



**Monograf**

**Pengelolaan Waduk Kaskade Citarum  
Untuk Pengembangan Air Baku  
Infrastruktur Air Minum DKI Jakarta**



**Lieza Corsita**

# **MONOGRAF**

*Pengelolaan Waduk Kaskade Citarum  
untuk Pengembangan Air Baku  
Infrastruktur Air Minum DKI Jakarta*

## UU No. 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta

### **Fungsi dan Sifat Hak Cipta Pasal 4**

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

### **Pembatasan Pelindungan Pasal 26**

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan fonogram yang telah dilakukan pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

### **Sanksi Pelanggaran Pasal 113**

1. Setiap orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000,00 (seratus juta rupiah).
2. Setiap orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).



**PENERBIT**  
**INSAN CENDEKIA MANDIRI**  
*Publisher of educational books*

# **MONOGRAF**

*Pengelolaan Waduk Kaskade Citarum  
untuk Pengembangan Air Baku  
Infrastruktur Air Minum DKI Jakarta*

**Dr. Lieza Corsita, S.T., M.T.**

**Monograf**  
**Pengelolaan Waduk Kaskade Citarum untuk Pengembangan Air Baku**  
**Infrastruktur Air Minum DKI Jakarta**

**Dr. Lieza Corsita, S.T., M.T.**

Editor:  
**Moh. Suardi**

Desainer:  
**Mifta Ardila**

Sumber:  
**[www.insancendekiamandiri.co.id](http://www.insancendekiamandiri.co.id)**

Penata Letak:  
**Reski Aminah**

Proofreader:  
**Tim ICM**

Ukuran:  
**viii, 109 hlm., 15.5 x 23 cm**

ISBN:  
**978-623-348-394-0**

Cetakan Pertama:  
**Oktober 2021**

Hak Cipta 2021, pada Dr. Lieza Corsita, S.T., M.T.

---

Isi diluar tanggung jawab penerbit dan percetakan

---

Hak cipta dilindungi undang-undang  
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau  
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini  
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

**Anggota IKAPI: 020/SBA/02**

**PENERBIT INSAN CENDEKIA MANDIRI**  
**(Grup Penerbitan CV INSAN CENDEKIA MANDIRI)**

Perumahan Gardena Maisa 2, Blok F03, Nagari Koto Baru, Kecamatan Kubung,  
Kabupaten Solok, Provinsi Sumatra Barat–Indonesia 27361

HP/WA: 0813-7272-5118

Website: [www.insancendekiamandiri.co.id](http://www.insancendekiamandiri.co.id)

[www.insancendekiamandiri.com](http://www.insancendekiamandiri.com)

E-mail: [penerbitbic@gmail.com](mailto:penerbitbic@gmail.com)



# Daftar Isi

---

<b>Prakata</b> .....	<b>vii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
A. Latar Belakang Masalah .....	1
B. Ruang Lingkup Penelitian.....	4
<b>BAB 2 KAJIAN PUSTAKA</b> .....	<b>7</b>
A. Review Pengembangan Sumber Air Minum DKI Jakarta	7
B. Kualitas Air Waduk Jatiluhur sebagai Sumber Air Minum dan Penurunan Daya Dukung Waduk.....	8
C. Penerapan Model Hidrologi di Waduk.....	10
D. Optimasi Pengelolaan Waduk.....	12
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>15</b>
A. Konsep Pemikiran Penelitian.....	15
B. Metode Penelitian .....	16
C. Kelas Debit dan Matrik Transisi.....	21
D. Model Prakiraan Debit.....	22
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>29</b>
A. Simulasi Model Operasional Waduk Deterministik di Kaskade Citarum .....	29
B. Analisis Debit di Waduk Kaskade Citarum .....	38
C. Analisis Debit DAS Saguling.....	39
D. Analisis Alokasi Debit Rencana untuk Air Baku di Waduk Kaskade Citarum.....	43
E. Kondisi Eksisting Lingkungan Ekonomi Waduk Kaskade Citarum dan Permasalahan yang dihadapi.....	48
F. Optimalisasi Pengusahaan Waduk Kaskade Citarum Menggunakan Metode Stokastik Diskrit Markov dan Kontinu.....	66

<b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b>	<b>93</b>
A. Kesimpulan.....	93
B. Saran Penelitian Lanjutan .....	94
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>95</b>
<b>DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG .....</b>	<b>95</b>
<b>TENTANG PENULIS .....</b>	<b>109</b>



# Prakata

---

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas segala rahmat dan anugerah yang diberikan sehingga saya dapat menyelesaikan penulisan monograf ini sangat membutuhkan konsentrasi dan waktu yang cukup, terkadang banyak yang kita ketahui dari membaca dan pengalaman semestinya harus dapat kita tuliskan, namun tidak sesederhana itu untuk menulis monograf.

Dari data fluktuasi debit air dalam berjalannya waktu, dapat dilihat dua fase iklim yang berpengaruh terhadap komponen utama siklus hidrologi, yaitu musim penghujan dan musim kemarau. Perubahan iklim Akumulasi kejadian ini akan mempengaruhi siklus hidrologi. Perubahan iklim telah diteliti selama ini mempunyai dampak yang signifikan terhadap sumber daya, untuk itu penulis meneliti tentang "*Pengelolaan Waduk Kaskade Citarum untuk Pengembangan Air Baku Infrastruktur Air Minum DKI Jakarta*". Lokasi dan objek studi yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah Waduk Kaskade Citarum. Subjek yang akan diteliti dalam pemeriksaan kualitas air adalah Waduk Jatiluhur. Penelitian di Waduk Kaskade Citarum berupa pengambilan data hidrologi, manajemen operasional waduk dan pengambilan data sekunder kualitas air.

Tidak lupa penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada keluarga serta pada teman-teman yang sudah ikut membantu memberikan masukan dan motivasi dalam penulisan monograf ini, karena dengan dukungan merekalah, monograf ini



selesai sebagaimana di tangan pembaca sekarang ini. Terakhir dengan segala kerendahan hati, apabila dalam tulisan ini masih terdapat kekurangan atau ketidaklengkapan, dengan tangan terbuka saya terima masukan dari pembaca. Terima kasih.

Ambon, Agustus 2021

Penulis

# BAB 1

## PENDAHULUAN

---

### A. Latar Belakang Masalah

Waduk adalah perairan semi tertutup dan merupakan bentuk perairan yang dibuat oleh manusia untuk keperluan tertentu. Situ, rawa, dan waduk termasuk dalam kategori danau yang memiliki multi fungsi, baik dalam aspek-aspek ekologi maupun sosial, ekonomi, dan budaya. Pembangunan waduk di Indonesia dimulai dengan dibangunnya waduk Kaskade di daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum bagian hilir, yaitu Waduk Ir. H. Djuanda (Jatiluhur) pada tahun 1967, yang mempunyai luas genangan maksimum 8.300 Ha dengan kedalaman maksimum 107 meter. Menurut Pedoman Komisi Dunia untuk Bendungan Bagi Masyarakat Umum dan Peraturan Pemerintah Nomor 37 Tahun 2010 tentang Bendungan, sebuah waduk dapat dikategorikan sebagai waduk besar apabila tinggi bendungan lebih dari 15 meter dengan daya tampung minimal 500.000 m<sup>3</sup>. Dengan demikian, Waduk Jatiluhur termasuk ke dalam kategori waduk besar. Kemudian, pada tahun 1985 dan 1986 dibangun pula Waduk Saguling dan Cirata di bagian atas (hulu) Waduk Jatiluhur, membentuk sebuah sistem sedemikian sehingga ketiga waduk ini disebut dengan Waduk Kaskade Citarum. Fungsi utama ketiga waduk ini adalah sebagai pembangkit listrik dan pengendali banjir, khusus untuk Waduk Jatiluhur fungsi lainnya adalah sebagai sumber air baku untuk air minum bagi kawasan Karawang, Bekasi, dan DKI Jakarta. Sistem tata air waduk berbeda dengan danau alami. Pada waduk, komponen tata air umumnya telah direncanakan sedemikian rupa sehingga volume, kedalaman, luas, presipitasi, debit masuk/keluar (*inflow/outflow*), dan waktu tinggal air diketahui dengan pasti dan telah dirancang sebagai bagian dari siklus hidrologinya.

Dari data fluktuasi debit air dalam berjalannya waktu, dapat dilihat dua fase iklim yang berpengaruh terhadap komponen utama siklus hidrologi, yaitu musim penghujan dan musim kemarau. Perubahan iklim dan cuaca mempengaruhi variabel utama siklus hidrologi, terutama curah hujan, yang sangat berkorelasi dengan temperatur udara.

WWF Indonesia dan Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) telah melaporkan pada tahun 1999 bahwa temperatur tahunan di Indonesia meningkat sebesar  $0,30^{\circ}\text{C}$  sejak tahun 1990 (Rhamdani, 2009). Sebuah skenario perubahan iklim (WWF Indonesia dan IPCC, 1999) memperkirakan bahwa temperatur akan meningkat antara  $1,30^{\circ}\text{C}$  sampai dengan  $4,60^{\circ}\text{C}$  pada tahun 2100 dengan trend sebesar  $0,10^{\circ}\text{C}$ – $0,40^{\circ}\text{C}$  per tahun. Selanjutnya, Susandi (2006) juga memproyeksikan kenaikan temperatur Indonesia akan mencapai  $3,50^{\circ}\text{C}$  pada tahun 2100, sementara kenaikan temperatur global bumi akan mencapai maksimum  $6,20^{\circ}\text{C}$  pada tahun tersebut (Rhamdani, 2009). Implikasi dari kenaikan temperatur itu akan menaikkan muka air laut sebesar 100 cm pada tahun 2100.

Akumulasi kejadian ini (perubahan iklim) akan mempengaruhi siklus hidrologi. Perubahan iklim telah diteliti selama ini mempunyai dampak yang signifikan terhadap sumber daya air dalam daerah sub-tropis maupun tropis (IPCC, 2007) di benua Afrika maupun Asia, baik secara kuantitas maupun kualitas (Kranz dkk., 2010; Park dkk., 2010; Teegavarapu, 2010; Eiji, 2007 dan Kang dkk., 2007). Dampak perubahan iklim pada desain infrastruktur sumber daya air secara hidrologi dan manajemennya dapat menjadi tantangan baru bagi para ahli hidrologi dan pengelola sumber daya air mengingat banyaknya perhitungan dalam pengelolaan sumber daya air yang tidak memperhatikan perubahan iklim pada input data hidrologi sehingga mempengaruhi perilaku sistem dan aturan operasional (Teegavarapu, 2010). Fungsi siklus hidrologi dalam rangka pengelolaan sumber daya air sangat tergantung oleh iklim yang dipengaruhi oleh faktor kosmik, regional, dan lokal (tutupan lahan). Oleh karena itu, penentuan arah kebijakan yang terkait dengan pengelolaan

sumber daya air harus melihat faktor-faktor di atas. Jika dikaitkan dengan uraian sebelum ini, fungsi Waduk Jatiluhur yang multi-guna dalam Waduk Kaskade Citarum harus pula ditilik kembali. Waduk Jatiluhur merupakan penyokong utama kebutuhan air baku untuk Propinsi DKI Jakarta, yakni sekitar 80% (Tamim, 2007). Debit air baku yang di pasok Waduk Jatiluhur untuk Jakarta ini adalah sebesar 16,5 m<sup>3</sup>/detik. Air yang berasal dari Jatiluhur dibagi di Bendungan Curug menuju ke tiga arah, yaitu Tarum Barat, Tarum Utara, dan Tarum Timur. Saluran yang menuju Jakarta adalah Saluran Tarum Barat yang merupakan saluran terbuka dengan kapasitas saluran sebesar 82 m<sup>3</sup>/detik saat dipompakan dengan pompa hidraulik di Bendungan Curug. Air dari Saluran Tarum Barat ini digunakan untuk memenuhi kebutuhan irigasi, domestik, dan industri. Namun, kapasitas Saluran Tarum Barat tersebut cenderung berkurang karena adanya sedimentasi pada dasar saluran. Berdasarkan perhitungan Badan Regulator Pelayanan Air Minum (BR-PAM) di DKI Jakarta, defisit air baku terhadap total kebutuhan air bersih dalam kurun waktu 5 (lima) tahun terakhir sudah dalam keadaan yang sangat mengkhawatirkan (Ali, 2007). Untuk tahun 2005, total air bersih yang harus diproduksi dari seluruh instalasi produksi yang masih beroperasi (7 instalasi) di DKI Jakarta adalah sebesar 25,8 m<sup>3</sup>/dt, sementara suplai air baku yang tersedia rata-rata 14,6 m<sup>3</sup>/dt. Defisit air baku tahun 2005 sebesar 11,2 m<sup>3</sup>/dt tersebut akan terus meningkat di tahun-tahun mendatang. Selama ini sumber air baku yang digunakan oleh PAM Jaya berasal dari pasokan air baku sungai lokal sebesar 3% dan sisanya 97% berasal dari sumber air baku Waduk Jatiluhur dan pembelian air curah dari PDAM Tangerang. Pada tahun 2012, Departemen Pekerjaan Umum merencanakan kajian pengembangan pasokan air minum untuk wilayah DKI Jakarta, Bekasi dan Karawang sebesar 15.000 liter/detik atau 15 m<sup>3</sup>/detik dari Instalasi Pengolahan Air (IPA) Curug yang dibangun bertahap, dengan sumber air baku yang berasal dari hulu (*upstream*) Bendungan Curug-Waduk multiguna Jatiluhur. Realisasi ground breaking pembangunan IPA tahap pertama sebesar 5.000 liter/detik dilaksanakan mulai tahun 2014

dan diharapkan beroperasi di tahun 2016. Alokasi kemampuan Waduk Jatiluhur dan potensinya dalam mengalirkan air baku perlu untuk dikaji dalam penelitian ini dilihat dari aspek kajian hidrologis, mengingat kebutuhan air untuk keperluan pertanian, perkotaan, dan industri di sepanjang Saluran Tarum Barat/Kali Malang semakin tinggi, ditambah pula oleh akibat perubahan iklim dan tata guna lahan pada wilayah tangkapan air (*catchment area*) Waduk Jatiluhur, Cirata, dan Saguling di bagian hulu. Selain berperan dalam memasok air minum wilayah DKI Jakarta, Waduk Kaskade Citarum juga mempunyai fungsi utama sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Kemudian, Waduk Jatiluhur yang merupakan bagian utama dari sistem ini juga berperan dalam pengendalian banjir dan irigasi.

## **B. Ruang Lingkup Penelitian**

Lokasi dan objek studi yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah Waduk Kaskade Citarum. Subjek yang akan diteliti dalam pemeriksaan kualitas air adalah Waduk Jatiluhur. Penelitian di Waduk Kaskade Citarum berupa pengambilan data hidrologi, manajemen operasional waduk dan pengambilan data sekunder kualitas air.

Adapun komponen utama kegiatan penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Kajian kondisi lingkungan fisik dasar dan rezim hidrologi di Waduk Kaskade Citarum,
2. analisis dan kajian alokasi kebutuhan air baku untuk infrastruktur air minum secara proporsional di Waduk Kaskade Citarum,
3. analisis pola operasi deterministik Waduk Kaskade Citarum (Waduk Saguling, Cirata, dan Jatiluhur),
4. desain model optimal dari simulasi pola operasi Waduk Kaskade Citarum dengan metode deterministik dan optimal dengan menggunakan prakiraan debit rencana kontinu dan diskrit Markov berdasarkan dua skenario konseptual,

## 1. Hipotesis

Hal-hal yang diuji pada penelitian ini adalah: Optimalisasi pola operasi Waduk Kaskade Citarum sebagai satu satuan manajemen sumber air (kuantitas dan kualitas) terintegral dari hulu sampai hilir dan alokasi air baku (Waduk Saguling, Cirata dan Jatiluhur) adalah proporsional.

## 2. Tujuan Penelitian

Tujuan utama:

Membangun model konseptual pengelolaan Waduk Kaskade Citarum (Waduk Saguling, Cirata dan Jatiluhur) dalam rangka pengembangan infrastruktur air minum kawasan DKI Jakarta.

Tujuan khusus:

- a. Mengkaji dan mengidentifikasi pola operasi Waduk di Kaskade Citarum (Waduk Saguling, Cirata dan Jatiluhur).
- b. Membangun model konseptual pengelolaan Waduk Kaskade Citarum:
  - 1) Deskripsi lingkungan ekonomi Waduk Kaskade Citarum
  - 2) Simulasi model deterministik Waduk Kaskade Citarum
  - 3) Simulasi model optimal dengan ketidakpastian debit masa depan

## 3. Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas maka dirumuskan masalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana pembagian proporsional alokasi air baku di Waduk Kaskade Citarum sebagai pengembangan sumber daya air berkelanjutan?
- b. Apakah hasil simulasi model pola operasi deterministik dan optimal di Waduk Kaskade Citarum dapat membangun sebuah model konseptual pengelolaan yang dapat diterapkan di Waduk Kaskade Citarum?

## 4. Kebaruan Penelitian

Aspek kebaruan (*novelty*) penelitian disertasi ini adalah penelitian komprehensif dan holistik mengenai aspek kualitas (keandalan) dan kuantitas di Waduk Kaskade Citarum. Aspek-

aspek kebaruan tersebut adalah, selain pemeriksaan *parameter-parameter physico-chemical* dan biologi kualitas air waduk, dilakukan pula penambahan pemeriksaan mikropolutan, yaitu logam Pb, yang akan dikaitkan dengan aspek-aspek operasional waduk (tinggi muka air, debit input/output, dan alokasi pemanfaatan air dalam variasi lintasan musim kering, basah, dan normal) akibat pengaruh perubahan iklim. Kebaruan lainnya yaitu belum banyak penelitian di Waduk Kaskade Citarum mengenai pengelolaan waduk yang bersifat deterministik namun dapat memprakirakan debit masa depan dengan model debit rencana yang memanfaatkan memoar data debit stokastik. Selain itu, kebaruan penelitian disertasi ini adalah pengkajian alokasi kebutuhan air baku yang proporsional di Waduk Kaskade Citarum dalam memenuhi kebutuhan air di downstream Waduk Jatiluhur, dan membangun model konseptual pengelolaan waduk Kaskade berdasarkan pada optimalisasi pemanfaatan air di waduk dengan mempergunakan pola operasi deterministik dan optimal.

# BAB 2

## KAJIAN PUSTAKA

### A. Review Pengembangan Sumber Air Minum DKI Jakarta

Kawasan Jabotabek membentuk satu kawasan andalan sebagai pusat adalah DKI Jakarta, di mana transformasi Kota Jakarta menjadi kota jasa telah memacu aktifitas ekonomi membutuhkan lahan rumah tinggal, sarana penunjang gedung tinggi (perkantoran, hotel, universitas, transportasi, jasa industri lainnya), perkembangan tersebut berimpas di kawasan sekelilingnya yaitu Tangerang, Bekasi dan Bogor dan Depok (Tamim, 2007). Perkembangan aktifitas DKI Jakarta seiring penambahan penduduk, membutuhkan pelayanan infrastruktur air minum sedangkan kapasitas pelayanan Infrastruktur air minum terpasang 18,025 m<sup>3</sup>/detik (tahun 2007), tidak dapat melayani laju permintaan air Kota Jakarta sebagai kota jasa.

**Tabel 2.1**  
**Kebijakan Strategis Sumber Air Baku Jagodetabek**

	Kota Jabodetabek	Alokasi sumber air baku	Keterangan
1	DKI Jakarta	Waduk Jatiluhur ( S. Citarum)	Prop. Jabar
2	Bekasi	Idem	Idem
3	Tangerang	Waduk Karian (S. Ciberang-Ciujung)	Prop. Banten
4	Bogor	Potensi S. Cisadane	Prop. Jabar
5	Depok	Potensi S. Ciliwung	Prop. Jabar

Sumber: Tamim (2007)



## **B. Kualitas Air Waduk Jatiluhur sebagai Sumber Air Minum dan Penurunan Daya Dukung Waduk**

Meningkatnya laju pertumbuhan penduduk sepanjang DAS Citarum akan mendorong semakin meningkatnya pemanfaatan lahan konservasi untuk memenuhi kebutuhan tempat tinggal penduduk dan mengurangi sejumlah permukaan tanah yang mampu menyimpan air hujan dan aliran air permukaan (Wangsaatmaja, 2004). Erosi dapat menyebabkan merosotnya produktivitas lahan, rusaknya lingkungan, terganggunya estetika, dan pencemaran lingkungan (Nakashima dkk., 2007). Sedimentasi yang terjadi di perairan waduk lebih besar jika dibandingkan dengan perairan danau alami (Chu dkk., 2009). Kondisi ini menyebabkan kekeruhan perairan tinggi dan selanjutnya mengakibatkan pendangkalan dan mengurangi daya tampung waduk, yang dapat memperpendek umur waduk.

Tinjauan kualitas perairan di Waduk Jatiluhur oleh Tontowi (2004) didapatkan hasil bahwa Waduk Jatiluhur sangat cocok untuk dipakai sebagai sumber air baku air minum kelas I namun memerlukan pengolahan yang murah dan sederhana. Hasil penelitian oleh Tontowi (2004) menunjukkan bahwa air Waduk Jatiluhur mengandung kadar zat tersuspensi yang berkisar antara 10–13 mg/l, kekeruhan berkisar 5,2–7,3 NTU, nilai BOD berkisar 1,2–2,0 mg/l, COD berkisar 4,8–9,4 mg/l, konsentrasi KMnO<sub>4</sub> berkisar 5,9–8,8 mg/l dan parameter lainnya seperti logam berat, ammonium, nitrat, nitrit, deterjen, sulfat, fosfat yang berada jauh di bawah baku mutu kelas I PP Nomor 82 Tahun 2001.

Pada saat ini, air waduk Jatiluhur dimanfaatkan sebagai sumber air baku untuk air minum dengan pengambilan melalui Saluran Tarum Barat oleh PDAM DKI Jakarta. Intake pengambilan air minum di daerah Cawang dengan debit sekitar 6,2 m<sup>3</sup>/detik. Pengaliran melalui saluran terbuka Tarum Barat telah mengakibatkan penurunan kualitas yaitu naiknya kadar zat tersuspensi, kekeruhan, bahan organik dan kadar oksigen terlarut sehingga perlu pengolahan yang lebih sulit dan lebih mahal. Mengingat terjadi pertambahan industri yang semakin pesat di Provinsi Jawa Barat, khususnya daerah hulu DAS Citarum pada kurun waktu satu

dekade ini maka perlu dilakukan tinjauan kembali kualitas air di Waduk Jatiluhur sebagai sumber air minum.

Menurut Hilda dkk. (2007), Waduk Jatiluhur sebagai waduk multiguna telah mengalami penurunan daya dukung di mana secara spasial berdasarkan hasil korelasi antara parameter fisik dan nutrien yang dianalisa menunjukkan terdapat perbedaan yang signifikan antara musim kemarau dengan musim hujan untuk parameter turbiditas, Total *Suspended Solid* (TSS), Nitrat-N, Ortofosfat, Total Organik Matter (TOM), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD). Sedangkan untuk parameter temperatur dan pH tidak mengalami perbedaan yang signifikan. Parameter fisik seperti pH, turbiditas dan TSS adalah parameter yang mempunyai korelasi yang sangat signifikan terhadap parameter nutrien.

Pengamatan menggunakan citra satelit pada tahun 2003 (Hilda dkk., 2007) diketahui bahwa adanya erosi dari daerah hulu dan pada musim penghujan air waduk lebih keruh dibandingkan musim kemarau. Telah terjadi sedimentasi pada waduk yang disebabkan oleh 2 (dua) faktor yaitu eksternal di mana material terbawa dari Waduk Cirata, Sungai Cisomang dan Sungai Cilalawi, dan faktor internal yaitu material berasal dari lahan sekitar waduk. Brainwood dkk., (2004) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa keberadaan nutrien seperti nitrat dan fosfat dalam ekosistem waduk mempunyai pengaruh yang jelas pada proses fotosintesa alga dalam setiap musim. Hal ini terjadi pada Waduk Jatiluhur di mana pada tahun 2007 ketika musim kemarau pernah terjadi *Blooming Algae* (Perum Jasa Tirta II, 2007).

Kualitas air secara tidak langsung dipengaruhi tinggi muka air yang merupakan peubah yang diamati secara langsung dan digunakan untuk menduga volume waduk. Balai Riset Pemulihan Sumber Daya Ikan (2009) melaporkan bahwa TMA (tinggi muka Air) di Waduk Jatiluhur maksimum terjadi pada bulan Juni dan terendah pada bulan November. Kecerahan terendah terjadi di bulan Agustus dan September (kondisi TMA menurun). Derajat keasaman (pH) berkisar 6,5–9,5 di mana terendah pada bulan Januari (kondisi TMA rendah) dan tertinggi pada bulan Oktober

(kondisi TMA menurun). Konsentrasi oksigen terendah terjadi pada lokasi keramba jaring apung (KJA) dan Dam (bendungan utama). Sebaliknya konsentrasi klorofil-a terendah terjadi pada bulan April (kondisi TMA meningkat) dan tertinggi terjadi di bulan Oktober (kondisi TMA menurun). Demikian halnya dengan kelimpahan plankton yang tertinggi terjadi pada bulan Januari dan terendah terjadi pada bulan Juni (kondisi TMA tinggi).

Karakteristik kualitas air di Waduk Jatiluhur berdasarkan hasil analisa Balai Riset Pemulihan Sumber Daya Ikan sangat dipengaruhi oleh *outflow* dari Waduk Cirata, sehingga dinamika kualitas di perairan ini lebih tinggi. Kecenderungan menurun terjadi pada parameter alkalinitas, sulfat dan bahan organik total telah terjadi dari tahun 2004 sampai tahun 2009.

### **C. Penerapan Model Hidrologi di Waduk**

Model hidrologi merupakan gambaran sederhana secara fisik dan matematik dari suatu sistem hidrologi yang kompleks. Secara umum model hidrologi dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori (Arwin dan Salahuddin, 1996; Nuraeni, 2011), yaitu

1. Model Fisik, yaitu model prototipe dengan skala tertentu untuk menirukan system atau kondisi hidrologi aslinya, meliputi:
  - a. *Scale Model*, yaitu model yang mewakili sistem hidrologi sebenarnya dalam skala yang lebih kecil.
  - b. *Analog Model*, yaitu model yang menggunakan model fisik dalam bentuk lain dengan sifat yang sama dengan prototipenya untuk mewakili sistem sebenarnya.
2. Model Abstrak atau Model Matematik, yaitu suatu model yang menyajikan sistem dalam bentuk matematis berupa persamaan-persamaan atau ungkapan yang menyajikan hubungan antar variabel dan parameter. Model abstrak dapat dibagi lagi menjadi:
  - a. Model Stokhastik (*stochastic model*), yaitu model dengan variabel-variabel yang tidak mempunyai nilai yang pasti pada kondisi ruang dan waktu tertentu tetapi dijelaskan dalam bentuk distribusi probabilitas. Model ini terdiri dari variabel-variabel tertentu, yang penyusunan hubungan

antara masukan dengan keluarannya mengikutsertakan pengertian “Kesempatan kejadian” (*chance of occurrence/randomness*) dalam proses waktu.

- b. Model Deterministik (*deterministic* model), yaitu model yang tidak mempertimbangkan “kesempatan kejadian” (*randomness*) dari variabel-variabel penyusunnya. Setiap masukan dengan sifat-sifat tertentu akan menghasilkan keluaran yang tertentu pula.

Tujuan penggunaan model dalam hidrologi antara lain adalah:

1. Peramalan (*forecasting*), termasuk di dalamnya untuk sistem peringatan dan manajemen.
2. Perkiraan (*prediction*), yaitu perkiraan besaran kejadian dan waktu hipotetis (*hypotetical future time*).
3. Sebagai alat deteksi dalam masalah pengendalian. Melalui suatu sistem yang sudah diketahui keluaran (*output*), maka masukan dapat dikontrol dan diketahui.
4. Sebagai alat identifikasi dalam perencanaan, misal dalam optimalisasi pengoperasian waduk.
5. Ekstrapolasi data atau informasi.
6. Penelitian dasar dalam proses hidrologi.

Dengan model hidrologi yang baik dan keluaran yang paling sesuai dengan kondisi sistem sebenarnya, maka masukan dari model dapat dikontrol dan diatur.

Penelitian aplikasi hidrologi secara kuantitatif untuk memperkirakan ketersediaan air telah banyak dilakukan baik skala besar yaitu DAS maupun lingkup kecil seperti waduk dan sungai. Metode pendekatan yang digunakan adalah berdasarkan prinsip konservasi massa atau water balance (Zhou dan Guo, 2013; Molina-Navarro dkk, 2014). Triamdodjo dalam Marganingrum (2013) menyatakan bahwa prinsip konservasi massa dinyatakan dalam bentuk persamaan neraca massa menggambarkan bahwa dalam suatu sistem hidrologi (DAS, waduk, danau dan aliran permukaan) dapat dievaluasi jumlah air yang masuk dan keluar

dari sistem tersebut dalam suatu periode waktu tertentu. Penggunaan persamaan water balance telah banyak diaplikasikan dengan berbagai metode perhitungan untuk setiap komponen hidrologinya. Pola hubungan hujan dan debit telah banyak dikembangkan untuk mengestimasi karakteristik fisik DAS terhadap respon hidrologi DAS (Marganingrum, 2013). Penelitian Marganingrum tahun 2013 telah menggunakan prinsip neraca air dalam menggambarkan hubungan antara hujan dan debit berdasarkan metode lumped (black box) dengan pendekatan input output. Hasil perhitungan menggunakan prinsip neraca massa air menunjukkan ada pengaruh positif yaitu peningkatan *base flow* hasil perhitungan bulanan pada periode 1986-2008 di Waduk Saguling.

Sumber air permukaan dalam aliran sungai dipengaruhi oleh variasi hujan yang bersifat acak dan cenderung stokastik. Sifat acak dan stokastik menjadi dasar melakukan penelitian hubungan hujan dan debit dengan metode statistik (Marganingrum, 2013; Liu dkk, 2011). Kompleksitas hubungan hujan debit dapat di atasi dengan penggunaan metode prakiraan debit (Sabar, 2009; Triatmodjo, 2006; Marganingrum, 2013). Pengembangan model debit prakiraan perlu divalidasi dengan data historikal debit yang ada. Dalam penelitian disertasi ini akan dilakukan perhitungan model prakiraan debit secara statistik (model kontinu) dan stokastik (model diskrit Markov).

