

# DAMPAK VARIABILITAS HUJAN DAN KONVERSI LAHAN TERHADAP SENSITIFITAS DEBIT ALIRAN SUNGAI CITARUM

## *Rainfall Variability and Landuse Conversion Impacts To Sensitivity of Citarum River Flow*

Dyah Marganingrum<sup>1)</sup>, Arwin<sup>2)</sup>, Dwina Roosmini<sup>2)</sup>, dan Pradono<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Puslit Geoteknologi-LIPI

<sup>2)</sup> KK Teknologi Pengelolaan Lingkungan-Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan ITB

<sup>3)</sup> KK Sistem Infrastruktur Wilayah dan Kota-SAPPK ITB

E-mail: dmarganingrum@yahoo.com

### **ABSTRACT**

*The objective of this study is to determine the sensitivity of Citarum river flow to climate change and land conversion. It will provide the flow information that required in the water resources sustainability. Saguling reservoir is one of the strategic reservoirs, which 75% water is coming from the inflow of Upper Citarum measured at Nanjung station. Climate variability was identified as rainfall variability. Sensitivity was calculated as the elasticity value of discharge using three-variate model of statistical approach. The landuse conversion was calculated used GIS at 1994 and 2004. The results showed that elasticity at the Nanjung station and Saguling station decreased from 1.59 and 1.02 to 0.68 and 0.62 respectively. The decreasing occurred in the before the dam was built period (1950-1980) to the after reservoirs operated period (1986-2008). This value indicates that: 1) Citarum river flow is more sensitive to rainfall variability that recorded at Nanjung station than Saguling station, 2) rainfall character is more difficult to predict. The landuse analysis shows that forest area decrease to  $\pm 27\%$  and built up area increased to  $\pm 26\%$ . Those implied a minimum rainfall reduction to  $\pm 8\%$  and minimum flow to  $\pm 46\%$ . Those were caused by land conversion and describing that the vegetation have function to maintain the baseflow for sustainable water resource infrastructure.*

**Keywords:** climate change, elasticity, statistik

### **ABSTRAK**

*Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan sensitivitas aliran sungai Citarum terhadap perubahan iklim dan konversi lahan. Dengan demikian diharapkan dapat memberikan informasi kondisi aliran yang diperlukan dalam keberlanjutan sumberdaya air. Waduk Saguling merupakan salah satu waduk strategis, yang 75% air yang berasal dari masuknya Atas Citarum diukur pada stasiun Nanjung. Variabilitas iklim telah diidentifikasi sebagai variabilitas curah hujan. Sensitivitas dihitung sebagai nilai elastisitas debit menggunakan model tiga-variate dari pendekatan statistik. Konversi penggunaan lahan dihitung menggunakan GIS pada tahun 1994 dan 2004. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada elastisitas stasiun Nanjung dan stasiun Saguling menurun dari 1,59 dan 1,02-0,68 dan 0,62 masing-masing. Penurunan terjadi pada perlakuan sebelum bendungan periode pembangunan (1950-1980) sampai periode operasional (1986-2008). Nilai ini menunjukkan bahwa: 1) aliran sungai Citarum lebih sensitif terhadap curah hujan variabilitas yang tercatat di stasiun Nanjung daripada stasiun Saguling, 2) karakter curah hujan lebih sulit untuk memprediksi. Analisis penggunaan lahan menunjukkan bahwa kawasan hutan penurunan  $\pm 27\%$  dan daerah terbangun meningkat  $\pm 26\%$ . Hal ini menunjukkan penurunan curah hujan minimum untuk  $\pm 8\%$  dan aliran minimum untuk  $\pm 46\%$ . Kondisi ini disebabkan oleh konversi lahan dan menjelaskan bahwa vegetasi memiliki fungsi untuk mempertahankan aliran dasar untuk infrastruktur sumber daya air yang berkelanjutan.*

**Kata kunci:** perubahan iklim, elastisitas, statistik

## PENDAHULUAN

Input utama sumber air di suatu Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah curah hujan. Curah hujan menjadi sumber air dalam bentuk air tanah, mata air, sungai, danau atau waduk, dipengaruhi oleh karakteristik DAS (*watershed properties*). Selain penggunaan lahan, variabel DAS lainnya relatif tetap (seperti sifat geologi atau tanah, topografi dan kemiringan lereng) (Suripin, 2004; Arwin, 2008). Perubahan variabel penggunaan lahan akan menentukan kuantitas dan kualitas sumber air, khususnya air permukaan. Studi yang mengkaji pendayagunaan sumber air permukaan cukup beralasan sesuai dengan amanat yang tertulis pada pasal 26 (5) UU No.7/2004. Peraturan tersebut mengatakan bahwa pendayagunaan sumberdaya air didasarkan pada keterkaitan antara air hujan, air tanah, dan air permukaan dengan mengutamakan pendayagunaan air permukaan.

Mengetahui dampak variabilitas hujan dan konversi lahan terhadap debit aliran Sungai sangat penting untuk menjamin keberlanjutan sumber air. Curah hujan (P) adalah variabel acak. Hujan yang berkarakter acak akan menjadi debit aliran dengan sifat yang acak pula, (meskipun hujan relatif lebih *independent* daripada debit). Karena hujan dan debit merupakan variabel acak, maka instrumen statistik dapat digunakan untuk mengetahui perubahan perilakunya (Arwin dkk, 2002; Koutsoyiannis, 2008; Liu dan Cui, 2009). Apabila curah hujan yang jatuh ke permukaan bumi dengan pola penggunaan lahan yang tetap (*fix variable*) maka debit aliran akan mengikuti pola curah hujan. Namun apabila guna lahannya berubah maka debit aliran (Q) akan semakin *independent*, baik secara kuantitas maupun kualitas (Arwin, 2009; Anna, *et al.*, 2011). Perubahan guna lahan dapat diketahui dari

analisis peta penggunaan lahan pada periode yang berbeda. Pada umumnya digunakan perbedaan periode minimum 10 tahun untuk menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam perubahan guna lahan.

Lokasi studi dilakukan di Cekungan Bandung. Kawasan ini menjadi salah satu kawasan strategis nasional (KSN) dengan fokus pengembangan ekonomi nasional [PP No. 26/2008]. Hulu DAS Citarum merupakan kawasan utama Cekungan Bandung dengan *catchment area* (daerah tangkapan)  $\pm 1717 \text{ km}^2$  dari  $2283 \text{ km}^2$  luas total Cekungan Bandung (NUDS, 1985). Secara administratif, KSN Cekungan Bandung meliputi lima daerah otonomi, yaitu Kabupaten Bandung, Kabupaten Bandung Barat, Kota Bandung, Kota Cimahi, dan tiga kecamatan di Kabupaten Sumedang. Gambar 1 adalah batasan lokasi studi dengan distribusi pos hujan dan pos debit yang digunakan untuk analisis dalam studi ini.

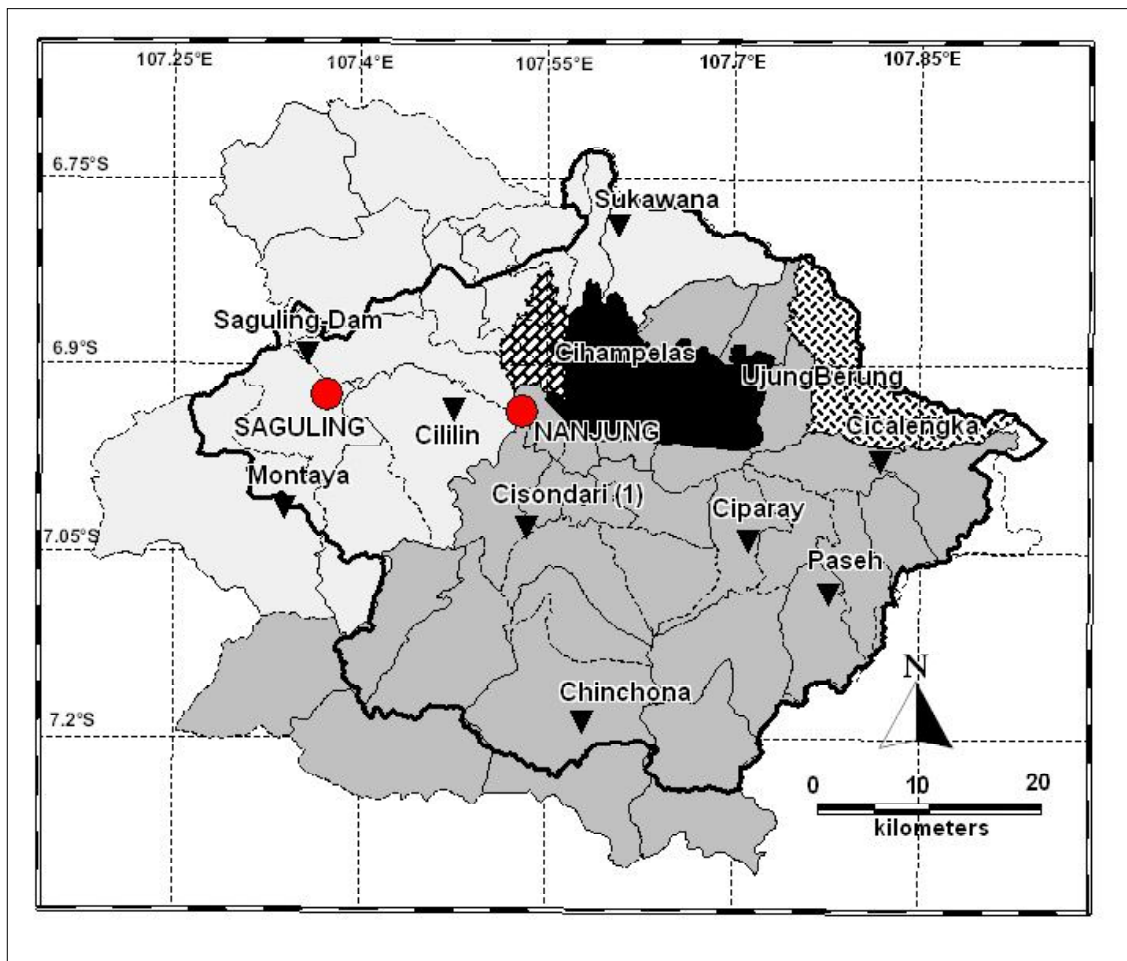
Pengembangan kawasan Cekungan Bandung sebagai Kawasan Strategis Nasional (KSN) yang bertumpu pada peningkatan ekonomi, menyebabkan kawasan ini mengalami eksploitasi lahan. Salah satu bentuk implikasinya adalah berkurangnya daerah resapan air (*recharge area/RA*). Sebagian daerah RA di kawasan Cekungan Bandung telah beralih fungsi menjadi permukiman dan kawasan industri akibat tekanan populasi dan aktivitas produksi di kawasan ini (Wangsaatmaja, 2004). Eksploitasi lahan telah menyebabkan gangguan terhadap keseimbangan komponen utama hidrologi (hujan dan debit). Pengelolaan DAS yang kurang memperhatikan integrasi antara aspek lahan dan air menjadi salah satu akar permasalahan di kawasan ini (Pribadi dan Oktavia, 2007).

Dengan demikian ada dua faktor utama

yang perlu diperhatikan dalam penda-  
gunaan sumber air permukaan, yaitu  
variabilitas hujan dan konversi lahan.  
Analisis perubahan debit aliran menjadi  
penting dalam menjamin keandalan  
sumber air serta keberlanjutan infrastruktur  
sumberdaya air. Salah satu infrastruktur  
sumberdaya air yang berfungsi strategis di  
lokasi studi ini adalah Waduk Saguling.  
Waduk ini merupakan pemasok utama  
energi listrik pada jaringan listrik Jawa-Bali  
karena memiliki LFC (*Load Frequency  
Control*). Input utama Waduk Saguling  
berasal dari Hulu DAS Citarum. Input  
tersebut terukur di pos pencatatan debit  
Nanjung yang meliputi 75% dari total in-

flow Waduk Saguling (Hart and Djuangsih,  
2002).

Waduk Saguling dibangun sebagai waduk  
fungsi tunggal (*single purpose*). Namun  
karena laju kebutuhan air baku di KSN  
Cekungan Bandung semakin meningkat,  
maka transformasi fungsi tunggal menjadi  
multisektor perlu dikaji lebih lanjut. Oleh  
karena itu perlu dilakukan analisis dan  
evaluasi debit aliran sungai Citarum  
(khususnya yang terukur di Pos Nanjung  
dan pos Saguling) akibat pengaruh  
variabilitas hujan dan konversi lahan. Nilai  
positif dari hasil studi ini ditujukan untuk  
mempersiapkan langkah mitigasi dan



Sumber: hasil analisis

Gambar 1. Lokasi Studi Cekungan Bandung

adaptasi guna menjaga keandalan sumber air di KSN Cekungan Bandung, khususnya keberlanjutan infrastruktur Waduk Saguling.

## METODE PENELITIAN

Hujan dan debit merupakan variabel acak. Oleh karena itu kecenderungan atau trend data historikalnya dapat dianalisis dengan instrumen statistik. Untuk menggambarkan trend dari suatu time series data dapat dilakukan transformasi rata-rata waktu, seperti metode *Moving Average* (rata-rata bergerak) (Koutsoyiannis, 2008). Trend dianalisis pada dua periode yang berbeda. Tahun 1950-1980 menggambarkan periode sebelum Waduk Saguling dibangun. Dan tahun 1986-2008 menggambarkan periode setelah Waduk Saguling dioperasikan.

Kecenderungan atau trend dari data hujan dan debit hanya menggambarkan kedua komponen hidrologi tersebut secara terpisah. Sedangkan untuk mengetahui hubungan antara kedua komponen P-Q tersebut dilakukan dengan analisis sensitivitas P-Q. Tinggi rendahnya sensitivitas debit terhadap variabilitas hujan ditentukan berdasarkan nilai elastisitas P-Q. Nilai elastisitas debit sungai terhadap variabilitas hujan didefinisikan sebagai perubahan debit sungai yang proporsional terhadap perubahan curah hujan yang dalam studi ini menggunakan variabel hujan wilayah rata-rata. Hujan wilayah rata-rata dalam studi ini dihitung menggunakan metode Poligon Thiessen.

Nilai elastisitas P-Q dirumuskan dalam persamaan berikut (Schaaque, 1990; Sankarasubramanian et al, 2001; Liu dan Cui, 2009):

$$\varepsilon_p(P_3Q) = \frac{dQ/Q}{dP/P} = \frac{dQ}{dP} \frac{P}{Q} \text{ ----- (1)}$$

Sankarasubramanian et al (2001) menerapkan persamaan (1) pada nilai rata-rata curah hujan (variabel iklim) yang dapat dianggap sebagai ukuran untuk membandingkan respon debit aliran terhadap perubahan iklim. Sehingga persamaan (1) dapat ditulis kembali sebagai berikut:

$$\varepsilon_p(\mu_p, \mu_Q) = \frac{dQ}{dP} \left| \frac{\mu_p}{\mu_Q} \right. \text{ ----- (2)}$$

Persamaan (1) menggambarkan *intrinsic property of catchment* (Chiew, 2006). Untuk mengestimasi nilai  $\varepsilon_p$  pada persamaan (1), dapat dilakukan dengan dua pendekatan (Sankarasubramanian et al, 2001):

1. Menggunakan pendekatan nonparameter alami (*the natural nonparametric approach*) dengan persamaan sebagai berikut :

$$\varepsilon_p = \text{median} \left( \frac{Q_t - \bar{Q}}{P_t - \bar{P}} \frac{\bar{P}}{\bar{Q}} \right) \text{ ----- (3)}$$

2. Menggunakan model tiga variat (trivariate model) sebagai estimator kedua, dengan persamaan sebagai berikut :

$$\varepsilon_p = \rho_{Q,P} \left( \frac{C_Q}{C_P} \right) \text{ ----- (4)}$$

Dimana :  $\rho_{Q,P}$  adalah koefisien korelasi antara Q dan P, sedangkan  $C_Q$  dan  $C_P$  masing-masing adalah koefisien variasi Q dan P.

Nilai elastisitas (e) dan korelasi ( $\rho$ ) P-Q menjadi salah satu pertimbangan utama dalam pengelolaan sumberdaya air, berkaitan dengan perhitungan ketersediaan air yang berkelanjutan.

Nilai hujan dalam perhitungan diatas ditentukan berdasarkan nilai hujan rata-rata wilayah di Cekungan Bandung. Perhitungan

hujan rata-rata wilayah menggunakan metode pendekatan polygon Thiessen dari beberapa stasiun hujan yang terdistribusi merata di Cekungan Bandung. Periode tahun 1950-1980 menggunakan 18 pos hujan sementara pada periode tahun 1986-2008 menggunakan 8 pos hujan. Perbedaan jumlah pos hujan tersebut dipengaruhi oleh ketersediaan serial data historikal dari masing-masing pos hujan yang disesuaikan dengan ketersediaan seri historikal data debit, baik di pos Nanjung maupun pos Saguling. Pos debit Nanjung mewakili DAS Citarum Hulu, sementara pos debit Saguling mewakili Waduk Saguling yang merupakan muara aliran DAS Citarum Hulu.

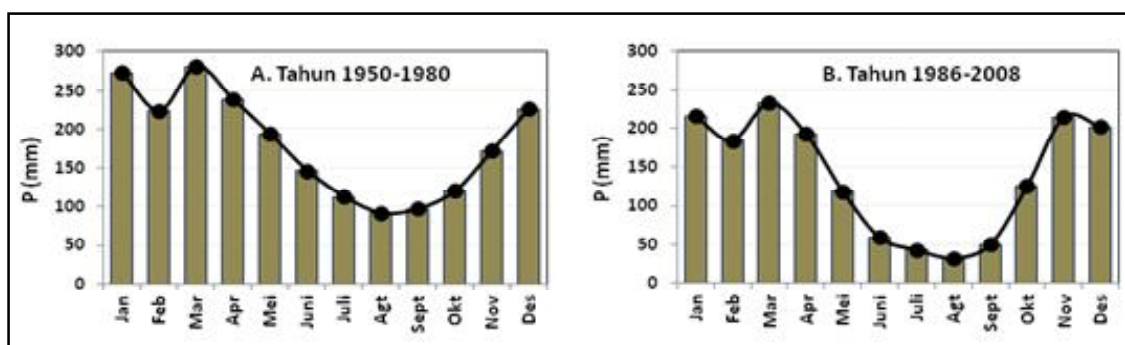
Sementara pengaruh konversi lahan dilakukan dengan analisis perubahan guna lahan periode 1994 dan 2004 (10 tahun) dikaitkan dengan perubahan data hujan dan debit harian minimum pada kedua tahun tersebut.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Di Indonesia terdapat tiga pola hujan, yaitu tipe Moonsun, Equatorial, dan Lokal (Tjasyono, 2004). Hasil analisis curah

hujan wilayah di Cekungan Bandung menunjukkan pola hujan tipe Moonsun dengan satu puncak hujan pada bulan Maret (Gambar 2). Rata-rata hujan bulanan mengalami penurunan setelah Waduk Saguling beroperasi. Rata-rata hujan bulanan pada periode 1950-1980 (sebelum Waduk Saguling beroperasi) sebesar 182 mm/bulan. Namun setelah Waduk Saguling beroperasi (periode 1986-2008), rata-rata hujan bulanan turun menjadi 139 mm/bulan. Perubahan nilai rata-rata adalah salah satu indikator adanya variabilitas atau ketidakpastian hujan (Arwin, 2009).

Variabilitas hujan yang jatuh pada sebuah DAS akan berpengaruh pada debit aliran. Meskipun sifat dependensinya lebih tinggi dari hujan, data debit juga merupakan variabel acak. Oleh karena itu, pendekatan statistik juga dapat digunakan untuk mengetahui trend atau sensibilitasnya (Arwin, 1993; Arwin dkk., 2002; Koutsoyiannis, 2008). Sensibilitas (pola suksesif) debit sangat diperlukan dalam perencanaan infrastruktur sumberdaya air. Gambar 3 menunjukkan bahwa metode *moving average* dengan 10 periode yang menggambarkan ekstrimitas debit di pos Nanjung sebagai inflow utama Waduk Saguling.



Sumber: hasil analisis

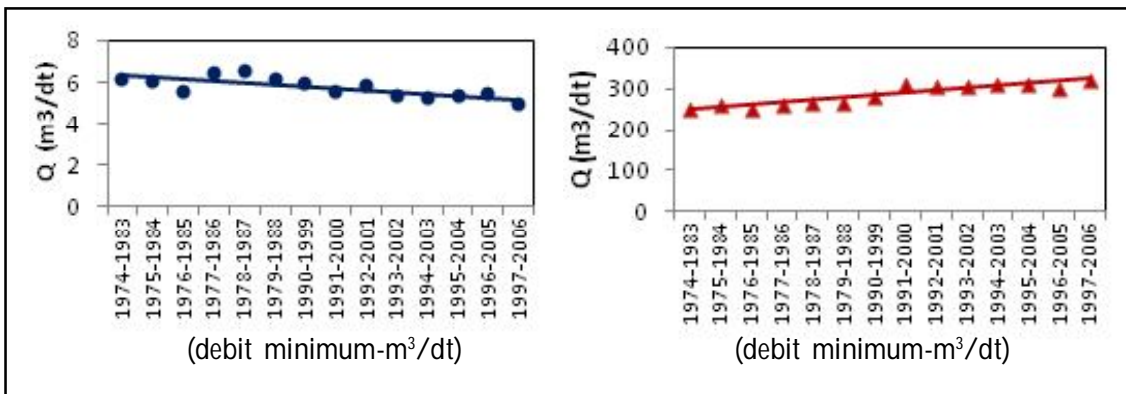
Gambar 2. Hujan Rata-Rata Wilayah Cekungan pada Dua Periode yang Berbeda [Periode Sebelum Waduk Saguling Dibangun (a) dan Periode Setelah Waduk Saguling Beroperasi (b)]

Ekstrimitas debit ditunjukkan dari adanya perbedaan yang makin ekstrim antara debit minimum dan debit maksimum. Debit harian minimum di pos Nanjung semakin turun sebaliknya debit harian maksimumnya semakin tinggi. Analisis debit rencana minimum-maksimum (kering-basah) sangat penting dalam perencanaan dan evaluasi infrastruktur sumberdaya air.

Hujan (P) dan debit (Q) merupakan dua komponen utama dalam siklus hidrologi yang menjadi variabel penentu sekaligus pembatas dalam pembangunan. Isu

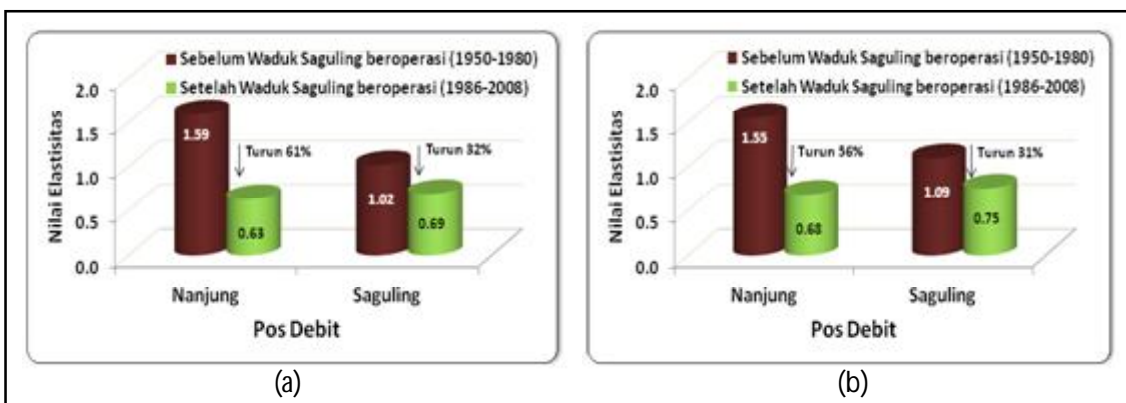
perubahan iklim akhir-akhir ini tentu akan memberikan pengaruh terhadap pola hujan dan debit di lokasi studi. Untuk mengetahui hubungan antara P dan Q dilakukan analisis sensitivitas P-Q.

Gambar 4 memperlihatkan hasil perhitungan sensitivitas debit aliran Sungai Citarum menggunakan model tiga variat (Lui dan Cui, 2009). Tingkat sensitivitas dihitung sebagai nilai elastisitas debit terhadap rata-rata curah hujan wilayah Cekungan Bandung. Perbandingan dilakukan pada debit terukur di pos Nanjung dan



Sumber: hasil analisis

Gambar 3. Debit Suksesif di Pos Nanjung Periode 1974-2006 dengan Moving Average 10 Tahun



Sumber: hasil analisis

Gambar 4. Nilai Elastisitas Debit Terukur di Pos Nanjung dan Pos Saguling terhadap Variabilitas Curah Hujan di Cekungan Bandung: (a) LagTime = Nol Bulan dan (b) LagTime = Satu Bulan

Pos Saguling, masing-masing sebagai pos primer dan pos sekunder. Sebagai inflow utama, debit terukur di Pos Nanjung memberikan pengaruh besar terhadap fluktuasi debit di Waduk Saguling.

Perhitungan statistik dilakukan dengan dua versi. Versi pertama (Gambar 4a) menggunakan *lagtime* nol bulan. Artinya korelasi dilakukan antara data debit dan data hujan pada bulan dan tahun yang sama. Versi kedua (Gambar 4b) menggunakan *lagtime* satu bulan, artinya korelasi dilakukan antara data curah hujan pada t bulan dengan data debit pada t+1 (satu bulan berikutnya). Dua skenario tersebut dilakukan atas dasar bahwa hujan yang jatuh menjadi limpasan terbagi atas *direct runoff* dan *baseflow*. Skenario 1 diterapkan pada DAS yang kecil dimana *baseflow* dapat diabaikan. Sedangkan skenario 2 diterapkan untuk DAS yang lebih besar dimana peranan *baseflow* sangat signifikan (Arwin 2002).

Korelasi dilakukan setelah menyamakan satuan debit dan hujan dalam bentuk vol-

ume ( $m^3/tahun$ ). Variabel hujan dikalikan dengan luasan DAS ( $2283 \text{ Km}^2$ ). Hasil perhitungan nilai elastisitas debit-hujan dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2, masing-masing menggunakan *lagtime* nol bulan dan satu bulan.

Hasil perhitungan dengan dua versi menunjukkan fenomena bahwa pembangunan infrastruktur Waduk Saguling dapat menurunkan sensitivitas debit terhadap perubahan iklim. Fenomena tersebut terlihat pada penurunan nilai elastisitas debit terhadap perubahan iklim, baik di pos Nanjung maupun pos Saguling yang cukup signifikan (masing-masing  $\pm 60\%$  dan  $\pm 30\%$ ). Sehingga dapat dikatakan bahwa pembangunan Waduk Saguling dapat meredam pengaruh variabilitas atau perubahan iklim yang terjadi di kawasan Cekungan Bandung.

Dari Gambar 4 terlihat bahwa sebelum Waduk Saguling dibangun (1950-1980), nilai elastisitas debit lebih dari 1 ( $e > 1$ ), baik yang terukur di pos Nanjung maupun Saguling. Nilai tersebut menunjukkan

Tabel 1. Perhitungan Elastisitas Debit-Hujan (Lagtime Nol Bulan)

<b>1950-1980 :</b>			
<b>Sebelum Waduk Saguling dibangun</b>	<b>Q-N</b>	<b>Q-S</b>	<b>P-Wil</b>
Rata-rata	1819	2659	4977
Standard deviasi	823	836	1005
Koefisien Variansi	0.45	0.31	0.20
Nilai korelasi, r	0.71	0.65	
Elastisitas	1.59	1.02	
<b>1986-2008:</b>			
<b>Setelah Waduk Saguling dioperasikan</b>	<b>Q-N</b>	<b>Q-S</b>	<b>P-Wil</b>
Rata-rata	2236	2840	3818
Stdandard deviasi	458	613	693
Koefisien Variansi	0.20	0.22	0.18
Nilai korelasi, r	0.56	0.58	
Elastisitas	0.63	0.69	

Sumber: hasil analisis

bahwa perubahan iklim di Cekungan Bandung sangat mempengaruhi kondisi aliran di Cekungan Bandung pada periode tersebut. Hal ini tentunya akan memberikan ancaman bagi keberlanjutan infrastruktur sumberdaya air di kawasan ini. Perubahan debit aliran tersebut menginisiasi perlunya melakukan evaluasi terhadap debit rencana pada infrastruktur sumberdaya air, termasuk waduk. Hal ini tertuang dalam PP No. 37 Tahun 2010 tentang Bendungan.

Setelah Waduk Saguling dioperasikan, nilai elastisitas debit terhadap perubahan iklim turun hingga kurang dari 1. Nilai tersebut menunjukkan kondisi bahwa debit di pos Nanjung maupun di pos Saguling tidak terlalu sensitif terhadap perubahan iklim yang terjadi di Cekungan Bandung. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa fungsi waduk selain sebagai penyimpan air, juga mampu meredam pengaruh perubahan iklim. Hal ini tentu dapat menjadi salah satu alasan yang menangkal bahwa pembangunan waduk selalu membawa

permasalahan. