

## Simulasi Dampak Peningkatan *Demand* terhadap Energi Listrik dalam Pemodelan Pengoperasian Waduk Kaskade

Iwan K. Hadihardaja<sup>1)</sup>  
Eva Vannya Martha<sup>2)</sup>  
Indratmo Soekarno<sup>1)</sup>

### Abstrak

*Peningkatan kebutuhan (demand) terutama air baku non irigasi pada dewasa ini relatif tidak dapat terkendali secara sistemik dalam kerangka tata ruang. Hal ini antara lain disebabkan oleh pertumbuhan kegiatan ekonomi yang mendorong arus urbanisasi yang sangat cepat dan terpusat pada suatu wilayah tertentu. Daerah Aliran Sungai (DAS) yang merupakan wilayah hidrologis yang mendukung keberlanjutan sumber air relatif tetap dan bahkan berkurang dari waktu ke waktu akibat pengembangan DAS yang tidak berwawasan lingkungan. Oleh karena itu, dalam rangka pemanfaatan sumber air secara optimal pada suatu DAS berkaitan dengan sistem pengoperasian waduk untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dan air baku perlu diwaspadai dampak peningkatan kebutuhan tersebut terhadap keberlanjutan layanan energi listrik sesuai dengan target perencanaan pembangunan suatu waduk. Dalam pemodelan ini dilakukan penelitian apakah dampak tersebut sangat signifikan terutama selama periode musim kering. Disamping itu, juga dilakukan simulasi analisa trade off antara kepentingan produksi energi listrik dan pemenuhan kebutuhan air baku dan irigasi untuk periode musim kering, normal dan basah untuk mengetahui tingkat layanan masing-masing kepentingan. Studi kasus penelitian ini dilakukan di Waduk Kaskade Citarum (Saguling, Cirata dan Jatiluhur), Jawa Barat. Analisa ini akan menghasilkan keluaran prioritas tingkat layanan masing-masing kepentingan berkaitan dengan produksi energi listrik dan pemenuhan kebutuhan berdasarkan target masing-masing energi dan kebutuhan tersebut. Model tersebut diselesaikan dengan Program Non Linier (PNL) dengan metode Generalized Reduced Gradient (GRG) berdasarkan skenario memaksimalkan energi dengan perubahan prosentasi total kebutuhan air baku (20%D, 40%D, 60%D, 80%D, 100%D, 110%D) dan irigasi dengan pola (pattern) kebutuhan yang sama yang harus dipenuhi. Hasil simulasi dan pemodelan menunjukkan bahwa peningkatan kebutuhan dihilir akan dapat memberikan penurunan energi yang relatif signifikan terutama pada musim kering.*

**Kata-kata kunci:** *pengoperasian waduk kaskade, model optimasi program non linier, simulasi trade off.*

### Abstract

*Increase of demand especially for raw water of non irrigation at this time is relatively uncontrollable systematically in spatial framework. This is because of the economic growth that stimulates urbanization rapidly and centralized in certain region. River basin as the hydrology region that support the sustainability of water resource is relatively constant and decrease from time to time affected by the river basin development without considering environmental aspect. Therefore, in order to utilize water resource for meeting energy and water demand, it is necessary to consider both interests in which the demand increase may affect the energy production and influence the sustainability of services for both interests based on the targets of the reservoir development. In this research, the model is developed in order to see the effect and the level of significance especially during dry period. On the other hand, the simulation has been carried out to analyze the trade off between energy production and water demand (irrigation and non irrigation) during dry period. This study is carried out in Cascade Citarum Reservoir (Saguling, Cirata dan Jatiluhur) in Citarum River Basin, West Java. Level of service will be the output of the trade off analysis between the interests of the energy production and water demand based on the each target. The model is solved by using Non Linear Programming (NLP) with Generalized Reduced Gradient (GRG) Method based on the scenario of maximizing energy within different water demand (20%D, 40%D, 60%D, 80%D, 100%D, 110%D). The result of simulation model shows that the demand increase would affect the decrease of energy production and it is relatively significant especially during the dry period.*

**Keywords:** *Cascade reservoir operation, non linear programming, trade off simulation.*

1) Staf Akademik Departemen Teknik Sipil, FTSP-ITB.

2) Program Pasca Sarjana Teknik Sumberdaya Air, Departemen Teknik Sipil, ITB

## 1. Pendahuluan

Waduk Kaskade Saguling-Cirata-Jatiluhur dibangun untuk memenuhi kebutuhan listrik (ketiga waduk) dan air baku untuk irigasi maupun non irigasi (waduk Jatiluhur). Ketiga waduk kaskade tersebut terletak di Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum merupakan salah satu DAS terbesar di Jawa Barat dengan 23 anak sungai yang bermuara di Laut Jawa.

Kebutuhan di hilir Waduk Jatiluhur disamping untuk produksi energi listrik (di ketiga waduk tersebut) juga dimanfaatkan untuk air minum dan rumah tangga (*municipal water supply*), kebutuhan perkebunan dan pertanian (*irrigation requirement*), industri (*water requirement for industry*) dan penggelontoran kota (*flushing*). Dan, sistem pengoperasian waduk di DAS Citarum direncanakan dan dilaksanakan dengan prinsip “*Keseimbangan air*”.

Namun demikian seiring dengan meningkatnya aktifitas ekonomi dan industri yang menyebabkan meningkatnya arus urbanisasi akan dapat mempengaruhi produksi energi di ketiga waduk tersebut. Penelitian ini diharapkan akan dapat menjelaskan hipotesa tersebut terutama apabila dikaitkan dengan periode musim kering. Simulasi dilakukan dengan membuat skenario peningkatan kebutuhan mulai dari 20% demand hingga 110% demand. Simulasi tersebut juga dimodelkan untuk inflow kondisi musim basah, normal dan kering. Tingkat prioritas layanan yang sama antara penyediaan energi listrik dan suplai untuk kebutuhan di hilir jatiluhur juga akan dianalisa.

Simulasi tersebut dilakukan dengan menerapkan teknik program non linier yang dilakukan secara iteratif untuk mendapatkan tingkat prioritas layanan yang sama antara penyediaan energi listrik dan suplai untuk kebutuhan air baku irigasi dan non irigasi. Dengan pemodelan ini, pengendalian kebutuhan dihilir waduk akan dapat dipertimbangkan agar target kebutuhan energi listrik dapat dipertahankan keberlanjutannya di masa yang akan datang.

Keterbatasan akan sumber air menyebabkan perlunya pengaturan air berdasarkan tingkat kepentingan (prioritas). Pengaturan dalam pengelolaan berdasarkan tingkat prioritas tersebut dapat dijumpai dalam pengelolaan waduk kaskade, terutama apabila masing-masing waduk dikelola oleh lembaga atau institusi yang berbeda, dan memiliki kepentingan pengoperasian waduk yang berbeda pula. Sebagai contoh yang berkaitan dengan permasalahan tersebut adalah pengoperasian Waduk Saguling, Waduk Cirata dan Waduk Jatiluhur yang terintegrasi dan terletak di sepanjang DAS Citarum, Jawa Barat.