#### **D. Optimasi Pengelolaan Waduk**

Waduk atau reservoir adalah bangunan penghalang (barrier) yang dibangun pada penampang melintang aliran sungai dalam bentuk Dam dan berfungsi untuk menampung air. Air yang tertampung di dalam reservoir dapat digunakan untuk berbagai keperluan. Reservoir dapat diklasifikasikan berdasarkan fungsi sebagai berikut (Wurbs, 1996):

##### **1. Reservoir Konservasi (*Storage or Conservation Reservoir*)**

Untuk memenuhi kebutuhan air bersih perkotaan, irigasi, atau pusat pembangkit listrik tenaga air, dilakukan pengambilan air secara langsung dari aliran sungai. Pada

kondisi aliran sungai yang rendah terdapat potensi kegagalan dalam memenuhi kebutuhan tersebut, sebaliknya pada kondisi aliran sungai yang besar terjadi potensi masalah banjir. Untuk mengatasi kondisi tersebut, maka dibangun reservoir konservasi yang berfungsi untuk menampung kelebihan air saat kondisi aliran puncak dan memanfaatkan kembali saat terjadi aliran sungai yang rendah atau saat meningkatnya kebutuhan air. Reservoir konservasi dapat sekaligus berfungsi untuk mengurangi risiko banjir pada daerah yang terletak di hilir reservoir.

2. Reservoir Pengendali Banjir (*Flood Control Reservoirs*)

Reservoir pengendali banjir berfungsi untuk mereduksi aliran puncak banjir sehingga dapat mencegah banjir di bagian hilir. Aliran air yang memasuki reservoir pengendali banjir, ditampung dan dikeluarkan secara bertahap sehingga outflow dapat ditampung oleh penampang saluran atau sungai di bagian hilir dan mencegah banjir.

3. Reservoir Distribusi (*Distribution Reservoirs*)

Reservoir distribusi adalah reservoir kecil yang dibangun untuk memenuhi kebutuhan air minum perkotaan. Reservoir ini memperoleh pasokan air dengan memompakan air pada debit tertentu.

4. Reservoir Multiguna (*Multipurpose Reservoirs*)

Reservoir multiguna adalah reservoir yang dibangun untuk memenuhi berbagai fungsi secara bersamaan. Reservoir multiguna berfungsi untuk melindungi daerah di bagian hilir aliran sungai dari kemungkinan banjir, atau menjadi tampungan air untuk memenuhi kebutuhan air minum, irigasi, industri, serta pembangkit listrik.

Debit air sungai yang masuk waduk, kapasitas tampung dan batasan aspek operasional waduk sangat mempengaruhi ketersediaan air dalam waduk. Prinsip pengoperasian waduk adalah penerapan teori keseimbangan massa (*mass balance*). Teori yang disebut juga sebagai *hydrolic budget* ini menyatakan bahwa simpanan air di dalam bangunan waduk untuk awal bulan  $t+1$

sama dengan simpanan air untuk awal bulan  $t$ , yang ditambah dengan masukan air dari sungai selama bulan ke- $t$ , dan dikurangi dengan output waduk dan evaporasi selama bulan ke- $t$  (Yeh, 1985; Wurbs, 1996; Labadie, 2004; Rani dan Maria, 2010; Yin dkk, 2014; Jothiprakash dan Magar, 2012; Syariman dan Heru, 2011, Sabar, 2009; Marganingrum, 2013).

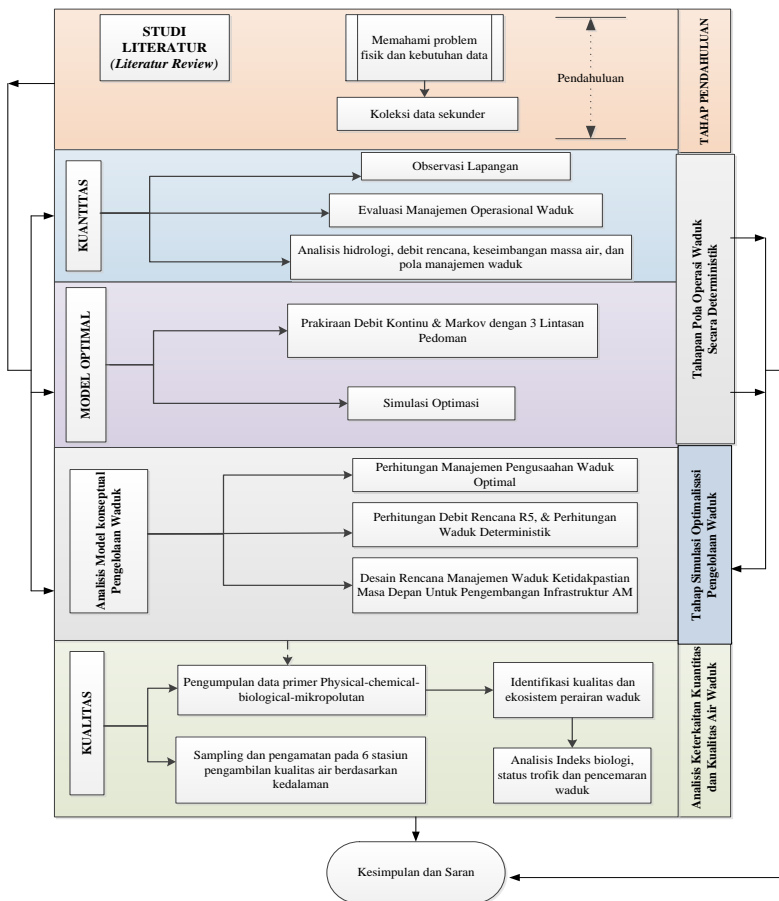
Menurut Marganingrum (2013) terdapat tiga variabel utama yang menyusun persamaan keseimbangan massa di atas yaitu

1. Variabel acak, adalah variabel yang kejadian dan besarnya tidak menentu dalam proses waktu yaitu variabel  $Q$  (variabel acak independent) dan  $E$  (variabel acak yang relatif dependent terhadap iklim dan luas genangan).
2. Variabel  $T$  sebagai Variabel yang dikomandokan, adalah variabel yang diatur besarnya untuk memperoleh besaran variabel yang ditentukan.
3. Variabel  $S$  sebagai Variabel yang ditentukan, adalah variabel yang diinginkan besarnya.

# BAB 3

# METODOLOGI PENELITIAN

## A. Konsep Pemikiran Penelitian



Gambar 3-1 Diagram Alir Penelitian



Diagram alir penelitian terbagi atas 2 (dua) bagian yang dijelaskan sebagai berikut:

Bagian pertama meliputi review literatur dan identifikasi kualitas dan ekosistem perairan Waduk Kaskade Citarum

Bagian kedua meliputi kajian secara paralel 3 (tiga) sub bagian yaitu 1) kajian rezim hidrologi DAS Citarum dan Simulasi model deterministik Waduk Kaskade Citarum, 2) kajian analisis model optimal waduk, perhitungan debit rencana, matriks transisi tahunan, perhitungan perkiraan debit kontinu dan Stokastik Markov, simulasi optimasi model pengusahaan waduk dengan ketidakpastian debit masa depan di Waduk Kaskade Citarum dan 3) kajian analisis keterkaitan aspek kualitas air terhadap kuantitas di Waduk Kaskade Citarum, kesimpulan dan penyusunan rekomendasi.

## **B. Metode Penelitian**

### **1. Analisis Data Hidrologi**

Data curah hujan dan debit yang dipergunakan diperoleh dari Perum Jasa Tirta II Jatiluhur. Gambar dan peta diperoleh dari berbagai sumber. Curah hujan yang diperlukan untuk penyusunan suatu rancangan pemanfaatan sumber daya air atau pengendalian banjir adalah curah hujan rata-rata di seluruh daerah yang bersangkutan. Curah hujan ini disebut curah hujan wilayah/daerah dan dinyatakan dalam mm.

Curah hujan rata-rata wilayah dihitung untuk mengetahui kontribusi hujan rata-rata terhadap debit aliran yang akhirnya akan mencerminkan pula kontribusi hujan tersebut terhadap aliran inflow waduk. Nilai hujan rata-rata dicari dengan menggunakan metode aritmatika/aljabar (Suripin, 2004). Metode ini adalah perhitungan rata-rata secara aljabar curah hujan di dalam dan di sekitar daerah yang bersangkutan.

$$\bar{R} = \frac{1}{n}(R_1 + R_2 + \dots + R_n) \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

Dengan:

$\bar{R}$  = Curah hujan daerah (mm)

n = Jumlah stasiun pengamat hujan

R1, R2,..., Rn = Curah hujan di tiap titik pengamatan

Hasil yang diperoleh dengan metode ini tidak jauh berbeda dengan hasil dari metode perhitungan lainnya, jika titik pengamatan tersebar merata di seluruh daerah yang diamati. Peramalan atau forecasting debit aliran masuk waduk dapat digunakan dengan pendekatan pemodelan deret waktu yang meramal nilai karakteristik tertentu pada periode ke depan. Hal ini dikarenakan bahwa pemodelan deret waktu merupakan dasar dari peramalan yang rasional, efektif, dan efisien.

## 2. Distribusi Data Debit

Setelah memperoleh data debit yang lengkap, data debit tersebut dibuat distribusi statistiknya untuk menganalisis probabilitas kejadian debitnya. Hal ini ditujukan untuk memperoleh besarnya nilai debit ekstrem kering, normal, dan basah. Pembagian ini akan digunakan pada pembagian kelas pada matrik transisi orde satu dan tiga kelas. Dan juga nilai debit ekstrem kering dan normal yang akan digunakan dalam pembuatan pedoman lintasan volume waduk. Analisis dilakukan dengan mempergunakan distribusi teoretis yaitu distribusi Normal, Log-Normal, Gamma, Log-Person III dan Gumbel. Untuk mengetahui distribusi peluang yang sesuai maka dilakukan uji *goodness-of-fit*. Uji *goodness-of-fit* dilakukan untuk menentukan tingkat kesesuaian antara sampel dengan suatu distribusi teoritis. Dalam pengujian ini dilakukan pengujian hipotesis, yaitu  $H_0$  jika sampel berasal dari distribusi teoritis yang diuji dan  $H_1$  jika sampel bukan berasal dari distribusi teoritis yang diuji. Untuk menguji hipotesis, maka ada dua jenis uji yang dapat dipergunakan, yaitu uji  $X^2$  dan uji *Kolmogorov-Smirnov* (K-S). Faktor-faktor yang menentukan jenis pengujian yang dilakukan adalah:

- a. Distribusi teoritis yang akan diuji, apakah merupakan distribusi diskrit atau kontinu. Uji chi kuadrat atau Uji  $X^2$

lebih sesuai untuk menguji fungsi distribusi diskrit, sedangkan uji *Kolmogorov-Smirnov* (K-S) lebih sesuai untuk menguji fungsi distribusi kontinu dengan nilai parameter telah diketahui atau tidak.

- b. Parameter distribusi teoritis tersebut telah diketahui atau tidak diketahui (diperkirakan dari sampel).
  - c. Jumlah data. Untuk uji chi kuadrat atau uji  $X^2$ , agar hasil uji tersebut dapat dipercaya dibutuhkan minimal empat data berbeda untuk variabel diskrit atau empat kelas data yang berbeda untuk variabel kontinu dengan frekuensi setiap data minimal empat. Jika kondisi tersebut tidak terpenuhi, maka dilakukan uji K-S (tidak tergantung jumlah data).
3. Uji  $X^2$

Hasil pengamatan tidak selalu tepat dengan hasil teoritis yang diharapkan, sehingga untuk mengetahui distribusi yang sesuai perlu mengetahui berapa besar perbedaan yang terjadi antara frekuensi hasil pengamatan dengan frekuensi yang diharapkan berdasarkan distribusi teoritis. Untuk mengukur perbedaan tersebut digunakan uji  $X^2$ . Jadi uji  $X^2$  mengukur perbedaan relatif antara frekuensi hasil pengamatan dengan frekuensi yang diharapkan berdasarkan distribusi teoritis. Besar perbedaan antara frekuensi hasil pengamatan dengan frekuensi yang diharapkan berdasarkan distribusi teoritis dinyatakan sebagai  $X^2$  yang ditentukan dengan persamaan berikut:

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

$$E_i = nP_i \dots\dots\dots(3.2)$$

Di mana:

- k = jumlah nilai variabel yang berbeda atau jumlah kelas
- $O_i$  = frekuensi hasil pengamatan
- $E_i$  = frekuensi yang diharapkan
- n = jumlah data
- $P_i$  = peluang dari distribusi teoritis

Jika nilai  $\chi^2 = 0$ , maka frekuensi hasil pengamatan dan frekuensi yang diharapkan dari distribusi teoritis tepat sama. Namun jika nilai  $\chi^2 > 0$  maka frekuensi hasil pengamatan dan frekuensi yang diharapkan dari distribusi teoritis tidak sama. Semakin besar nilai  $\chi^2$  maka semakin besar pula perbedaan. Setelah nilai  $\chi^2$  dihitung, selanjutnya nilai  $\chi^2$  tersebut dibandingkan dengan nilai  $\chi^2$  dari distribusi teoritis (tabel Chi-kuadrat) pada derajat kebebasan dan derajat kepercayaan tertentu. Besar derajat kebebasan yang dipergunakan ditentukan sebagai berikut:

- a.  $v = k-1$  jika frekuensi yang diharapkan dihitung tanpa harus mengestimasi parameter sampel.
- b.  $v = k-1-m$ . jika frekuensi yang diharapkan hanya dapat dihitung dengan mengestimasi  $m$  parameter sampel.

$H_0$  diterima jika nilai  $\chi^2$  hasil perhitungan lebih kecil dari nilai  $\chi^2_{\alpha}$  pada derajat kepercayaan  $\alpha$  tertentu (biasanya 0,05).

$$P(\chi^2 \leq \chi^2_{\alpha}) = 1 - \alpha \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

4. Uji Kolmogorov-Smirnov

Uji Kolmogorov-Smirnov (K-S) menetapkan suatu titik di mana terjadi penyimpangan terbesar antara distribusi teoritis dengan sampel. Bila  $F_0(X)$  adalah suatu fungsi distribusi peluang kumulatif yang ditentukan atau distribusi teoritis dan  $S_N(X)$  adalah distribusi kumulatif sampel, maka diharapkan untuk setiap harga  $X$ ,  $F_0(X)$  harus mendekati  $S_N(X)$ . Artinya diharapkan selisih antara  $F_0(X)$  dan  $S_N(X)$  relatif kecil dan masih dalam batas-batas kesalahan random sehingga dapat dikatakan kedua fungsi tersebut identik. Dengan kata lain, distribusi yang diajukan dapat mewakili data pengamatan atau sampel.

Uji K-S ini menguji penyimpangan terbesar yaitu

$$DN = \text{Maks } |F_0(X) - S_N(X)| \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

Data diurutkan dari nilai terkecil ke nilai terbesar sebelum data diuji. Peluang dari data hasil pengurutan tersebut ( $S_N(X)$ ), kemudian dapat dihitung dengan beberapa metode menurut Prasetyo (2006):

a. Metode California:

$$P(X \leq x) = m/N \dots\dots\dots (3.5)$$

b. Metoda Hazen:

$$P(X \leq x) = (2m-1) / 2N \dots\dots\dots(3.6)$$

c. Metoda Bernard dan Bos-Levenbach:

$$P(X \leq x) = (m-0,3) / (N + 0,4) \dots\dots\dots(3.7)$$

d. Metoda Weibull:

$$P(X \leq x) = m / (N+1) \dots\dots\dots(3.8)$$

Di mana

m = nomor urut kejadian

N = jumlah data observasi

$P(X \leq x)$  = peluang terjadinya kejadian yang nilainya lebih kecil atau sama dengan x

Dari empat metode, metode Weibull merupakan yang paling sering dipergunakan dalam analisis peluang dan periode ulang hidrologi. Jika DN telah dihitung, selanjutnya dibandingkan dengan Do tabel. Ho diterima jika DN lebih kecil dari Do pada derajat kepercayaan tertentu.

$$P(DN \leq Do) = 1 - \alpha \dots\dots\dots (3.9)$$

## 5. Periode Ulang

Periode ulang dari suatu fenomena hidrologi adalah rata-rata rentang waktu yang diperlukan di mana suatu nilai dari suatu kejadian akan disamai atau dilampaui sekali. Jika periode ulang suatu nilai kejadian adalah sepuluh tahun maka nilai kejadian tersebut akan terjadi sekali dalam sepuluh tahun. Rata-rata di sini menunjukkan bahwa nilai/kejadian tersebut secara kronologis tidak harus terjadi setiap sepuluh tahun sekali, tetapi akan terjadi misalnya sepuluh kali dalam seratus tahun. Dalam analisa frekuensi selalu ditentukan periode ulang kejadian yang akan ditinjau. Bila suatu kejadian adalah sama atau kurang dari x terjadi sekali dalam T tahun maka probabilitas kejadian adalah sama dengan satu dalam T kasus.

$$P(X \leq x) = \frac{1}{T} \dots\dots\dots (3.10)$$

atau

$$T = \frac{1}{P(X \leq x)} = \frac{1}{1 - P(X \geq x)} \dots\dots\dots (3.11)$$

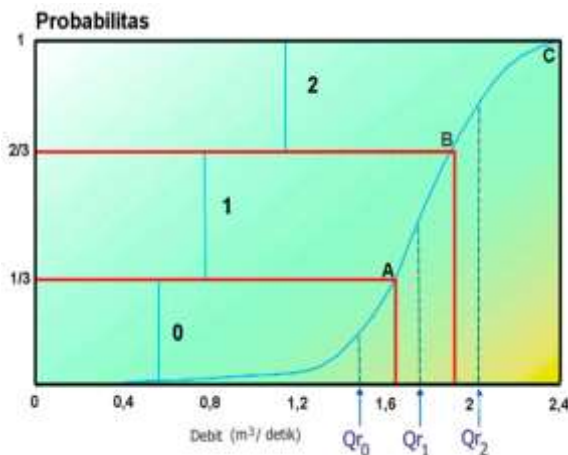
### C. Kelas Debit dan Matrik Transisi

Untuk membentuk matrik transisi, data debit harus dilakukan pengkelasan data yang ditetapkan berdasarkan kurva distribusi kumulatif kurang dari, seperti pada Gambar 3.3. Besaran debit dalam matrik tiga kelas orde satu dibagi menjadi tiga yaitu

1. Debit kering (dinyatakan dengan 0)
2. Debit normal (dinyatakan dengan 1)
3. Debit basah (dinyatakan dengan 2)

Prosedur untuk memperoleh matriks transisi adalah sebagai berikut:

1. Menentukan banyaknya pembagian kelas.
2. Memasukkan data debit historik ke dalam pembagian kelas sesuai dengan batas kelas yang ditentukan.
3. Mencari nilai probabilitas kejadian  $j$  pada waktu  $t_n$  terjadi bila kejadian  $i$  terjadi pada waktu  $t_{n-1}$ .
4. Membangun matriks transisi dengan elemen tiap baris dan kolom hasil perhitungan probabilitas transisi pada waktu yang ditinjau.



Gambar 3-2 Kurva Distribusi Kumulatif Untuk Tiga Kelas Debit

Dari kurva pada Gambar 3.2 dapat dijelaskan bahwa kelas debit 0 (kering) berkisar antara titik 0 dan proyeksi titik A ke sumbu X ( $0 < X \leq A$ ), kelas debit 1 (normal) berkisar antara proyeksi titik A dan B ( $A < X \leq B$ ), dan kelas 2 (basah) berkisar antara proyeksi titik B dan C ( $B < X \leq C$ ).

#### D. Model Prakiraan Debit

Curah hujan dan debit adalah dua variabel utama pada siklus hidrologi dalam pengembangan sumber daya air pada suatu DAS. Dalam rangka menunjang pengembangan sumber daya air dalam suatu DAS di bangunlah stasiun-stasiun pengamat curah hujan dan debit. Hujan yang jatuh wilayah daerah pengaliran (DAS) mempunyai kontribusi yang berbeda antara satu tempat dengan lainnya karena pengaruh ketinggian, posisi, dan iklim regional pada wilayah tersebut. Berdasarkan pengamatan hidro meteorologi pada suatu DAS, terutama curah hujan dan debit air, kita dapat meneliti hubungan (korelasi) antar variabel dalam ruang dan waktu. Selanjutnya, penelitian kejadian antara hujan-debit dilakukan berdasarkan keterkaitan antara dua variabel acak (stasiun pengamatan hujan dan debit) untuk memprediksi ketidakpastian debit masa depan melalui model prakiraan debit. Penelitian ini mengkaji model prakiraan debit dengan pendekatan model kontinu dan model stokastik Markov.

Model prakiraan debit kontinu mempunyai prinsip didasari analisis statistik korelasi dan regresi berganda (*multiple regression*). Regresi berganda dilakukan dengan metode enter artinya semua variabel diikutsertakan dalam analisis. Persamaan regresi berganda dirumuskan sebagai Persamaan 3.12:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + E \dots\dots\dots (3.12)$$

Di mana Y adalah nilai variabel bebas (dependent variabel); a adalah konstanta yaitu nilai Y bila X=0;  $b_n$  adalah koefisien regresi ke-n;  $X_n$  adalah nilai variabel terikat (independent variable) ke-n; dan E adalah error. Uji korelasi dilakukan setelah didapatkan persamaan regresi untuk menentukan kuat tidaknya hubungan antara variabel bebas dan variabel terikatnya (koefisien korelasi =

R). Nilai R berkisar antara -1 dan 1. Untuk nilai R = -1 menyatakan hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat sangat kuat (sempurna) hanya berbalikan arah. Untuk R = 1 menyatakan bahwa hubungan variabel bebas dan variabel terikat sangat kuat namun berhubungan searah.

Selain model kontinu, prakiraan debit dapat diestimasi menggunakan model diskrit Markov (Sabar, 2009). Analisis Markov adalah suatu teknik matematik untuk peramalan perubahan pada variabel-variabel tertentu berdasarkan pengetahuan dari perubahan sebelumnya. Pada analisis ini terlihat suatu sistem setelah percobaan berulang, di mana hasil dari sistem pada periode yang akan datang tidak dapat ditentukan sebelumnya dengan pasti. Suatu set kemungkinan perubahan keadaan (transisi) diperhitungkan untuk menjelaskan bagaimana sistem tersebut melakukan transisi (perubahan) dari satu periode ke periode lainnya. Proses Markov adalah suatu kasus khusus dari proses stokastik yang lebih umum. Proses stokastik dapat dilihat sebagai deretan variabel acak terhadap waktu. Jika proses Markov dengan n-kejadian probabilitas transisi dari kondisi i pada  $X_{n-1}$  ke kondisi j pada  $X_n$  dan diasumsikan probabilitas ini tetap sepanjang waktu, maka transisi tersebut akan lebih mudah disusun dalam bentuk matriks. Nilai matrik didapat dengan menghitung pasangan tahun yang dicirikan dengan keadaan debit (0, 1, 2). Jika dimiliki suatu seri meteorologi (N+1) tahun, maka akan dimiliki N pasangan terpisah. N01 dan N10 menyajikan jumlah dari perubahan berturut-turut keadaan dari debit kering (0) ke keadaan debit normal (1), atau dari debit normal (1) ke debit kering (0), dan seterusnya. Jika dinamakan  $P_i$  probabilitas marjinal dari keadaan debit i, dapat digambarkan hubungan sbb:

$$A_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \quad \text{dan} \quad P_i = \frac{N_i}{N} \dots\dots\dots (3.13)$$

Di mana:

- N = N0 + N1 + N2
- N0 = N00 + N01 + N02;
- N1 = N10 + N11 + N12;



$$N_2 = N_{20} + N_{21} + N_{22}$$

**Tabel 3.1 Matrik Multikelas Prosesus Orde Satu**

Kondisi Debit Waktu $t_{n-1}$	Kondisi Debit Waktu $t_n$			Jumlah Keadaan Debit $t_{n-1}$
	0	1	2	
0	$N_{00}$	$N_{01}$	$N_{02}$	$N_0 = N_{00} + N_{01} + N_{02}$
1	$N_{10}$	$N_{11}$	$N_{12}$	$N_1 = N_{10} + N_{11} + N_{12}$
2	$N_{20}$	$N_{21}$	$N_{22}$	$N_2 = N_{20} + N_{21} + N_{22}$
Jumlah Keadaan Debit $t_n$	$N_0' = N_{00} + N_{10} + N_{20}$	$N_1' = N_{01} + N_{11} + N_{21}$	$N_2' = N_{02} + N_{12} + N_{22}$	$N = N_0 + N_1 + N_2 = N_0' + N_1' + N_2'$

Perhitungan debit andalan untuk air baku di tiap Waduk Kaskade Citarum dapat ditentukan dengan formula rumus alokasi air baku sebagai berikut:

1. Qairbaku Saguling =  $Q_{R5}$  debit Pos Saguling=  $Q_{out}$  Waduk Saguling
2. Qairbaku Cirata =  $Q_{out}$  waduk Saguling +  $Q_{lokal}$   $R5$  DAS Cirata =  $Q_{out}$  Waduk Cirata
3. Qairbaku Jatiluhur =  $Q_{out}$  waduk Cirata +  $Q_{lokal}$   $R5$  DAS Jatiluhur
4. Optimalisasi Pengelolaan Waduk Secara Deterministik dan Optimal

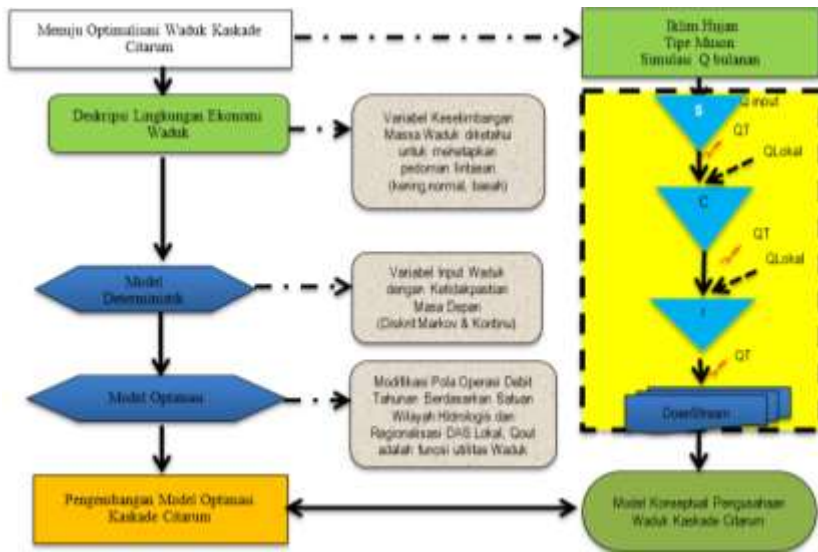
Debit air sungai yang masuk waduk, kapasitas tampung dan batasan aspek operasional waduk sangat mempengaruhi ketersediaan air dalam waduk. Prinsip pengoperasian waduk adalah penerapan teori keseimbangan massa (*mass balance*) untuk mencapai kondisi optimal dalam pengelolaan waduk. Teori yang disebut juga sebagai *hydraulic budget* ini menyatakan bahwa simpanan air di dalam bangunan waduk untuk awal bulan  $t+1$  sama dengan simpanan air untuk awal bulan  $t$ , yang ditambah dengan masukan air dari sungai selama bulan ke- $t$ , dan dikurangi

dengan output waduk dan evaporasi selama bulan ke-t (Handojo, 2006 dalam Marganingrum, 2013; Liu dkk, 2011; Yin dkk, 2014).

Terdapat tiga variabel utama yang menyusun persamaan keseimbangan massa di atas yaitu

1. Variabel acak, adalah variabel yang kejadian dan besarnya tidak menentu dalam proses waktu yaitu variabel Q (variabel acak independent) dan E (variabel acak yang relatif dependent terhadap iklim dan luas genangan).
2. Variabel T sebagai Variabel yang dikomandokan, adalah variabel yang diatur besarnya untuk memperoleh besaran variabel yang ditentukan.
3. Variabel S sebagai Variabel yang ditentukan, adalah variabel yang diinginkan besarnya.

Dalam penelitian ini manajemen pengoperasian atau perusahaan waduk ditempuh dengan dua cara yaitu pola pengoperasian waduk deterministik dan pola pengoperasian waduk optimal (Sabar, 2009; Liu dkk, 2011). Definisi pola pengoperasian waduk deterministik (*Gestion Avenir Connu = GAC*) adalah sistem pengoperasian waduk menggunakan debit rencana. Mengacu pada pasal 45 PP nomor 37 tahun 2010 tentang Bendungan, debit rencana dibuat dalam tiga kelas yaitu kering (0), normal (1) dan basah (2). ketiga kelas debit rencana tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan lintasan pedoman ( $St$ ) kering, normal dan basah. Sedangkan yang dimaksud pola pengoperasian waduk optimal (*Gestion Avenir Aleatoire = GAA*) adalah pengoperasian waduk dengan ketidakpastian debit inflow. Tujuan dari optimalisasi adalah mengoptimalkan lintasan waduk agar sesuai atau mendekati lintasan pedomannya sehingga tidak ada air yang terbuang melalui *spillway*. Skema langkah-langkah dalam manajemen pengoperasian waduk yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Skema Manajemen Pengoperasian Waduk Deterministik dan Optimal

Prinsip utama melakukan simulasi optimasi model konseptual di Waduk Kaskade Citarum yaitu mendefinisikan problem fisik dengan persamaan matematis di mana output yang diharapkan mendekati kondisi aktual atau kejadian sebenarnya. Simulasi dilakukan secara bulanan untuk melakukan uji model yang dibuat melalui skenario yaitu skenario pertama bahwa DAS Kaskade Citarum sebagai satu kesatuan wilayah hidrologis dari hulu sampai hilir, dan skenario yang kedua adalah DAS Kaskade Citarum mempunyai rezim hidrologis dinamis yang terdiri dari tiga sub sistem wilayah hidrologi. Dalam kasus ini ada dua hal yang menjadi target dalam menjalankan simulasi berdasarkan dua skenario yaitu 1) lintasan aktual mengikuti lintasan pedoman yang ditetapkan, dan 2) output hasil simulasi dapat memenuhi constraint di downstream dan menghindari kelebihan air yang terbangun melalui spillway.

Tujuan atau objektif dalam optimasi waduk didasarkan atas fungsi-fungsi sebagai berikut (Zhou dan Guo, 2013):

1. Meminimalkan risiko banjir pada downstream:

$$f_1 = \min R = \max \frac{\#(Qx_t \leq Qmax)}{T} \dots \dots \dots (3.14)$$

2. Memaksimalkan kebutuhan air di downstream:

$$f_2 = \max Q_{am} = \max \frac{1}{N} \sum_{t=1}^T Q_{Rt} \Delta t \dots \dots \dots (3.15)$$

3. Memaksimalkan tenaga penggerak Turbin PLTA:

$$f_3 = \max E = \max \frac{1}{N} \sum_{t=1}^T P_i \Delta t \dots \dots \dots (3.16)$$

Adapun constraints dalam menjalankan model optimasi dengan prakiraan debit inflow kontinu adalah: (1) persamaan keseimbangan massa air, (2) batasan tinggi muka air waduk, (3) kebutuhan air di downstream, (4) batasan tenaga penggerak turbin (Liu dkk, 2011). Persamaan kesetimbangan massa digunakan dalam menjalankan simulasi:

$$S_{t+1pedoman} = S_{t \text{ aktual}} + Q_{in-t} - Q_{out-t} \dots \dots \dots (3.17)$$

Di mana:

- $S_{t+1pedoman}$  = lintasan pedoman yang merupakan variabel yang ditetapkan (deterministik) dan ditunjukkan sebagai stok volume waduk atau TMA pada bulan mendatang (t+1)
- $S_{t \text{ aktual}}$  = stok volume waduk atau TMA pada bulan eksisting (t)
- $Q_{in-t}$  = debit masuk waduk yang merupakan variabel acak
- $Q_{out-t}$  = debit turbin yang merupakan variabel yang dikomandokan atau diharapkan untuk menghasilkan target energi dan kebutuhan downstream
- R = kontrol risiko banjir di downstream, %
- $Q_{am}$  = Kebutuhan air di downstream,  $m^3$
- $Q_{Rt}$  = aliran kebutuhan air di downstream dalam periode waktu t,  $m^3/detik$
- $Q_{xt}$  = Jumlah outflow waduk dalam periode t,  $m^3/detik$
- $P_t$  = Daya output waduk dalam periode waktu t, kW

Simulasi pengelolaan waduk optimal mempunyai perbedaan dalam pengoperasiannya jika dibandingkan dengan simulasi waduk deterministik di mana nilai  $S_{t+1}$  pedoman dan  $Q_{in-t}$  diperoleh dari hasil perhitungan model. Sedangkan  $S_{(t)}$  aktual pada awal

simulasi mengikuti lintasan pedoman yang dipilih  $S_{(t)pedoman}$ . Dengan memasukkan semua variabel kedalam persamaan maka diperoleh  $Q_{out-t}$  hasil perhitungan. Dengan memasukkan nilai  $Q_{out-t}$ ,  $S_t$ -aktual dan  $Q_{in-aktual}$  kedalam persamaan maka diperoleh nilai  $S_{t+1-aktual}$  yang akan digunakan untuk perhitungan bulan selanjutnya. Pada saat menentukan  $Q_{out-t}$  dan  $S_{t+1-aktual}$  harus memperhatikan *constraint* waduk maupun turbin. Apabila debit yang dikeluarkan melampaui batasan maksimum turbin maka digunakan nilai maksimum turbin dan kelebihan stok air merupakan jumlah air yang disimpan dalam waduk ( $S_t$ ). Jika nilai stok melebihi kapasitas maksimum waduk, maka kelebihan stok air dialirkan sebagai tambahan debit *release* (melewati turbin). Apabila setelah ditambah kelebihan air dari waduk dan jumlah  $Q_{out}$  tetap melebihi kapasitas maksimum turbin maka akan terjadi limpasan melalui spillway.

# BAB 4

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### **A. Simulasi Model Operasional Waduk Deterministik di Kaskade Citarum**

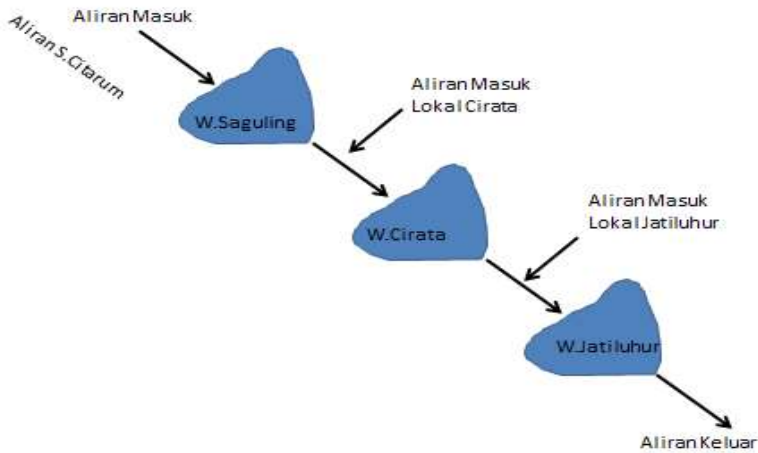
#### **Ketersediaan dan Analisis Data Hujan**

Analisis terhadap data hujan sangat dibutuhkan karena hujan merupakan unsur iklim dengan variabilitas tinggi dan sebagai faktor penentu dan pembatas dalam perencanaan di sektor lain khususnya pengembangan infrastruktur sumber daya air (Marganingrum, 2013; Yin dkk, 2014; Jothiprakash dan Magar, 2012). Curah hujan adalah sumber utama sumber daya air pada setiap lokasi tertentu, namun jumlah hujan yang dapat dimanfaatkan sangat tergantung pada intensitas, ukuran, dan kecepatan hujan (Asdak, 2007; Hadihardaja, 2006; Yin dkk, 2014, Kranz dkk, 2010). Berdasarkan distribusi curah hujan rata-rata bulanan di Indonesia, BMKG dalam Marganingrum (2013) membagi menjadi 3 (tiga) pola hujan, yaitu

1. Pola hujan moonsun yang wilayahnya memiliki perbedaan cukup jelas antara periode musim hujan dan periode kemarau yang dikelompokkan dalam zona musim (ZOM). Pola moonsun dicirikan oleh tipe curah hujan yang bersifat unimodial (satu puncak musim hujan, DJF (Desember-Januari-Februari) musim hujan, JJA (Juni-Juli-Agustus) musim kemarau).
2. Pola hujan equatorial yang wilayahnya memiliki distribusi hujan bulanan bimodial dengan dua puncak musim hujan maksimum dan hampir sepanjang tahun masuk dalam kriteria musim hujan. Pola equatorial dicirikan oleh tipe curah hujan dengan bentuk bimodial (dua puncak hujan) yang biasanya terjadi sekitar bulan Maret dan Oktober.

3. Pola hujan lokal yang wilayahnya memiliki distribusi hujan bulanan kebalikan dengan pola moonsun. Pola lokal dicirikan oleh bentuk pola hujan unimodial (satu puncak hujan) tetapi bentuknya berlawanan dengan tipe hujan moonsun.

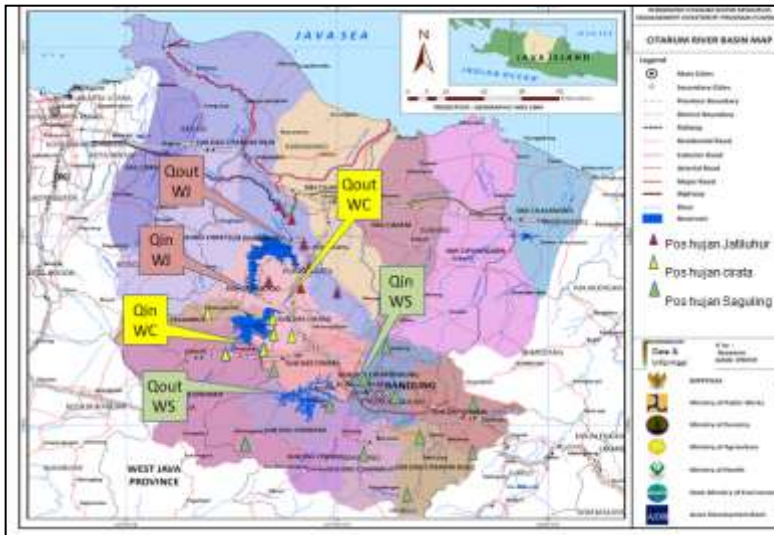
Waduk Kaskade Citarum (Saguling-Cirata-Jatiluhur) berlokasi di Sungai Citarum, terletak di bagian barat pulau Jawa, meliputi bangunan bendungan utama, PLTA, sarana irigasi dan sarana penunjang lainnya sepanjang daratan Pantai Utara Jawa Barat, terbentang dari Sungai Cikeas dan batas timur DKI Jakarta, Sungai Cilalanang di Indramayu (Hadihardjaja, 2006). Skema sistem waduk Kaskade Citarum di Sungai Citarum dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4-1 Sistem Aliran Waduk Kaskade Citarum

Analisis data hujan DAS Kaskade Citarum didasari pada analisis data hujan dari pos-pos hujan yang tersebar di sub DAS Saguling, sub DAS Cirata dan sub DAS Jatiluhur. Untuk menentukan hujan rata-rata di DAS Kaskade Citarum diperlukan analisis hidrologi menggunakan perhitungan hujan rata-rata wilayah di setiap sub DAS. Lokasi pos pengamatan curah hujan di Waduk Kaskade Citarum ditunjukkan pada Gambar 4.2, di mana tersebar

7 pos pengamatan di sub DAS Jatiluhur, 7 pos pengamatan di sub DAS Cirata dan 18 pos pengamatan di Citarum Hulu-Saguling. Lokasi dan arah aliran debit masuk dan keluar ditunjukkan dengan notasi Qin dan Qout di setiap waduk.



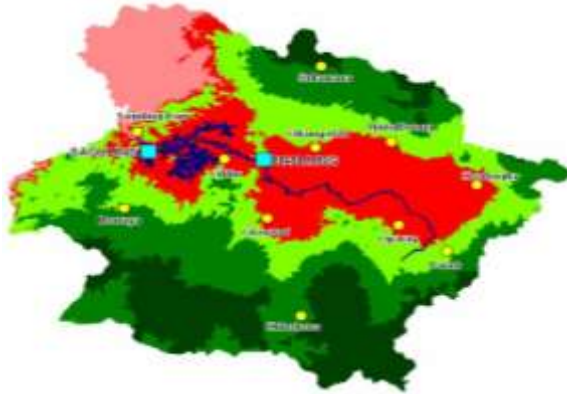
Gambar 4-2 Lokasi Pos Pengamatan Curah Hujan di Waduk Kaskade Citarum

Sumber: PSDA Provinsi Jawa Barat (2011)

### Pola Curah Hujan di Waduk Saguling

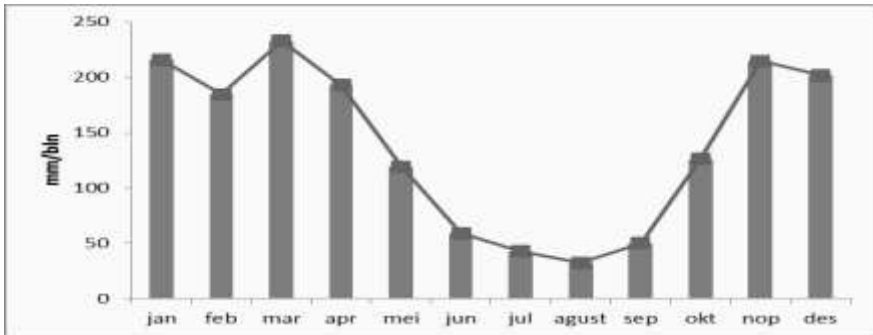
Analisis data hujan di DAS Citarum Hulu yaitu DAS Saguling didasari pada analisis data hujan dari 11 pos hujan pada periode tahun 1986-2008 yang hampir tersebar merata di seluruh bagian DAS (Marganingrum, 2013), yang ditunjukkan pada Gambar 4.3.





Gambar 4-3 Lokasi Pos Hujan di DAS Citarum Hulu-Saguling

Hasil analisis hujan wilayah di DAS Saguling berdasarkan rata-rata hujan bulanan tahun 1986-2008 menurut Marganingrum (2013) menunjukkan pola hujan tipe moonsun di mana terjadi satu puncak hujan (unimodial) yaitu puncak hujan terjadi pada bulan Maret (Gambar 4.4).

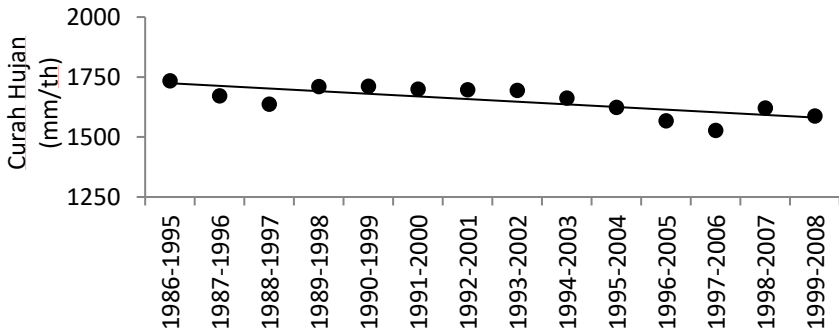


Gambar 4-4 Hujan rata-rata bulanan DAS Citarum Hulu (1986-2008)

Sumber: Marganingrum (2013)

Dalam rangka menjamin ketersediaan air untuk pembangunan infrastruktur sumber daya air sesuai kebutuhan maka diperlukan suatu estimasi dan evaluasi terhadap data memoar komponen hidrologi yang tercatat di pos hujan maupun debit (Marganingrum, 2013; Arwin, 2009). Mengingat bahwa data hujan bersifat acak maka data hujan dapat dianalisis menggunakan metode statistik untuk mengetahui perubahan nilai rata-rata dan

deviasi (simpangan baku) dari data hujan yang tercatat melalui pos hujan.

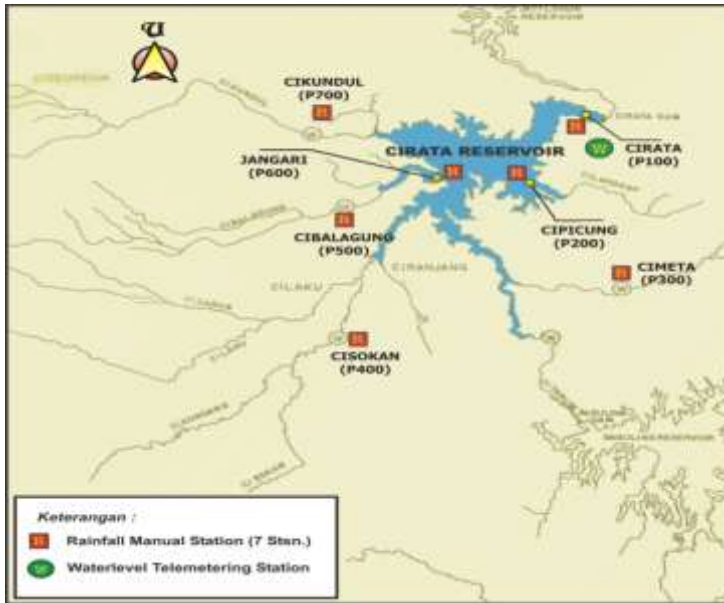


Gambar 4-5 Sensibilitas hujan wilayah DAS Citarum Hulu (1986-2008)  
Sumber: Marganingrum (2013)

Hasil penelitian Marganingrum (2013) menunjukkan bahwa perhitungan curah hujan wilayah tahunan rata-rata selama periode tahun 1986-2008 sebesar 1672 mm/tahun relatif lebih kecil dibandingkan dengan periode hujan tahun 1950-1999 sebesar 2167 mm/tahun. Hal ini mengindikasikan adanya perubahan besaran parameter statistik hujan di DAS Citarum Hulu-Saguling menuju ekstrim. Untuk melihat sensibilitas (trend) hujan di wilayah penelitian menggunakan perhitungan statistik dengan metode moving average periode 10 tahun (Marganingrum, 2013) ditunjukkan oleh Gambar 4.5.

### **Pola Curah Hujan di Waduk Cirata**

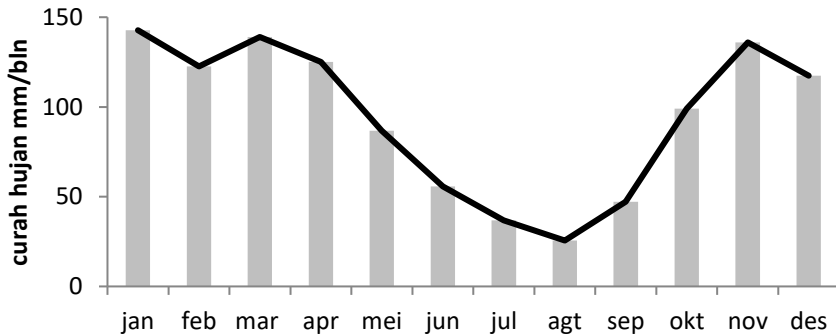
Data hujan yang digunakan pada DAS Cirata adalah data hujan bulanan tahun 1994-2011 yang tersebar atas 7 pos pengamatan (Gambar 4.6.). Adapun nama pos pengamatan di Waduk Cirata adalah pos Cirata, Cipicung, Cimeta, Cisokan, Cibalagung, Jangari, dan Cikundul.



Gambar 4-6 Pola Curah Hujan di Waduk Cirata  
Sumber: BPWC Cirata (2012)

Berdasarkan distribusi data rata-rata curah hujan bulanan, daerah di DAS Cirata memiliki tipe pola hujan monsoon. Hujan maksimum terjadi pada bulan Maret seperti halnya pola hujan yang terjadi pada DAS Saguling. Gambar 4.7 memperlihatkan grafik jumlah curah hujan bulanan wilayah Cirata.

Pola curah hujan di Indonesia khususnya waduk Cirata adalah tipe V atau tipe monsoon, atau curah hujan dengan grafik tahunan berbentuk seperti huruf V. Artinya, Indonesia pada umumnya akan mengalami presipitasi dalam jumlah banyak pada bulan Desember–Februari dan akan mengalami sedikit presipitasi pada bulan Juni–Agustus. Sedangkan bulan Maret–Mei dan September–November disebut sebagai musim peralihan. Pada musim peralihan ini, kondisi curah hujan dan angin sangat tidak menentu, hal ini disebabkan oleh perubahan angin pasat maupun monsoon oleh karena adanya pergeseran sumber panas (tekanan).

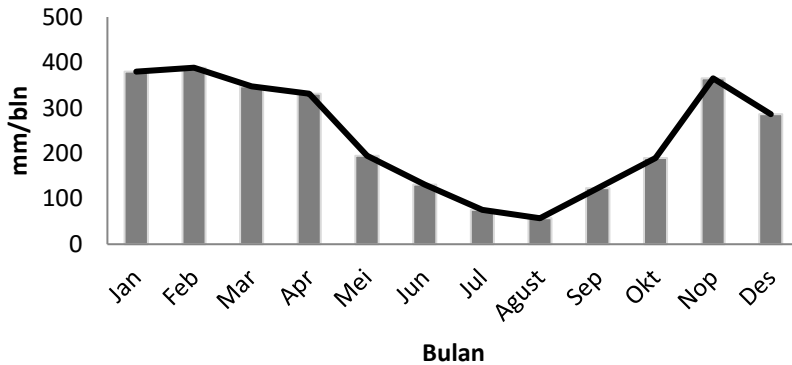


Gambar 4-7 Hujan Rata-Rata Bulanan DAS Cirata (1994-2011)

### **Pola Curah Hujan di Waduk Jatiluhur**

Hasil analisis curah hujan wilayah berdasarkan olah data disajikan pada Gambar 4.8 dengan deskripsi umum yaitu rerata tahunan curah hujan wilayah DAS Citarum Hilir adalah 2.869,53 mm/th yang sesuai dengan ciri curah hujan di wilayah Jawa Barat antara 2.000–3.000 mm/th. Dampak El Nino pada DAS Citarum dapat terlihat pada rendahnya curah hujan pada tahun 2006 sebesar 1.462 mm dengan 7 bulan kering dan menyisakan 2 bulan basah, mengakibatkan sebagian petani di daerah hulu tidak dapat mengusahakan sawahnya sehingga areal persawahan dialih fungsikan sementara untuk tanaman pertanian lahan kering lainnya. Anomali La Nina terakhir di Indonesia pada tahun 1999 memberikan suatu peringatan agar pengelolaan DAS Citarum harus dilakukan secara teratur dan berkesinambungan karena kondisi saat ini yang lebih didominasi oleh kawasan pertanian akan sangat mudah mengalami degradasi apalagi jika kegiatan pertanian dilakukan tanpa memperhatikan kaidah konservasi tanah dan air. Wilayah DAS yang telah mengalami degradasi akan sangat peka terhadap penyimpangan iklim yang terjadi pada wilayah tersebut. Curah hujan bulanan terendah yang terjadi pada DAS Jatiluhur adalah 0 mm sedangkan curah hujan tertinggi 687,25 mm, sedangkan berdasarkan rerata bulanan dari tahun 1994-2011, curah hujan terendah pada bulan Agustus sebesar 57,18 mm dan tertinggi pada bulan Februari sebesar 388,48 mm (Gambar 4.8). Hasil ini menunjukkan ciri umum dari gejala curah hujan di

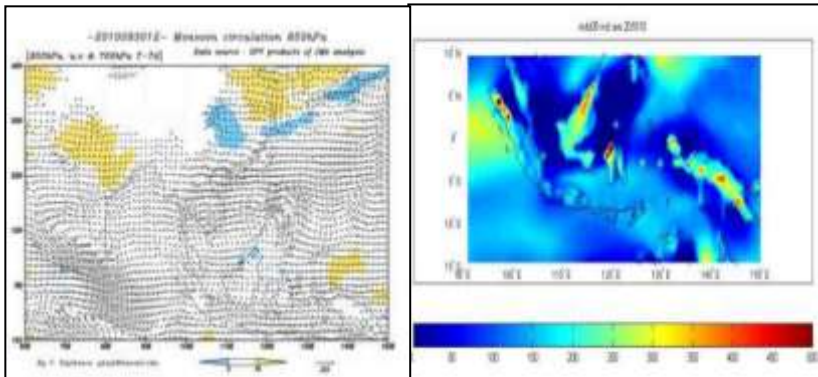
Indonesia yang termasuk dalam Zona Iklim Tropis dengan ciri variasi musiman di mana curah hujan sangat tinggi saat musim hujan dan sangat rendah saat musim kemarau (Park dkk, 2010).



Gambar 4-8 Hujan rata-rata bulanan di Waduk Jatiluhur (1994-2011)

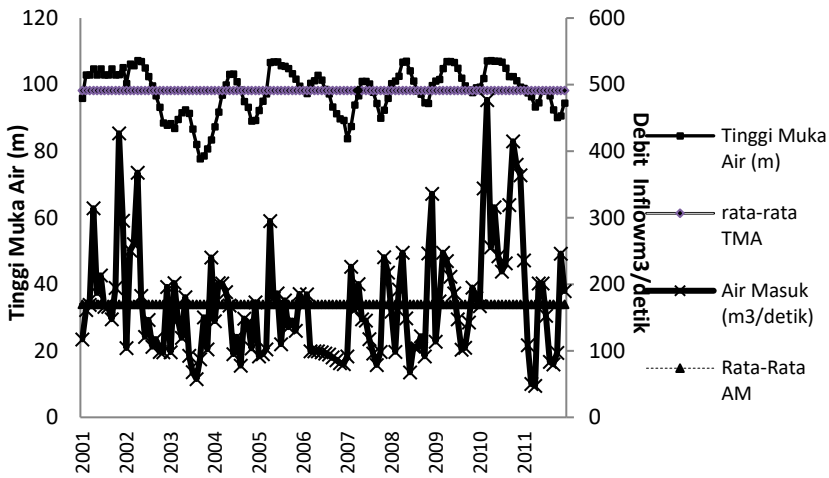
Berkaitan dengan penyediaan air baku untuk air minum maka perlu dipahami dampak iklim global terhadap curah hujan di Indonesia khususnya di DAS Citarum berupa anomali iklim El Nino dan La Nina (Marganingrum dkk, 2009; Syariman dan Heru, 2011; Park dkk, 2010). Menurut Fadholi (2013) menyatakan bahwa kejadian El Nino biasanya diikuti dengan penurunan curah hujan dan peningkatan suhu udara, sedangkan kejadian La Nina merangsang kenaikan curah hujan di atas curah hujan normal. Fenomena ini dapat dilihat dari Gambar 4.9(a) yang menunjukkan pola angin Monsoon selama bulan September bergerak dari timur di sepanjang Laut Arafura, Nusa Tenggara, dan Jawa yang mengandung uap air. Gambar 4.9(b) juga menunjukkan bahwa selama September tahun 2010, angin timur di wilayah selatan Indonesia tampak homogen. Di Samudera Pasifik terjadi La Nina. Pada pekan ketiga September tahun 2010, terjadi ekstrem basah di wilayah Pulau Jawa dan Nusa Tenggara. Prediksi Oktober, La Nina cenderung terus berlangsung, sehingga wilayah benua maritim Indonesia cenderung lebih basah dari normal. Berdasarkan model yang dibuat oleh LAPAN, curah hujan cenderung meningkat,

terutama di bagian barat Pulau Sumatra, bagian Barat Pulau Kalimantan, Sulawesi Selatan, dan sebagian besar Papua.



Gambar 4-9 Pola Iklim Monsoon di Indonesia bulan September Tahun 2010 (a) dan Prediksi Curah Hujan Bulan Oktober Tahun 2010 Hasil Luaran Model DARLAM- LAPAN (b)  
Sumber: Lapan (2010)

Debit tahunan dan tinggi muka air Waduk Jatiluhur (2001 - 2011) dapat dilihat pada Gambar 4.10. Grafik ini memperlihatkan sekaligus membuktikan bahwa visi hidrologi menyatakan bahwa komponen hidrologi bersifat acak dan stokastik (Liu dkk, 2011). Ekstremitas debit inflow terjadi pada tahun 2003 di mana terjadi debit inflow minimum dan tahun 2010 terjadi debit inflow maksimum dalam kurun waktu 10 tahun.



Gambar 4-10 Debit inflow dan Tinggi Muka Air di Waduk Jatiluhur Tahun 2001–2011

## B. Analisis Debit di Waduk Kaskade Citarum

Analisis debit sungai sering dikaitkan dengan tingkat keandalan ketersediaan air dalam memenuhi kebutuhan dan sering disebut sebagai debit andalan. Sebagai contohnya kegiatan yang membutuhkan keandalan ketersediaan air adalah penyediaan air baku dan PLTA (Hadihardaja, 2006; Kodoatie dan Sjarief, 2010 dalam Marganingrum, 2013). Debit andalan ditetapkan dengan suatu besaran minimum tertentu yang memiliki probabilitas tertentu dalam memenuhi kebutuhan, seperti contoh untuk kebutuhan air baku minum biasanya ditetapkan 90% atau 95 % sedangkan untuk irigasi ditetapkan 80%. Persamaan periode ulang terhadap probabilitas dirumuskan sebagai  $Tr = (1/P)$  di mana  $Tr$  adalah periode ulang dan  $P$  adalah nilai probabilitas atau kemungkinan yang diharapkan terjadi.

**Tabel 4-11 Kriteria Desain Air Baku Domestik dan Irigasi**

Sumber Air Waduk	Kriteria desain Perencanaan Air Baku			
	Domestik		Irigasi	
Debit Air Suksesif				
Kering	30 hari	TR=10-20 Tahun	30 hari	TR =5 Tahun

Sumber: Modifikasi Sabar (2009)

Pengamatan terhadap nilai debit minimum maupun debit maksimum diharapkan dapat memberikan penjelasan terhadap kecenderungan potensi air permukaan pada DAS Citarum. Pengamatan debit telah banyak dilakukan dalam penelitian Marganingrum (2013) dan Rhamdani (2009) di waduk Saguling terhadap dua periode yaitu 1950-1985 (periode dalam perencanaan pembangunan dan pengelolaan waduk Saguling) dan 1986-2008 (periode setelah pembangunan waduk Saguling). Pengamatan juga dilakukan terhadap kecenderungan debit minimum dari tahun ke tahun sehingga memberikan penjelasan mengenai potensi aliran dasar (*base flow*) DAS, sedangkan pengamatan terhadap kecenderungan debit maksimum dari tahun ke tahun dapat memberikan penjelasan mengenai banjir atau limpasan karena perubahan tata guna lahan. Selanjutnya pengamatan debit dalam penelitian waduk Kaskade Citarum ini dilakukan dalam rentang waktu pengamatan tahun 1994-2011 dengan pertimbangan keseragaman terhadap data curah hujan yang tersedia di waduk Cirata mulai tahun 1994 telah memiliki 7 pos pengamatan. Ketersediaan data curah hujan akan dikorelasikan kemudian dengan data debit untuk membuat prakiraan debit masa depan.

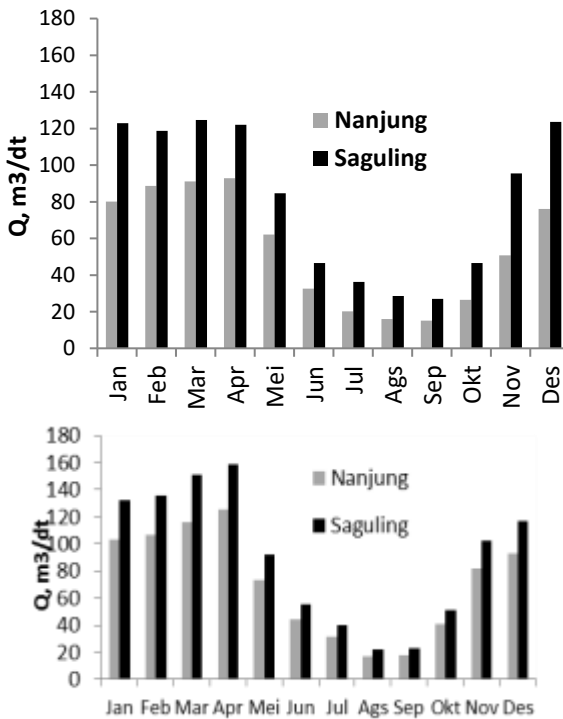
### **C. Analisis Debit DAS Saguling**

Analisis debit di Waduk Kaskade Citarum dimulai dari data pengamatan debit pada waduk Saguling yaitu pos debit Nanjung sebagai stasiun primer dan pos debit Saguling sebagai stasiun sekunder. Gambar 4.12 memperlihatkan bahwa debit bulanan rata-rata pos Nanjung dan Pos Saguling memiliki pola bulanan yang sama (Marganingrum, 2013).



