ISSN 0853-2982

JURNAL TEKNIK SIPIL
Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

Model Prakiraan Debit Air dalam Rangka Optimalisasi Pengelolaan Waduk Saguling – Kaskade Citarum

Mariana Marselina
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132
E-mail: mariana.marselina@yahoo.com

Arwin Sabar
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132
E-mail: arwinsabar@yahoo.com

Indah Rachmatiah Siti Salami
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132
E-mail: indahrss@yahoo.com

Dyah Marganingrum
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Jalan Cisitu No 21/154D Bandung 40135
E-mail: dmarganingrum@yahoo.com

Abstrak

Peningkatan laju pertumbuhan penduduk dan industri mendorong peningkatan kebutuhan air baku dan energi listrik. Salah satu penyedia kebutuhan energi listrik di wilayah Jawa, Madura, Bali adalah Waduk Saguling. Asupan air bagi Waduk Saguling adalah Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum Hulu dengan luas daerah tangkapan sebesar 2.340,88 km^2. Waduk Saguling juga merupakan salah satu waduk yang membentuk waduk kaskade Citarum yang terdiri dari Waduk Saguling, Cirata, dan Jatiluhur. Data debit aliran mempunyai peranan penting dalam pengelolaan dan pengembangan sumberdaya air suatu DAS. Dalam penelitian ini dilakukan perbandingan model bangkitan debit inflow Waduk Saguling menggunakan metode korelasi spasial (hujan dan debit) atau metode kontinu serta dengan metode diskrit Markov yang menggunakan prinsip model stokastik Markov 3 kelas. Data debit inflow Waduk Saguling yang digunakan adalah data debit dari tahun 1986-2013. Pada metode korelasi spasial diperoleh kombinasi tipe $PPPQ_{t-1}$ memiliki nilai korelasi sebesar 0,86 sedangkan untuk metode diskrit Markov diperoleh nilai korelasi sebesar 0,804. Dalam rangka optimasi pengelolaan waduk ditemukan bahwa pengelolaan waduk dengan model kontinu memberikan nilai korelasi lebih tinggi antara lintasan pedoman dan lintasan aktual di Waduk Saguling yakni sebesar 0,940 jika dibandingkan dengan metode diskrit Markov yang memberikan korelasi antara lintasan pedoman dan lintasan aktual Waduk Saguling sebesar 0,852.

Kata-kata Kunci: *Metode diskrit Markov, metode korelasi spasia, optimasi pengelolaan waduk, prakiraan debit.*

Asbtract

Enhancement of population and industry have lead to an enhancement demand for raw water and electrical energy. One of the electricity provider in Java-Madura-Bali is Saguling Reservoir. The water intake of Saguling is upstream Citarum watershed with an area of 2340.88 km^2. Saguling is also one of the reservoirs that form Citarum Cascade consisting of Saguling, Cirata and Jatiluhur. Data of reservoir discharge has an important role in the management of water resources. Discharge forecasting approach taken in this research was the spatial correlation method (rainfall and discharge) and discrete Markov method that used the principle of stochastic Markov model of 3 classes. Saguling inflow discharge that used in this research was data from 1986 to 2013. In the spatial correlation method, combination type of $PPPQ_t$ obtained a correlation value of 0.86 while for discrete Markov method obtained the correlation value of 0.804. In order to optimization of reservoir management, this research found that the reservoir management with continuous model provides a higher correlation values between the actual trajectory and the guidelines trajectory in Saguling which amounted to 0,940 compared to discrete Markov method that provides a correlation between the actual trajectory and the trajectory guidelines Saguling at 0.852.

Keywords: *Discrete Markov method , forecast discharge, spatial correlation method.*

1. Pendahuluan

Alokasi air adalah kekhawatiran di negara berkembang di mana sumber daya air yang terbatas yang terbatas dan permintaan yang lebih besar dengan lebih banyak pihak (Read *et al*., 2014). Waduk menyediakan pasokan air, perlindungan banjir, dan manfaat pembangkit listrik tenaga air (Null, *et al*., 2014). Keberadaan waduk dapat membuat penggunaan sumber daya air untuk masyarakat manusia lebih efisien sehinggga pengoperasian waduk secara optimal, dianggap penting. Sebuah model optimal

Diterima 15 Juni 2016, Direvisi 30 Maret 2017, Diterima untuk dipublikasikan 31 Maret 2017.
Copyright © 2017 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2017.24.1.12

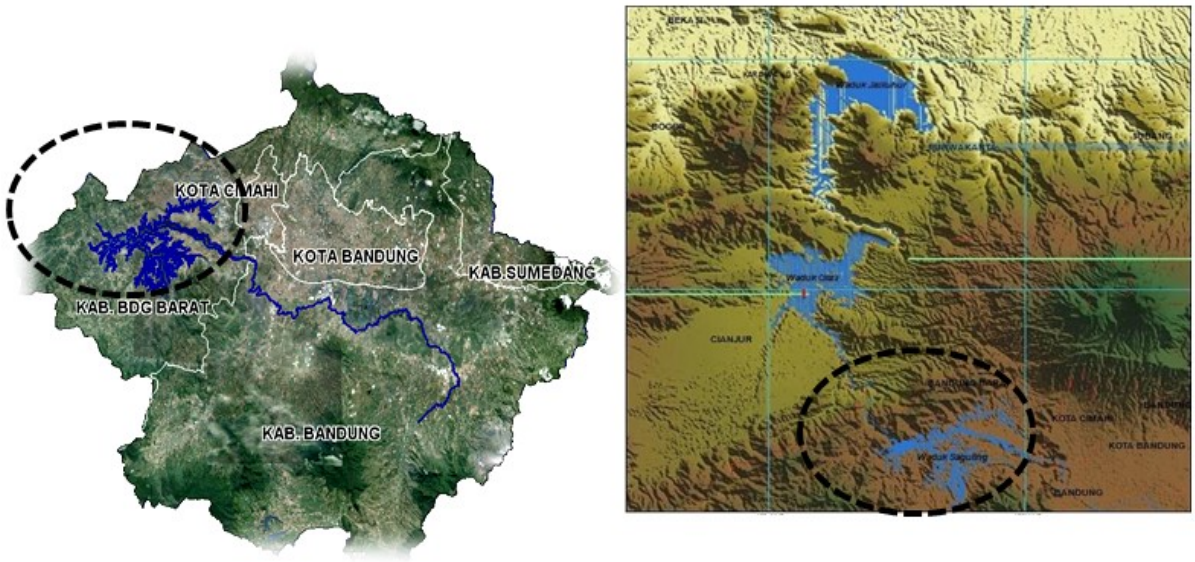
waduk multi guna diusulkan untuk mengurangi konflik antara penggunaan air dan kerusakan lingkungan (Xu, *et al*., 2014).

Sumber daya air adalah sumber daya alam yang dapat diperbaharui melalui siklus hidrologi dan merupakan fungsi ruang dan waktu (Arwin, 2009). Sumber air dapat diperbarui melalui siklus hidrologi, dipengaruhi oleh iklim, konversi lahan membentuk komponen rezim hidrologi (hujan dan debit) yang berkarakter acak dan stokastik, sedangkan pada kemiringan relatif landai pembuangan air dari daratan laut merupakan fenomena deterministik.

Pengetahuan tentang beberapa periode hujan diperlukan untuk desain struktur hidrolik seperti perlindungan banjir, infrastruktur air minum dan sistem saluran drainase (Benabdesselam, 2013). Hubungan antara hujan dan debit merupakan dasar peramalan yang tepat untuk pengoperasian proyek hidrolik dan untuk memperpanjang data debit. Untuk dapat meramalkan debit dimasa depan secara akurat atau mendekati kenyataan dilapangan, dibutuhkan ketepatan pemilihan metode perhitungan serta data input yang memadai. Komponen hidrologi yang mendasari peramalan debit yang paling banyak digunakan adalah komponen hujan dan debit karena dari hasil penelitian kedua komponen tersebut adalah komponen yang paling berpengaruh terhadap ketersediaan debit dibanding komponen hidrologi lainnya. Oleh karena itu dalam penelitian ini kemudian kedua komponen tersebut (hujan dan debit) kemudian dimodifikasi menjadi beberapa alternatif untuk kemudian dilihat kombinasi yang menghasilkan nilai korelasi yang tertinggi.

2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi penelitian



Gambar 1. Lokasi penelitian

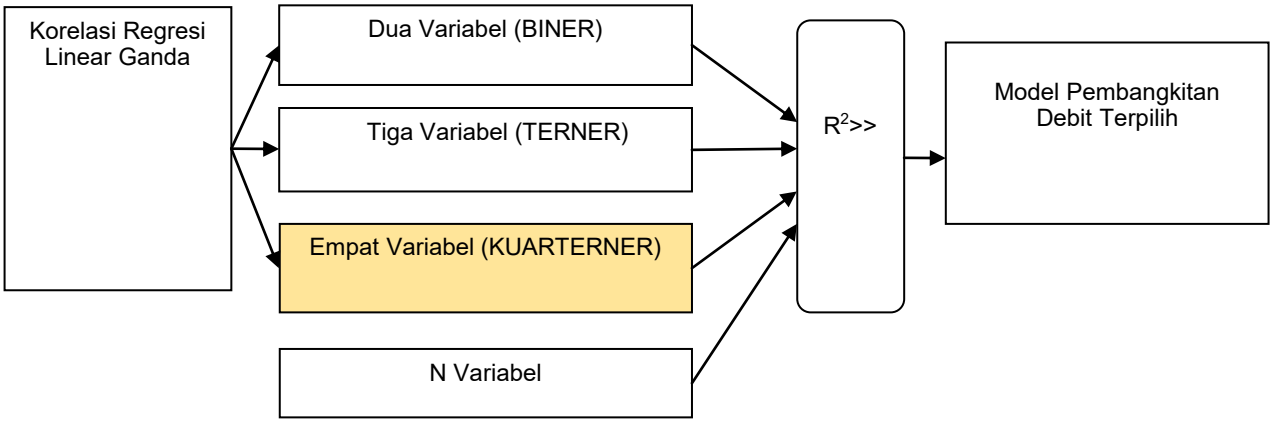
Lokasi penelitian yaitu Waduk Saguling seperti ditunjukkan pada **Gambar 1** terletak di wilayah Kabupaten Bandung Barat berada di Provinsi Jawa Barat, Indonesia. Data curah hujan dan debit pada penelitian ini diambil dari pos-pos pencatatan hujan dan debit yang ada di DAS Waduk Saguling. Data yang didapatkan tidak selalu lengkap sehingga diperlukan perhitungan regresi linier untuk memperkirakan data kosong (Abatzoglou, 2009). Teknik pengisian data kosong pada penelitian ini mengunakan korelasi spartial empat variabel dimana tiga pos hujan menjadi penjelas dan satu pos hujan lagi menjadi yang dijelaskan. Korelasi terbesar antar stasiun dipilih sebagai stasiun pengisi dan dibuatkan persamaan regrasi sebagai persamaan pengisian data hujan. Untuk melengkapi data debit juga digunakan korelasi spartial empat variabel dimana dua pos hujan dan satu pos debit sebagai penjelas.

Model kontinu hujan-debit didasarkan pada korelasi antara stasiun hujan dengan stasiun debit. Dari penelitian diketahui bahwa model korelasi yang melibatkan empat variabel hidrologi, lebih efektif dalam menentukan hubungan antar hujan-debit. Hubungan dengan lebih dari empat variabel tidak memberikan hasil yang berarti (kenaikan koefisien determinasi relatif kecil).

Hubungan hujan dan debit sungai merupakan dasar peramalan yang tepat untuk pengoperasian projek-projek pengembangan sumber daya air dan perluasan data debit aliran sungai. Data pengukuran debit sungai sering kali tidak lengkap. Salah satu cara yang digunakan untuk melengkapinya adalah dengan cara regresi linier berganda menggunakan korelasi sparsial F (x,y,z,t) komponen utama hidrologi (P dan Q), (Arwin, 2002).

Model kontinu prakiraan debit menggunakan metode korelasi regresi linier ganda (Arwin, 2002) dibangun berdasarkan korelasi antara dua variabel acak, yaitu data stasiun pengamat hujan (P) dan data stasiun pengamat debit (Q). Model dengan nilai koefisien determinasi (R2) terbesar dipilih sebagai model yang paling baik untuk membangun data debit (**Gambar 2**).

Diterima 15 Juni 2016, Direvisi 30 Maret 2017, Diterima untuk dipublikasikan 31 Maret 2017.
Copyright ⓒ2017 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2017.24.1.12



Gambar 2. Model kontinu prakiraan debit masa depan (Arwin, 2002)

2.2 Model terner (korelasi tiga variabel acak)

Model terner terdiri dari 3 (tiga) variabel siklus hidrologi tipe ketautan model terner terdiri dari dua stasiun penjelas (X_2 dan X_3) untuk menjelaskan satu stasiun yang dijelaskan (X_1). Skema korelasi antara ketiga stasiun tersebut dijelaskan pada **Gambar 2**.

Persamaan regresi linier dari model terner dinyatakan sebagai berikut (Arwin, 2002):

$$x_1 = r_2 x_2 + r_3 x_3 + \varepsilon \quad (1)$$

dengan :

$$x_1 = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \text{ i = 1, 2, dan 3} \quad (2)$$

Koefisien korelasi parsiil diekspresikan sebagai berikut (Arwin, 2002):

$$r_2 = \frac{\rho_{12} - \rho_{13}\rho_{23}}{1 - \rho_{23}^2} \quad (3)$$

$$r_3 = \frac{\rho_{13} - \rho_{12}\rho_{23}}{1 - \rho_{23}^2} \quad (4)$$

Persamaan koefisien determinasi model terner dituliskan sebagai berikut (Arwin, 2002):

$$R^2 = \frac{(\rho_{12}^2 + \rho_{13}^2 - 2\rho_{12}\rho_{13}\rho_{23})}{1 - \rho_{23}^2} \quad (5)$$

$$\varepsilon 2 = 1 - R^2 \quad (6)$$

Model terner dapat digunakan pada DAS untuk pengelolaan waduk dengan ketidakpastian masa yang akan datang. Model ini terdiri dari tiga tipe yaitu model terner tipe PP(Q1), tipe PQ(Q1), dan tipe QQ(Q1).

2.3 Model kuaterner (korelasi empat variabel acak)

Model kuaterner terdiri dari empat stasiun hidrologi yaitu tiga stasiun penjelas (X_2, X_3, dan X_4) dan satu stasiun yang akan dijelaskan (X_1). Skema korelasi model ini dapat dituliskan sebagai berikut:

Persamaan regresi linier model kuaterner dinyatakan sebagai berikut (Arwin, 2002):

$$x_1 = r_2 x_2 + r_3 x_3 + r_4 x_4 + \varepsilon \quad (7)$$

dengan:

$$\Sigma x_1 x_j = r_2 \Sigma x_2 x_j + r_3 \Sigma x_3 x_j + r_4 \Sigma x_4 x_j \quad (8)$$

Asumsi E(εxj) = 0 untuk j = 2, 3, dan 4.

Nilai ri dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Yule Walker sebagai berikut:

$$\begin{vmatrix} 1 & \rho_{12} & \rho_{24} \\ \rho_{23} & 1 & \rho_{34} \\ \rho_{24} & \rho_{34} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \rho_{12} \\ \rho_{13} \\ \rho_{14} \end{vmatrix} \quad (9)$$

Koefisien determinasi R2 dan kesalahan relatif ε dihitung dengan persamaan sebagai berikut: (10)

$$\varepsilon = \frac{1 + r_{22} + r_{32} + r_{42} - 2(r_2\rho_{12} + r_3\rho_{13} + r_4\rho_{14}) +}{2(r_2 r_3 \rho_{23} + r_2 r_4 \rho_{24} + r_3 r_4 \rho_{34})} \quad (10)$$

$$R^2 = 1 - \varepsilon 2 \quad (11)$$

Model kuaterner dapat digunakan pada DAS untuk pengelolaan waduk air dengan ketidakpastian masa yang akan datang. Model ini terdiri dari empat tipe yaitu model kuartener tipe PPP(Q1), tipe PPQ(Q1), tipe PQQ(Q1).

2.4 Model diskrit Markov 3 kelas orde 1

Model diskrit Markov terdiri dari 2 (dua) tarikan dimana tarikan pertama adalah penentuan kondisi dan tarikan kedua adalah penentuan besaran. Probabilitas kejadian pada suatu waktu tertentu bergantung/ditentukan hanya dari kejadian waktu sebelumnya. Oleh karena data debit bersifat stokastik, maka pendekatan dengan model Markov dibuat melalui pembuatan matrik transisi untuk menjelaskan mengenai nilai probabilitas (ketidakpastian) kejadian besaran debit tertentu dimana jumlah probabilitas seluruh kejadian sama dengan 1 seperti ditunjukkan pada **Tabel 1**. Matrik transisi tersebut bersifat homogen atau matriks stokhastik karena semua transisi probabilitas Pij adalah tetap dan independen terhadap waktu. Probabilitas Pij harus memenuhi kondisi:

Diterima 15 Juni 2016, Direvisi 30 Maret 2017, Diterima untuk dipublikasikan 31 Maret 2017.
Copyright ©2017 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2017.24.1.12

$\sum_j P_{ij} = 1$ untuk seluruh nilai i;

$P_{ij} \geq 0$ untuk seluruh nilai i dan j

Tabel 1. Matrik transisi orde satu (Arwin, 2002)

Kondisi Debit	Kondisi Debit Waktu t_n				
Waktu t_{n-1}	0	1	2	…	N
0	P_{00}	P_{01}	P_{02}	…	P_{0N}
1	P_{10}	P_{11}	P_{12}	…	P_{1N}
2	P_{20}	P_{21}	P_{22}	…	P_{2N}
…	…	…	…	…	…
N	P_{N0}	P_{N1}	P_{N2}	…	P_{NN}

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Debit prakiraan metode korelasi spasial hujan dan debit

Dalam perhitungan debit prakiraan dengan menggunakan metode korelasi spasial hujan dan debit digunakan alat bantu SPPS dengan menggunakan komponen $PPPQ_{t-1}$ dan menghasilkan nilai korelasi sebesar 0,86 terhadap debit aktual.

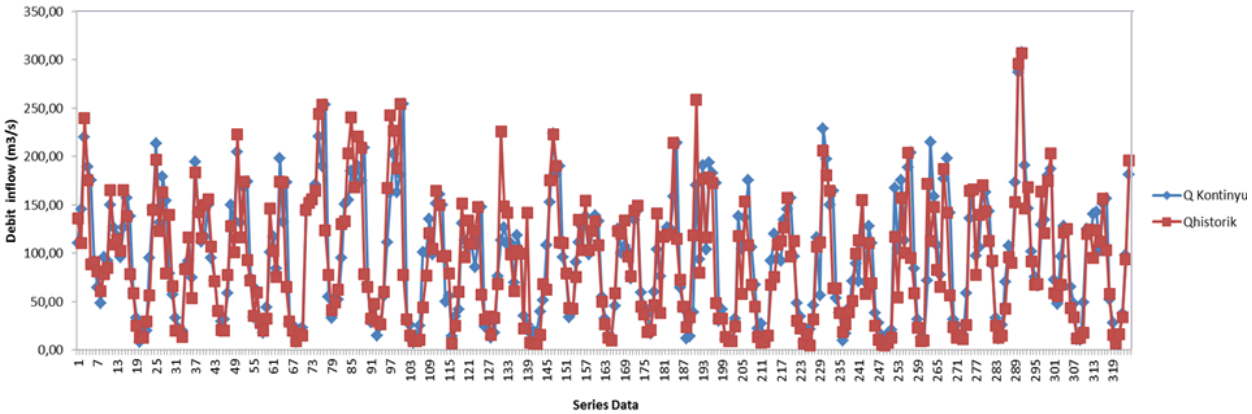
3.2 Debit prakiraan metode diskrit Markov 3 kelas orde 1

Model prakiraan debit dengan model diskrit Markov yaitu peramalan debit masa depan dengan menggolongkan debit ke dalam 3 kelas debit, yaitu kering, normal, dan basah yang diurutkan mulai dari data debit yang terkecil hingga yang terbesar. Debit yang akan diklasifikasikan berasal dari debit input bulanan historis. Batas kelas debit untuk masing-masing kelas terlihat dalam **Tabel 3**.

Setelah mengetahui interval debit untuk masing-masing kelas dan nilai rata-rata debit masing-masing kelas (basah-normal-kering), data debit historik kemudian ditransformasikan ke dalam kelas 0-1-2. Lalu dengan menggunakan matriks transisi bulanan seperti contoh **Tabel 4**, dilakukan prakiraan kondisi di bulan berikutnya (basah-normal-kering) yang hasilnya dapat dilihat pada **Tabel 5**. Setelah itu, akan didapatkan nilai prakiraan debit yang besarannya sesuai dengan nilai rata-rata debit masing-masing kelas (basah-normal-kering) yang telah didapatkan sebelumnya yang disajikan dalam **Tabel 6**.