Pengelolaan waduk kaskade di DAS Citarum tersebut tidak lepas dari dasar hukum yang definitif untuk pengoperasiannya, yakni UU No. 11 tahun 1974 tentang Pengairan, bab IV pasal 8, Ayat 1 dan 2 yang kemudian dalam penjelasan ayat 2 dijelaskan bahwa pengaturan air dan tata pengairan berkaitan dengan keperluan rakyat disegala bidang yang mencakup prioritas pengelolaan air mencakup:

1. Kebutuhan air minum dan rumah tangga (*municipal water supply*)
2. Kebutuhan perkebunan dan pertanian (*irrigation requirement*)
3. Kebutuhan industri (*water requirement for industry*)
4. Penggelontoran kota (*flushing*)
5. Kebutuhan pembangkitan tenaga listrik (*power generation*)

Dalam studi ini dilakukan suatu analisa *trade off* antara kepentingan pemenuhan kebutuhan untuk air baku (termasuk irigasi) dan pembangkitan tenaga listrik yang dievaluasi berdasarkan inflow periode musim kering, normal dan basah, sebagai input dalam pengoperasian waduk yang kemudian disimulasikan dengan suatu skenario terjadinya peningkatan kebutuhan dihilir waduk kaskade tersebut.

Studi tentang analisa *trade off* juga pernah dilakukan oleh Hadihardaja dkk. (2001) yakni antara energi listrik dan pembuangan sedimen (melalui *bottom outlet*) untuk pengoperasian Waduk Sanmenxia yang terletak di Sungai Kuning, China, dengan program non linier. Demikian juga, studi pengoperasian waduk kaskade di Saguling, Cirata dan Jatiluhur secara stokastik juga telah dilakukan oleh Hadihardaja dan Matnali (2002) dengan *chance constraint* program linier yang bertujuan memaksimalkan energi listrik. Namun, studi yang terakhir tersebut belum memasukkan simulasi *trade off* akibat dampak peningkatan demand yang dapat mempengaruhi produksi energi listrik. Pemodelan *trade off* yang berkaitan dengan pengoperasian waduk kaskade dilakukan dengan pemodelan program non linier berdasarkan skenario inflow kering, normal, basah dan prosentase kebutuhan dihilir waduk kaskade tersebut. Sedangkan fungsi tujuan adalah memaksimalkan produksi energi. Setiap skenario disimulasikan untuk masing-masing periode musim dengan gradasi kebutuhan yang ditetapkan untuk mengetahui pola pengoperasian waduk untuk mendapatkan tingkat prioritas (kepentingan) yang sama antara tingkat layanan untuk energi dan air baku

## 2. Studi Kasus

Waduk Saguling yang dibangun pada awal tahun 1980-an dan mulai beroperasi tahun 1986 merupakan waduk yang lokasinya paling hulu terletak sekitar 30 km sebelah barat Kota Bandung. Dengan luas DAS 2.283 km<sup>2</sup> dan volume tampung efektif sebesar 611.5 juta m<sup>3</sup>, Waduk Saguling merupakan waduk yang dimanfaatkan airnya untuk pembangkitan listrik, mempunyai kapasitas terpasang 4 x 175 MW dapat memberikan output maksimum sebesar 700 MW dengan rata-rata tahunan 2.156 GWh. Fungsi PLTA Saguling dalam sistem kelistrikan se-Jawa dan Bali adalah untuk memikul beban puncak (Waduk Saguling, Cirata dan Ir. H. Djuanda, “*Company Profile*” : 1986 – 2002)

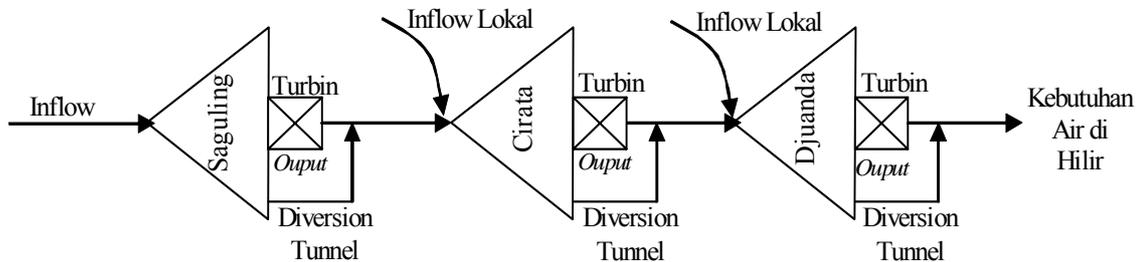
Waduk Cirata merupakan waduk yang juga digunakan untuk pembangkitan listrik terletak kurang lebih 51 km di hilir Waduk Saguling. Waduk Cirata dengan luas DAS 4.119 km<sup>2</sup> dan volume tampungan efektif sebesar 796 juta m<sup>3</sup>, terdiri dari Cirata I dengan kapasitas terpasang 4 x 125 MW dapat memberikan output maksimum sebesar 504 MW dan Cirata II dengan kapasitas terpasang 4 x 125 MW dapat memberikan output maksimum sebesar 504 MW yang mana keduanya mampu memproduksi energi listrik rata-rata 1.428 GWh pertahun.

Tidak berapa jauh di hilir Waduk Cirata terdapat Waduk Jatiluhur yang dibangun tahun 1957 dan selesai tahun 1967. Waduk ini mempunyai DAS seluas 5.400 km<sup>2</sup> dan volume tampungan efektif sebesar 1.404 juta m<sup>3</sup>. Waduk Jatiluhur merupakan waduk serba guna yang airnya dimanfaatkan untuk berbagai macam tujuan dengan prioritas utama air minum, irigasi, tenaga listrik, dan lain sebagainya. Waduk Jatiluhur menyediakan dan menyalurkan air baku air minum bagi PDAM kabupaten dan PAM Jakarta, menyediakan air baku untuk kawasan industri dan penyediaan air untuk irigasi. Untuk pembangkitan listrik Waduk Jatiluhur mempunyai kapasitas terpasang 6 x 25 MW, memberikan output maksimum sebesar 188 MW dan memproduksi listrik rata-rata dalam setahun sebesar 900 juta KWh.

Skematisasi sistem waduk kaskade Saguling, Cirata dan Jatiluhur disajikan dalam **Gambar 1**.

Dalam Waduk Saguling, Cirata dan Ir. H. Djuanda, “*Kumpulan Data-data*” : 1986 – 2002) dapat disajikan data inflow untuk periode musim basah, normal dan kering dapat dilihat dalam **Gambar 2**.

Sedangkan, target produksi untuk produksi energi dan air baku termasuk irigasi untuk tahun 2001, 2002 dan 2003 dapat dilihat pada **Tabel 1**.