(1950-1980)

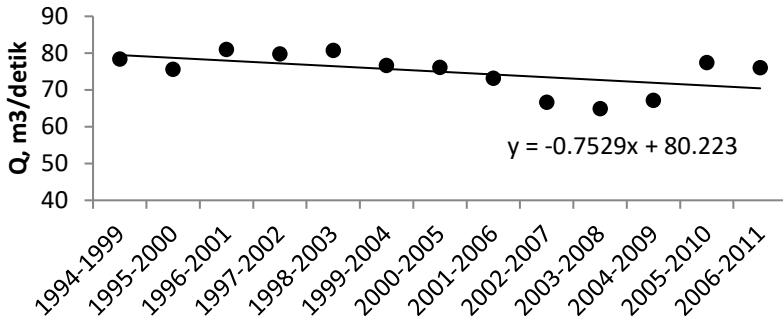
(1986-2008)



Gambar 4-12 Fluktuasi Debit Rata-Rata Bulanan Di Pos Nanjung Dan Pos Saguling Pada Dua Periode Waktu Yang Berbeda  
Sumber: Marganingrum (2013)

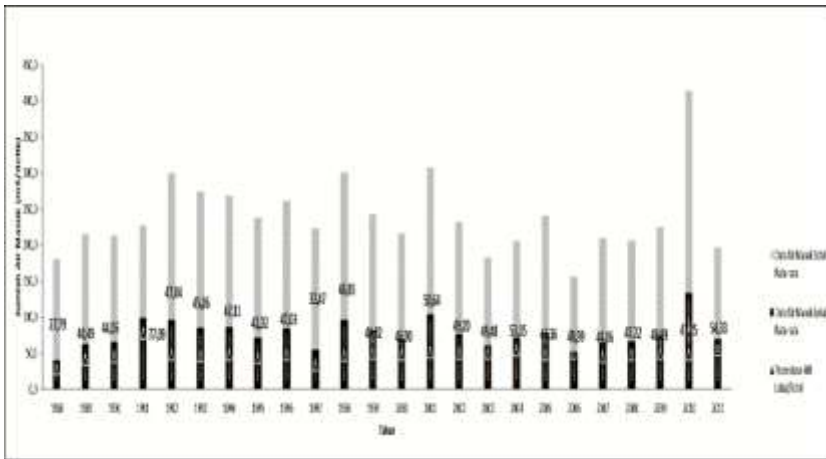
### Analisis Debit DAS Lokal Cirata

Pengamatan tren debit rata-rata lokal Cirata dilakukan pada kurun waktu yaitu tahun 1994-2011. Dari Gambar 4.13 kecenderungan debit lokal rata-rata 5 tahunan di DAS Cirata terlihat menurun seperti halnya yang terjadi di DAS Saguling. Trend debit yang menurun menunjukkan bahwa volume debit sungai lokal semakin berkurang di DAS Cirata maupun Saguling. Faktor-faktor yang menyebabkan debit sungai menurun adalah berkurangnya daerah resapan air akibat konversi lahan terbangun di DAS maupun faktor iklim.



Gambar 4-14 Trend Debit Lokal DAS Cirata Periode Tahun 1994-2011

Gambar yang menunjukkan perbandingan besaran debit lokal Cirata terhadap debit total yang masuk di Cirata dapat dilihat pada Gambar 4.15 di bawah ini.

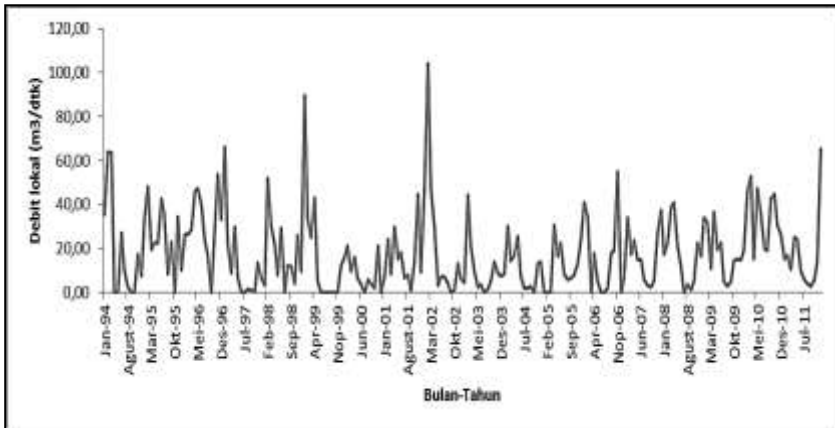


Gambar 4-15 Perbandingan Debit Lokal Cirata terhadap Debit Total Masok Waduk Cirata Tahun Pengamatan 1988-2011  
Sumber: BPWC Cirata (2012)

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa debit masuk ke Waduk Cirata adalah merupakan debit ouput dari waduk Saguling ditambah dengan debit lokal Cirata (berasal dari sungai-sungai disekitar waduk Cirata). Hasil analisis data tahun 1988-2011 menunjukkan bahwa debit lokal Cirata mempengaruhi debit total Waduk Cirata sebesar 47,27 %.

## Analisis Debit DAS Lokal Jatiluhur

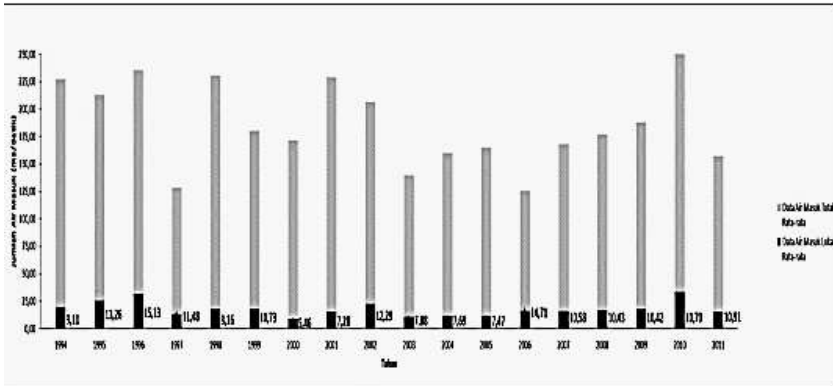
Pengamatan dilakukan pada periode waktu tahun 1994-2011 di mana data debit lokal Jatiluhur didapatkan dari pendekatan asumsi perhitungan debit input Waduk Jatiluhur dikurangi debit output dari Waduk Cirata (skema aliran telah ditunjukkan dalam Gambar 4.1. Hal ini didasarkan pertimbangan bahwa mengingat tidak tersedianya data pos debit sungai lokal di DAS Jatiluhur maka digunakan pendekatan persamaan debit lokal Jatiluhur adalah selisih debit input Waduk Jatiluhur terhadap debit output Waduk Cirata. Data debit lokal Jatiluhur dapat dilihat pada Gambar 4.16 di bawah ini.



Gambar 4-16 Grafik Debit Lokal Bulanan Waduk Jatiluhur Tahun 1994-2011

Sumber: PJT II Jatiluhur (2011)

Gambar yang menunjukkan perbandingan besaran debit lokal Jatiluhur terhadap debit total yang masuk di Waduk Jatiluhur dapat dilihat pada Gambar 4.17 di bawah ini



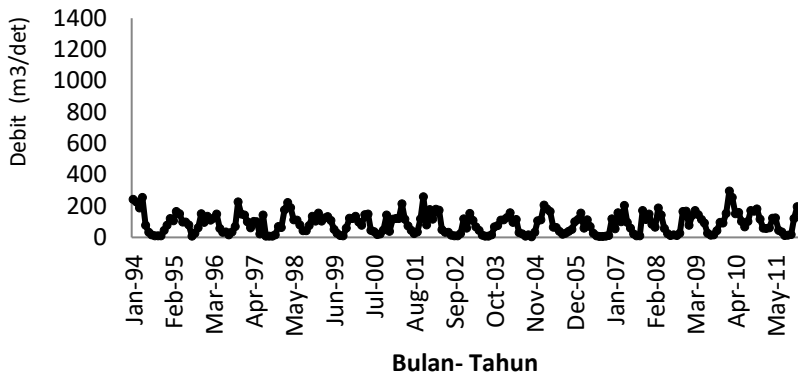
Gambar 4-17 Perbandingan Debit Lokal Jatiluhur terhadap Debit Total Masok Waduk Jatiluhur Tahun Pengamatan 1994-2011  
Sumber: Hasil perhitungan

Gambar 4.17 menunjukkan bahwa debit masuk ke Waduk Jatiluhur adalah merupakan kontribusi dari debit *output* dari Waduk Cirata sebesar 90% ditambah dengan debit lokal Jatiluhur sebesar 10%. Ini terlihat dari grafik persentase debit lokal terhadap debit total yang masuk ke waduk Jatiluhur rata-rata sebesar 10 % dalam kurun waktu tahun 1994-2011. Hal ini menunjukkan bahwa debit output Waduk Cirata sangat dominan mempengaruhi kondisi ketersediaan air di Waduk Jatiluhur.

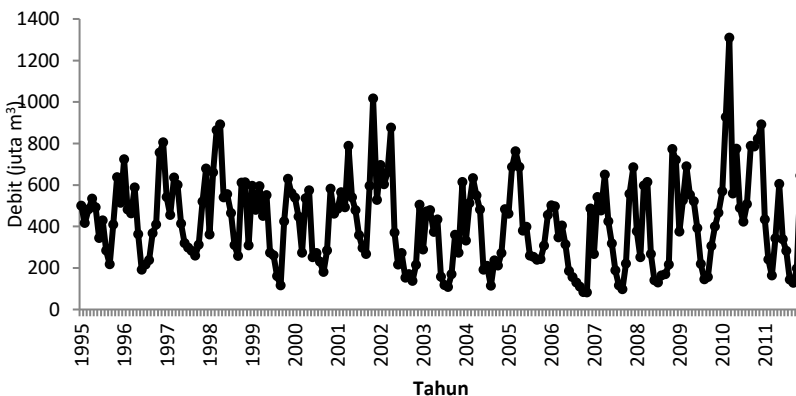
#### D. Analisis Alokasi Debit Rencana untuk Air Baku di Waduk Kaskade Citarum

Debit rencana merupakan debit yang tersedia di aliran pada waktu tertentu diperhitungkan keberadaannya yang melampaui atau sama dengan suatu nilai berdasarkan probabilitas dan distribusi tertentu yang mewakili karakteristik aliran tersebut. Besarnya debit rencana ini dapat ditentukan dengan metode rangking, rasional atau dengan pendekatan metode statistik hidrologi. Dalam penelitian ini digunakan metode Weibull (menghitung probabilitas 80% untuk debit rencana R5, dan probabilitas 95% untuk debit rencana R20). Berdasarkan Tabel 4.1 tentang kriteria desain air baku domestik dan irigasi dilakukan analisis debit rencana R5 di Waduk Saguling dan Cirata dengan pertimbangan debit output waduk digunakan untuk irigasi sedangkan untuk Waduk Jatiluhur

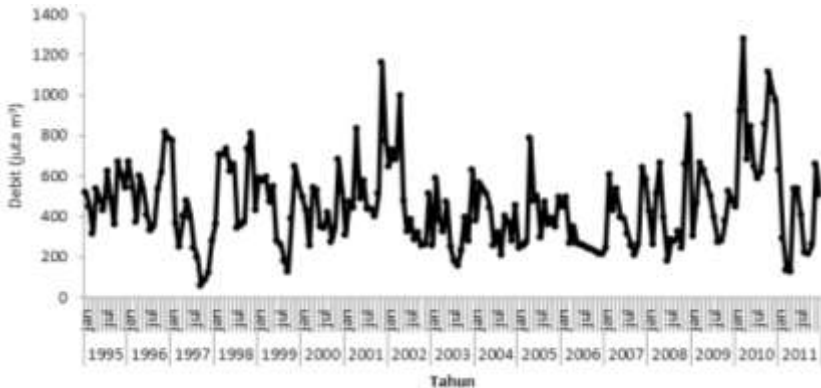
digunakan debit rencana R5 dan R 20 (pertimbangan fungsi waduk sebagai sumber air baku irigasi dan air minum). Keacakan (random) data debit diperlihatkan pada Gambar 4.18 (grafik debit Pos Saguling), Gambar 4.19 (Grafik debit input Waduk Cirata) dan Gambar 4.20 (Grafik debit input Waduk Jatiluhur) di bawah ini. Oleh karena adanya keacakan dari debit, maka jelas terlihat bahwa debit bersifat random variable, sehingga perlu dilakukan analisa secara statistik.



Gambar 4-18 Debit acak bulanan Pos Saguling (1986-2011)  
Sumber data: PT Indonesia Power (2011)



Gambar 4-19 Debit acak bulanan Waduk Cirata (1995-2011)  
Sumber data: BPWC Cirata (2011)



Gambar 4-20 Debit acak bulanan Waduk Jatiluhur (1995-2011)  
 Sumber data: PJT II Jatiluhur (2011)

Pendekatan fungsi distribusi digunakan untuk mengetahui pola aliran dengan memanfaatkan data debit bulanan dan harian. Untuk dapat memahami fenomena-fenomena probabilistik ataupun stokastik seperti debit air sungai dituntut adanya pencocokan fungsi probabilitas tertentu pada nilai observasi acak yang ada. Dari penelitian, dapat dikatakan bahwa tidak pernah diperoleh suatu distribusi terbaik yang dapat dipergunakan bagi semua debit. Hal ini disebabkan oleh debit air yang mempunyai karakteristik statistik yang berbeda secara ruang dan waktu. Tabel 4.1, Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 menunjukkan nilai debit R5 tahun di Pos Saguling, debit lokal Cirata dan debit lokal Jatiluhur dengan pengamatan data tahun 1994-2011.

**Tabel 4.1 Debit Rencana R5 di Pos Saguling (m<sup>3</sup>/detik) Data Debit Tahun 1994-2011**

Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nop	Des
61,03	98,04	73,09	101,07	56,69	24,81	14,07	7,44	8,22	8,62	30,12	78,91

**Tabel 4.2 Debit Rencana R5 Lokal Cirata (m<sup>3</sup>/detik) Data Debit Tahun 1994-2011**

Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Se p	Okt	Nop	Des
70,43	83,64	56,15	89,59	54,19	22,38	12,09	6,62	10,49	20,96	48,16	65,17

**Tabel 4.3 Debit Rencana R5 Lokal Jatiluhur (m<sup>3</sup>/detik) Data Debit Tahun 1994-2011**

Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nop	Des
5,9	21,	8,6	16,	5,3	2,3	0,00	1,88	0,34	0,1	3,01	6,61
3	83	4	55	9	5				4		

Setelah didapatkan debit rencana R5 tahunan bulanan maka dicari debit rata-rata untuk dijadikan debit rencana air baku di Waduk Kaskade Citarum. Debit air baku untuk Waduk Saguling sebesar 46,92 m<sup>3</sup>/detik, Lokal Cirata sebesar 44,98 m<sup>3</sup>/detik dan lokal Jatiluhur sebesar 6,05 m<sup>3</sup>/detik. Perhitungan alokasi untuk air baku di tiap Waduk Kaskade Citarum dapat ditentukan dengan formula rumus sebagai berikut:

$$Q_{airbaku\ Saguling} = Q_{R5\ debit\ Pos\ Saguling} = Q_{out\ Waduk\ Saguling} \quad (4.1a)$$

$$Q_{airbaku\ Cirata} = Q_{out\ waduk\ Saguling} + Q_{lokal\ R5\ Lokal\ Cirata} = Q_{out\ Waduk\ Cirata} \quad (4.1b)$$

$$Q_{airbaku\ Jatiluhur} = Q_{out\ waduk\ Cirata} + Q_{lokal\ R5\ Lokal\ Jatiluhur} \quad (4.1c)$$

Hasil perhitungan debit rencana di Waduk Kaskade Citarum dapat dilihat pada Tabel 4.4 di bawah ini. Debit rencana untuk air baku di Waduk Kaskade Citarum menjadi Constraint yang harus diperhatikan dalam menjalankan pola operasi waduk dalam rangka menjamin ketersediaan air baku di downstream. Alokasi air minum yang harus disediakan di Waduk Saguling, Cirata, dan Jatiluhur adalah berdasarkan debit rencana R10 atau R20 (Sabar, 2009) yang dapat dilihat pada Tabel 4.5. Alokasi air minum diperlukan untuk menjamin ketersediaan debit air minum yang digunakan di downstream Waduk Kaskade Citarum.

**Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Debit Rencana Alokasi Air Baku di Waduk Kaskade Citarum**

Nama Lokasi	Debit Rencana Lokal / Q <sub>R5</sub> (m <sup>3</sup> /detik)	Total Debit Rencana Air Baku(m <sup>3</sup> /detik)
Waduk Saguling	46,92	46,92
Waduk Cirata	44,98	91,9
Waduk Jatiluhur	6,05	97,95

**Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Debit Rencana R20 untuk Air Minum di Waduk Kaskade Citarum**

Nama Lokasi	Debit Rencana Lokal / QR20 (m3/detik)	Total Debit Alokasi Air Minum (m3/detik)
Waduk Saguling	29,53	29,53
Waduk Cirata	28,51	58,04
Waduk Jatiluhur	0,98	59,02

Hasil perhitungan alokasi ketersediaan air baku di Waduk Kaskade Citarum didapatkan nilai 97,95 m<sup>3</sup>/detik proporsional yang bisa digunakan sebagai debit air baku untuk irigasi dan air minum di downstream (kawasan DKI Jakarta dan sekitarnya). Jika dibandingkan dengan hasil kajian SOP Waduk Kaskade Citarum yang dilakukan oleh BBWS Citarum tahun 2013 tentang kebutuhan minimum air baku di downstream Waduk Jatiluhur yaitu sebesar 115,9 m<sup>3</sup>/detik maka hasil perhitungan alokasi ketersediaan air baku pada penelitian ini memberikan nilai debit yang mendekati dengan selisih sebesar 15 %. Hal ini dapat disebabkan atas beberapa faktor yaitu penggunaan data historis debit yang tidak sama, perhitungan alokasi debit lokal yang tidak sama serta metode perhitungan debit rencana yang tidak sama di mana dalam penelitian ini digunakan metode debit rencana R5 untuk alokasi air baku dan R20 untuk alokasi air minum. Kajian SOP Waduk Kaskade Citarum yang dilakukan oleh BBWS tidak memberikan sumber metodologi yang jelas disebabkan perhitungan menggunakan perangkat lunak sehingga tidak mudah secara gamblang mendeskripsikan metode perhitungan. Untuk itu diperlukan keseragaman dalam perhitungan alokasi air baku di Waduk Kaskade Citarum baik secara metodologi maupun akurasi data debit yang digunakan bersumber dari tempat yang sama dan terpercaya. Untuk alokasi air minum di Waduk Kaskade Citarum didapatkan alokasi yang proporsional sebesar 59,02 m<sup>3</sup>/detik yang dihitung berdasarkan debit rencana R20. Alokasi air minum yang didapatkan mencukupi pemenuhan rencana kebutuhan air minum untuk kawasan DKI Jakarta sampai dengan tahun 2030 yaitu sebesar 20,214 m<sup>3</sup>/detik (Tamim, 2007).



## **E. Kondisi Eksisting Lingkungan Ekonomi Waduk Kaskade Citarum dan Permasalahan yang dihadapi**

### **Kondisi Lingkungan Ekonomi Waduk Kaskade Citarum**

Pengoperasian waduk Saguling disimulasikan pada tahun 1950-1980 dan didesain debit output untuk keperluan PLTA sebesar 147 Juta m<sup>3</sup> untuk setiap unit turbin yang dioperasikan. Kapasitas efektif tampungan waduk Saguling sebesar 600x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> sedangkan constraint waduk adalah:

1. Keseimbangan massa di waduk:

$$S_{t+1} = S_t + Q_{in} - Q_{out}$$

2. Batas fisik tampungan air:

$$0 < S < 609 \times 10^6 \text{m}^3$$

3. Tinggi Muka Air (TMA):

$$623 \text{ m} < \text{TMA} < 643 \text{ m}$$

4. Batas Turbin (MCM/ x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>):

$$121,617 < T < 588,67 (4 \times 147,17)$$

5. Alokasi air baku dari Saguling = 121,617 x10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>

Kapasitas efektif tampungan Waduk Cirata sebesar 768 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> dengan desain debit output untuk keperluan PLTA sebesar 354,78 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> untuk setiap unit turbin di mana ada 8 (delapan) unit turbin yang dioperasikan di Cirata sedangkan constraints waduknya adalah sebagai berikut:

1. Keseimbangan massa di waduk:

$$S_{t+1} = S_t + Q_{in} - Q_{out}$$

2. Batas fisik tampungan air:

$$0 < S < 768 \times 10^6 \text{m}^3$$

3. Tinggi Muka Air (TMA):

$$205 \text{ m} < \text{TMA} < 220 \text{ m}$$

4. Batas Turbin (MCM/ x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>):

$$242,115 < T < 2.838,24 (8 \times 354,78)$$

5. Alokasi air baku dari Cirata = 242,115 x10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>

Kapasitas efektif tampungan Waduk Jatiluhur sebesar 1.869 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> dengan desain debit output untuk keperluan PLTA sebesar 141,91 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> untuk setiap unit turbin, ada 6 (enam)

unit turbin yang dioperasikan di Jatiluhur sedangkan constraints waduknya adalah sebagai berikut:

1. Keseimbangan massa di waduk:

$$S_{t+1} = S_t + Q_{in} - Q_{out}$$

$$Q_{air\ baku} = Q_{air\ minum} + Q_{Alokasi\ irigasi}$$

2. Batas fisik tampungan air:

$$0 < S < 1.869 \text{ juta m}^3$$

3. Tinggi Muka Air (TMA):

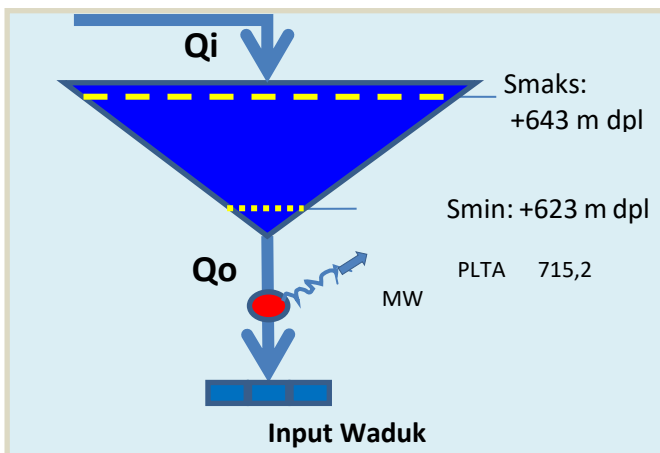
$$87,5 \text{ m} < \text{TMA} < 107 \text{ m}$$

4. Batas Turbin (MCM/  $\times 10^6 \text{ m}^3$ ):

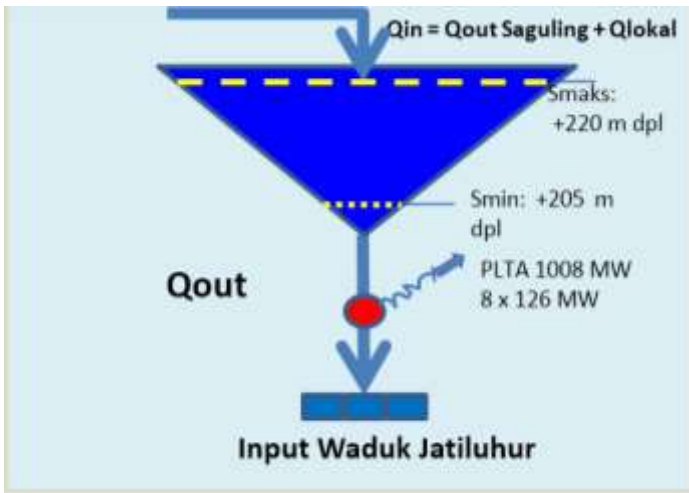
$$315,420 < T < 851,47 \text{ (} 6 \times 141,91 \text{)}$$

5. Alokasi air baku Jatiluhur =  $315,420 \times 10^6 \text{ m}^3$

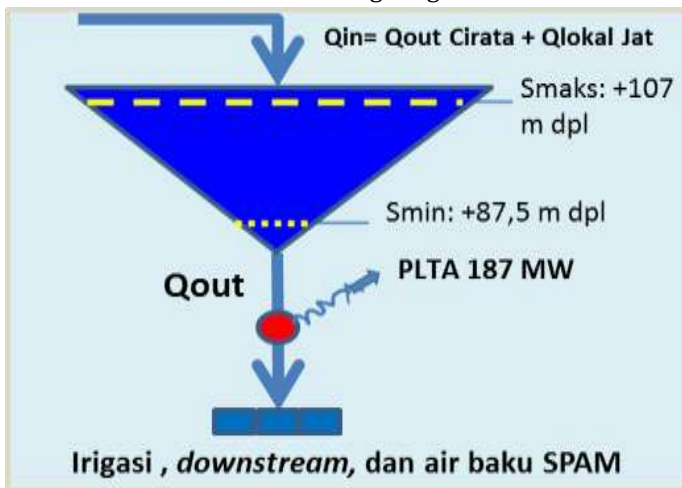
Pengelolaan waduk secara optimal berarti menggunakan potensi waduk semaksimal dan seoptimal mungkin berdasarkan pendekatan simulasi waduk dengan peramalan debit yang akan datang (Yin dkk, 2014; Liu dkk, 2011). Lingkungan ekonomi waduk sangat penting untuk diperhatikan dalam pengelolaan waduk untuk mendapatkan hasil yang optimal sesuai dengan kapasitas waduk. Gambar 4.21, Gambar 4.22 dan Gambar 4.23 menunjukkan skema lingkungan fisik Waduk Saguling, Cirata dan Jatiluhur.



Gambar 4-21 Skema Lingkungan Waduk Saguling



Gambar 4-22 Skema Lingkungan Waduk Cirata



Gambar 4-23 Skema Lingkungan Waduk Jatiluhur

Pada skema Gambar 4.21 terlihat bahwa kapasitas tampungan waduk Saguling maksimum berada pada elevasi (TMA) +643 m dpl dengan volume efektif sebesar  $603 \times 10^6 \text{ m}^3$ , waduk Cirata kapasitas tampungan maksimum di elevasi + 220 m dpl dengan volume efektif  $740 \times 10^6 \text{ m}^3$  dan kapasitas tampungan maksimum waduk Jatiluhur berada pada elevasi +107 m dpl dengan volume efektif sebesar  $1.869 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Kapasitas minimum

waduk Saguling berada pada elevasi +623 m dpl dengan volume 0 juta m<sup>3</sup> di mana untuk menjaga air selalu tersedia di badan waduk, maka pihak pengelola Waduk Saguling menetapkan bahwa tinggi muka air minimum diharapkan tidak kurang dari +625 m dpl. Kapasitas minimum waduk Cirata dan Jatiluhur masing-masing berada pada elevasi +205 m dpl dan +87,5 m dpl (Gambar 4.22 dan Gambar 4.23). Ruang diantara kapasitas tampungan maksimum dan minimum disebut zona aktif untuk menghasilkan energi listrik dalam pengoperasian waduk. Sementara zona tidak aktif berada di bawahnya untuk meletakkan pipa menggerakkan turbin. Di bawah zona tidak aktif terdapat ruang sedimentasi yang disebut dengan dead storage.

Tabel 4.6 menjelaskan karakteristik pengoperasian Waduk Kaskade Citarum. Dalam pelaksanaan operasi waduk, tujuan utama adalah memaksimalkan energi menghadapi beberapa fungsi kendala)/*constraint* sebagai berikut:

1. Kendala keseimbangan air yaitu adanya persamaan neraca massa yang merupakan persamaan yang memberikan batasan bahwa volume air di dalam waduk pada waktu  $t+1$  ( $St+1$ ) harus sama dengan volume air pada waktu  $t$  ( $St$ ) ditambah volume air yang masuk ( $Q_{in}$ ) dikurangi dengan volume air yang keluar ( $Q_{utilitas}$ ) untuk memenuhi kebutuhan *downstream*.
2. Kendala fisik adalah batasan yang berkaitan dengan kondisi fisik waduk dalam menampung air seperti kapasitas tampungan waduk minimum dan maksimum, debit *outflow* maksimum yang diperbolehkan masuk ke dalam turbin dan debit *outflow* maksimum yang diperbolehkan keluar melalui *spillway*.
3. Kendala target yaitu target minimum dari debit *outflow* yang keluar (disebut juga debit utilitas) yang besarnya mengacu pada kebutuhan air di *downstream* dan energi minimum yang dihasilkan setiap bulannya.
4. Kendala operasional yang berhubungan dengan sistem operasional waduk seperti debit maksimum yang diperbolehkan (dihubungkan dengan biaya pemeliharaan turbin per bulan), biaya operasional dan pemeliharaan (berkaitan dengan pemeliharaan sungai per bulan).

**Tabel 4.6 Karakteristik Pengoperasian Waduk Kaskade Citarum**

No	Keterangan	Satuan	Saguling	Cirata	Jatiluhur
I.	<b>Pelaksanaan</b>				
	Konstruksi				
1.	Tahun Mulai	Tahun	1980	1984	1957
2.	Tahun Selesai	Tahun	1986	I = 1988 II = 1998	1967
II.	<b>Elevasi</b>				
	<b>Waduk</b>				
1.	Muka Air Banjir	m	645	223	111,50
2.	Muka Air Normal	m	643	220	107
3.	Muka Air Minimum	m	623	205	87,5
III	<b>Luas Muka</b>				
	<b>Air</b>				
1.	Muka Air Banjir	Ha	5.343		8.440
2.	Muka Air Normal	Ha	4.869	6200	7.780
3.	Muka Air Minimum	Ha			2.730
IV	<b>Volume</b>				
	<b>Waduk</b>				
1.	Muka Air Banjir	juta m <sup>3</sup>	974	2.165	2.836
2.	Muka Air Normal	juta m <sup>3</sup>	875	1,865	2.448
3.	Volume Mati	juta m <sup>3</sup>	272	1.125	579
4.	Volume Efektif	juta m <sup>3</sup>	603	740	1.869
V.	<b>Hidrologi</b>				
1.	Induk Sungai		Citarum	Citarum	Citarum
2.	Daerah Tangkapan Air	Km <sup>2</sup>	2.283	4.119	4.500
3.	Curah Hujan Tahunan	mm	3.222		2.200
4.	Debit Desain Pengelak	m <sup>3</sup> /dt	500	2.600	1.500
VI.	<b>Pembangkit</b>				
	<b>Listrik</b>				

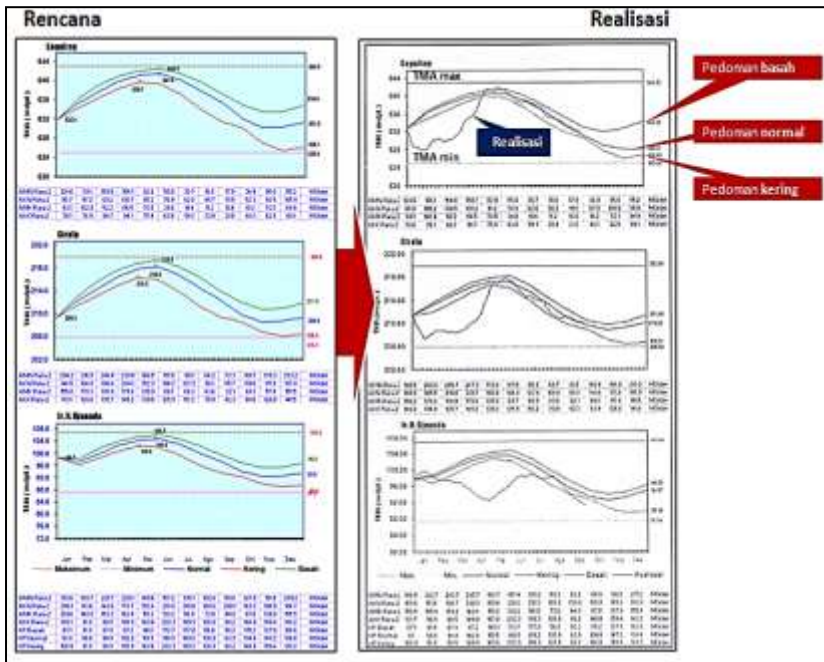
1.	Kapasitas Terpasang	MW	715,2	1.008	187
2.	Energi Per Tahun	GWH/th	2.156	1.426	850
3.	<b>Turbin</b>				
a.	Jumlah	Buah	4	8	1
b.	Kapasitas	MW	4 x 178,8	8 x 126	187
c.	Debit Minimum/Bulan	MCM	147,168	354,78	141,912
d.	Debit Maksimum/Bulan	MCM	588,672	2.838,24	851,472
e.	Efisiensi	MCM	0,9830	0,9874	0,9344
f.	Debit Maksimum	m <sup>3</sup> /dt	4 x 56	8 x 135	6 x 54
g.	Tinggi jatuh Efektif	m	362,4	112,5	86,5
h.	Elevasi Tail Race	m	252	103	20.5

Sumber: PT. Power Indonesia UP Saguling, PT. PJB UP Cirata, PT. Jasa Tirta II.