Tabel 2. Persamaan debit prakiraan metode korelasi spasial

Bulan	Persamaan
Januari	Qjan= (0,0621)P2+(0,3148)P10+(0,2141)Qdes + 16,449
Februari	Qfeb= (0,3020)P4+(0,2080)P6+(0,4451)Qjan -3,014
Maret	Qmar= (0,1566)P6+(0,2885)P10+(0,3172)Qfeb + 0,8306
April	Qapr= (0,0987)P2+(0,0978)P7+(0,3328)Qmar + 64,625
Mei	Qmei= (0)P2+(0)P3+(1)Qapr+ 0
Juni	Qjun= (0,2013)P3+(0,1742)P4+(0,2585)Qmei + 9,4927
Juli	Qjul = (0,1746)P2+(0,0842)P10+(0,0688)Qjuni + 23,7672
Agustus	Qagt = (0,1030)P2+(0,1659)P8+(0,0764)Qjuli + 6,494
September	Qsept = (0,0555)P1+(0,2558)P2+(0,2411)Qagustus + 8,9508
Oktober	Qokt = (0,2108)P4+(0,0828)P7+(0,4556)Qseptember + 3,4011
Nopember	Qnov = (0,2108)P10+(0,0828)P4+(0,4556)Qoktober - 7,5567
Desember	Qdes = (0,3598)P10-(0,004)P2+(0,2700)Qnovember + 12,6486



Gambar 3. Perbandingan debit historik dan debit bangkitan model kontinu

Diterima 15 Juni 2016, Direvisi 30 Maret 2017, Diterima untuk dipublikasikan 31 Maret 2017.
Copyright ⓒ2017 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2017.24.1.12

Tabel 3. Batas kelas debit bulanan Waduk Saguling (1986-2013)

Bulan	Kelas kering (0)	Kelas Normal (1)	Kelas Basah (2)
Jan	76,62	123,18	123,18
Feb	90,14	130,83	202,24
Mar	90,34	150,17	218,46
Apri	109,92	154,58	217,09
May	62,12	98,50	143,12
Jun	26,39	57,80	95,08
Jul	16,00	31,79	77,27
Aug	7,59	14,82	47,27
Sep	9,25	18,35	55,53
Oct	12,05	40,12	102,12
Nov	35,96	100,58	173,30
Dec	78,11	122,17	172,01

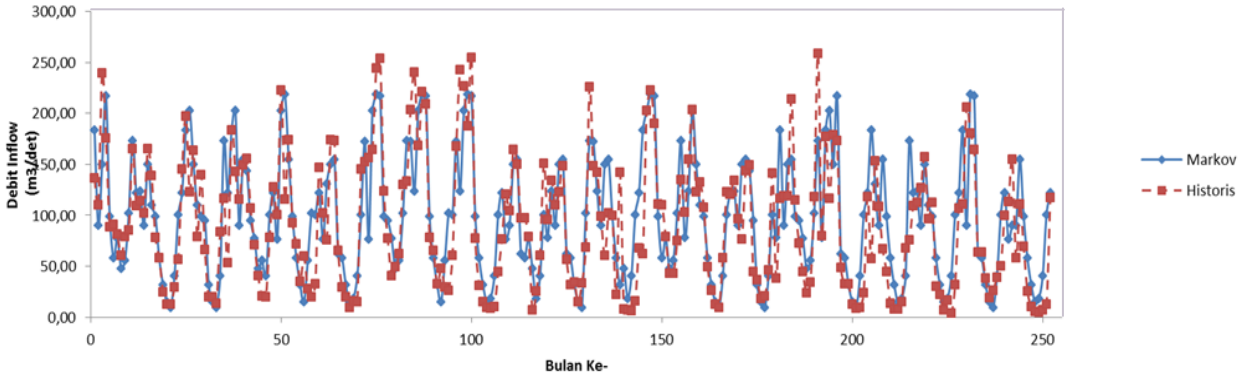
Tabel 4. Matriks transisi bulanan markov 3 kelas orde 1

Kondisi Bulan	Kondisi Debit Bulan Februari				
	0	1	2		
0	0,57	0,14	0,29	1	P0N
1	0,29	0,29	0,43	1	P1N
2	0,14	0,57	0,29	1	P2N
				3	PNN
	P0N	P1N	P2N	PNN	

Tabel 5. Klasifikasi debit input bulanan Waduk Saguling dengan model markov (1986-2013)

Tahun	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Des
1986	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1
1987	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1
1988	2	1	1	0	2	1	0	1	1	2	1	0
1989	2	1	0	1	2	2	2	2	1	0	1	1
1990	0	2	0	2	1	1	1	2	2	0	0	1
1991	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	2	2
1992	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2
1993	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1	2
1994	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
1995	1	0	1	1	1	2	2	0	1	1	2	0
1996	1	0	1	1	0	0	1	1	2	2	2	2
1997	1	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0
1998	0	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	0
1999	2	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
2000	1	0	0	1	2	1	1	1	1	1	2	0
2001	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	0
2002	2	1	2	1	0	0	1	1	0	0	0	1
2003	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1
2004	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1
2005	1	2	2	1	0	1	1	1	1	1	0	0
2006	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2007	0	2	0	2	1	1	0	0	0	2	1	2
2008	0	0	2	0	0	0	0	1	0	1	2	2
2009	0	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	0
2010	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
2011	0	0	0	0	2	1	1	1	0	0	1	1
2012	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	2
2013	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	0	2

Diterima 15 Juni 2016, Direvisi 30 Maret 2017, Diterima untuk dipublikasikan 31 Maret 2017.
Copyright ⓒ 2017 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2017.24.1.12



Gambar 4. Kalibrasi debit prakiraan model chain markov dengan debit input historis Waduk Saguling (1986-2013)

Tabel 6. Data debit bulanan (m3/s) Waduk Saguling hasil prakiraan model chain markov orde 3 (1986-2013)