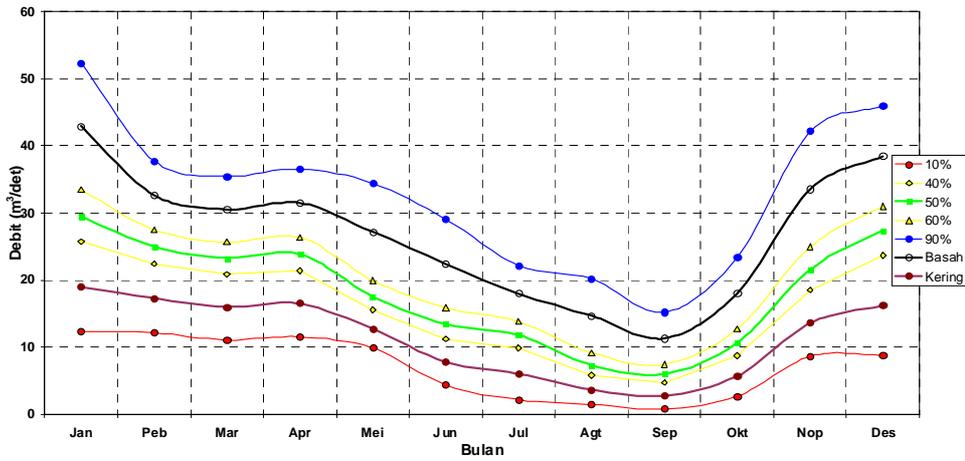


**Gambar 1. Sistematika waduk kaskade**

**Tabel 1. Tipikal target energi listrik dan air baku (termasuk irigasi)**

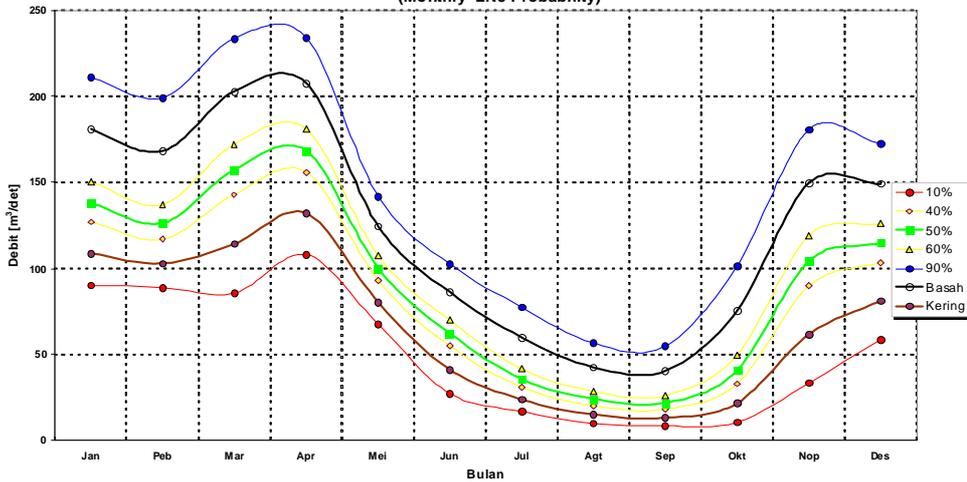
Deskripsi	Target		
	2001	2002	2003
Tahun	2001	2002	2003
Energi Listrik (GWh)	4265	4317	4329
Kebutuhan Air di hilir (MCM)	6053	6281	6304

DEBIT AIR MASUK LOKAL JUANDA 1988 - 2001  
(MONTHLY LN 3 PROBABILITY)



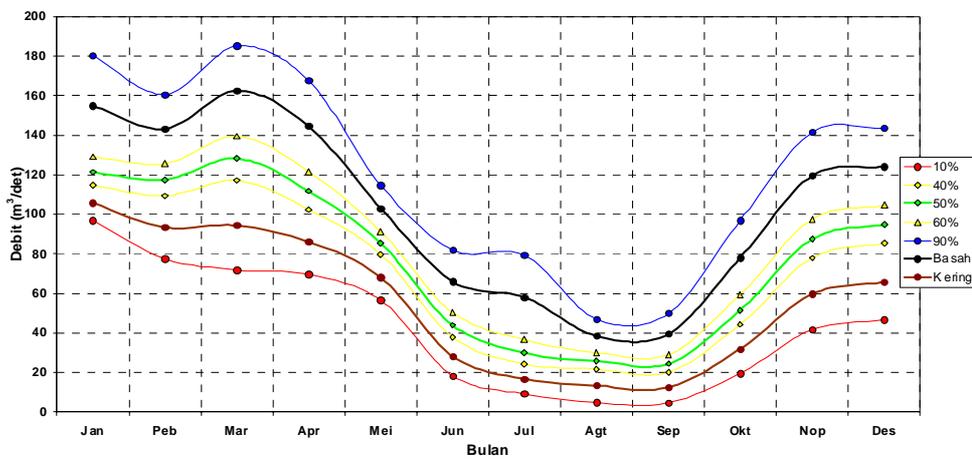
(a)

Total Inflow Saguling Reservoir 1986-2001  
(Monthly LN3 Probability)

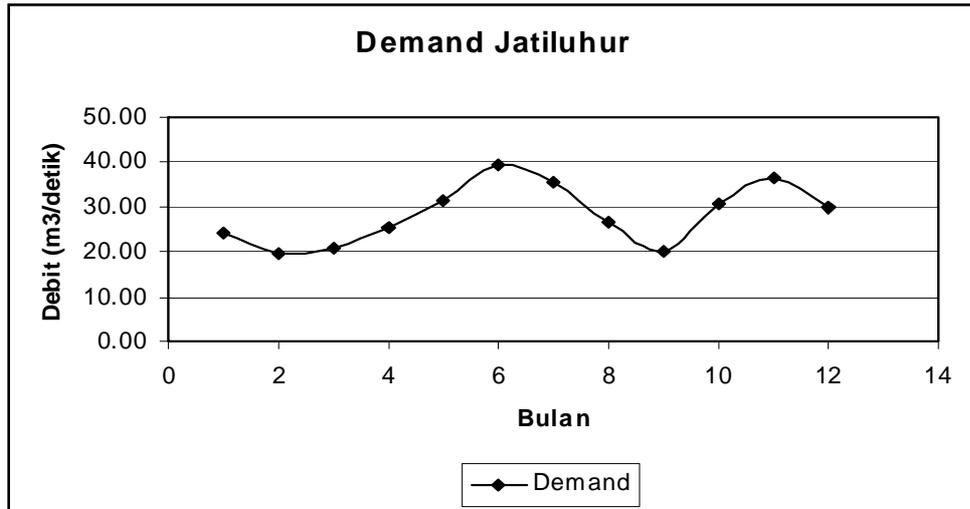


(b)

DEBIT AIR MASUK LOKAL CIRATA 1988 - 2001  
(MONTHLY LN 3 PROBABILITY)



(c)



(d)

Gambar 2. Inflow waduk kaskade dan kebutuhan *Downstream* Jatiluhur (a, b, c, d)

### 3. Pemodelan Pengoperasian Waduk Kaskade

#### 3.1 Persamaan konservasi waduk

Persamaan dasar konservasi volume untuk waduk (Linsley dan Franzini (1996) dan Wurbs (1996) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$S_{t+\Delta t} - S_t = I_{vol} - O_{vol} \quad (1)$$

dimana  $S_t$  dan  $S_{t+\Delta t}$  menunjukkan volume tampungan (*storage*) pada awal dan akhir,  $\Delta t$  merupakan interval dari waktu, dan  $I_{vol}$  dan  $O_{vol}$  menunjukkan masukan dan keluaran selama periode waktu tertentu.