### Permasalahan dalam Pengelolaan Waduk Kaskade Citarum

Permasalahan yang terjadi di tahun 2011 di Waduk Kaskade Citarum dapat ditunjukkan pada Gambar 4.24 di mana grafik lintasan realisasi tinggi muka air di Waduk Kaskade Citarum tidak mengikuti pola pedoman lintasan yang telah ditetapkan. Hasil evaluasi BBWS Citarum atas permasalahan yang terjadi di tahun 2010 dan tahun 2011 menunjukkan bahwa adanya ketidakakuratan data dalam memperkirakan debit lokal di DAS Cirata dan Jatiluhur akibat kondisi cuaca dan angin, adanya kekurangan data dalam mengukur elevasi air di *outlet* dan *spillway*, selain itu sumber data yang didapatkan dari berbagai pihak sehingga pemutakhiran data dan akurasi data perlu diperhatikan. Oleh karena itu evaluasi mengenai eksisting SOP di waduk Kaskade Citarum diperlukan mengingat kebijakan SOP selama ini tidak dapat menyarankan pedoman operasi waduk sesuai kenyataan jika debit yang masuk di atas atau di bawah pedoman lintasan normal.

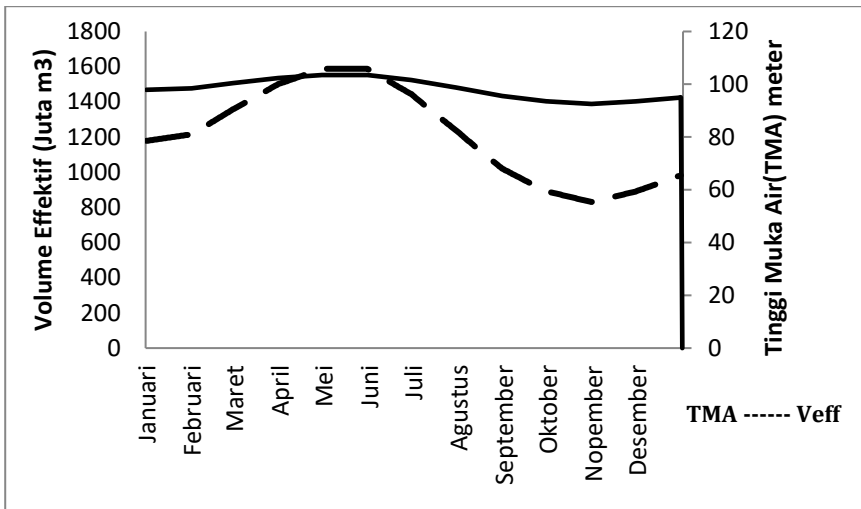
Evaluasi waduk Kaskade Citarum perlu dilakukan untuk menjamin kinerja waduk itu sendiri oleh setiap pengelola masing-masing waduk dan mencari solusi atas permasalahan yang dihadapi. Untuk evaluasi kualitas air dan volume tampungan waduk di Saguling dilakukan oleh PT Indonesia Power secara rutin tiga bulan sekali, evaluasi kualitas air dan volume tampungan waduk Cirata dilakukan oleh BPWC bekerja sama dengan Lemlit UNPAD setiap bulan sekali dan evaluasi waduk Jatiluhur ditangani oleh PJT II Jasa Tirta setiap bulan sekali. Balai Besar Wilayah Sungai Citarum (BBWS) Direktorat Sumber Daya Air Kementerian PU juga melakukan evaluasi di tahun 2013 mengenai penyusunan Standard Operation Procedure (SOP) untuk waduk Kaskade Citarum. Beberapa rekomendasi disusun oleh BBWS Citarum untuk perbaikan SOP waduk Kaskade Citarum yaitu rekomendasi kebijakan, rekomendasi zona operasi waduk, rekomendasi pedoman operasi waduk, rekomendasi pedoman sistem waduk Kaskade, rekomendasi petunjuk pedoman operasi, dan terakhir rekomendasi prosedur operasi waduk sesuai kondisi waktu. Evaluasi waduk Kaskade Citarum ini telah mengacu pada PP nomor 37 tahun 2010 tentang Bendungan Pasal 45 di mana dinyatakan bahwa pola operasi waduk ditetapkan oleh pengelola waduk setiap tahun dan ditinjau kembali paling sedikit 1 (satu) kali dalam waktu 5 (lima) tahun.



Gambar 4-24 Grafik Rencana dan Realisasi Pedoman Lintasan di Waduk Kaskade Citurum tahun 2011

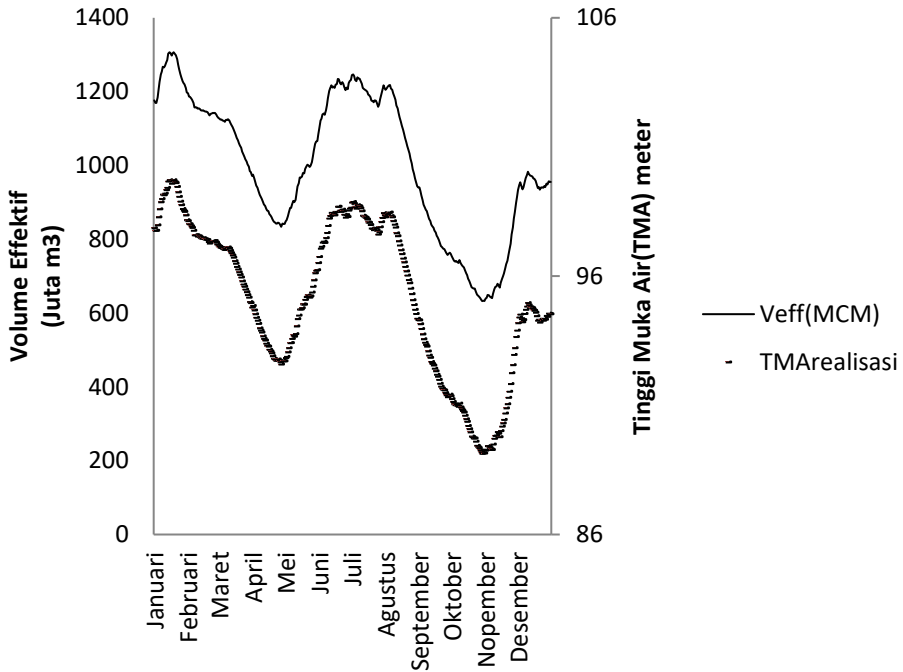
Pengoperasian waduk selama ini dilakukan secara intuitif yaitu dengan cara menampung kelebihan air pada musim hujan (November-April) di waduk yang digunakan pada musim kering (Mei-Oktober). Faktor kontinuitas dan kuantitas air harus diperhatikan dalam menjamin pasokan penyediaan air waduk, di samping penerapan prinsip hukum kekekalan massa. Pengoperasian secara intuitif mempunyai kelemahan karena hanya berdasarkan rencana pengelolaan perairan waduk sesuai rule curve. Sebagai contohnya di Waduk Jatiluhur kondisi tinggi muka air waduk yang menggambarkan ketersediaan air waduk cenderung rendah pada bulan November dan Desember. Sedangkan realisasi dari stok/volume air waduk yang dilihat dari tinggi muka air rencana normal adalah masing-masing 92 meter dan 94 meter pada bulan November dan Desember tahun 2011. Grafik volume efektif Waduk Jatiluhur dan tinggi muka air rencana maupun tinggi muka air sesungguhnya dapat dilihat pada Gambar 4.25 dan Gambar 4.26.





Gambar 4-25 Grafik Lintasan Volume Efektif Dan Tinggi Muka Air Rencana Waduk Jatiluhur Tahun 2011

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.25 dapat dilihat bahwa volume efektif Waduk Jatiluhur adalah 1.588 juta m<sup>3</sup> dengan tinggi muka air adalah 104 meter terjadi pada bulan Mei sampai Juni. Ini menunjukkan bahwa waduk di awal tahun mengalami pengisian dan mencapai volume maksimum pada bulan Mei sampai Juni. Waduk mengalami pengosongan volume pada bulan Juli sampai November, mencapai titik minimum volume di bulan November dan kembali mengisi mulai bulan Desember sampai April di tahun berikutnya. Namun yang terjadi sesungguhnya di lapangan adalah lintasan tinggi muka air Waduk Jatiluhur berfluktuasi dan tidak sesuai dengan pedoman rule curve yang ditetapkan (Gambar 4.26). Volume maksimum terjadi pada Januari 2011. Ini diakibatkan pada awal tahun 2011 curah hujan mengalami peningkatan diakibatkan gejala iklim La Nina dan faktor manajemen waduk atau faktor eksternal lainnya yang harus dikaji lebih mendalam pada penelitian di tahap selanjutnya.



Gambar 4-26 Grafik Lintasan Volume Efektif Dan Tinggi Muka Air Realisasi Waduk Jatiluhur Tahun 2011

### Pola Operasi Waduk Deterministik di Kaskade Citarum

Menurut Marganingrum (2013) dan Hadihardaja (2006), kebijakan pengoperasian Waduk Kaskade Citarum sebagai waduk serial dilakukan melalui sebuah pedoman pengoperasian waduk yang disebut dengan rule curve (lintasan) yang ditetapkan oleh P3B (Pusat Pengendalian dan Pengaturan Beban). Rule curve pengoperasian waduk adalah kurva yang menunjukkan hubungan antara elevasi muka air waduk, debit outflow dan waktu pengoperasian (Zhou dan Guo, 2013; Liu dkk, 2011). Rule curve dibuat menggunakan model RESOP (Reservoir Operation) oleh tim SPK TPA. Hasil model RESOP didapatkan lintasan pedoman yang disepakati untuk rencana satu tahun ke depan. Dalam operasional waduk, hasil perencanaan rule curve akan ditinjau setiap bulan di mana tim SPK TPA akan mengevaluasi kondisi aktual operasi waduk dan melakukan perbaikan rencana untuk operasi waduk bulan berikutnya.

Pedoman lintasan operasi telah banyak diterapkan untuk operasi waduk karena kemudahan implementasi (Liu dkk, 2011). Pola pengusahaan waduk deterministik Waduk Kaskade Citarum dilakukan dengan menentukan pola lintasan pedoman berdasarkan debit rencana R5 tahun dan debit rencana diskrit tiga kelas. Sesuai skema aliran waduk Kaskade Citarum maka perhitungan dimulai dari waduk Saguling. Hasil simulasi deterministik dari waduk Saguling kemudian menjadi input untuk waduk Cirata dan selanjutnya hasil debit outflow dari waduk Cirata menjadi inflow untuk waduk Jatiluhur. Debit rencana R5 tahun dilakukan melalui uji distribusi probabilitas kontinu berdasarkan tes Goodness of fit menggunakan metode Chi-Squared dan Smirnov Kolmogorof dengan bantuan perangkat lunak. Serial data debit rencana kering, normal, dan basah diproses untuk menentukan lintasan pedoman kering, normal dan basah menggunakan persamaan keseimbangan air.

Waduk merupakan salah satu pengaturan terukur yang paling efisien dalam pengembangan sumber daya air dan pengelolaannya (Guo dkk, 2011). Pengoperasian waduk Kaskade seperti contohnya adalah waduk serial dapat menguntungkan dengan pengaturan stok air waduk pada debit aliran yang sama. Menurut Guo (2011) optimalisasi waduk Kaskade dalam pengoperasiannya ditempuh dengan menetapkan tujuan yaitu memaksimalkan keuntungan ekonomi dengan mempertahankan kondisi tanpa mengalami banjir dan kekeringan dengan pola lintasan. Berkaitan dengan hal tersebut maka ditetapkan tujuan melakukan pola deterministik di Waduk Kaskade Citarum yaitu memanfaatkan air semaksimal mungkin untuk memenuhi kebutuhan downstream dengan meminimalkan air terbuang melalui spillway jika terjadi kondisi banjir atau kelebihan air. Pola operasi deterministik dapat diimplementasikan untuk menghasilkan pola lintasan yang maksimal dengan langkah-langkah sebagai berikut: (1) Jadwal pelepasan optimum didasarkan kondisi waduk terhadap fungsi waktu. Ini didasarkan pada kondisi optimasi deterministik (Yeh, 1985; Labadie, 2004); (2) Bentuk-bentuk dan variabel dari pengaturan pedoman operasi

pendahuluan diidentifikasi dan diestimasi menggunakan pendekatan fitting approach; (3) pengaturan naik turunnya pedoman operasi diukur melalui simulasi dan ditapis menggunakan optimasi berbasis simulasi (Sulis, 2014; Labadie, 2004); (4) Pedoman pengoperasian diuji lebih lanjut dan diverifikasi menggunakan debit inflow model (prakiraan) melalui simulasi hidrologi (Rani dan Maria, 2010; Liu dkk, 2011; Guo, 2011).

Karena seleksi dari pedoman pengoperasian telah terbukti sebagai bagian tersulit dari proses, banyak digunakan tipe pedoman operasi termasuk metode pedoman operasi secara *linear*, *fuzzy network*, dan *decision trees* (Liu dkk, 2011). Semua metode tersebut di atas merupakan model *black-box* dengan fundamental fisik dan *constraints* operasional sehingga diperlukan kebijakan standar operasi dengan beberapa constraint yang akan dioperasikan.

Pola operasi dengan model deterministik waduk digunakan fungsi tujuan dan constraints sebagai berikut:

Asumsi tujuan utama dari waduk Kaskade Citarum adalah sumber penggerak turbin PLTA, fungsi tujuannya adalah memaksimalkan tenaga penggerak turbin PLTA setiap tahun dan menjamin laju penghasil tenaga air yang dirumuskan:

$$\max \frac{1}{n} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m N_{i,t} \Delta t \dots\dots\dots (4.2)$$

Di mana T adalah nilai periode waktu dalam tahun n, m adalah jumlah waduk,  $\Delta t$  adalah interval waktu, dan  $N_{i,t}$  adalah output tenaga turbin waduk i dalam periode waktu t di mana dihitung dari persamaan berikut:

$$N_{i,t} = \min (K_i Q_{i,t}, H_{i,t}, f_{\max} (H_{i,t})) \dots\dots\dots (4.3)$$

Di mana  $Q_{i,t}$  dan  $H_{i,t}$  adalah debit turbin dan tinggi hidrolis waduk i selama periode waktu t, dan  $K_i$  sebagai koefisien output komprehensif untuk waduk i. Fungsi  $f_{\max} (H_{i,t})$  menunjukkan output dibatasi oleh kapasitas turbin di setiap waduk.

Constraint yang bisa diaplikasikan dalam model deterministik yaitu

Persamaan keseimbangan massa air

$$S_{t+1} = S_t + (Q_{in} - Q_{out}) \Delta t \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad \dots\dots\dots(4.4)$$

Constraints kapasitas tampungan air

$$S_{i,t}^{min} \leq S_{i,t} \leq S_{i,t}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \dots\dots\dots(4.5)$$

Constraints Qout

$$Q_{i,t}^{min} \ll Q_{i,t} \ll Q_{i,t}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \dots\dots\dots(4.6)$$

Hubungan hidrologis antara waduk i upstream dan waduk i+1 downstream

$$Q_{ini+1,t} = Q_{ini,t} + Q_{out,i,t} \quad i = 1, 2, \dots, m-1 \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

Hydropower output limits

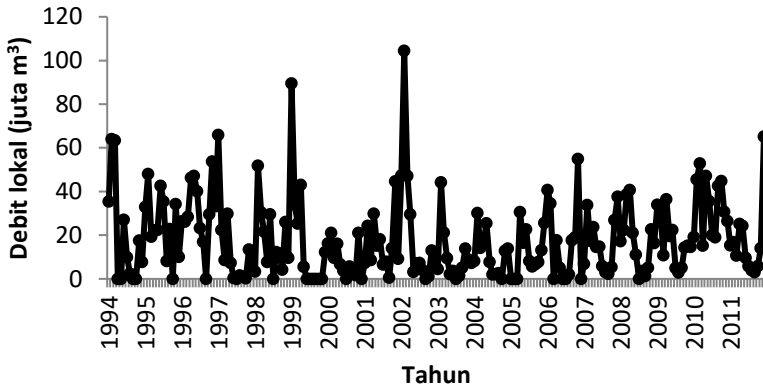
$$N_{i,t}^{min} \ll N_{i,t} \ll N_{i,t}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

Tinggi muka air waduk

$$Z_{i,t} = Z_i^b, Z_{i,T+1} = Z_i^e \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

**Pola Deterministik Waduk Jatiluhur**

Grafik debit lokal di Waduk Jatiluhur secara grafis ditunjukkan pada Gambar 4.36 di bawah ini terlihat bahwa data debit bersifat acak dan stokastik. Hasil perhitungan probabilitas debit rencana diskrit tiga kelas lokal Jatiluhur dapat dilihat pada Tabel 4.15.



Gambar 4-36 Grafik Perhitungan Debit Lokal Jatiluhur Satuan 106 m<sup>3</sup>/detik (Data Debit Tahun 1994-2011)

**Tabel 4.15 Hasil Perhitungan Debit Rencana Diskrit Tiga Kelas Lokal Jatiluhur (Data Debit Tahun 1994-2011)**

Bulan	Kering	Normal	Basah
	satuan m <sup>3</sup> /detik		
JAN	5,93	17,24	43,34
PEB	21,83	32,06	46,59
MAR	8,64	17,41	33,69
APR	16,55	25,12	38,22
MEI	5,39	15,18	24,78
JUN	2,35	11,19	31,96
JUL	0,00	4,94	12,97
AGT	1,88	3,94	9,86
SEP	0,34	3,05	14,10
OKT	0,14	5,43	16,22
NOP	13,01	21,09	38,47
DES	6,61	12,24	29,17

Tabel 4.16, Tabel 4.17 dan Tabel 4.18 adalah hasil perhitungan lintasan pedoman di Waduk Jatiluhur (tahun kering, normal dan basah) yang dibangun berdasarkan penjumlahan data debit rencana Waduk Cirata dengan debit lokal Jatiluhur.

**Tabel 4.16 Hasil Perhitungan Lintasan Pedoman Tahun Kering Waduk Jatiluhur**

Bulan	Jumlah hari	Vin	Vout	Delta	St
			106 m <sup>3</sup>		
Jan	31	365,61	253,79	111,8	256,5
Feb	28	483,48	253,79	229,7	486,2
Mar	31	362,98	253,79	109,2	595,4
Apr	30	526,74	253,79	273,0	868,4
May	31	307,15	253,79	53,4	921,7
Jun	30	128,83	253,79	-125,0	796,8
Jul	31	70,07	253,79	-183,7	613,0
Aug	31	42,01	253,79	-211,8	401,3
Sep	30	50,77	253,79	-203,0	198,3
Oct	31	79,82	253,79	-174,0	24,3
Nov	30	229,50	253,79	-24,3	0,0
Dec	31	398,49	253,79	144,7	144,7
		365	253,8		

**Tabel 4.17 Hasil Perhitungan Lintasan Pedoman Tahun Normal Waduk Jatiluhur**

Bulan	Jumlah hari	Vin	Vout	Delta	St
			106 m <sup>3</sup>		
Jan	31	626,81	432,76	194,0	443,3
Feb	28	644,06	432,76	211,3	654,6
Mar	31	695,47	432,76	262,7	917,3
Apr	30	713,51	432,76	280,7	1198,0
May	31	524,67	432,76	91,9	1289,9
Jun	30	258,67	432,76	-174,1	1115,8
Jul	31	161,16	432,76	-271,6	844,2
Aug	31	91,77	432,76	-341,0	503,3
Sep	30	101,50	432,76	-331,3	172,0
Oct	31	260,77	432,76	-172,0	0,0
Nov	30	557,19	432,76	124,4	124,4
Dec	31	557,55	432,76	124,8	249,2
		365	432,8		

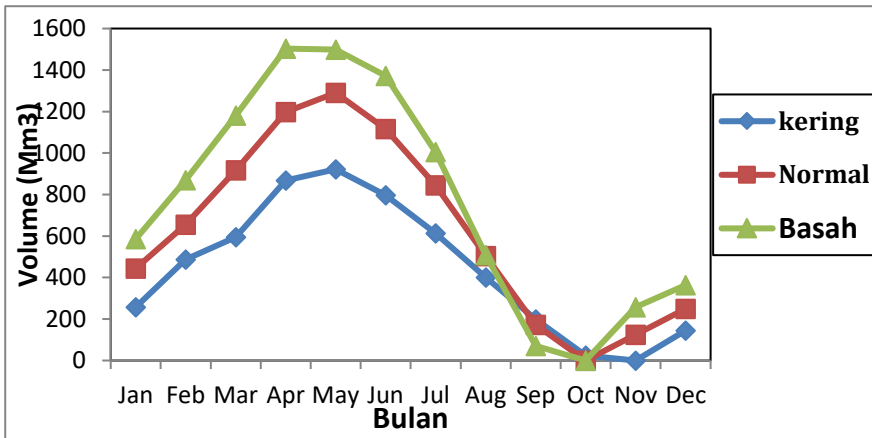
Hasil perhitungan St (stok waduk) di Waduk Jatiluhur untuk pedoman lintasan kering dan normal dapat dilihat bahwa posisi waduk mulai mengisi ketika berada awal bulan November di mana  $Q_{in} > Q_{out}$ . Demikian halnya yang terjadi pada pedoman lintasan Waduk Jatiluhur tahun basah.

**Tabel 4.18 Hasil Perhitungan Lintasan Pedoman Tahun Basah Waduk Jatiluhur**

Bulan	Jumlah hari	Vin	Vout	Delta	St
		106 m3			
Jan	31	899,20	675,88	223,3	586,2
Feb	28	958,59	675,88	282,7	868,9
Mar	31	987,46	675,88	311,6	1180,5
Apr	30	998,68	675,88	322,8	1503,3
May	31	671,21	675,88	-4,7	1498,6
Jun	30	549,68	675,88	-126,2	1372,4
Jul	31	308,61	675,88	-367,3	1005,1
Aug	31	178,83	675,88	-497,0	508,1
Sep	30	238,28	675,88	-437,6	70,5
Oct	31	605,40	675,88	-70,5	0,0
Nov	30	933,57	675,88	257,7	257,7
Dec	31	781,02	675,88	105,1	362,8
	365	675,9			

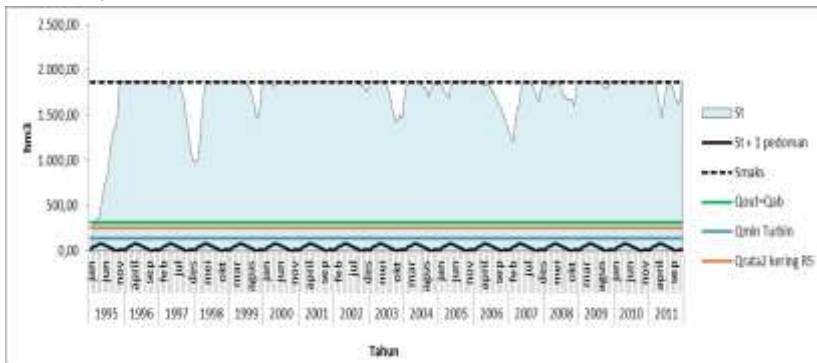
Gambar 4.37 menunjukkan pedoman lintasan (St) tahun kering, normal dan basah dari hasil perhitungan yang sudah dilakukan di Waduk Jatiluhur.





Gambar 4-37 Lintasan Pedoman Debit Rencana Diskrit Tiga Kelas Waduk Jatiluhur

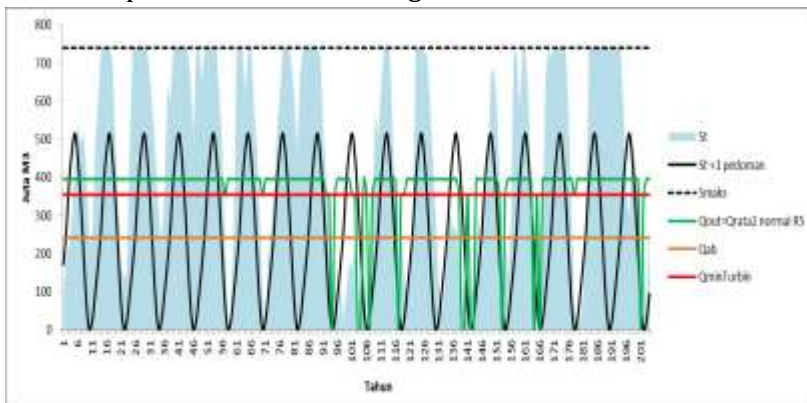
Simulasi model waduk deterministik di Waduk Jatiluhur dengan pedoman lintasan kering dapat dilihat pada Gambar 4.38 yang menunjukkan stok debit input yang masuk mencukupi atau tersedia namun kondisi yang sama halnya dialami waduk Jatiluhur akan terjadi banyak air yang terbuang percuma. *Constraint Qout* Turbin yang digunakan dalam pengelolaan deterministik kering di Waduk Jatiluhur adalah debit air baku downstream.



Gambar 4-38 Pengelolaan Waduk Jatiluhur Deterministik Dengan Pedoman Lintasan Tahun Kering (1994-2011)

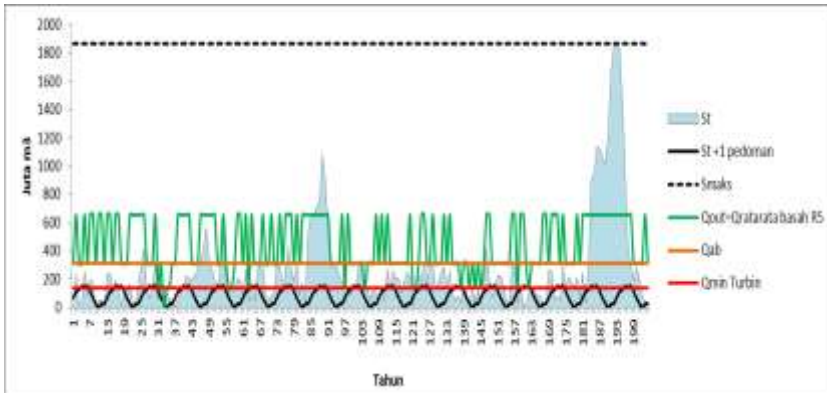
Simulasi pengelolaan waduk deterministik dengan pedoman lintasan normal dapat dilihat pada Gambar 4.39. Dapat dilihat bahwa stok debit input yang masuk mencukupi dan tersedia namun juga masih ada air yang terbuang percuma dan beberapa

tahun terjadi kekurangan air. Hal ini mengakibatkan tidak optimalnya pemanfaatan air di waduk Jatiluhur jika menggunakan metode deterministik. Constraint yang digunakan dalam pengelolaan deterministik normal di Waduk Jatiluhur adalah menggunakan debit turbin dengan Qrata-rata normal,  $Q$  minimum Turbin dan 5 (lima) terjadi kejadian  $Q_{out}$  Turbin adalah nol atau tidak beroperasi karena kekurangan stok air di waduk.



Gambar 4-39 Pengelolaan Waduk Jatiluhur Deterministik Dengan Pedoman Lintasan Tahun Normal (1994-2011)

Simulasi pengelolaan waduk deterministik dengan pedoman lintasan basah dapat dilihat pada Gambar 4.40. Dapat dilihat bahwa terdapat kondisi kelebihan dan kekurangan air sehingga menyebabkan tidak optimalnya pemanfaatan air. Constraint yang digunakan dalam pengelolaan deterministik basah di Waduk Jatiluhur adalah menggunakan debit turbin dengan Qrata-rata basah dan  $Q$  minimum Turbin.



Gambar 4-40 Pengelolaan Waduk Jatiluhur Deterministik Dengan Pedoman Lintasan Basah (1994-2011)

Pengelolaan deterministik tidak memperhatikan rencana tahun yang akan datang apakah kering, normal, atau basah sehingga tidak dapat memberikan pedoman lintasan yang akan digunakan secara tepat. Hal ini dapat dilihat dari kondisi yang terjadi yaitu kelebihan air sehingga akan terbuang percuma dan kondisi kekurangan air sehingga dapat mengurangi keefektifan kerja turbin dalam menghasilkan energi listrik. Oleh karena itu, pengelolaan deterministik belum tepat digunakan untuk pengelolaan waduk jangka panjang yang membutuhkan keoptimalan pengoperasian dalam menjamin kebutuhan air untuk menghasilkan energy listrik (PLTA). Dalam tahap penelitian selanjutnya akan dibahas pengelolaan waduk Optimal di Waduk Kaskade Citarum dengan prakiraan debit diskrit Markov dan Kontinu.

## F. Optimalisasi Pengusahaan Waduk Kaskade Citarum Menggunakan Metode Stokastik Diskrit Markov dan Kontinu

### Prakiraan Debit Inflow Waduk Kaskade Citarum

Prediksi debit inflow atau volume air yang akan masuk ke waduk dalam pengoperasiannya merupakan hal yang sulit dilakukan. Hal ini disebabkan oleh fungsi debit *inflow* waduk sebagai penentu volume air yang dapat dikeluarkan melalui fungsi utilitas dan berapa bagian air yang harus tersimpan dalam waduk

sebagai volume cadangan. Metode prakiraan debit inflow dalam penelitian ini menggunakan model kontinu dan model stokastik diskrit Markov. Kedua model tersebut akan divalidasi terhadap data debit historikal untuk memilih metode yang sesuai dalam rangka optimalisasi waduk.