Tahun	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1986	183,24	90,14	150,17	217,09	98,50	57,80	77,27	47,27	55,53	102,12	173,30	122,17
1987	123,18	90,14	150,17	109,92	98,50	57,80	31,79	14,82	9,25	40,12	100,58	122,17
1988	183,24	202,24	150,17	109,92	98,50	95,08	31,79	14,82	9,25	40,12	173,30	122,17
1989	183,24	202,24	90,34	154,58	143,12	95,08	77,27	47,27	55,53	40,12	100,58	122,17
1990	76,62	202,24	218,46	154,58	98,50	57,80	31,79	14,82	55,53	102,12	100,58	122,17
1991	76,62	130,83	150,17	154,58	62,12	57,80	31,79	14,82	18,35	40,12	100,58	172,01
1992	76,62	202,24	218,46	217,09	98,50	95,08	77,27	47,27	55,53	102,12	173,30	172,01
1993	123,18	202,24	218,46	217,09	98,50	57,80	31,79	14,82	55,53	102,12	100,58	172,01
1994	123,18	202,24	218,46	217,09	98,50	57,80	31,79	14,82	18,35	40,12	100,58	122,17
1995	76,62	90,14	150,17	154,58	62,12	57,80	77,27	47,27	18,35	40,12	100,58	78,11
1996	123,18	90,14	150,17	154,58	62,12	57,80	31,79	14,82	9,25	102,12	173,30	172,01
1997	123,18	90,14	150,17	154,58	98,50	57,80	31,79	47,27	18,35	40,12	100,58	122,17
1998	183,24	202,24	218,46	217,09	98,50	57,80	77,27	47,27	55,53	102,12	173,30	78,11
1999	123,18	202,24	150,17	109,92	98,50	57,80	31,79	14,82	9,25	40,12	100,58	122,17
2000	123,18	90,14	150,17	154,58	143,12	95,08	31,79	14,82	9,25	40,12	100,58	78,11
2001	183,24	90,14	150,17	154,58	98,50	95,08	77,27	47,27	55,53	102,12	173,30	78,11
2002	183,24	202,24	150,17	217,09	62,12	57,80	31,79	14,82	9,25	40,12	100,58	122,17
2003	183,24	130,83	90,34	154,58	98,50	57,80	31,79	14,82	18,35	40,12	173,30	122,17
2004	123,18	90,14	150,17	109,92	98,50	57,80	31,79	14,82	18,35	40,12	100,58	122,17
2005	183,24	90,14	218,46	217,09	62,12	57,80	31,79	14,82	9,25	40,12	100,58	122,17
2006	76,62	90,14	90,34	154,58	98,50	57,80	31,79	14,82	18,35	40,12	100,58	122,17
2007	76,62	202,24	218,46	154,58	98,50	57,80	31,79	14,82	18,35	40,12	173,30	172,01
2008	123,18	130,83	150,17	217,09	98,50	57,80	31,79	14,82	9,25	40,12	100,58	172,01
2009	76,62	130,83	150,17	154,58	143,12	95,08	77,27	14,82	9,25	40,12	100,58	122,17
2010	183,24	202,24	218,46	217,09	143,12	95,08	77,27	47,27	55,53	102,12	173,30	172,01
2011	76,62	130,83	150,17	154,58	98,50	95,08	31,79	14,82	9,25	40,12	100,58	122,17
2012	76,62	130,83	90,34	154,58	62,12	57,80	31,79	14,82	18,35	40,12	100,58	172,01
2013	183,24	202,24	218,46	154,58	98,50	95,08	77,27	47,27	55,53	102,12	100,58	122,17

3.3 Lingkungan ekonomi Waduk Saguling

Lingkungan ekonomi waduk memberikan informasi tentang batasan storage atau konstrain waduk yang digunakan. Waduk Saguling yang merupakan waduk multiguna yang digunakan untuk PLTA, Air Baku, dan Irigasi.

Diterima 15 Juni 2016, Direvisi 30 Maret 2017, Diterima untuk dipublikasikan 31 Maret 2017.
Copyright ⓒ2017 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2017.24.1.12

Obyektifitas: Memaksimumkan pemanfaatan air untuk memenuhi kebutuhan air di *downstream* dan tidak ada air yang terbuang di *spillway.*

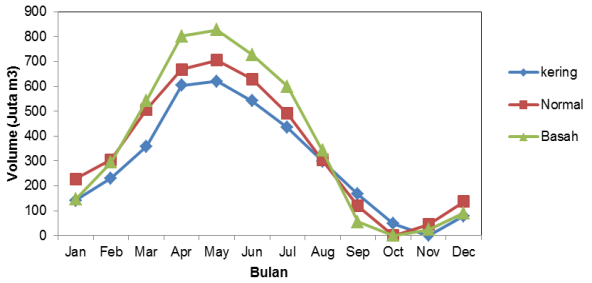
Konstrain:
1. Hukum Kekekalan massa air:
   $S_{t+1} = S_t + Q_{in} - Qout - E$
2. Batasan Volume Tampungan
   $0 < S < 600$ juta m^3
3. Debit masukan:
   Qin (debit rencana: Markov dan Kontinu)
4. Batasan debit keluaran
   Q turbin max : 580,61 juta m^3/bulan
   Q turbin min : 72,58 juta m^3/bulan
   Q airbaku : 145,23 juta m^3/bulan

Optimalisasi pengelolaan Waduk Saguling dalam penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan air semaksimal mungkin untuk meminimalisir air yang terbuang. Pengelolaan optimal ketidakpastian debit air masa depan (acak) dilakukan dengan menggunakan model Markov dan model kontinu. Dalam penelitian ini juga dilakukan antisipasi keacakan debit dengan memprakirakan debit masa depan. Dalam penelitian ini model prakriraan debit masa depan yang digunakan adalah model diskrit Markov serta model korelasi spasial hujan dan debit (model kontinu), kemudian pengelolaan optimal juga dapat memprakirakan keacakan iklim dengan melakukan penentuan tahun kering, normal dan basah menggunakan matriks transisi Markov 3 kelas. Selanjutnya dilakukan perhitungan lintasan pedoman (kering, normal, basah) yang digunakan dihitung dengan metode historik dan metode diskrit Markov.