Sebagai alternatif konservasi volume dapat digambarkan sebagai berikut

$$\frac{dS}{dt} = I - O \quad (2)$$

dimana  $dS/dt$  menunjukkan perubahan dari volume terhadap waktu  $I$  dan  $O$  adalah volume masukan dan pengeluaran pada saat itu.

Persamaan ini dapat ditulis untuk tahap diskritisasi waktu sebagai berikut

$$\frac{S_{t+\Delta t} - S_t}{\Delta t} = I - O \quad (3)$$

dimana  $I$  dan  $O$  adalah rata-rata inflow dan outflow selama waktu  $\Delta t$ . **Persamaan 2.3** dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{S_{t+\Delta t} - S_t}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t+\Delta t}}{2} - \frac{O_t - O_{t+\Delta t}}{2} \quad (4)$$

dimana  $I_t$ ,  $I_{t+\Delta t}$ ,  $O_t$  dan  $O_{t+\Delta t}$  menunjukkan masukan dan pengeluaran pada saat permulaan dan saat akhir pada waktu  $\Delta t$ .

#### 3.2 Evaporasi dan persamaan kesetimbangan waduk

Total evaporasi pada bulan ke- $t$  dapat dicari dengan hasil perkalian antara indeks evaporasi dengan luas genangan permukaan waduk rata-rata selama bulan ke- $t$ . Dengan persamaan sebagai berikut :

$$E_t = e_t \left[ \frac{A_t + A_{t+1}}{2} \right] \quad (5)$$

dimana :

$E_t$  = Total evaporasi bulan ke- $t$

$e_t$  = Indeks evaporasi bulan ke- $t$

$A_t$  = Luas genangan air bulan ke- $t$

Penentuan *State Equation* serta Nilai Koefisiennya *State equation* untuk ketiga waduk adalah:

$$V_{t+1} = V_t + I_t - e_t \left[ \frac{(A_t + A_{t+1})}{2} \right] - Q_t \quad (6)$$

Dengan  $A_t$  dan  $A_{t+1}$  adalah luas permukaan waduk untuk bulan/tahap ke- $t$  dan  $t+1$ . Luas permukaan ini adalah fungsi dari volume waduk yaitu didapat dari regresi power dari data luas permukaan vs volume.

### 3.3 Model optimasi pengoperasian sistem waduk kaskade

Model optimasi program non linier yang diterapkan untuk simulasi pengoperasian waduk secara iteratif memiliki fungsi tujuan sebagai berikut:

$$MaxTotalE = \sum_{i=1}^3 \left( \sum_{t=1}^{12} E_{it} \right) \quad (7)$$

Dimana E adalah energi bulanan untuk ketiga waduk kaskade, indeks  $i = 1, 2, 3$  menyatakan indeks waduk Saguling, Cirata dan Jatiluhur, berturut-turut. Sedangkan, indeks  $t$  menyatakan indeks bulan Januari ( $t=1$ ), Februari ( $t=2$ ) dan seterusnya hingga bulan Desember ( $t=12$ ).

Fungsi kendala yang terkait dengan sistem pengoperasian waduk kaskade tersebut dapat dijabarkan secara ringkas sebagai berikut:

$$A_t = 0.1215 x V_t^{0.8824} \Big|_{i=1} \quad (8)$$

$$A_t = 0.4113 x V_t^{0.6611} \Big|_{i=2} \quad (9)$$

$$A_t = 0.8626 x V_t^{0.57524} \Big|_{i=3} \quad (10)$$

$$V_{t+1} = V_t + I_t - e_t \left[ \frac{(A_t + A_{t+1})}{2} \right] - R_{t(i)} \Big|_{i=1} \quad (11)$$

$$V_{t+1} = V_t + IL_t + R_{t(i-1)} - e_t \left[ \frac{(A_t + A_{t+1})}{2} \right] - R_{t(i)} \Big|_{i=2} \quad (12)$$

$$V_{t+1} = V_t + IL_t + R_{t(i-1)} - e_t \left[ \frac{(A_t + A_{t+1})}{2} \right] - R_{t(i)} \Big|_{i=3} \quad (13)$$

$$H_{t(efektif)} = 289,23 V_t^{0,0444} \Big|_{i=1} \quad (14)$$

$$H_{t(efektif)} = 15,927 V_t^{0,2628} \Big|_{i=2} \quad (15)$$

$$H_{t(efektif)} = 2,1417 V_t^{0,4526} \Big|_{i=3} \quad (16)$$

$$E_t = \eta \rho g H_{t(efektif)} R_{t(i)} \Delta t \Big|_i \quad \underline{\text{jika}} \quad (17)$$

$$R_{t(i)} \leq Q_{\max-turbin} \Big|_i$$

$$E_t = \eta \rho g H_{t(efektif)} Q_{\max-turbin} \Delta t \Big|_i \quad \underline{\text{jika}} \quad (18)$$

$$R_{t(i)} \geq Q_{\max-turbin} \Big|_i$$

$$R_{t(i=3)} \geq D_{t(i=3)} \quad (19)$$

$$V_{\min} \leq V_t \leq V_{\max} \Big|_i \quad (20)$$

Dimana notasi  $V, A, e, D, I, IL, H, Q, R$  dan  $\Delta t$ , berturut-turut adalah volume tampungan waduk, luas genangan waduk, indeks evaporasi, demand hilir Jatiluhur, inflow, inflow lokal, debit masuk turbin, air dilepas dari waduk (*outflow/release*) dan waktu dalam bulan. Variabel keputusan (*decision variable*) dalam pemodelan optimasi tersebut adalah volume tampungan waduk ( $V$ ) untuk waktu ke- $t$ . Dalam perhitungan mass balance tampungan di waduk, dianggap sama dengan nol untuk mempermudah perhitungan dengan asumsi adalah bahwa perubahan luas genangan antara waktu ke- $t$  dan ke- $t+1$  tidak terlalu signifikan.

### 3.4 Metode generalized reduced gradient

Persamaan fungsi tujuan dan kendala untuk pengoperasian waduk kaskade tersebut diselesaikan dengan program non linier (PNL) menggunakan metode Generalized Reduced Gradient (GRG) adalah algoritma eliminasi variabel implisit. Metode tersebut merupakan penurunan secara numerik dari persamaan diferensial parsial untuk necessary dan sufficient condition seperti dalam Haines (1977) dan Ossenbruggen (1984). Metode ini (Rao, 1984) dapat menangani permasalahan berkaitan dengan fungsi kendala yang berupa persamaan maupun pertidaksamaan. Dalam permasalahan PNL, model optimasi berkendala diubah menjadi pemodelan yang tidak berkendala dimana fungsi tujuan tak berkendala (*unconstrained objective function*) dapat ditulis dalam bentuk dua matriks J dan C pada titik  $x^{(t)}$  sebagai berikut:

$$\nabla f(x^{(t)}) = \nabla f(x^{(t)}) - \nabla f(x^{(t)}) J^{-1} C \quad (21)$$

dimana,

$$J = \begin{bmatrix} \nabla \hat{h}_1 \\ \nabla \hat{h}_2 \\ \vdots \\ \nabla \hat{h}_K \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad C = \begin{bmatrix} \nabla h_1 \\ \nabla \bar{h}_2 \\ \vdots \\ \nabla \bar{h}_K \end{bmatrix} \quad (22)$$