### **Model Diskrit Markov**

Model diskrit Markov merupakan model diskrit stokastik dalam pengambilan keputusan, di mana waktu  $t$  akan mempengaruhi keputusan yang diambil pada waktu yang akan datang ( $t+1$ ). Pendekatan dengan model diskrit Markov menggunakan matriks transisi yang menjelaskan nilai probabilitas (ketidakpastian) kejadian besaran debit tertentu. Untuk membuat matriks transisi tiga kelas maka dilakukan langkah-langkah berikut: 1) mengurutkan data dari kecil ke besar; 2) menghitung nilai probabilitas setiap data menggunakan metode Weibull di mana probabilitas setiap urutan data ( $P_i$ ) ditentukan dengan persamaan  $P_i = m_i/(N+1)$ ; dan 3) melakukan probabilitas kumulatif untuk rangkaian data setiap bulan dan membaginya menjadi tiga kelas. Tiga kelas tersebut masing-masing dengan interval sebagai berikut: Kelas 0 (kering)  $0 < P \leq 1/3$ , Kelas I (normal)  $1/3 < P \leq 2/3$ , dan Kelas 2 (basah)  $2/3 < P \leq 1$ . Pada setiap interval kelas ditentukan debit rata-rata yang mewakili kelas tersebut dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q_{rj} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{ij}}{n} \dots\dots\dots (V.1.)$$

Di mana  $Q_{rj}$  adalah debit rata-rata pada kelas debit kering, normal dan basah, sedangkan  $n$  adalah jumlah data pada setiap kelas. Berdasarkan kelas debit yang tercantum pada Tabel V.1, Tabel V.2 dan Tabel V.3, maka dibuat pembagian interval kelas debit berdasarkan data historis debit Saguling, debit lokal Cirata dan debit lokal Jatiluhur dari tahun 1994 sampai dengan 2011. Pembagian kelas dimaksudkan untuk membuat matriks transisi tiga kelas orde satu.

**Tabel V.1 Batas Kelas Debit Bulanan Saguling (m<sup>3</sup>/detik)  
Berdasarkan Data Historis 1994-2011**

Bulan	Debit Kering (Kelas 0)		Debit Normal (Kelas 1)		Debit Basah (Kelas 2)	
	Jan	44	- 82,48	82,49	- 133,67	133,68
Feb	56	- 104,45	104,46	- 153,21	153,22	- 226,64
Mar	58,04	- 108,2	108,3	- 170,27	170,28	- 305
Apr	67,03	- 132,61	132,62	- 164,27	164,28	- 254,25
Mei	44,44	- 63,78	63,78	- 107,81	107,82	- 148,74
Jun	13	- 31,17	31,17	- 58,67	58,68	- 173
Jul	7,64	- 22,12	22,13	- 36	36,01	- 141,46
Ags	5,39	- 9,01	9,02	- 15,1	15,12	- 42,49
Sep	4,29	- 9,315	9,32	- 20,69	20,6	- 87
Okt	4,08	- 25,43	25,44	- 67,44	67,45	- 225
Nop	12,22	- 50,16	50,17	- 134,49	134,5	- 258,73
Des	38,22	- 89,01	89,02	- 108,76	108,77	- 166,01

**Tabel V.2 Batas Kelas Debit Bulanan Lokal Cirata (m<sup>3</sup>/detik)  
Berdasarkan Data Historis 1994-2011**

Bulan	Debit Kering (Kelas 0)		Debit Normal (Kelas 1)		Debit Basah (Kelas 2)	
	Jan	39,80	- 91,00	91,01	- 112,30	112,31
Feb	58,19	- 107,90	107,91	- 123,05	123,06	- 199,00
Mar	43,16	- 97,57	97,58	- 128,00	128,01	- 282,64
Apr	70,34	- 96,90	96,91	- 119,20	119,21	- 70,34
Mei	35,20	- 63,70	63,71	- 95,60	95,61	- 135,36
Jun	12,20	- 30,70	30,71	- 59,00	59,01	- 88,26
Jul	8,38	- 20,60	20,61	- 42,02	42,03	- 86,81
Ags	2,20	- 11,66	11,67	- 20,90	20,91	- 88,05
Sep	2,50	- 14,87	14,88	- 31,91	31,92	- 133,82
Okt	7,48	- 36,01	36,02	- 61,10	61,11	- 125,62
Nop	17,86	- 69,30	69,31	- 125,72	125,73	- 135,23
Des	44,81	- 84,37	84,38	- 104,75	104,76	- 133,96

**Tabel V.3 Batas Kelas Debit Bulanan Lokal Jatiluhur (m<sup>3</sup>/detik)  
Berdasarkan Data Historis 1994-2011**

Bulan	Debit Kering (Kelas 0)		Debit Normal (Kelas 1)		Debit Basah (Kelas 2)	
	Jan	0	- 8,21	8,22	- 32,92	32,93
Feb	0	- 24,27	24,28	- 34,51	34,52	- 104,43
Mar	0	- 10,75	10,76	- 25,28	25,29	- 63,48
Apr	0	- 17,72	17,73	- 29,85	29,86	- 46,25
Mei	0	- 6,71	6,72	- 19,56	19,57	- 47,18
Jun	0	- 7,19	7,20	- 22,47	22,48	- 42,70
Jul	0	- 0,00	0,01	- 6,62	6,63	- 35,48
Ags	0	- 2,50	2,51	- 5,63	5,64	- 19,07
Sep	0	- 1,08	1,09	- 5,08	5,09	- 42,66
Okt	0	- 1,13	1,14	- 7,79	7,80	- 44,83

Nop	0	-	13,53	13,54	-	26,12	26,13	-	54,95
Des	0	-	7,70	7,71	-	14,70	14,71	-	65,17

Setelah menetapkan batas kelas debit bulanan di masing-masing pos debit Saguling, lokal Cirata dan lokal Jatiluhur maka dilakukan perhitungan debit rata-rata untuk setiap jenis kelas yang akan digunakan dalam perhitungan matriks transisi Markov.

**Tabel V.4 Debit Rata-Rata Saguling Untuk Setiap Jenis Kelas (m<sup>3</sup>/detik)**

Bulan	(Kelas kering )	(Kelas normal)	(Kelas basah)
Jan	62,86	117,81	187,38
Feb	87,33	127,38	189,55
Mar	77,15	142,63	210,09
Apr	97,11	148,38	214,07
Mei	55,27	90,90	119,28
Jun	24,08	42,11	101,26
Jul	14,46	29,39	69,55
Ags	7,23	11,78	25,43
Sep	7,83	14,45	41,33
Okt	10,31	52,25	128,65
Nop	29,60	110,49	198,71
Des	72,71	100,48	136,14

**Tabel V.5 Debit Rata-rata Lokal Cirata Untuk Setiap Jenis Kelas (m<sup>3</sup>/detik)**

Bulan	(Kelas kering )	(Kelas normal)	(Kelas basah)
Jan	65,98	103,09	130,61
Feb	82,70	115,47	159,24
Mar	64,63	119,52	166,73
Apr	84,91	107,40	142,98
Mei	52,32	88,15	110,26
Jun	22,92	49,10	87,94
Jul	13,18	33,68	59,55
Ags	7,13	17,64	44,41
Sep	9,17	22,37	57,65
Okt	21,05	48,90	92,74
Nop	46,25	94,74	156,31
Des	63,63	94,49	117,31

**Tabel V.6 Debit Rata-Rata Lokal Jatiluhur Untuk Setiap Jenis Kelas  
(m<sup>3</sup>/detik)**

Bulan	(Kelas kering )	(Kelas normal)	(Kelas basah)
Jan	5,04	21,21	52,14
Feb	17,81	31,82	59,71
Mar	6,29	18,07	43,50
Apr	12,56	25,37	37,83
Mei	3,79	13,51	31,27
Jun	2,51	13,98	32,96
Jul	0,00	4,22	17,38
Ags	1,62	3,87	11,69
Sep	0,28	3,05	17,80
Okt	0,23	5,03	22,63
Nop	10,26	19,47	40,93
Des	4,70	11,63	34,08

Proses stokastik yang dilakukan didasarkan deretan variabel acak debit terhadap waktu. Jika proses Markov dengan n-kejadian probabilitas transisi dari kondisi i pada  $X_{n-1}$  ke kondisi j pada  $X_n$  dan diasumsikan probabilitas ini tetap sepanjang waktu, maka transisi tersebut akan lebih mudah disusun dalam bentuk matriks. Nilai matrik didapat dengan menghitung pasangan tahun yang dicirikan dengan keadaan debit (0, 1, 2). Jika dimiliki suatu seri meteorologi (N+1) tahun, maka akan dimiliki N pasangan terpisah. N01 dan N10 menyajikan jumlah dari perubahan berturut-turut keadaan dari debit kering (0) ke keadaan debit normal (1), atau dari debit normal (1) ke debit kering (0), dan seterusnya. Sebagai contoh hasil perhitungan matriks transisi bulan Januari-Februari di Waduk Kaskade Citarum dapat dilihat pada Tabel V.7, Tabel V.8 dan Tabel V.9. Jika kejadian probabilitas yang sama terjadi di setiap debit maka diambil nilai probabilitas transisi yang paling banyak terjadi secara historis, seperti contohnya Tabel V.7 kondisi nilai transisi probabilitas bulan Januari adalah sama di setiap kondisi (t+1) debit kering, normal maupun basah. Oleh karena itu ditinjau data debit historisnya cenderung kondisi kering maka diambil nilai probabilitasnya adalah debit kering.

**Tabel V.7 Matriks Transisi Bulan Januari-Februari Saguling**

Kondisi Bulan Januari (t)	Kondisi Bulan Februari (t+1)				
	0	1	2		
0	0,3333	0,3333	0,3333	1.0000	P0N
1	0,16667	0,5	0,3333	1.0000	P1N
2	0,5	0,16667	0,3333	1.0000	P2N
	1	1	1	3.0000	PNN
	PN0	PN1	PN2	PNN	

**Tabel V.8 Matriks Transisi Bulan Januari-Februari Lokal Cirata**

Kondisi Bulan Januari (t)	Kondisi Bulan Februari (t+1)				
	0	1	2		
0	0,5	0,333333	0,166667	1.0000	P0N
1	0,166667	0,5	0,333333	1.0000	P1N
2	0,333333	0,166667	0,666667	1.0000	P2N
	1	1	1	3.0000	PNN
	PN0	PN1	PN2	PNN	

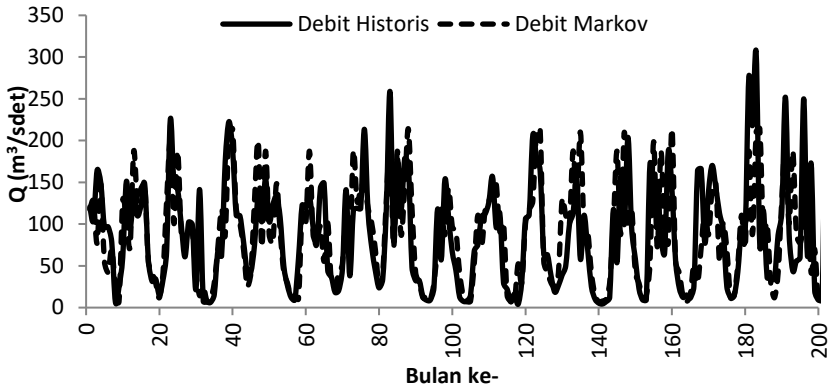
**Tabel V.9 Matriks Transisi Bulan Januari-Februari Lokal Jatiluhur**

Kondisi Bulan Januari (t)	Kondisi Bulan Februari (t+1)				
	0	1	2		
0	0,333333	0,333333	0,333333	1.0000	P0N
1	0,5	0,166667	0,333333	1.0000	P1N
2	0,166667	0,5	0,333333	1.0000	P2N
	1	1	1	3.0000	PNN
	PN0	PN1	PN2	PNN	

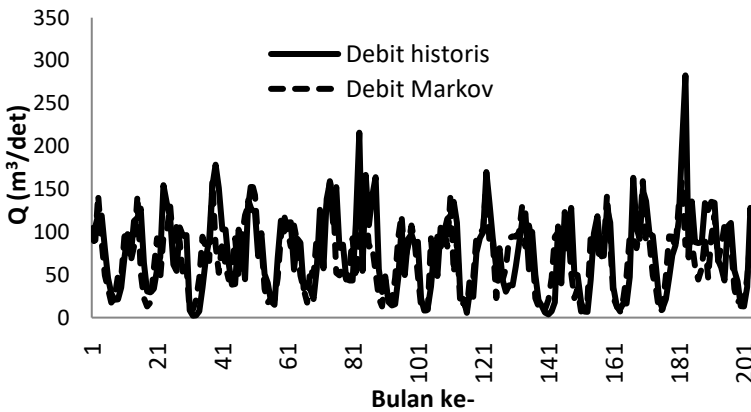
Berdasarkan matriks transisi yang telah dibuat untuk 12 kondisi (12 bulan) maka disusun data model prakiraan Markov Saguling, lokal Cirata dan lokal Jatiluhur (Tabel V.10, Tabel V.11 dan Tabel V.12). Hasil simulasi model debit inflow prakiraan Markov terhadap data debit historis ditunjukkan pada Gambar V.1,



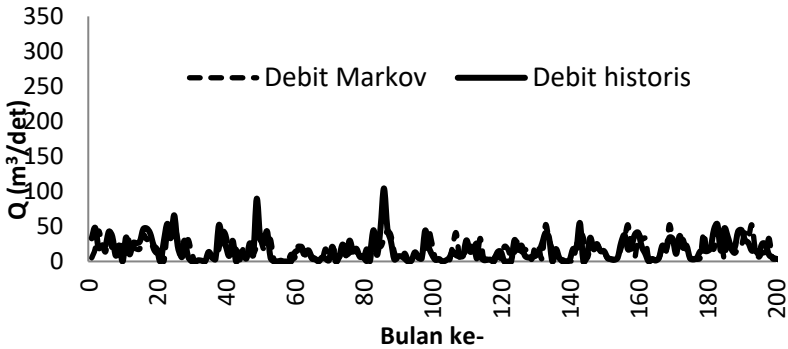
Gambar V.2 dan Gambar V.3 dengan koefisien korelasi (R) sebesar masing-masing 0,66 (Waduk Saguling); 0,65 (Lokal Cirata) dan 0,52 (Lokal Jatiluhur).



Gambar V-1 Simulasi Prakiraan Debit Inflow Saguling Model Diskrit Markov



Gambar V-2 Simulasi Prakiraan Debit Inflow Lokal Cirata Model Diskrit Markov



Gambar V-3 Simulasi Prakiraan Debit Inflow Lokal Jatiluhur Model Diskrit Markov

**Model Kontinu**

Konsep model kontinu merupakan korelasi hubungan spasial antara dua atau lebih variabel acak yaitu variabel debit dan hujan. Debit yang masuk Saguling (QS), Lokal Cirata (QLC) dan Lokal Jatiluhur (QLJ) diestimasi berdasarkan regresi multivariat di mana debit Saguling ( $Q_{St+1}$ ), debit lokal Cirata ( $QLC_{t+1}$ ) dan debit lokal Jatiluhur ( $QLJ_{t+1}$ ) sebagai dependen variabel. Variabel independen model kontinu di Saguling adalah debit terukur di pos Nanjung ( $Q_{Nt+1}$ ) dan curah hujan dari 11 pos hujan ( $PX_t$ ). Sedangkan variabel independen di Cirata adalah 1 pos debit lokal terukur di Cirata dan curah hujan dari 7 pos curah hujan ( $PX_t$ ). Variabel independen di Jatiluhur diasumsikan terdapat 1 pos debit lokal terukur di Jatiluhur dan 7 pos curah hujan (dengan pendekatan debit lokal menggunakan simplifikasi matematis di mana debit lokal = debit input Jatiluhur dikurangi debit output Cirata). Hal ini disebabkan tidak tersedianya data debit lokal Jatiluhur. Data historis hujan dan debit yang digunakan adalah data tahun 1994 sampai 2011. Tabel V.13, Tabel V.14 dan Tabel V.15 menunjukkan hasil regresi multivariat Q-P di Waduk Saguling, lokal Cirata dan lokal Jatiluhur (perhitungan terinci dilampirkan).

**Tabel V.13 Persamaan Hasil Korelasi Model Kontinu Saguling**

Bulan	Persamaan
Jan	$Q_{Jan} = 172,175 + 0,274 P_1 + 0,534 P_2 - 1,13 P_{11}$
Feb	$Q_{Feb} = 102,54 + 0,45 Q_{Jan} - 0,624 P_6 + 0,435 P_8$
Mar	$Q_{Mar} = 64,985 - 1,211 P_5 - 0,17 Q_{Feb} + 1,51 P_8$
Apr	$Q_{April} = 149,02 - 0,488 Q_{Mar} + 0,124 P_8 + 0,145 P_9$
Mei	$Q_{Mei} = 62,349 - 0,446 P_8 + 0,51 P_{11} + 0,255 P_2$
Jun	$Q_{Jun} = 28,095 - 0,669 P_8 + 0,882 P_7 + 0,229 Q_{MEI}$
Jul	$Q_{Juli} = 31,04 + 0,433 P_2 + 0,747 P_3 - 0,782 P_1$
Agust	$Q_{ags} = 5,255 + 0,049 P_6 + 0,017 Q_{JULI} + 0,127 P_2$
Sep	$Q_{sep} = 31,58 + 0,153 P_1 - 0,036 P_7 + 0,71 Q_{AGS}$
Okt	$Q_{okt} = 62,566 + 0,873 P_2 - 1,152 P_6 + 1,693 Q_{SEPT}$
Nop	$Q_{nov} = 28,209 - 0,292 P_3 + 0,499 Q_{OKT} + 0,606 P_8$
Des	$Q_{des} = 68,304 + 0,512 P_6 - 0,533 P_9 - 0,113 Q_{NOV}$

Keterangan:

P1 = Cihampelas, P2= Sukawana, P3 = Saguling, P4 = Cililin,  
 P5 = Montaya, P6 = Cisondari, P7 = Chincona, P8 = Paseh,  
 P9 = Cicalengka,  
 P10 = ujung Berung, P11= Ciparay

**Tabel V.14 Persamaan Hasil Korelasi Model Kontinu Lokal Cirata**

Bulan	Persamaan
Jan	$Q_{Jan} = 177,08 - 0,082 P_1 - 0,042 P_2 - 0,118 P_3 + 0,147 P_4 + 0,277 P_5 + 0,033 P_6 - 0,374 P_7 - 0,531 Q_{des}$
Feb	$Q_{Feb} = 87,103 + 0,156 P_1 - 0,192 P_2 + 0,048 P_3 + 0,072 P_4 + 0,15 P_5 + 0,503 P_6 - 0,325 P_7 - 0,706 Q_{JAN}$
Mar	$Q_{mar} = 100,633 + 0,496 P_5 - 0,097 P_7 - 0,348 P_2$
Apr	$Q_{apr} = 92,5 + 0,005 P_1 + 0,094 P_2 - 0,014 P_3 - 0,009 P_4 - 0,03 P_5 + 0,168 P_6 - 0,054 P_7 - 0,144 Q_{mar}$
Mei	$Q_{mei} = 88,49 - 0,045 P_1 + 0,115 P_2 - 0,038 P_3 + 0,105 P_4 + 0,014 P_5 - 0,016 P_6 + 0,094 P_7 - 0,475 Q_{apr}$
Jun	$Q_{jun} = 18,758 - 0,018 P_1 + 0,141 P_2 + 0,131 P_3 + 0,095 P_4 - 0,225 P_5 - 0,195 P_6 + 0,112 P_7 + 0,287 Q_{mei}$
Jul	$Q_{jul} = 18,778 - 0,12 P_1 + 0,159 P_2 - 0,141 P_3 + 0,155 P_4 + 0,007 P_5 - 0,112 P_6 + 0,127 P_7 + 0,211 Q_{juni}$
Agust	$Q_{ags} = 0,167 P_2 - 0,113 P_6 + 0,7 Q_{JULI} - 0,4233$
Sep	$Q_{sep} = 13,315 - 0,19 P_3 + 0,527 P_6 + 0,29 P_7$
Okt	$Q_{okt} = 78,889 - 0,165 P_3 + 0,272 P_4 + 0,707 Q_{SEPT}$

Nop	$Q_{nop} = 41,036 + 0,125 P_3 + 0,777 P_4 - 0,576 P_5$
Des	$Q_{des} = 80,159 - 0,128 P_1 - 0,003 P_2 + 0,062 P_3 - 0,054 P_4 + 0,088 P_5 + 0,102 P_6 + 0,015 P_7 - 0,102 Q_{NOV}$

Keterangan:

$P_1$  =Cikundul,  $P_2$ = Cibalagung,  $P_3$  = Cisokan,  $P_4$  = Cimeta,  
 $P_5$  = Cirata,  $P_6$  = Janggari,  $P_7$  = Cipicung

**Tabel V.15 Persamaan Hasil Korelasi Model Kontinu Lokal Jatiluhur**

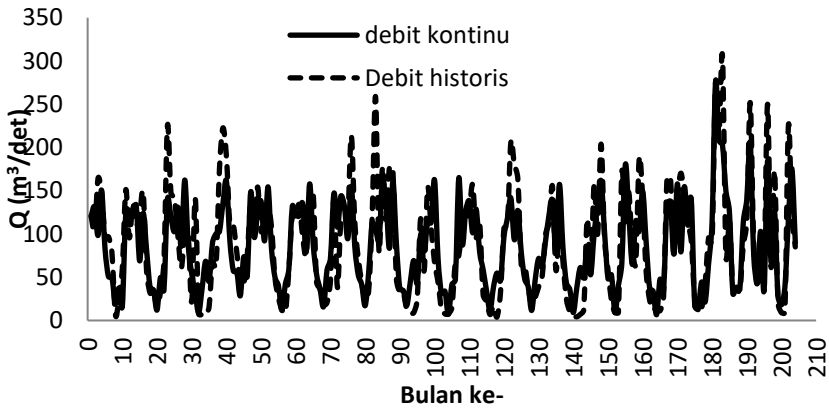
Bulan	Persamaan
Jan	$Q_{jan} = 56,907 + 0,089 P_1 - 0,088 P_2 - 0,041 P_3 + 0,088 P_4 - 0,067 P_5 - 0,057 P_6 - 0,027 P_7 + 0,628 Q_{DES}$
Feb	$Q_{feb} = 17,078 - 0,065 P_4 + 0,072 P_7 + 0,156 Q_{JAN}$
Mar	$Q_{mar} = 6,174 - 0,038 P_3 + 0,018 P_7 + 0,612 Q_{FEB}$
Apr	$Q_{apr} = 18,099 - 0,017 P_1 + 0,12 P_2 - 0,071 P_3 + 0,067 P_4 - 0,011 P_5 - 0,015 P_6 + 0,012 P_7 - 0,591 Q_{MARET}$
Mei	$Q_{mei} = 25,72 - 0,012 P_1 + 0,023 P_2 + 0,013 P_3 + 0,024 P_5 - 0,076 P_6 - 0,005 P_7 + 0,297 Q_{APRIL}$
Jun	$Q_{jun} = 3,439 - 0,057 P_5 + 0,063 P_7 + 0,704 Q_{MEI}$
Jul	$Q_{jul} = 0,008 P_7 - 1,278 + 0,653 Q_{JUNI} - 0,047 P_6$
Agust	$Q_{ags} = 0,32 + 0,032 P_1 + 0,038 P_4 + 0,182 Q_{JULI}$
Sep	$Q_{sep} = 4,082 + 0,104 P_6 - 0,043 P_7 + 0,486 Q_{AGS}$
Okt	$Q_{okt} = 1,524 + 0,069 P_3 - 0,016 P_6 + 0,205 Q_{SEPT}$
Nop	$Q_{nop} = 7,342 - 0,03 P_1 - 0,019 P_2 + 0,079 P_3 - 0,042 P_4 - 0,063 P_6 + 0,048 P_7 + 0,788 Q_{OKT}$
Des	$Q_{des} = 0,074 P_4 + 0,212 P_6 - 8,244 - 0,153 P_3$

Keterangan:

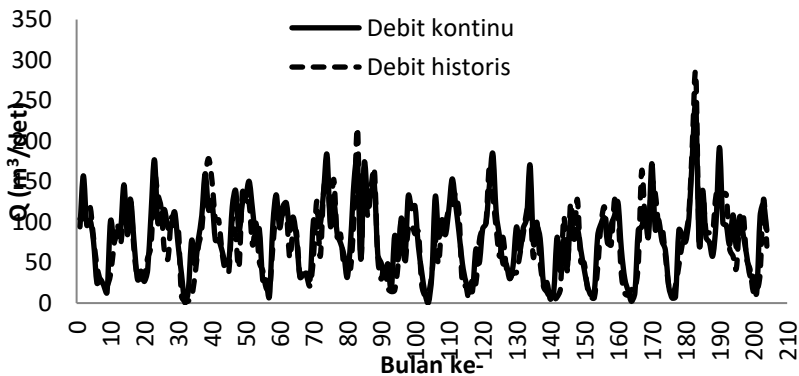
$P_1$  =Cisomang,  $P_2$ = Darangdan,  $P_3$  = Purwakarta,  $P_4$  = Cikao Bandung,  $P_5$  = Pondok Salam,  $P_6$  = Cibukamanah,  $P_7$  = Wanayasa

Simulasi validasi model prakiraan kontinu dilakukan terhadap data debit historis ditunjukkan pada Gambar V.4, Gambar V.5 dan Gambar V.6. Nilai Korelasi determinasi regresi (R) debit model dengan debit historis di waduk Saguling, lokal Cirata dan lokal Jatiluhur masing-masing sebesar 0,80, 0,85 dan 0,73. Nilai korelasi determinasi model kontinu di waduk kaskade Citarum lebih tinggi dibandingkan dengan model debit stokastik Markov.

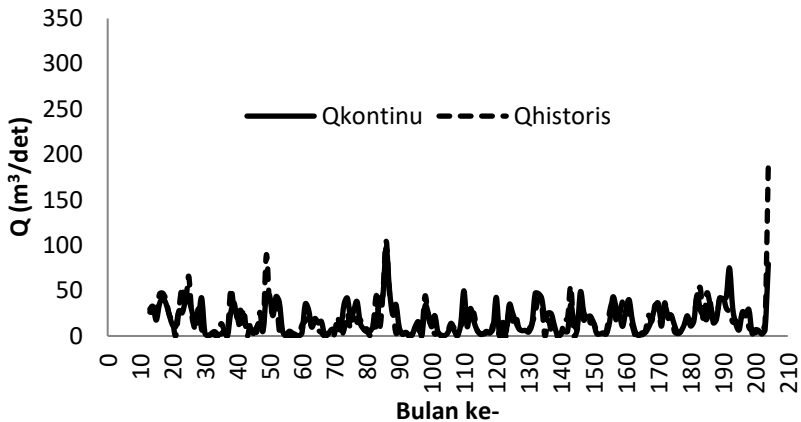
Sehingga menjadi dasar pemilihan prakiraan debit inflow dalam melakukan simulasi optimalisasi perusahaan Waduk Kaskade Citarum.



Gambar V-4 Simulasi prakiraan debit inflow model Kontinu Saguling



Gambar V-5 Simulasi prakiraan debit inflow model Kontinu Lokal Cirata



Gambar V-6 Simulasi Prakiraan Debit Inflow Model Kontinu Lokal Jatiluhur

### Prakiraan Klasifikasi Debit Tahunan Waduk Kaskade Citarum

Penentuan prakiraan jenis kelas tahun di waduk Kaskade Citarum menggunakan metode transisi Markov yang membagi serial data inflow tahunan ke dalam tiga kelas dilakukan dalam penelitian ini. Jika dibandingkan dengan penentuan pola operasi yang dilakukan oleh pengelola waduk serial Kaskade Citarum yang tergabung dalam SPK TPA, setiap tahun mereka mengadakan pertemuan untuk menentukan lintasan pedoman (pola operasi waduk) yaitu suatu ketetapan pengaturan tinggi muka air waduk secara equal sharing antara waduk Saguling, waduk Cirata, dan waduk Jatiluhur. Pola operasi waduk terdiri atas pola operasi kering, normal dan basah. Pola operasi tersebut merupakan tata cara pengaturan air sesuai kondisi volume dan atau elevasi air waduk. Tabel V.16 menunjukkan hasil perhitungan penentuan klasifikasi debit tahunan menggunakan metode diskrit Markov dari data debit tahunan di waduk Kaskade Citarum yang membuktikan bahwa setiap waduk (DAS) memiliki keunikan dan perbedaan dalam dimensi ruang dan waktu. Hal ini yang mendasari penetapan pedoman lintasan dapat didasarkan skenario kedua bahwa setiap waduk memiliki pedoman lintasan dinamis mengikuti alur sistem DAS atau mengikuti pola waduk upstream. Ada dua pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini untuk

menentukan pedoman lintasan waduk yaitu pertama adalah pendekatan DAS Kaskade Citarum sebagai satu sistem hidrologis dari hulu sampai ke hilir (masing-masing waduk memiliki tiga pedoman lintasan yaitu kering, normal dan basah), kedua adalah pendekatan bahwa DAS Kaskade Citarum sebagai sistem hidrologis dinamis yang memiliki tiga sub sistem satuan hidrologis sehingga jumlah pedoman lintasan dibedakan atas sub sistem Kaskade 1 (waduk Saguling), sub sistem Kaskade 2 (Waduk Cirata) dan sub sistem kaskade 3 (Waduk Jatiluhur). Jumlah pedoman lintasan setiap sub sistem (PMiNj) waduk ditentukan oleh persamaan berikut ini:

$$PMiNj = Mi^{Nj} \dots\dots\dots (V.2)$$

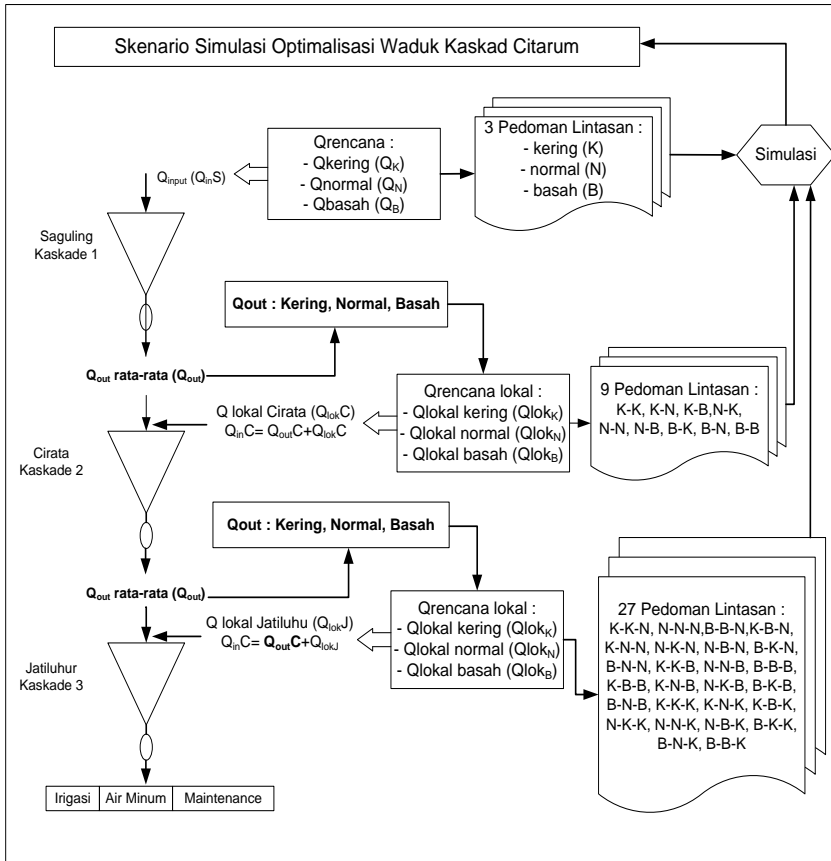
Di mana Nj = 1 untuk kaskade ke-1 (waduk Saguling); Nj=2 untuk Kaskade ke- 2 (waduk Cirata); Nj=3 untuk kaskade ke- 3, Mi = Jumlah lintasan waduk (i = 3,5 dst).

Hasil perhitungan persamaan V.2 di waduk Kaskade Citarum ditemukan bahwa pedoman lintasan untuk waduk Saguling sebagai sub sistem Kaskade ke-1 adalah tiga lintasan, waduk Cirata 9 lintasan dan waduk Jatiluhur 27 lintasan. Matriks pembagian lintasan berdasarkan pendekatan tiga sub sistem satuan hidrologis ini ditunjukkan pada Gambar V.7.

Penentuan debit rencana untuk membuat pedoman lintasan menggunakan metode diskrit tiga kelas dilakukan dengan analisis probabilitas diskrit. Analisis distribusi ini dilakukan dengan membagi data debit bulanan menjadi tiga kelas (kering, normal dan basah) yang masing-masing kelas memiliki probabilitas sama (+ 33,3%), selanjutnya penentuan pedoman menggunakan persamaan keseimbangan massa air.

Lintasan waduk yang digunakan dalam pedoman adalah menggunakan debit input rata-rata di waduk Kaskade Citarum, sedangkan debit outputnya konstan (debit rata-rata dari debit input). Sedangkan dalam simulasi pola pengoperasian waduk digunakan data debit historik bulanan sebagai debit input dan

debit prakiraan. Perhitungan pola lintasan telah dibahas pada pembahasan pola deterministik.



Gambar V-7 Skenario Simulasi Optimalisasi Waduk Kaskade Citarum dengan Sistem Hidrologis Dinamis

Skenario optimalisasi Waduk Kaskade Citarum secara dinamis didasarkan atas perhitungan volume tahunan debit masing-masing dilakukan di pos debit Saguling, debit lokal Cirata dan debit lokal Jatiluhur. Perhitungan volume tahunan digunakan sebagai dasar untuk memprediksi jenis kelas tahunan sehingga didapatkan jenis tahun masuk dalam kategori kelas kering, normal atau basah menggunakan metode transisi Markov. Perhitungan volume tahunan Waduk Kaskade Citarum dilampirkan dalam penelitian ini. Rekapitulasi jenis kelas tahun di Waduk Kaskade Citarum ditunjukkan pada Tabel V.6.

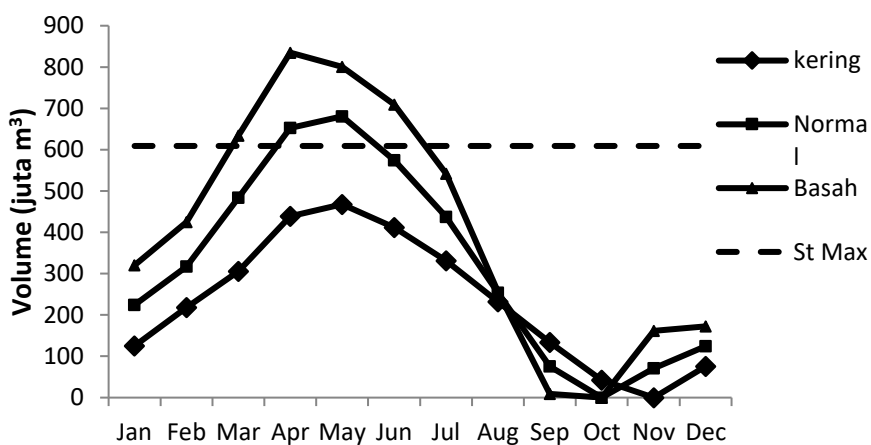


**Tabel V.16 Penentuan Jenis Kelas Tahun Berdasarkan Volume tahunan di Waduk Kaskade Citarum**

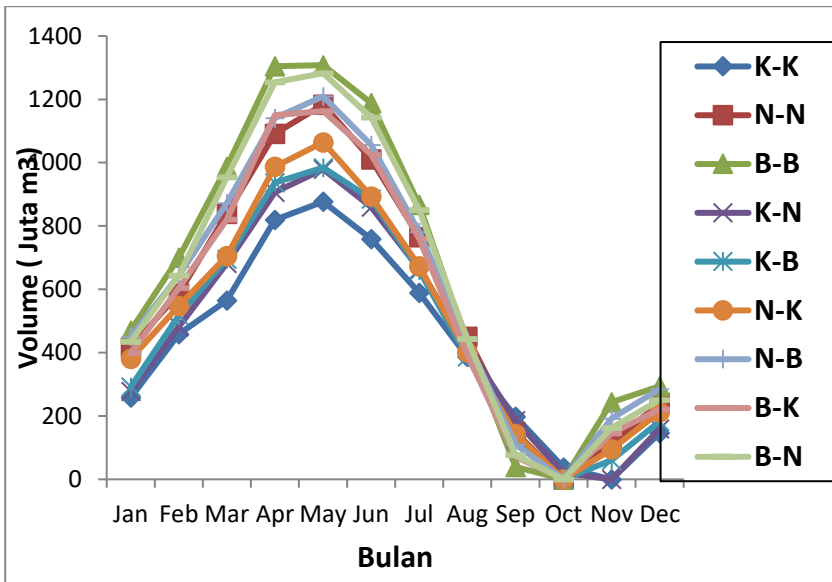
TAHUN	WADUK SAGULING	LOKAL CIRATA	LOKAL JATILUHUR
	Jenis Kelas Tahun		
1995	NORMAL	NORMAL	BASAH
1996	NORMAL	BASAH	BASAH
1997	KERING	NORMAL	BASAH
1998	BASAH	NORMAL	KERING
1999	NORMAL	NORMAL	NORMAL
2000	KERING	NORMAL	NORMAL
2001	BASAH	BASAH	KERING
2002	NORMAL	NORMAL	KERING
2003	BASAH	BASAH	BASAH
2004	BASAH	NORMAL	KERING
2005	BASAH	BASAH	KERING
2006	KERING	BASAH	KERING
2007	BASAH	NORMAL	NORMAL
2008	NORMAL	NORMAL	NORMAL
2009	KERING	NORMAL	NORMAL
2010	KERING	BASAH	BASAH
2011	NORMAL	NORMAL	BASAH

Tabel V.16 menunjukkan bahwa setiap waduk memiliki keunikan dan jenis tahun yang berbeda sehingga terbukti bahwa rezim hidrologi yang terjadi di Waduk Kaskade Citarum dipengaruhi fungsi ruang dan waktu (Sabar, 2009). Sebagai contoh yang terjadi di tahun 2010, waduk Saguling memiliki jenis tahun kering, lokal Cirata memiliki jenis tahun basah dan lokal Jatiluhur memiliki jenis tahun basah. Perbedaan jenis tahun ini menjadi dasar penentuan pedoman lintasan di setiap waduk yang bersifat dinamis dengan variasi debit berdasarkan klasifikasi jenis tahun pada waduk sebelumnya (Gambar V.7). Gambar V.8, Gambar V.9 dan Gambar V.10 menunjukkan kurva lintasan pedoman di waduk

Saguling, Cirata dan Jatiluhur dengan pendekatan DAS Kaskade Citarum sebagai satu kesatuan rezim hidrologis hulu-hilir yang bersifat dinamis (Skenario 2). Lintasan pedoman yang akan digunakan dalam operasional di Waduk Saguling berdasarkan Gambar V.8 dibatasi constraint yaitu St maksimum di mana terdapat lintasan normal dan basah yang melampaui kondisi St maksimum. Sedangkan pedoman lintasan di Waduk Cirata dan Jatiluhur tidak melampaui Constraint St maksimum yang telah ditetapkan.



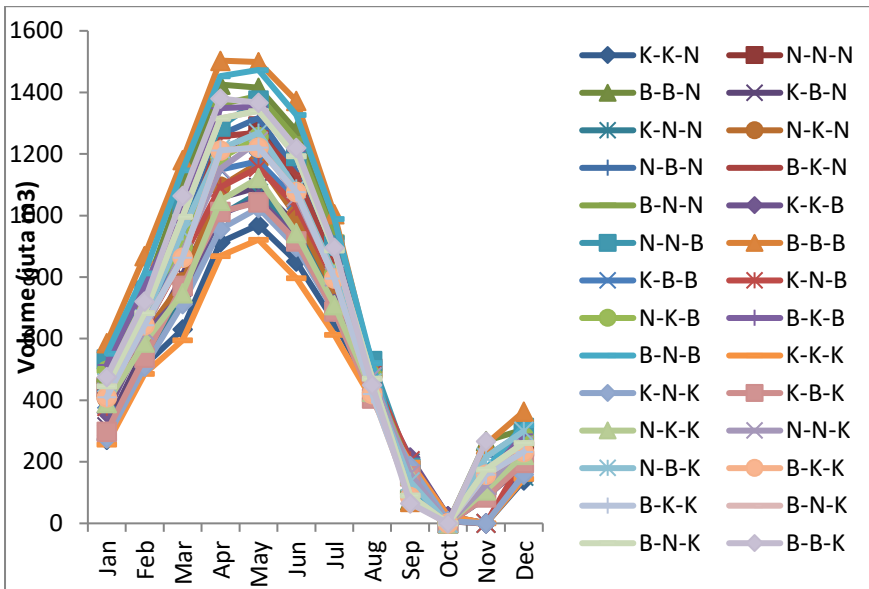
Gambar V-8 Lintasan Pedoman Berdasarkan Debit Rencana Diskrit Tiga Kelas Waduk Saguling



Gambar V-9 Lintasan Pedoman Berdasarkan Debit Rencana Diskrit Tiga Kelas Waduk Cirata Dengan 9 Kombinasi Lintasan

Keterangan:

K-K=kering-kering, N-N=normal-normal, B-B =basah-basah,  
 K-B=kering-basah,K-N = kering-normal, N-K=Normal-kering,  
 N-B= normal-basah, B-K=basah-kering, B-N= Basah-normal



Gambar V-10 Lintasan Pedoman Berdasarkan Debit Rencana Diskrit Tiga Kelas Waduk Jatiluhur dengan 18 Kombinasi Lintasan

Keterangan:

- K-K-N = kering-kering-normal
- N-N-N=normal-normal-normal
- B-B-N = basah-basah-normal
- K-B-N=kering-basah-normal
- K-N-N= kering-normal-normal
- N-K-N= normal-kering-normal
- N-B-N= normal-basah-normal
- B-K-N= basah-kering-normal
- B-N-N= basah-normal-normal
- K-K-B= kering-kering-basah
- N-N-B= normal-normal-basah
- B-B-B= basah-basah-basah
- K-B-B= kering-basah-basah
- K-N-B= kering-normal-basah
- N-K-B= normal-kering-basah
- B-K-B= basah-kering-basah
- B-N-B= basah-normal-basah
- K-K-K= kering-kering-kering

K-N-K= kering-normal-kering  
K-B-K= kering-basah-kering  
N-K-K= normal-kering-kering  
N-N-K= normal-normal-kering  
N-B-K= normal-basah-kering  
B-K-K= basah-kering-kering  
B-N-K= basah-normal-kering  
B-B-K= basah-basah-kering

### **Simulasi Optimasi Model Konseptual Waduk Kaskade Citarum**

Prinsip utama melakukan simulasi optimasi model konseptual di Waduk Kaskade Citarum yaitu mendefinisikan problem fisik dengan persamaan matematis di mana output yang diharapkan mendekati kondisi aktual atau kejadian sebenarnya.

Simulasi dilakukan secara bulanan untuk melakukan uji model yang dibuat melalui skenario yaitu skenario pertama bahwa DAS Kaskade Citarum sebagai satu kesatuan wilayah hidrologis dari hulu sampai hilir, dan skenario yang kedua adalah DAS Kaskade Citarum mempunyai rezim hidrologis dinamis yang terdiri dari tiga sub sistem wilayah hidrologi.

### **Skenario 1 Optimasi Pengelolaan Waduk Kaskade Citarum**

Validasi hasil simulasi dilakukan dengan membandingkan nilai lintasan pedoman terhadap lintasan aktualnya dengan uji korelasi Spearman (R). Pemilihan skenario terbaik berdasarkan nilai korelasi terbesar antara lintasan pedoman dengan lintasan aktualnya dan hasil Qout memenuhi kebutuhan di downstream. Tabel V.17 menunjukkan nilai korelasi antara lintasan pedoman (St pedoman) dengan lintasan aktual (St aktual) dari skenario 1 yang menggunakan debit prakiraan model kontinu dan diskrit Markov. Skenario 1 digunakan dalam simulasi optimasi di mana jenis tahunan adalah sama di setiap waduk. Sebagai contoh jika digunakan jenis tahun kering di Waduk Saguling, maka jenis tahun yang sama digunakan di Waduk Cirata dan Jatiluhur. Hasil simulasi optimasi dengan skenario 1 menunjukkan bahwa penggunaan

model prakiraan debit Kontinu menghasilkan nilai R yang besar dibandingkan penggunaan debit prakiraan Stokastik Markov.

**Tabel V.17 Nilai Korelasi Pengelolaan Waduk Optimal Skenario 1**

No	Waduk	Skenario Jenis tahun	Lintasan Pedoman	Model Prakiraan Debit	R
1	Saguling	1	Diskrit Kelas	3 Kontinu	0,9
	Saguling	1	Diskrit Kelas	3 Markov	0,87
2	Cirata	1	Diskrit Kelas	3 Kontinu	0,88
			Diskrit Kelas	3 Markov	
3	Cirata	1	Diskrit Kelas	3 Kontinu	0,83
	Jatiluhur	1	Diskrit Kelas	3 Markov	0,8
	Jatiluhur	1	Diskrit Kelas	3 Markov	0,76

### Skenario 2 Optimasi Pengelolaan Waduk Kaskade Citarum

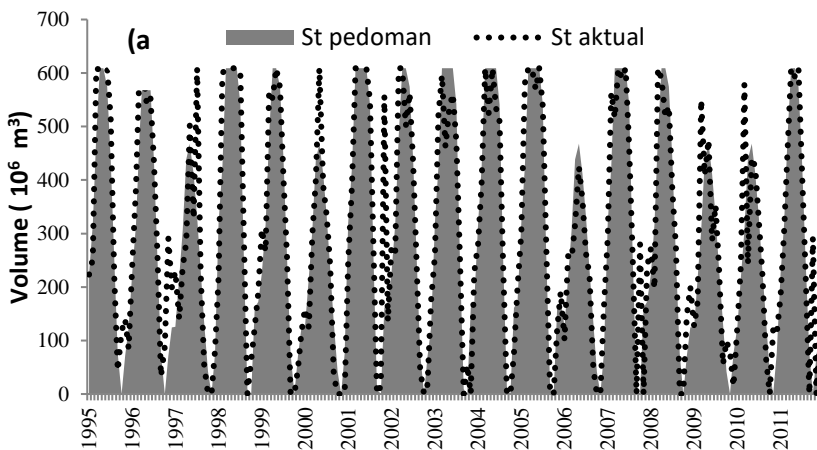
Simulasi optimasi waduk menggunakan skenario 2 menggunakan debit prakiraan Kontinu. Validasi hasil simulasi dilakukan dengan membandingkan nilai lintasan pedoman terhadap lintasan aktualnya dengan uji korelasi Spearman (R). Pemilihan skenario terbaik berdasarkan nilai korelasi terbesar antara lintasan pedoman dengan lintasan aktualnya dan hasil Qout memenuhi kebutuhan di downstream. Tabel V.18 menunjukkan nilai korelasi antara lintasan pedoman (St pedoman) dengan lintasan aktual (St aktual) dari skenario 2 yang menggunakan debit prakiraan model kontinu di Waduk Cirata dan Jatiluhur.

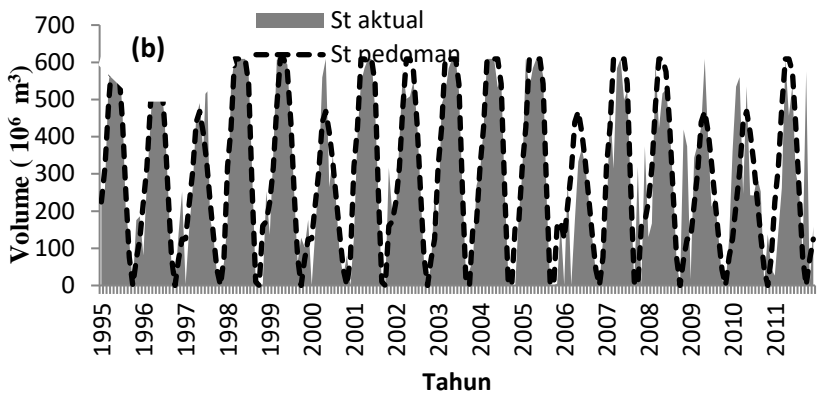
**Tabel V.18 Nilai Korelasi Pengelolaan Waduk Optimal Skenario 2**

No	Waduk	Skenario Jenis tahun	Lintasan Pedoman	Model Prakiraan Debit	R
1	Cirata	2 (N-B)	Diskrit Kelas	3 Kontinu	0,9
2	Jatiluhur	2(N-B-X)	Diskrit Kelas	3 Kontinu	0,9

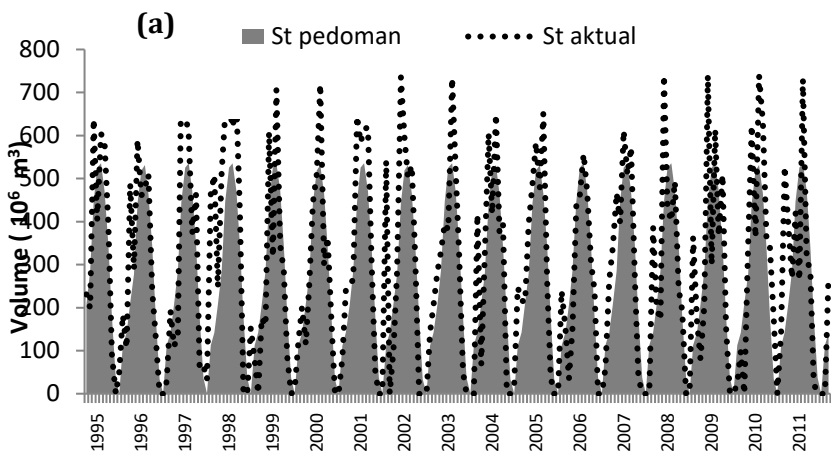
Tabel V.17 dan Tabel V.18 menunjukkan bahwa simulasi optimasi Waduk Kaskade Citarum menggunakan model prakiraan debit kontinu memberikan hasil lebih baik dibandingkan model prakiraan debit Markov. Skenario menggunakan klasifikasi jenis tahun menunjukkan bahwa skenario kedua menghasilkan hasil korelasi R yang lebih baik dibandingkan menggunakan skenario 1, ini terjadi di Waduk Cirata yaitu nilai R terbesar didapatkan dari simulasi optimasi di Waduk Cirata dengan skenario jenis tahun dan pedoman lintasan N-B (normal-basah). Sedangkan simulasi skenario 2 di Waduk Jatiluhur dengan penggunaan semua jenis pedoman lintasan menunjukkan nilai R lebih besar dibandingkan skenario 1.

Secara grafis hasil simulasi lintasan waduk optimal di waduk Saguling, Cirata dan Jatiluhur ditunjukkan pada Gambar V.11, Gambar V.12 dan Gambar V.13.

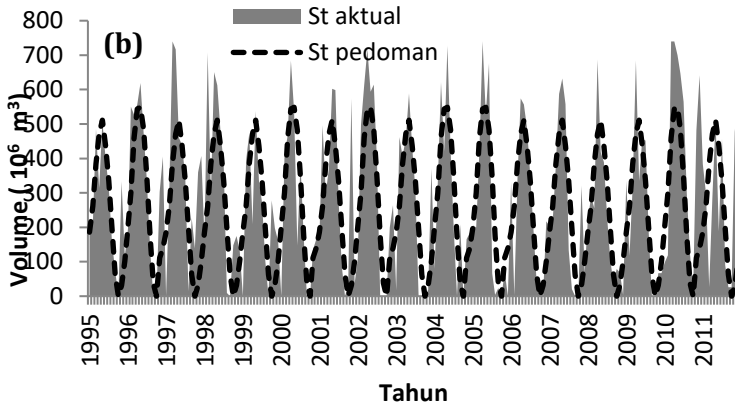




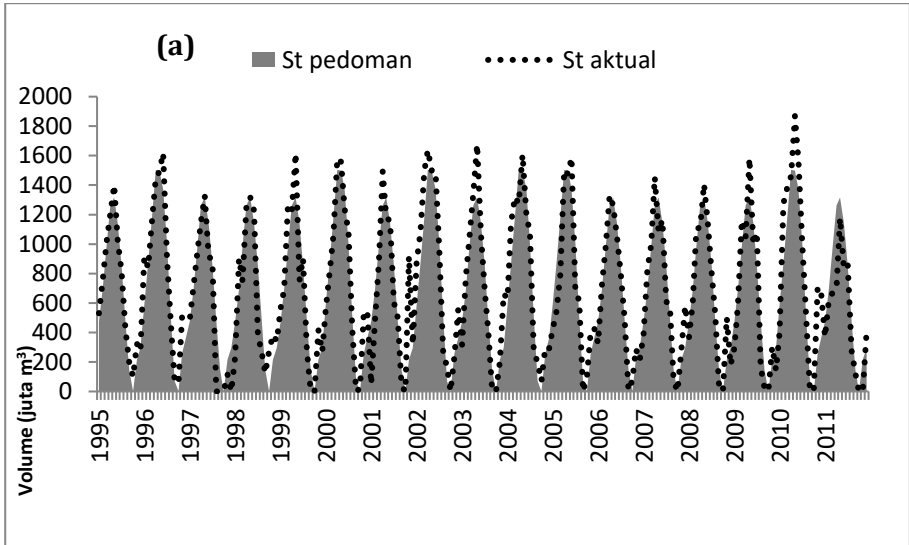
Gambar V-11 Simulasi Lintasan di Waduk Saguling Berdasarkan Metode Prakiraan Debit Kontinu (a) dan Markov (b)

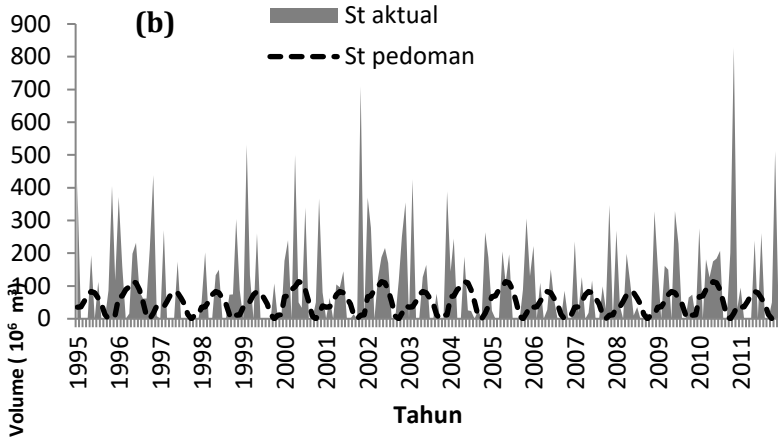






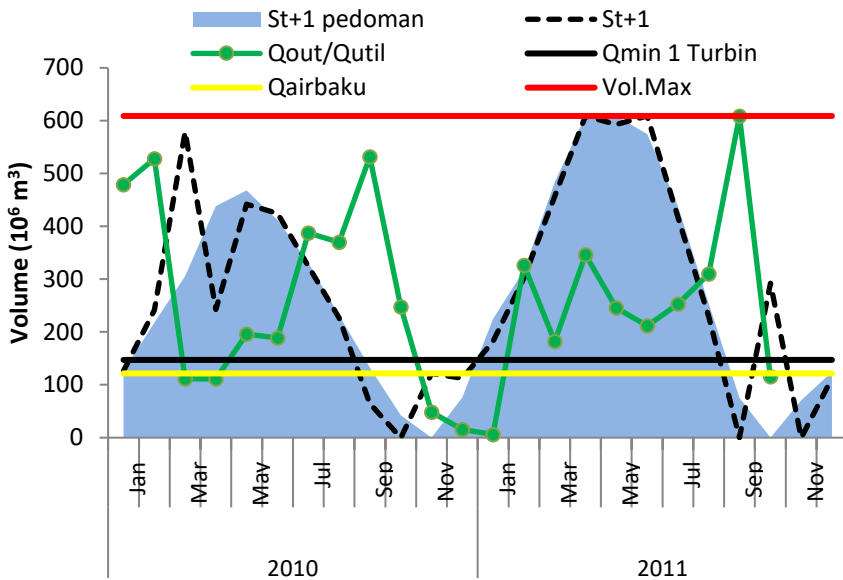
Gambar V-12 Simulasi Lintasan di Waduk Cirata Berdasarkan Metode Prakiraan Debit Kontinu (a) dan Markov (b)



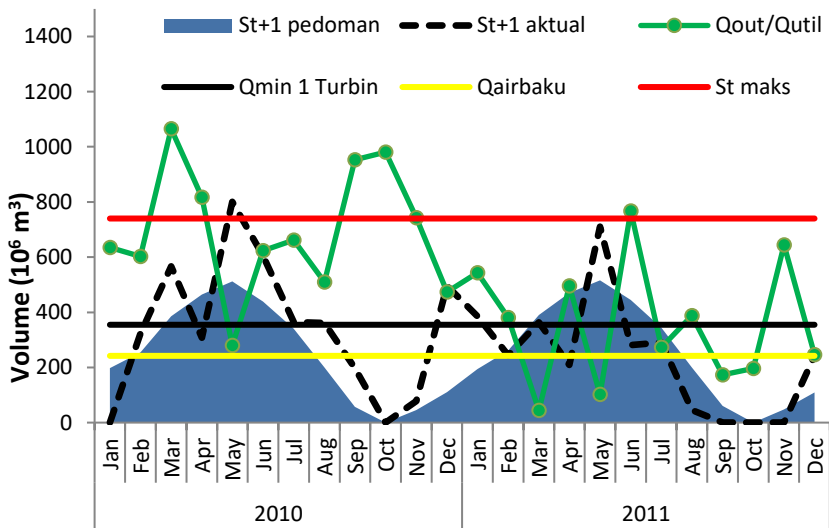


Gambar V-13 Simulasi Lintasan di Waduk Jatiluhur Berdasarkan Metode Prakiraan Debit Kontinu (a) dan Markov (b)

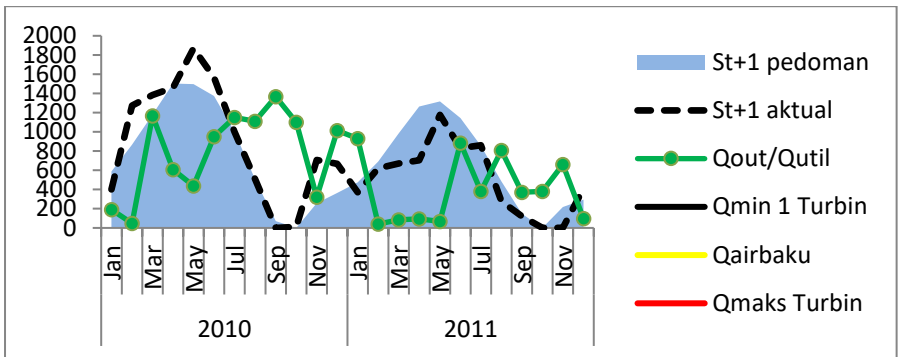
Nilai korelasi  $R$  yang terjadi pada lintasan pedoman terhadap lintasan aktual pengelolaan waduk optimal menggunakan metode kontinu terbesar terdapat rata-rata 0,9 di ketiga waduk. Ini menunjukkan bahwa metode kontinu dapat digunakan sebagai model konseptual di Waduk Kaskade Citarum. Contoh simulasi optimasi secara keseluruhan di waduk Kaskade Citarum ditunjukkan secara grafis pada Gambar V.14, Gambar V.15 dan Gambar V.16.



Gambar V-14 Simulasi Pengelolaan Waduk Saguling Optimal Metode Kontinu Contoh Kejadian Tahun 2010-2011



Gambar V-15 Simulasi Pengelolaan Waduk Cirata Optimal Metode Kontinu Contoh Kejadian Tahun 2010-2011



Gambar V-16 Simulasi Pengelolaan Waduk Jatiluhur Optimal Metode Kontinu Contoh Tahun 2010-2011

Hasil simulasi optimasi secara keseluruhan menggunakan dua skenario menunjukkan nilai korelasi yang paling besar pada skenario 2 sehingga membuktikan bahwa pengelolaan Waduk Kaskade Citarum merupakan satu kesatuan terpadu dari hulu sampai ke hilir yang bersifat dinamis di mana setiap waduk memiliki keunikan tersendiri dibuktikan dengan penggunaan pedoman lintasan yang bervariasi kelas debit tahunan mengikuti rezim hidrologis lokal di setiap waduk. Simulasi optimalisasi waduk menggunakan prakiraan debit inflow yang dibangkitkan melalui model korelasi debit-hujan telah banyak dilakukan dalam penghitungan dan penetapan pedoman operasi yang efisien (Liu dkk, 2011; Marganingrum, 2013). Gambar V.14, Gambar V.15 dan Gambar V.16 memperlihatkan bahwa hasil simulasi di Waduk Kaskade Citarum dengan periode data debit tahun 1994-2011 telah berhasil memenuhi target yaitu pertama: lintasan aktual mengikuti lintasan pedoman yang ditetapkan (nilai korelasi R lintasan pedoman terhadap lintasan aktual mendekati 1 khusus untuk Waduk Saguling dan Cirata), dan kedua: output hasil simulasi dapat memenuhi constraint di downstream dan menghindari kelebihan air yang terbuang melalui spillway (grafik debit output (Qout) yang dikeluarkan berada dalam area constraint yang ditetapkan). Simulasi yang dilakukan di Waduk Jatiluhur pada tahun 2010 (Gambar V.16) menunjukkan bahwa tidak terjadi limpasan di mana nilai Qout yang dikeluarkan berada

di bawah batas stok maksimum debit. Jika dibandingkan dengan kejadian eksisting di Waduk Jatiluhur tahun 2010 yang terjadi banyak limpasan maka model konseptual menggunakan skenario 2 dengan prakiraan debit kontinu lebih optimal digunakan di dalam pengelolaan Waduk Kaskade Citarum.

# BAB 5

## KESIMPULAN

---

### A. Kesimpulan

1. Alokasi perhitungan debit air baku untuk Waduk Kaskade Citarum dalam rangka memenuhi kebutuhan air minum di downstream untuk kawasan DKI Jakarta adalah proporsional di mana alokasi debit air baku untuk Waduk Saguling, Cirata dan Jatiluhur sebesar 46,92 m<sup>3</sup>/detik, 91,9 m<sup>3</sup>/detik dan 97,95 m<sup>3</sup>/detik. Hasil perhitungan alokasi ketersediaan air minum di Waduk Kaskade Citarum didapatkan nilai 59,02 m<sup>3</sup>/detik yang bisa digunakan sebagai debit air minum di kawasan DKI Jakarta dan sekitarnya.
2. Kebijakan pengoperasian Waduk Kaskade Citarum dilakukan berdasarkan pedoman pengoperasian waduk (*rule curve*) dengan 3 (tiga) pola lintasan yaitu kering, normal dan basah. Pola lintasan digunakan secara deterministik didapatkan kondisi terjadi kelebihan air ketika menggunakan pola lintasan kering dan normal sedangkan kondisi kekurangan air jika menggunakan lintasan basah sehingga pengelolaan deterministik belum tepat digunakan untuk pengelolaan waduk jangka panjang yang membutuhkan keoptimalan pengoperasian dalam menjamin kebutuhan air untuk menghasilkan energi listrik (PLTA) dan sumber air baku. Simulasi model deterministik di Waduk Kaskade Citarum menggunakan pola normal secara umum menunjukkan hasil optimal dibandingkan pola lintasan tahun kering dan basah (kisaran R = 0,64).
3. Hasil perhitungan matriks transisi Markov untuk menetapkan klasifikasi debit tahunan di Waduk Kaskade Citarum

menunjukkan bahwa setiap DAS dan waduk adalah unik dan merupakan fungsi dari ruang dan waktu.

4. Pengelolaan Waduk Kaskade Citarum secara optimal didasarkan pendekatan simulasi waduk menggunakan peramalan debit masa depan (metode Diskrit Markov dan Kontinu) menunjukkan bahwa metode Kontinu memberikan hasil kalibrasi lebih baik daripada metode diskrit Markov di mana nilai kalibrasi dengan debit historis (R) sebesar 0,9 untuk Waduk Saguling, 0,9 untuk debit lokal Cirata dan 0,9 untuk debit lokal Jatiluhur.
5. Simulasi optimasi dilakukan atas 2 skenario yaitu pertama bahwa DAS kaskade Citarum sebagai kesatuan sistem hidrologis dari hulu sampai hilir, dan skenario yang kedua adalah DAS kaskade Citarum mempunyai sistem hidrologis dinamis yang terdiri dari tiga sub sistem wilayah hidrologis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa skenario pertama dan kedua memberikan hasil optimum di Waduk Saguling dan Waduk Cirata. Skenario kedua simulasi waduk optimal di Kaskade Citarum membuktikan bahwa hipotesis penelitian yang menyatakan optimalisasi pola operasi Waduk Kaskade Citarum sebagai satu satuan manajemen terpadu dari hulu sampai hilir (waduk Saguling, Cirata dan Jatiluhur) terbukti jika setiap waduk diperlakukan sebagai sub hidrologis yang unik.

## **B. Saran Penelitian Lanjutan**

Dalam rangka pengembangan model optimasi pengelolaan Waduk Kaskade Citarum sebagai sumber air baku untuk infrastruktur air minum DKI Jakarta diperlukan penelitian lanjutan dengan memperhatikan aspek:

1. Kajian yang mendalam tentang daya dukung kapasitas waduk terkait dengan beban pencemaran, tingkat sedimentasi dan bioindikator.
2. Aspek ekonomi, sosial, institusional dan teknologi rekayasa sebagai faktor yang berkontribusi di dalam konservasi lingkungan perairan Waduk Kaskade Citarum perlu dikaji lebih dalam keterkaitannya dengan metode program dinamis.



# DAFTAR PUSTAKA

---

- Ali, F. 2007 : Implementasi Konsep IUWRM untuk Keterpaduan pengelolaan Sumber Daya Air dan Penanganan Kemacetan Lalu Lintas di Wilayah Metropolitan DKI Jakarta, (<http://bebasbanjir2025.wordpress.com/10-makalah-tentang-banjir-2/firdaus-ali/diunduh> pada tgl 26 April 2010).
- Arwin, Salahuddin. 1996. Pengelolaan Optimal Stokastik Aktual Dengan Metode Program Dinamik Bellman (Kasus PLTA Saguling), *Prosiding Seminar Ekonomi Pengembangan Sumber Air Baku Untuk Mendukung Program Air Bersih*, Yogyakarta.
- Asdak, C. 2007. *Hidrologi Dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*, Gajah mada university press, cetakan keempat Juli, ISBN 979-420-561-3.
- Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Daerah Jawa Barat dan Puslitbang Sumber Daya Air. 2001. *Perhitungan Daya Tampung dengan Pemodelan Kualitas Air*. Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Daerah Jawa Barat dan Pusat Penelitian Pengembangan Sumberdaya Air, Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. Bandung.
- Bakeri, Samsul., M. Januar J.P., Etty Riani, Surjono H. Sutjahjo. 2012. Analisis MDS (Multi Dimensional Scaling) Untuk Keberlanjutan Pengelolaan Air Lintas Wilayah Studi Kasus DKI Jakarta, *Jurnal Teknik Lingkungan*, Vol.13 No.1, Hal 13-23.
- Balai Riset Pemulihan Sumber Daya Ikan Kementrian Kelautan dan Perikanan. 2009. *Biolimnologi dan Hidrologi Waduk*



*Kaskadee Sungai Citarum, Jawa Barat. Laporan Tahunan Akhir.*

- Brainwood, M. A., Burgin, S., Maheswari, B. 2004. Temporal Variations in Water Quality of Farm Dams : Impacts of Land Use and Water Sources, *Journal Agricultural Water Management*, 70,151-175.
- Cabecinhaa, Edna., Martinho Lourenc, João Paulo Mourac, Miguel Ângelo Pardald, dan João Alexandre Abrala. 2009. A multi-scale approach to modelling spatial and dynamic ecological patterns for reservoir's water quality management, *Jurnal Ecological Modelling*, 220, 2559-2569.
- Chao, Xiaobo., Yafei Jia, F. Douglas Shields Jr, Sam S.Y Wang, dan Charles M. Cooper. 2007. Numerical Modelling of Water Quality and Sediment related Processes, *Journal Ecological Modelling*, 201, 385-397 p.
- Chu, Hone-Jay., Liang-Cheng Chang, Yu-Pin Lin, Yung-Chieh Wang, dan Yu-Wen Chen. 2009. Application of System Dynamics on Shallow Multipurpose Artificial Lakes: A Case Study of Detention Pond at Tainan, Taiwan, *Jurnal Enviromental Model Assesment*, DOI 10.1007/s 10666-009-9196-4, Springer Science media.
- Delpa, I., Jung, A.V., Baures, E., Clement, M., dan Thomas, O. 2009. Impact Of Climate Change On Surface Water Quality In Relation To Drinking Water Production, *Journal Enviroment International*, Vol.35, page 1225-1233.
- Devi, R., Esubalew Tesfahune, Worku Legesse, Bishaw Deboch dan Abebe Beyene. 2008. Assesment of Siltation and Nutrient Enrichment of Gilgel Bibe Dam, Southwest Ethiopia, *Journal Biosource Technology*, 99, 975-979 p.
- Effendi, Hefni. 2003. *Telaah Kualitas Air Bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan*, Penerbit Kanisius, Yogyakarta.
- Eiji, K., Takehiko Fukushima dan Hideo Harasawad. 2007. A Modeling Approach To Forecast The Effect Of Long-Term

- Climate Change On Lake Water Quality, *Jurnal ecological modelling*, 209, 351–366.
- Eun Hye Na dan Seok Soon Park. 2006. A Hydrodynamic And Water Quality Modeling Study Of Spatial And Temporal Patterns Of Fitoplankton Growth In A Stratified Lake With Buoyant Incoming flow. *Jurnal ecological modelling*, 199, 298–314.
- Fadholi, Akhmad. 2013. Studi Dampak El Nino dan Indian Ocean Dipole (IOD) Terhadap Curah Hujan di Pangkal Pinang, *Jurnal Ilmu Lingkungan*, Volume 11 Issue 1, pp 43-50.
- Guo, H.C., L. Liu, Huang, G.H., Fuller, G.A., Zou, R., dan Yin. 2001. A System Dynamics approach for Regional Environmental Planning and Management : A Study for the Lake Erhai Basin, *Journal of Enviromental Management*, 61, 93-111.
- Gupta, Indrani., Shivani Onage and Rakesh Kumar. 2009. Study Of Variations In Water Quality Of Mumbai Coast Through Multivariate Analysis Techniques, *Indian Journal of Marine Sciences*, Vol.38 (2) June 2009, pp 170-177.
- Hach. 2003. *Water Analysis Handbook (Fourth Edition)*, Volume 2, Hach Chemical Company, Loveland, Colorado.
- Hadihardaja, Iwan.K. 2006. Analisis Keandalan Pengoperasian Optimal Waduk Kaskade Citarum Untuk Pemenuhan Kebutuhan Air Baku, *Jurnal Desain dan Konstruksi*, Volume 5 No 1,21-35.
- Jorgensen, S.E dan R.A Vollenweider (editors). 1988. *Guidelines of lake management, Volume I, Principle of lake management*, International Lake Enviroment Comitte, United Nations Environment Programme.
- Jothiprakash, V., R.B Magar. 2012. Multi-time-step Ahead Daily and Hourly Intermittent Reservoir Inflow Prediction By Artificial Intelegent Technique Using Lumped and Distributed Data, *Journal Of Hydrology*, Vol. 450-451, pp 293-307.
- Kang, B., Seung Jong Lee, Dong-Hyun Kang, dan Young-Oh Kim. 2007. A Flood Risk Projection for Yongdam Dam Against Future Climate Change, *Journal of hydro-environment Research*, I, 118-125 p.

- Kodoatie, Robert J., Roestam Sjarief. 2005. *Pengelolaan Sumber Daya Air Terpadu*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Koswara, Bachrulhajat. 2011. Restorasi Waduk Saguling melalui Aplikasi Metode Ekoteknologi, *Jurnal Akuatika*, Volume II Nomor 2/September 2011, Hal 126-134.
- Kranz, N., Timo Menniken, dan Jochen Hinkel. 2010. Climate Change Adaptation Strategies in The Mekong and Orange-Senqu basins : What Determines The State-of-Play?, *Journal Enviromental Science & Policy*, volume 13, page 648-659.
- Labadie, J.W. 2004. Optimal Operation Of Multireservoir System : State Of The Art Review, *Journal Of Water Resources Planning And Management*, Vol.130 (2), pp 93-111.
- Lajoie, F., Ali A.A, Andre G.R. dan Mhamed Me. 2007. Impacts of Dams on Monthly Flow Characteristic.The Influence of watershed Size and Seasons, *Journal of Hydrology*, volume 334, page 423-439.
- Liu, Pan., Shenglian Guo, Xiaowei Xu dan Jionghong Chen. 2011. Derivation Of Aggregation Based Joint Operating Rule Curves For Cascade Hydropower Reservoirs, *Journal Water Resources Management*, Vol 25, pp 3177-3200.
- Machbub, Badruddin. 2010. Model Perhitungan Daya Tampung Beban Pencemaran Air Danau dan Waduk, *Jurnal Sumber Daya Air*, Vol.6 No 2, hal.103-204.
- Mantel, K.S., Denis, A.H., dan Nikite, W.J.M. 2010. Ecological Impacts of Small Dams On South African Rivers Part 1: Drivers of change- Water Quantity and Quality, *Journal Water SA*, Vol.36 no 3, ISSN 1816-7950 (on-line).
- Marganingrum, Dyah. 2013. Manajemen Sumberdaya Air Terpadu Waduk Saguling dalam Rangka Pengembangan SPAM Regional KSN Cekungan Bandung. Disertasi. Program Studi Teknik Lingkungan Institut Teknologi Bandung.
- Matteau, M., Ali A.A, dan Mohamed M. 2009. Aplication of Multivariate Statistical Analysis Methods to The Dam

Hydrologic Impact Studies, *Journal of Hydrology*, volume 371, page 120-128.

- Matthies, M., Berlekamp, J., Lautenbach, S., Grafa, dan Reimerba. 2006. System Analysis Of Water Quality Management For The Elbe River Basin, *Jurnal Environmental Modelling & Software*, 21 ,1309- 1318 p.
- Moss, Brian. 2014. Discussion Article Models From Ecohydrology And Hydrobiology Can Inform Our Human Future, *Journal Ehydrology & Hydrobiology*, Volume 14, pp 21-32.
- Mustapha, Moshood Keke. 2008. Assesment Of Water Quality Of Oyun Reservoir, Offa, Nigeria, Using Selected Physico-Chemical Parameters, *Turkish Journal of fisheries and aquatic sciences*, 8 : 309-319.
- Nakashima, S., Yoshiro ,Y., dan Kuninao, T. 2007. Characterization of The Water Quality od Dam Lakes on Shikoku Island, Japan, *Jurnal Limnology*, volume 8, page 1-22.
- Nastiti, A.S., Krismono dan Endi S. K. 2001. Dampak Budi Daya Ikan dalam Keramba Jaring Apung terhadap Peningkatan Unsur N dan P di Perairan Waduk Saguling, Cirata dan Jatiluhur, *Jurnal Penelitian Perikanan Indonesia*, Vol.7 nomor 2, 22-27.
- Nastiti, A.S., Siti Nuroniah, Sri Endah Purnamaningtyas dan Endi Setiadi Kartamihardja. 2001. Daya dukung perairan Waduk Jatiluhur untuk Budi Daya Ikan dalam Keramba Jaring Apung, *Jurnal Penelitian Perikanan Indonesia*, Vol.7 nomor 2, 14-20.
- Navarro, Eugenio Molinna., Dennis Trolle, Silvia martinez Perez, Antonio Sastre Merlin, Erik Jeppesen. 2014. Hydrological and water quality impact assesment of mediterranean limno-reservoir under climate change and land use management scenarios, *Journal of hydrology*, Volume 509, pp 354-366.
- Nhiwatiwa, T., Marshal, B.E. 2007. Water Quality and Plankton Dynamics in Two Small Dams in Zimbabwe, *African Journal of Aquatic Science*, 32, pp 139-151.

- Nuraeni, Yeni. 2011. Metode Memperkirakan Debit Air yang Masuk ke Waduk dengan Metode Stokastik Chain Markov (Contoh Kasus: Pengoperasian Waduk Air Saguling), *Jurnal Teknik Sipil*, Vol.18 No.2 Agustus, hal.157-170.
- Park, J.H., Lei Duan, Bomchul Kim, Myron J.M., dan Hideaki Shibata. 2010. Potential Effects Of Climate Change and Variability on Watershed Biogeochemical Processes and Water Quality in Northeast Asia, *Journal Enviroment International*, 36, 212-225 p.
- Perum Jasa Tirta II. 2007. *Studi Keramba Jaring Apung Tahap II Waduk Ir.H.Djuanda*, Laporan Akhir.
- Piehler, M.F., Dyble, J., Moisaner, P.H., Chapman, A.D., Hendrickson dan Paerl. 2009. Interactions Between Nitrogen Dynamics And The Fitoplankton Community In Lake George, Florida, USA. *Journal Lake Reservation Management*, 25, 1-14 p.
- Popovicova, J. 2009. Water Quality Assesment and Ecoregional Comparison of A Reservoir in East Central Indiana, *Journal Lake And Reservoir Management*, volume 25, 155-166.
- Pujiastuti, Peni., Bagus Ismail dan Pranoto. 2013. Kualitas dan Beban Pencemaran Perairan Waduk Gajah Mungkur, *Jurnal Ekosains*, Volume V No.1, Maret, hal 59-75.
- Purnomo, K., dan Endi, S. K. 2005. Pengelolaan Secara Terpadu Perikanan Waduk Kaskadee di DAS Citarum, *Workshop of Culture, Capture Conflicts: Sustaining Fish Production and Livelihood in Indonesia Reservoirs* 18-20 Oktober 2005, Departemen Kelautan dan Perikanan, ACIAR dan NACA, Bandung, 13 p.
- Radojevic, M., Bashkin, V.N. 1999. *Practical Enviromental Analysis*, Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Ramirez-Zierold, Jorge, A., Martin Merino-Ibarra, Emiliano Monroy-Rios, Monica Olson, Fermin, S.C, Margarita E. G., dan Gloria Vilaclara. 2010. Changing Water, Fosforus And Nitrogen Budget For Valle De Bravo Reservoir, Water Supply

- For Mexico City Metropolitan Area, *Journal Lake and Reservoir Management*, 26, 23-24 p.
- Rani, Deepti., Maria Magdalena Moreira. 2010. Simulation-optimization Modelling : A Survey and Potential Application In Reservoir System Operation, *Journal Water Resources Management*, Vol.24, pp 1107-1138.
- Rhamdani. 2009. *Pengaruh Perubahan Iklim Terhadap Pengelolaan Waduk PLTA Saguling Di Das Citarum Hulu*. Tesis. Program Magister Teknologi Manajemen Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan. Institut Teknologi Bandung.
- Rizka, M., Hilda L, dan Asep M. 2008. Analisa Daya Dukung Waduk Dilihat Dari Hubungan Parameter Fisika-Kimia Air Terhadap Parameter Nutrien Menurut Perbedaan Musim, *Prosiding Seminar Geoteknologi Kontribusi Ilmu Kebumihan dalam pembangunan berkelanjutan*, Puslit Geoteknologi LIPI.
- Sabar, Arwin. 2009. Tren global pembangunan infrastruktur sumber daya air yang berkelanjutan, *Makalah Diskusi Pakar Perumusan Kebijakan Eco-Efficient Water Infrastructure Indonesia*, Bappenas, Jakarta.
- Sadahiro, Yukio. 2006. Advanced Urban Analysis Spatial Analysis using GIS, Lecture Course #716-26 E, Associate Professor of the Department of Urban, Engineering, University of Tokyo.
- Sanchez-Roman, R.M., Marcos, V. F., dan Alba M.G. 2010. Water Resource Assesment at Piracicaba, Capivari and Juandiai River Basins : A Dynamic System Approach, *Journal Water Resource Management*, 24, 761-773 p.
- Santhanam, H., dan Amal Raj. 2010. Carlson Index, A Poor Cursor Of Trophic Status Assessment Of Pulicat Lagoon, Southeast Coast Of India, *International Journal of Enviromental Studies*, 67 :1, 17-25.
- Santosa, Singgih. 2010. *Statistik Multivariat Konsep dan Aplikasi dengan SPSS*. Penerbit PT Elex Media Computindo, Kelompok Gramedia, Jakarta.

- Sukimin. 2005. Kualitas Lingkungan Perairan Waduk Kaskade Sungai Citarum, *Workshop of Culture, Capture Conflicts: Sustaining Fish Production and Livelihood in Indonesia Reservoirs*, 18-20 Oktober 2005, Departemen Kelautan dan Perikanan, ACIAR dan NACA, Bandung, 14 p.
- Sulis, Andrea. 2014. Improved Implicit Stochastic Optimization Technique For Multireservoir Water System Under Drought Conditions, *Proceedings 7th International Enviromental Modelling and Software Society*, Sandiego, CA, USA.
- Suwignyo. 1996. *Ekosistem Perairan Pedalaman, Tipologi dan Permasalahannya*, Kuliah Kursus Penyusunan Amdal XIX, PPSML-LP UI, Jakarta.
- Syariman, Petrus., Agus Heru. 2011. Extreme Weather Impacts On Citarum Cascade Reservoir Operation Pattern, *Jurnal Tenik Hidraulik, Puslitbang Sumber Daya Air*, Volume 2 No 1.
- Tamim, M. Z. A. 2008. Kebijakan Strategis Pengembangan Air Minum, Di Kawasan Andalan Kasus Jagodetabek, *Makalah*, Direktorat PAM, Dirjen Ciptakarya PU.
- Tasrif, M. 2007. *Analisis Kebijakan Menggunakan Model System Dynamics*. Program Magister Studi Pembangunan. ITB. Bandung.
- Taufik. 2008. *Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Hulu Dan Pengaruhnya Terhadap ketersediaan Air Dengan Pemodelan System Dinamics Studi Kasus DAS Hulu Bendungan Sumi Kabupaten Bima - NTB* . Tesis. Program Studi : Studi Pembangunan. ITB.
- Teegavarapu, R. S. V. 2010. Modelling Climate Change Uncertainties in Water Resources Management Models, *Journal Enviromental Modelling & Software*, 25, 1261-1265.
- Tontowi. 2004. Penelitian Kualitas Air Waduk Jatiluhur Sebagai Sumber Air Baku Air Minum dan Penurunan Kualitasnya Setelah mengalir Melalui Saluran Tarum Barat, *Buletin Pusair Media informasi Kegiatan Penelitian Keairan*, Vol.XIII nomor 40, Juli, 2-10.

- Wangsaatmadja, S. 2004. *Dampak Konversi Lahan Terhadap Rezim Aliran Air Permukaan serta Kesehatan Lingkungan Suatu Analisis Kasus DAS Citarum Hulu*. Disertasi Program Doktor. Institut Teknologi Bandung.
- Winz, I., Gary Brierley dan Sam Trowsdale. 2009. The Use of System Dynamics Simulation in Water Resources Management, *Journal Water Resource Management*, 23, 1301-1323.
- Wurbs, Ralph A. 1996. *Modelling & Analysis Of Reservoir System Operations*, Prentice-Hall, Inc, USA.
- Yeh, William W-G. 1985. Reservoir Management and Operations Models : A State of The Art Review, *Journal Water Resources*, Vol.21 No 12, pp 1797-1818.
- Yin , Xin-An, Zhi-Feng Yang, Geoffrey E.Petts, G. Mathias Kondolf. 2014. A Reservoir Operating Method For Riverine Ecosystem Protection, Reservoir Sedimentation Control and Water Supply, *Journal of Hydrology*, Vol.512, pp 379-387.
- Zhang, X.H., Zhang, H.W., Chen, dan Zhao, X.H. 2008. Water Resources Planning Based on Complex System Dynamics : A Case Study of Tianjin City, *Jurnal Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 13, 2328-2336 p.
- Zhou, Yanlai., dan Shenglian Guo. 2013. Incorporating Ecological Requirement Into Multipurpose Reservoir Operating Rule Curves For Adaptation To Climate Change, *Journal Of Hydrology*, Vol 498, pp 153-164.







# DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN	Nama	Pemakaian Pertama Kali
DAS	Daerah Aliran Sungai	1
WWF	World Wide Fund	1
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	1
IPA	Instalasi Pengolahan Air	2
BR-PAM	Badan Regulator Pelayanan Air Minum	3
PLTA	Pembangkit Listrik Tenaga air	3
KJA	Keramba Jaring Apung	3
BPWC	Badan Pengelola Waduk Cirata	3
SNI	Standar Nasional Indonesia	4
TSS	Total Suspended Solid	11
TOM	Total Organic Matter	11
BOD	Biochemical Oxygen Demand	11
COD	Chemical Oxygen Demand	11
TMA	Tinggi Mula Air	12
TSI	Trofic State Index	13
DO	Dissolved Oxygen	25
GPS	Global Positioning System	25

AAS	Atomic Absorbancy Spectrofotometer	25
TP	Total fosfat	27
TN	Total Nitrogen	27
K-S	Kolmogorov-Smirnov	29
ZOM	Zona musim	42
DJF	Desember-Januari- Februari	42
JJA	Juni-Juli-Agustus	42
SOP	Standard Operation Procedure	67
BBWS	Balai Besar Wilayah Sungai Citarum	67
P3B	Pusat Pengendalian dan Pengaturan Beban	70
RESOP	Reservoir Operation	70
GAC	Gestion Avenir Connu	71
GAA	Gestion Avenir Aleatoire	71
R5	Rencana 5	85
BPLHD	Badan Pengelolaan Hidup Daerah	123
TDS	Total Dissolved solid	127
MSA	Measure sampling adequacy	136

## LAMBANG

$PO_4$	orthofosfat	3
$NO_3$	Nitrit	3
$H_2S$	Asam sulfida	3
Pb	Timbal	4
Hg	Merkuri	4
pH	Derajat Keasaman	12
N	Nitrogen	13
P	Fosfat	13
$X^2$	Chi Kuadrat	29
k	Jumlah nilai variable yang berbeda atau jumlah kelas	30
$O_i$	Frekuensi hasil pengamatan	30
$E_i$	Frekuensi yang diharapkan	30
n	Jumlah data	30
$P_i$	Peluang dari distribusi teoritis	30
$F_o(X)$	suatu fungsi distribusi peluang kumulatif yang ditentukan atau distribusi teoritis	31
$S_N(X)$	adalah distribusi kumulatif sampel, maka diharapkan untuk setiap harga X	31
m	Nomor urut kejadian	32
N	Jumlah data observasi	32
$P(X \leq x)$	peluang terjadinya kejadian yang nilainya lebih kecil atau sama dengan x	32
T	Periode Waktu	33
Qrj	debit rata-rata pada kelas debit kering, normal	95
	dan basah	
Qs	Debit yang masuk Saguling	105
$Q_{LC}$	Lokal Cirata	105
$Q_{LJ}$	Lokal Jatiluhur	105
$Q_{St+1}$	debit Saguling	105
$Q_{LCt+1}$	debit lokal Cirata	105
$Q_{Lj+1}$	debit lokal Jatiluhur	105
$Q_{Nt+1}$	debit terukur di pos Nanjung	105
$P_{Xt}$	curah hujan dari 11 pos hujan	105

$P_{Xt}$	curah hujan dari 7 pos curah hujan	105
R	Koefisien determinasi regresi	108
$PM_iN_j$	Jumlah pedoman lintasan setiap sub sistem	110
K	Kering	114
N	Normal	114
B	Basah	114
$S_{t+1pedoman}$	lintasan pedoman yang merupakan variabel yang ditetapkan (deterministik) dan ditunjukkan sebagai stok volume waduk atau TMA pada bulan mendatang (t+1)	116
$S_{t aktual}$	stok volume waduk atau TMA pada bulan eksisting (t)	116
$Q_{in-t}$	debit masuk waduk yang merupakan variabel acak	116
$Q_{out-t}$	debit turbin yang merupakan variabel yang dikomandokan atau diharapkan untuk menghasilkan targetenergi dan kebutuhan downstream	116
R	kontrol resiko banjir di downstream, %	116
$Q_{am}$	Kebutuhan air di downstream, m <sup>3</sup>	116
$Q_{Rt}$	aliran kebutuhan air di downstream dalam periode waktu t, m <sup>3</sup> /detik	116
$Q_{Xt}$	Jumlah outflow waduk dalam periode t, m <sup>3</sup> /detik	116
$P_t$	Daya output waduk dalam periode waktu t, kW	116
$NH_3$	Amoniak	127
$NO_2$	Nitrat	127

# TENTANG PENULIS

---



Dr. Lieza Corsita, S.T., M.T., lahir di Jayapura, 30 November 1974 bertempat tinggal di kelurahan Hedam distrik Heram Kota Jayapura. Penulis adalah Dosen dan praktisi lingkungan dengan pengalaman mengajar lebih dari dua dekade di Universitas Sains dan Teknologi Jayapura (USTJ) sejak tahun 1998 di Program studi Teknik Lingkungan S-1. Pendidikan formal sarjana ditempuh di Institut Teknologi Bandung, lulus tahun 1998 dan setahun kemudian melanjutkan magister teknik di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dan lulus di tahun 2002. Penulis mendapatkan gelar Doktor ditempuh di Institut Teknologi Bandung tahun dan lulus di tahun 2015. Selama menjadi dosen, penulis banyak menerbitkan artikel dan publikasi yang berkaitan dengan bidang ilmu Teknik Lingkungan yang berkaitan dengan penyediaan air bersih untuk air minum, pencemaran kualitas perairan, kajian limbah B3, teknologi tepat guna, dan energi terbarukan.

## Monograf

# Pengelolaan Waduk Kaskade Citarum Untuk Pengembangan Air Baku Infrastruktur Air Minum DKI Jakarta

Kawasan Jabotabek membentuk satu kawasan andalan sebagai pusat adalah DKI Jakarta, dimana transformasi Kota Jakarta menjadi kota jasa telah memacu aktifitas ekonomi membutuhkan lahan rumah tinggal, sarana penunjang gedung tinggi (perkantoran, hotel, universitas, transportasi, jasa industri lainnya), perkembangan tersebut berimpas di kawasan sekelilingnya yaitu Tangerang, Bekasi dan Bogor dan Depok Perkembangan aktifitas DKI Jakarta seiring pertambahan penduduk, membutuhkan pelayanan infrastruktur air minum sedangkan kapasitas pelayanan Infrastruktur air minum terpasang  $18,025 \text{ m}^3/\text{detik}$  (tahun 2007), tidak dapat melayani laju permintaan air Kota Jakarta sebagai kota jasa.

Kualitas air secara tidak langsung dipengaruhi tinggi muka air yang merupakan peubah yang diamati secara langsung dan digunakan untuk menduga volume waduk. Balai Riset Pemulihan Sumber Daya Ikan melaporkan bahwa TMA (tinggi muka Air) di Waduk Jatiluhur maksimum terjadi pada bulan Juni dan terendah pada bulan November. Kecerahan terendah terjadi di bulan Agustus dan September (kondisi TMA menurun). Derajat keasaman (pH) berkisar 6,5 - 9,5 dimana terendah pada bulan Januari (kondisi TMA rendah) dan tertinggi pada bulan Oktober (kondisi TMA menurun).

Hasil simulasi optimasi secara keseluruhan menggunakan dua skenario menunjukkan nilai korelasi yang paling besar pada skenario 2 sehingga membuktikan bahwa pengelolaan Waduk Kaskade Citarum merupakan satu kesatuan terpadu dari hulu sampai ke hilir yang bersifat dinamis dimana setiap waduk memiliki keunikan tersendiri dibuktikan dengan penggunaan pedoman lintasan yang bervariasi kelas debit tahunan mengikuti rezim hidrologis lokal di setiap waduk. Simulasi optimalisasi waduk menggunakan prakiraan debit inflow yang dibangkitkan melalui model korelasi debit-hujan telah banyak dilakukan dalam penghitungan dan penetapan pedoman operasi yang efisien.



Penerbit Insan Cendekia Mandiri  
Perumahan Gardena Misa 2 Blok F03,  
Koto Baru, Kec. Kubung, Solok  
Email : penerbitbic@gmail.com  
Website : www.insancendekiamandiri.co.id



**IKAPI**  
IKATAN PENERBIT INDONESIA