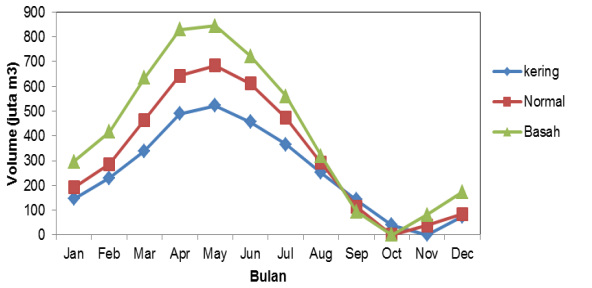
Setelah diketahui debit prakiraan dan lintasan pedoman yang digunakan kemudian nilai tersebut disubstitusikan kedalam persamaan hukum kekekalan masa untuk menghitung debit keluaran Waduk Saguling. Pengelolaan optimal model Markov menggunakan debit prakiraan masa depan diskrit Markov, lintasan pedoman hasil perhitungan model diskrit Markov dan penentuan tahun kering, normal dan basah menggunakan matriks transisi 3 kelas orde 1 Markov. Pengelolaan optimal model kontinu menggunakan debit prakiraan korelasi spasial, lintasan pedoman hasil perhitungan model kontinu dan penentuan tahun kering, normal, dan basah menggunakan model korelasi spasial. Skenario pola pengelolaan waduk dengan model kontinu dan model diskrit Markov dapat dilihat pada **Tabel 7**.

3.4 Penentuan pedoman lintasan dengan model diskrit Markov dan model kontinu

Lintasan pedoman (kering, normal, dan basah) yang digunakan adalah lintasan pedoman PU 5 tahun seperti



Gambar 5. Pedoman lintasan basah model kontinu PU 5 tahun



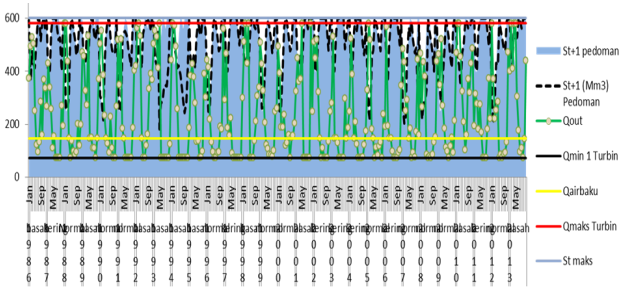
Gambar 6. Pedoman lintasan kering, normal, basah model diskrit markov

ditunjukkan pada **Gambar 5** dan lintasan pedoman Markov dapat dilihat pada **Gambar 6**.

3.5 Optimasi pengelolaan Waduk Saguling

Optimasi pengelolaan Waduk Saguling dalam penelitian ini mengacu pada PP No. 37 Tahun 2010 tentang Bendungan pasal 45 yang menyatakan bahwa pola operasi waduk terdiri atas pola operasi tahun kering, tahun normal, dan tahun basah.

Dalam pengelolaan optimal dengan tahun prakiraan model Markov digunakan data debit prakiraan dengan model Markov dan lintasan pedoman yang dibangun dengan model Markov diskrit 3 kelas. Simulasi pengelolaan optimal dengan prakiraan tahunan model Markov, debit prakiraan dan lintasan pedoman Markov

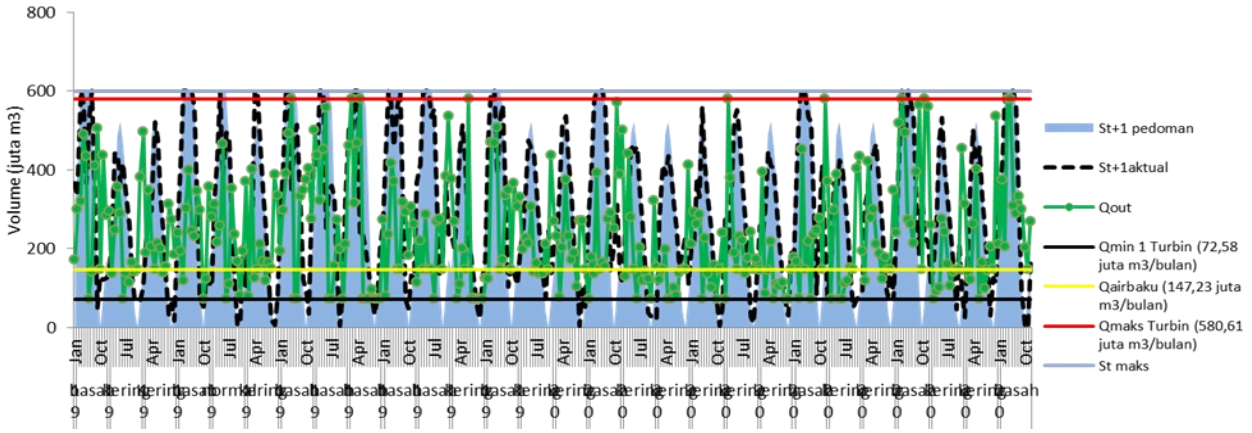


Gambar 7. Pengelolaan optimal model diskrit markov

Tabel 7. Skenario simulasi pola pengusahaan Waduk Optimal (Arwin, 2002)