Matriks J adalah matriks  $K \times K$  dan matriks C adalah matriks  $K \times [N-K]$  yang dievaluasi pada  $x^{(t)}$ . Vektor  $\nabla \hat{h}_k$  dihitung dengan mendiferensialkan fungsi kendala ke- $k$  terhadap variabel basis  $\hat{x}$

$$\nabla \hat{h}_k = \left\{ \frac{\partial h_k(x)}{\partial \hat{x}_1}, \frac{\partial h_k(x)}{\partial \hat{x}_2}, \dots, \frac{\partial h_k(x)}{\partial \hat{x}_K} \right\} \quad (23)$$

Sehingga, setiap vektor  $\nabla \hat{h}_k$  merupakan vektor  $1 \times K$ . Demikian juga, untuk  $\nabla \bar{h}_k$  di hitung dengan mendiferensialkan fungsi kendala ke- $k$  terhadap variabel non basis  $\bar{x}$

$$\nabla \bar{h}_k = \left\{ \frac{\partial h_k(x)}{\partial \bar{x}_1}, \frac{\partial h_k(x)}{\partial \bar{x}_2}, \dots, \frac{\partial h_k(x)}{\partial \bar{x}_{N-K}} \right\} \quad (24)$$

Sehingga vektor diatas adalah vektor 1 x (N-K). Notasi vektor sederhana tersebut merupakan bilangan riil yang dihitung menggunakan teknik diferensial numerik yang merupakan turunan orde pertama dan kedua dan dapat dihitung berdasarkan teknik *central difference* berturut-turut sebagai berikut:

$$\left. \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} \right|_{x^{(t)}} = \left\{ \frac{f(x_i^{(t)} + \Delta x_i^{(t)}) - f(x_i^{(t)} - \Delta x_i^{(t)})}{2\Delta x_i^{(t)}} \right\} \quad (25)$$

Vektor  $\nabla \bar{f}(x^{(t)})$  adalah bagian dari vektor gradien fungsi objective yang berkaitan dengan variabel non basis dievaluasi pada titik  $x^{(t)}$ . Dengan cara yang sama, vektor  $\nabla f(x^{(t)})$  adalah sisa dari vektor gradien fungsi tujuan. Pernyataan  $\nabla f(x^{(t)})$  dikenal sebagai *reduced gradient* pada titik  $x^{(t)}$ . Reduced gradient akan bernilai sama dengan nol pada titik optimumnya.

Dalam algoritma GRG, fungsi kendala dalam bentuk pertidaksamaan di modifikasi dengan memberikan variabel slack untuk setiap pertidaksamaan agar dapat ditransformasikan menjadi fungsi kendala dalam bentuk persamaan.

#### 4. Penentuan Tingkat Layanan untuk Analisa Trade Off

##### 4.1 Tingkat layanan energi listrik dan air baku

Dalam studi ini dikembangkan suatu persamaan sederhana untuk mengetahui prioritas tingkat layanan energi listrik dan air baku. Hal ini merupakan akibat adanya konflik kepentingan (*conflict of interest*) antara dua tujuan (*objective*) yakni antara produksi energi listrik (dari ketiga waduk kaskade) dan terjadinya peningkatan kebutuhan (demand) dihilir Jatiluhur.

Oleh karena itu untuk menentukan besaran prioritas tingkat kepentingan yang sama, dalam melayani baik untuk memenuhi target energi listrik maupun untuk target memenuhi air baku termasuk irigasi, maka diperlukan suatu mekanisme tolok ukur agar prioritas untuk masing-masing tujuan dapat diketahui tingkat layanan sebagai berikut:

$$TLE(\%) = \frac{TPE}{TTE} \quad \text{dan} \quad TLD(\%) = \frac{TAD}{TTD} \quad (26)$$

Dimana TLE, TPE dan TTE, berturut-turut adalah Tingkat Layanan Energi, Total Produksi Energi dan Total Target Energi. Sedangkan, TLD, TAD dan TTD, berturut-turut adalah Tingkat Layanan Demand (termasuk air baku dan irigasi), Total Airbaku Demand, dan Total Target Demand. Apabila prosentase TLE dan TLD adalah sama besarnya, maka tujuan pengoperasian untuk memaksimalkan energi

dengan memenuhi kebutuhan di hilir Jatiluhur memiliki prioritas tingkat layanan yang sama. Apabila TLE dan TLD memiliki harga sama dengan satu, maka target yang diinginkan dapat tepat dipenuhi. Namun apabila kedua tolok ukur tingkat layanan kurang dari satu maka target tidak dapat dipenuhi atau sebaliknya bila lebih besar dari satu berarti terdapat kelebihan pasokan. Disamping itu, apabila TLE dan TLD keduanya memiliki besaran yang sama maka berarti prioritas tingkat layanan keduanya adalah sama dan tingkat pengorbanan yang sama apabila berharga sama-sama kurang dari satu.

##### 4.2 Skenario peningkatan kebutuhan air (demand)

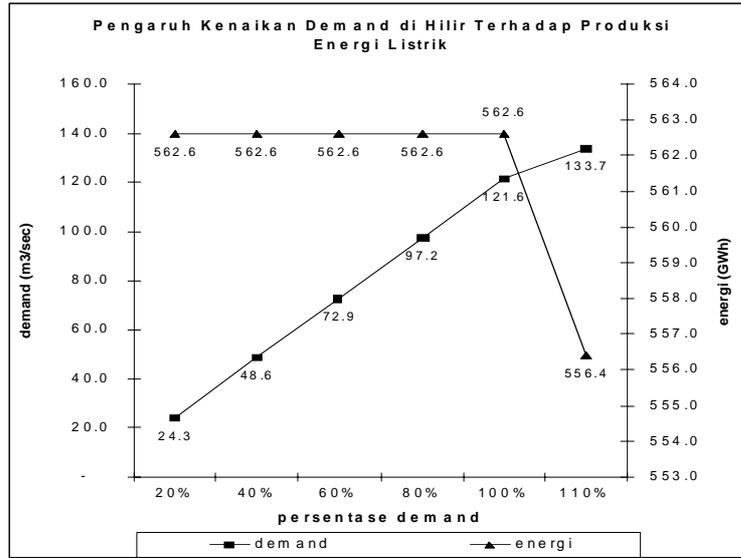
Kebutuhan air ( $D$ ) yang digunakan berdasarkan harga yang sudah dihitung untuk kebutuhan di hilir Jatiluhur secara bulanan baik untuk air baku non irigasi maupun irigasi. Dari kebutuhan hasil perhitungan dibuat enam skenario seri demand dengan prosentase 20%D, 40%, 60%, 80%, 100%, dan 110% dimana  $t = 1, \dots, 12$ .

