Paya Bener

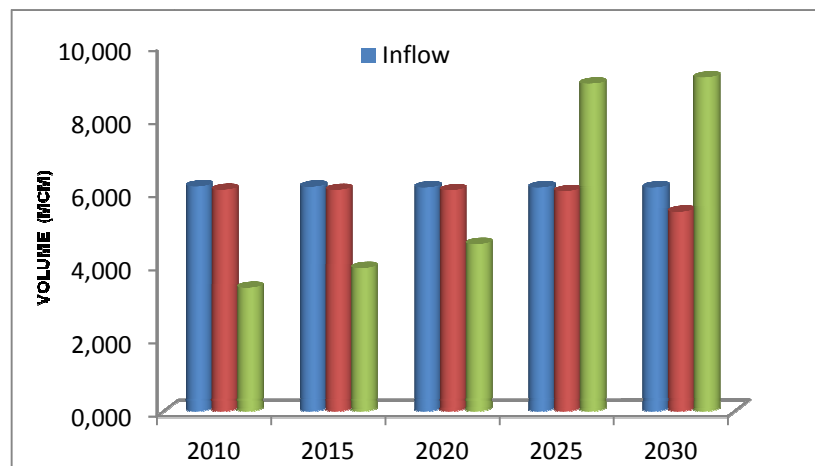
Hasil optimasi pengoperasian Waduk Paya Bener dengan menggunakan program non linier adalah besarnya *release* air tiap bulan untuk memenuhi kebutuhan air di hilir waduk. Besarnya inflow, *release*, dan kebutuhan air berdasarkan jenis tahun normal untuk pengoperasian tahun 2020 dan 2030 disajikan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Inflow, *Release*, dan Kebutuhan Air Tahun Normal Tahun 2020

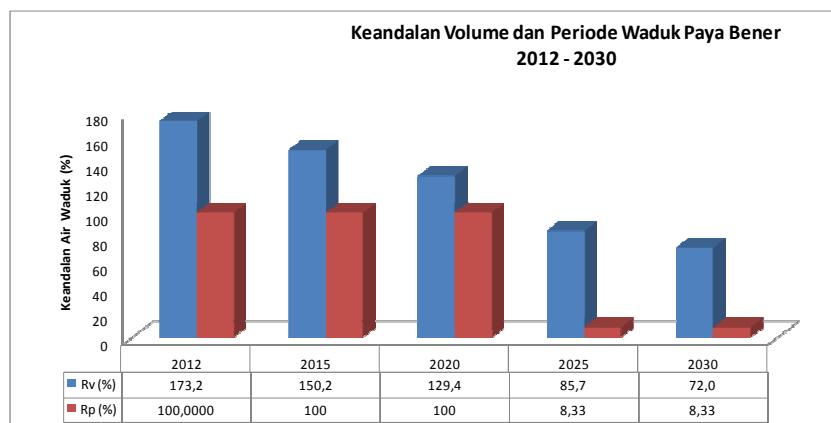


Gambar 7. Inflow, Release, dan Kebutuhan Air Tahun Normal Tahun 2030



Gambar 8. Inflow, Release, dan Kebutuhan Air Tahun Normal Tahun 2030

Berdasarkan grafik 6, 7, dan 8 *release* bulanan dapat memenuhi sampai pada akhir pengoperasian. Semakin meningkatnya kebutuhan menyebabkan pada bulan-bulan kering terjadi kekurangan air, sehingga sampai pada tahun 2030 waduk tidak dapat lagi memenuhi kebutuhan air secara penuh. Oleh karena itu, pada proses optimasi perlu untuk melepaskan batasan pengoperasian waduk dimana release air waduk harus lebih besar dari kebutuhan tidak dapat diterapkan setelah tahun 2023. Namun hal tersebut dapat menimbulkan kendala, apabila dalam jangka panjang inflow waduk tidak dapat dikembalikan pada elevasi air normal.



Gambar 9. Keandalan Volume dan Priode Waduk Paya Bener

Keadaan kekurangan air tersebut secara jangka panjang menyebabkan tingkat keandalan waduk secara volume dan periode semakin berkurang mulai dari tahun 2023 seperti yang diberikan pada Gambar 9. Walaupun terjadi kekurangan secara tahunan, namun untuk tiap bulannya keandalan volume waduk dapat memenuhi minimal sampai 72% pada tahun 2030 dan 85,7% pada tahun 2020. Sedang keandalan periode waduk dapat memenuhi secara penuh hanya pada bulan terakhir pengoperasian waduk. Hal ini disebabkan karena batasan (*constraint*) pengoperasian yang harus memenuhi lebih besar atau sama dengan awal pengoperasian.

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan pembahasan yang telah dilakukan maka penulis mengambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. Proyeksi kebutuhan air mendatang didasarkan pada laju pertumbuhan penduduk sebesar 3,1% pertahun penduduk kecamatan yang mendiami kawasan kota. Tingkat pertumbuhan ini relatif tinggi disebabkan pengembangan kawasan di Kota Takengon.
- b. Berdasarkan analisa neraca air yang dilakukan mulai tahun 2012 sampai 2030, menunjukkan bahwa Waduk Paya Bener memang dibutuhkan untuk menampung air pada waktu terjadi surplus air di sungai Arul Pestak dan dapat dipakai sewaktu terjadi kekurangan air. Namun pada tahun basah tidak terjadi kekurangan air.
- c. Kekurangan air yang terjadi menyebabkan tingkat keandalan waduk secara volume dan periode semakin berkurang mulai dari tahun 2023. Namun secara bulanan keandalan volume waduk dapat memenuhi sampai 72% pada tahun 2030 dan sampai 85,7% pada tahun 2020.
- d. Keandalan periode waduk dapat memenuhi secara penuh hanya pada bulan terakhir pengoperasian waduk. Hal ini disebabkan karena batasan (*constraint*) pengoperasian yang harus memenuhi lebih besar atau sama dengan awal pengoperasian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2005, *Standar Kebutuhan Air Domestik dan Non Domestik Perkotaan Jakarta*.
- Anonim, 2009, *Laporan Akhir Review Design Waduk Paya Bener*. CV. Dating Consultant Engineer.
- Azmeri, 2004, *Analisis Ketersediaan Air dan Sistem Operasi Waduk Suka Wana-Sungai Cimahi*, Tesis, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Azmeri, 2008, *Permodelan Trade off Pengoperasian Waduk Kaskade Menggunakan Algoritma Genetika*, Disertasi, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Azmeri dan Saputra, M., 2011, Optimization of water utilization for electric energy at tiro reservoir, pidie district, *Jurnal teknik Sipil Unsyiah*, Volume 1, Tahun I, No. 1, September 2011, halaman 91-100.
- Linsley, R. K., dan J.B. Franzini, 1996, *Teknik Sumber Daya Air Jilid 1*, Terjemahan Sasongko Djoko, Erlangga, Jakarta.
- Miller, E. R., 2000 : *Optimization-Foudations and Applications*, A Wiley-Interscience Publication, Canada.
- Ossenbruggen P. J, 1984, *System Analisis for Civil Engineers*. New York.
- Triadmodjo, B., 2009 : *Hidrologi Terapan*, Beta Offset, Yogyakarta.
- Wurbs A.R 1996, *Modelling and Analysis of reservioir System Operations Prentice Hall PTR*. Upper Saddle River NJ 07458. USA