Model Optimalisasi Waduk Aktual (Uncertain)	Pola Pengusahaan Waduk	Tahun Kering, Normal dan Basah	Prakiraan Q input
Diskrit stokastik-markov	Debit diskrit markov kering, normal dan basah	Matriks transisi markov	Model diskrit stokhastik-markov
Kontinu	Debit rencana kering,normal dan basah	Matriks transisi markov	Model kontinu

Diterima 15 Juni 2016, Direvisi 30 Maret 2017, Diterima untuk dipublikasikan 31 Maret 2017.
Copyright ©2017 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2017.24.1.12



Gambar 8. Pengelolaan optimal model kontinu

Tabel 8. Nilai korelasi pengelolaan optimal model diskrit markov dan model kontinu

Prakiraan Tahun	Qin Prakiraan	Lintasan Pedoman	R (Korelasi Lintasan Pedoman dan Lintasan Aktual)
Markov	Markov	Markov	0,852
Kontinu	Kontinu	Kontinu	0,940

ditunjukkan pada **Gambar 7**. yang memberikan nilai korelasi antara lintasan pedoman dan lintasan aktual sebesar 0,852.

Dalam pengelolaan optimal dengan tahun prakiraan model kontinu digunakan data dimaksudkan adalah menggunalkan debit prakiraan dengan model kontinu dan lintasan pedoman yang dibangun dengan model kontinu diskrit 3 kelas. Hasil simulasinya ditunjukkan pada **Gambar 8** dimana dengan metode pengelolaan ini diperoleh nilai korelasi antara lintasan pedoman dan lintasan aktual sebesar 0,940.

Rekapitulasi nilai korelasi (R) antara lintasan pedoman dan lintasan aktual dengan prakiraan tahun Kontinu dan Markov dapat dilihat pada **Tabel 8**. Nilai korelasi yang lebih besar dihasilkan dari simulasi pengelolaan optimal dengan prakiraan tahun kontinu, debit prakiraan yang dibangun dengan model kontinu dan lintasan pedoman kontinu.

4. Kesimpulan

1. Metode korelasi spasial hujan-debit (metode kontinu) dan metode diskrit Markov merupakan metode yang efektif digunakan dalam model prakiraan debit masa depan. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh bahwa nilai korelasi prakiraan debit inflow Waduk Saguling dengan metode kontinu lebih besar dibandingkan dengan metode diskrit Markov.

2. Korelasi prakiraan debit dan debit historis dengan metode kontinu sebesar 0,86 sedangkan dengan metode diskrit Markov sebesar 0,804.

3. Simulasi pengelolaan optimal Waduk Saguling dengan model kontinu memberikan nilai R (korelasi llintasan pedoman dan lintasan aktual) lebih tinggi yakni 0,940 dibandingkan dengan model Markov yang memberikan nilai korelasi (R) sebesar 0,852.

4. Simulasi pengelolaan Waduk Saguling secara optimal berkontribusi dalam penyusunan Pedoman Operasi dan Pemeliharaan (SOP) Waduk Saguling sehingga fungsi waduk dapat berlangsung sesuai dengan fungsi yang telah direncanakan sebelumnya.

Daftar Pustaka

Abatzoglou, J.T., 2009, Classification of Regional Climate Variability in the State of California, *Journal of Applied Meteorology and Climatology 48*, 1527–1541.

Arwin, 2002, *Tren Global Pembangunan Infrastruktur Sumber Daya Air yang berkelanjutan Dalam rangka Diskusi Pakar Perumusan Kebijakan Eco-Efficient Water Infrastructure Indonesia*, Direktorat Pengairan dan Irigasi.

Arwin, 2009, *Perubahan Iklim,Konversi Lahan Dan Ancaman Banjir Dan Kekeringan Di Kawasan Terbangun*. Pidato Ilmiah Guru Besar, ITB Bandung.

Benabdesselam, Tamara and Amarchi, Hocine, 2013, Regional Approach for the Estimation of Extreme Daily Precipitation on North-East Area of Algeria, *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, Vol 5 (10), 573- 583.

Null, Sarah E., Josue Medellin-Azuara, Alvar Escriva-Bou, Michelle Lent, Jay R. Lund, 2014, Optimizing the Dammed: Water Supply Losses and Fish Habitat Gains From Dam Removal in California, *Journal of Environmental Management,* 136, 121-131.

Diterima 15 Juni 2016, Direvisi 30 Maret 2017, Diterima untuk dipublikasikan 31 Maret 2017.
Copyright ⓒ2017 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2017.24.1.12

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 tentang Bendungan, 2010, Jakarta : Kementrian Agraria dan Tata Ruang/ Badan Pertahanan Nasional.

Read, L., Kaveh Madani, Bahareh Inanloo, 2014, Optimality Versus Stability in Water Resource Allocation, *Journal of Environmental Management* 133, 343-354.

Xu, Xinyi, Lingling Bin, Chengzhong Pan, Aizhong Ding dan Desheng Chen, 2014, *Optimal Reoperation of Multi-Reservoirs for Integrated Watershed Management with Multiple Benefits*, Water 2014, 6, 796-812, Beijing Normal University : College of Water Sciences.

Diterima 15 Juni 2016, Direvisi 30 Maret 2017, Diterima untuk dipublikasikan 31 Maret 2017.
Copyright ⓒ 2017 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2017.24.1.12

Diterima 15 Juni 2016, Direvisi 30 Maret 2017, Diterima untuk dipublikasikan 31 Maret 2017.
Copyright ⓒ2017 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2017.24.1.12