#### 5. Analisa dan Diskusi

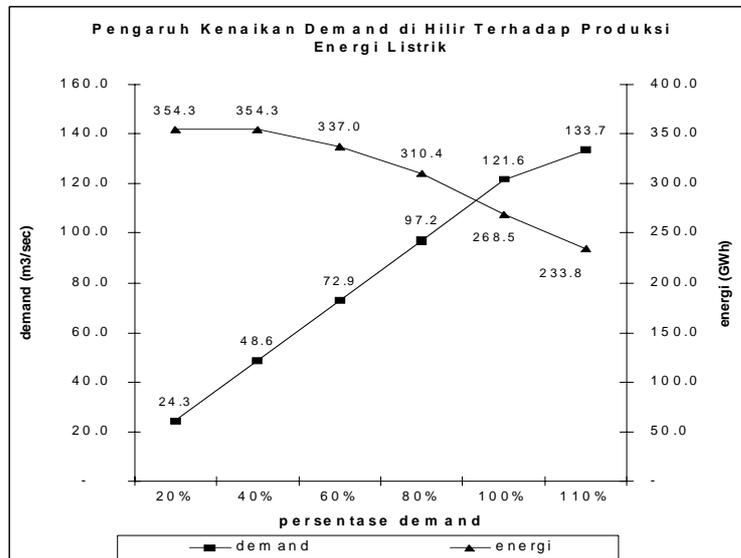
Dari hasil simulasi pemodelan dengan menerapkan demand seperti diatas, dapat dibuat kurva hubungan antara peningkatan demand dengan produksi energi dan pemenuhan air baku dihilir Waduk Jatiluhur (Lihat **Gambar 3** dan **Gambar 4**). Hasil simulasi menunjukkan hasil yang berbeda antara pengoperasin periode basah, normal dan kering.

Pada periode musim basah energi listrik tidak signifikan berubah saat memenuhi kebutuhan hingga 100%D. Produksi energi mulai menurun pada saat demand diperbesar lebih dari 100%D. Untuk periode musim normal dan kering, penurunan energi terjadi pada saat pemenuhan demand, berturut-turut, lebih besar dari 80%D dan 40%D.

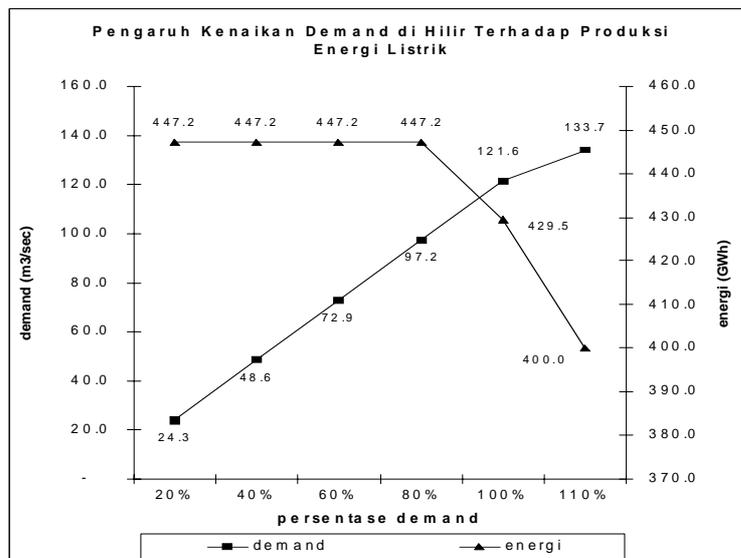
Untuk periode musim basah, kecenderungan produksi energi bertahan disebabkan oleh inflow yang besar yang dapat tersimpan di ketiga waduk sehingga memberikan elevasi waduk yang relatif tinggi sehingga dapat menghasilkan energi listrik yang besar agar dapat dipertahankan. Sedangkan, untuk musim normal dan kering, dengan inflow yang semakin kecil memberikan dampak penyimpanan air di ketiga waduk yang semakin kecil pula apabila peningkatan stratifikasi prosentase demand yang sama diterapkan untuk priode musim tersebut. **Gambar 3** dan **Gambar 4** menyajikan hasil simulasi untuk bulan Januari dan Juli 2002.



(a)

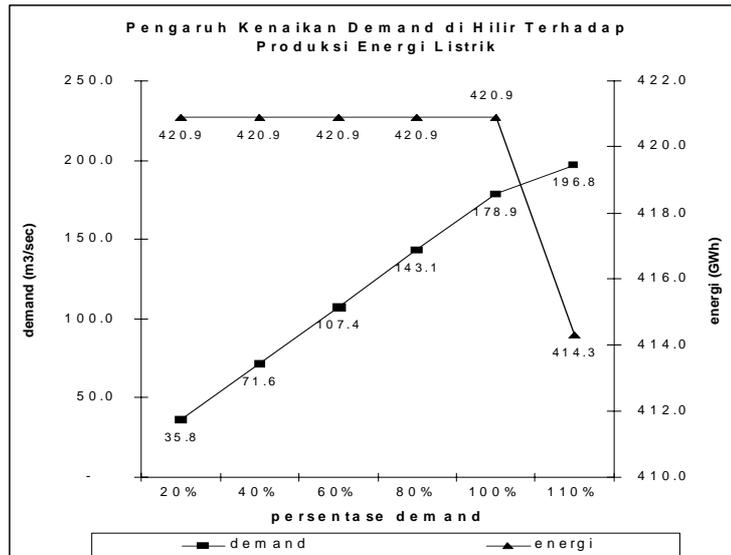


(b)

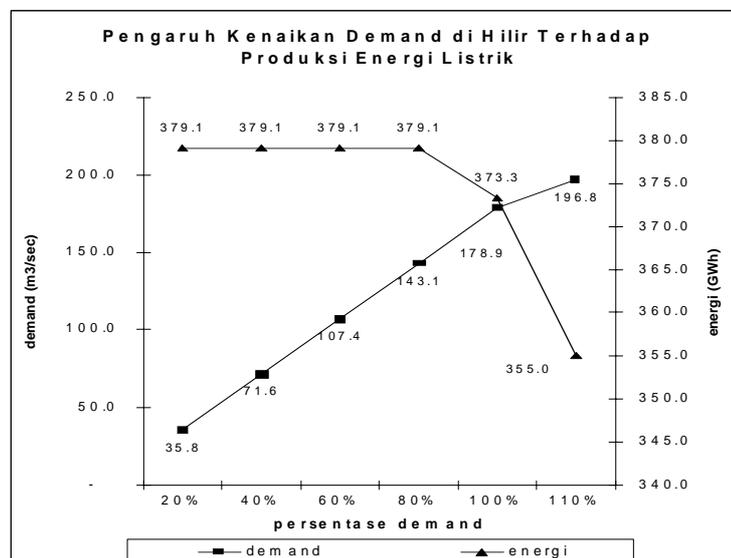


(c)

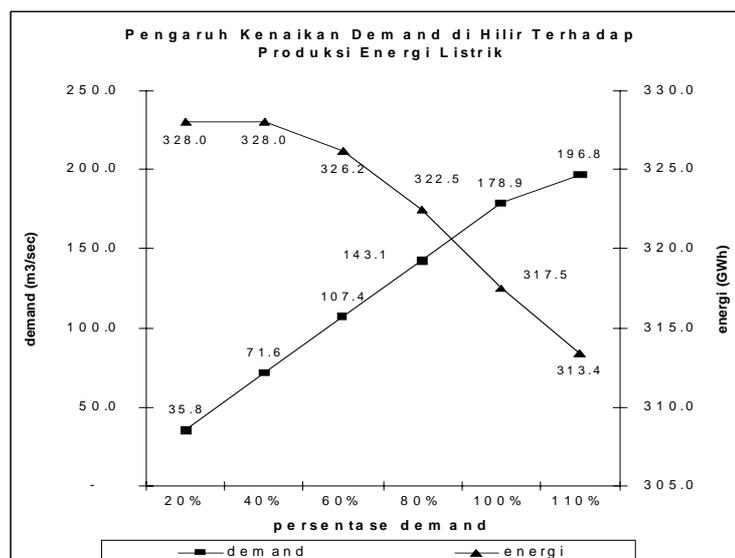
Gambar 3. Kurva trade off bulan Januari 2002 tahun basah (a), normal (b), dan kering (c)



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. Kurva *trade off* bulan Juli 2002 tahun basah (a), normal (b), dan kering (c)

Dalam bulan Januari 2002 secara umum menghasilkan produksi energi listrik yang lebih besar dibandingkan bulan Juli 2002, hal ini oleh karena inflow bulan Januari lebih besar dari bulan Juli baik untuk periode musim basah, normal dan kering. Kelebihan air pada bulan Januari dengan demand yang relatif lebih kecil dari pada bulan Juli (lihat **Gambar 2(d)**) dapat disimpan untuk memberikan produksi energi semaksimal mungkin.

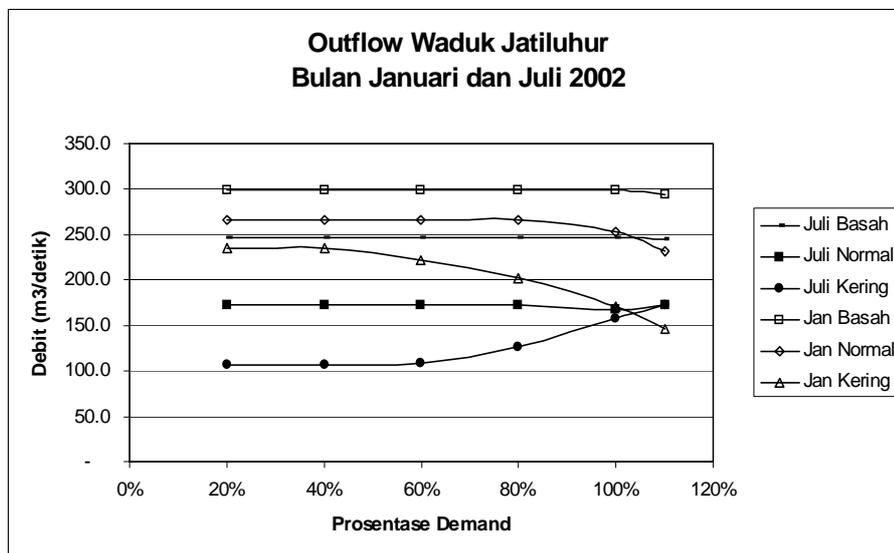
Outflow yang terjadi untuk berbagai prosentase demand sesuai skenario yang disimulasikan pada bulan Januari 2002 menunjukkan bahwa inflow yang semakin mengecil (dari musim basah ke normal dan ke kering), maka outflow yang terjadi semakin mengecil. Hal ini terjadi oleh karena agar dapat mempertahankan produksi energi listrik untuk tetap maksimal dengan mempertahankan elevasi waduk yang tetap tinggi. Demikian juga untuk peningkatan demand yang disimulasikan tersebut menunjukkan penurunan outflow secara gradual yang juga memberikan indikasi untuk mempertahankan elevasi waduk yang tinggi agar dapat menjaga agar produksi energi listrik tetap maksimal.

Hasil simulasi periode bulan Juli 2002 (**Gambar 5**) untuk inflow musim dari basah ke normal dan ke kering, juga memberikan outflow yang relatif semakin kecil yang analisisnya menunjukkan bahwa elevasi

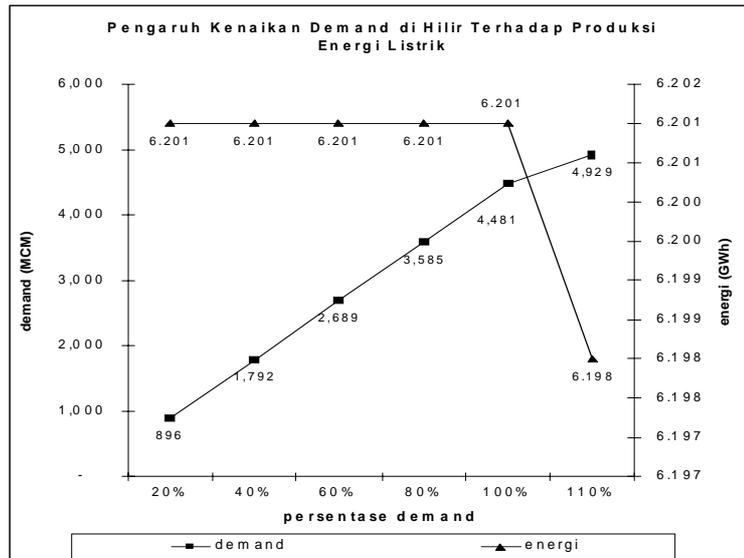
waduk yang tinggi dipertahankan untuk memperoleh energi listrik yang tetap besar. Namun, dalam periode musim yang sama dan seiring dengan peningkatan demand, terjadi peningkatan outflow yang cukup signifikan terutama pada periode musim normal dan kering. Hal ini terjadi oleh karena fungsi kendala dalam memenuhi demand harus dipenuhi (dan relatif besar, lihat **Gambar 2(d)**) dengan menurunkan elevasi muka waduk yang berarti bahwa produksi energi listrik akan menurun.

Dalam **Gambar 6** disajikan pengaruh dampak energi akibat peningkatan demand dalam kurun waktu 2002. Semakin kering periode musim inflow masuk ke waduk, akan semakin besar penurunan energi listrik yang terjadi relatif sangat signifikan yang analisisnya tidak jauh berbeda dengan yang terjadi pada bulan Januari dan Juli 2002.

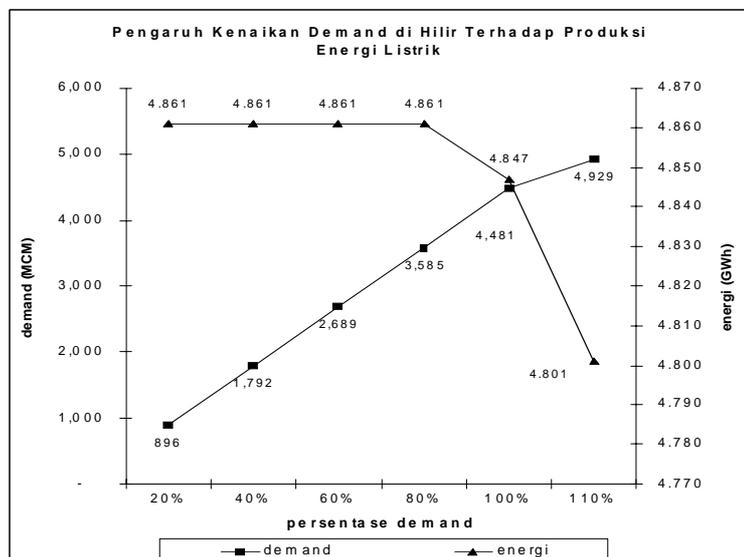
Prioritas tingkat layanan yang terjadi, dapat dilihat pada **Gambar 7**, menunjukkan hubungan antara Tingkat Layanan Energi (TLE) dan Tingkat Layanan Demand (TLD) terhadap skenario peningkatan demand. Untuk prioritas TLE dan TLD yang sama, hasil simulasi menunjukkan bahwa Tingkat Layanan tersebut adalah sebesar 67%. Sedangkan, prosentase demand yang harus diberikan adalah sebesar 90%D untuk pengoperasian periode musim kering.



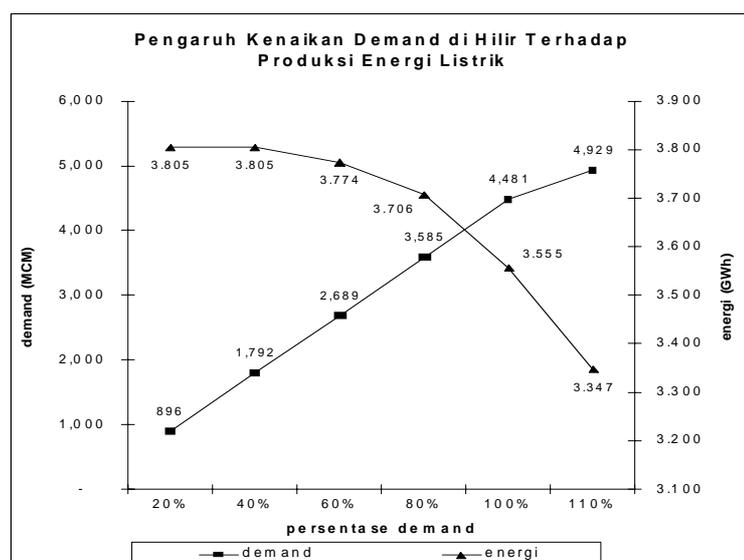
**Gambar 5. Total outflow downstream Jatiluhur** untuk bulan Januari dan 2002 untuk periode basah, normal dan kering.



(a)

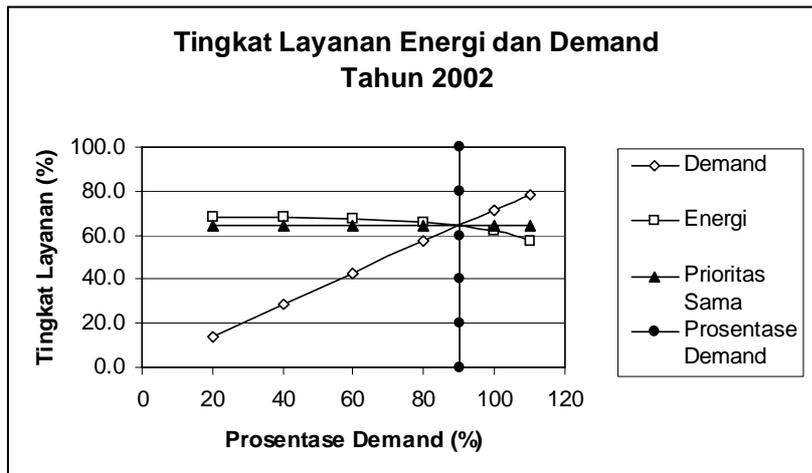


(b)



(c)

Gambar 6. Trade off total 2002 tahun basah (a), normal (b), dan kering (c)



Gambar 7. Tingkat layanan produksi energi total waduk kaskade dan *demand downstream* Jatiluhur periode musim kering

## 6. Kesimpulan

Pemodelan pengoperasian waduk dengan Analisa *Trade-Off* untuk mengetahui dampak produksi energi listrik akibat kenaikan *demand* dengan memaksimalkan energi listrik dapat dirinci sebagai berikut:

1. Adanya ketentuan dari besarnya *demand* yaitu 20 % *demand*, 40 % *demand*, 60 % *demand*, 80 % *demand*, 100 % *demand* dan 110 % *demand*, dimana kenaikan persentase demand ini merupakan *input* dalam pengoperasian waduk dengan program non linier yang mana salah satu *output*-nya adalah produksi energi listrik, persentase demand tersebut memberi pengaruh terhadap besarnya produksi energi listrik, semakin besar persentase kenaikan *demand*, semakin besar penurunan dari produksi energi listrik yang dihasilkan.
2. Selain variasi dari besarnya *demand*, periode waktu (musim) juga memberi pengaruh terhadap besarnya produksi energi listrik yang dihasilkan. Penurunan produksi energi listrik yang sangat besar terjadi pada tahun kering dibandingkan pada tahun basah dan tahun normal, ketersediaan air yang sedikit menjadi perselisihan antara objektifnya, dimana pencapaian target dari satu objektif dapat terpenuhi dengan mengorbankan objektif yang lainnya, dalam hal ini pencapaian besarnya *demand* di hilir Waduk Jatiluhur dapat terpenuhi dengan menurunkan besarnya energi listrik yang dihasilkan, demikian juga sebaliknya pencapaian produksi energi listrik dapat terpenuhi dengan mengorbankan kebutuhan air (*demand*) di hilir Waduk Jatiluhur.
3. Dengan analisa *trade-off* berdasarkan tingkat layanan yaitu membagi hasil produksi dengan targetnya sehingga didapat nilai persentase dari layanan yang masing-masing diberikan oleh energi listrik dan

*demand* di hilir Waduk Jatiluhur agar keduanya objektif tersebut mendapatkan prioritas yang sama dalam penggunaan air. Dengan tingkat layanan yang sama yakni sebesar 67%.

## Daftar Pustaka

- Hadihardaja, I. K., D. G. Fontane, M. L. Albertson, 2001, "Trade Off Analysis of Reservoir Sediment – Control Modeling", Journal Teknik Sipil, Vol. 8 No.3.
- Hadihardaja, I. K., M. Riyanto, 2002, "Pengoperasian Waduk Kaskade dengan Metode Chance—Constrained Linear Programming", Journal dan Pengembangan Keairan, No. 2 – Tahun 9 – Desember.
- Haimes, Yacov Y., 1977, "Hierarchical Analysis of Water Resources Systems", McGraw-Hill, New York.
- Linsey, R.K., J.B. Franzini, D.L.Freyberg, and G. Tchobanoglous, 1999, "Water Resources Engineering", 4<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, New York.
- Ossenbruggen, Paul J., 1984, "System Analysis for Civil Engineers", John Wiley and Sons, Canada.
- Rao, SS., 1984, "Optimization Theory and Applications", Wiley Eastern Limited, New Delhi.
- Waduk Saguling, Cirata dan Ir. H. Djuanda, "Company Profile" : 1986 – 2002.
- Waduk Saguling, Cirata dan Ir. H. Djuanda, "Kumpulan Data-data" : 1986 – 2002.
- Wurbs, Ralph A., 1996, "Modeling & Analysis of Reservoir System Operations", PTR Prentice Hall.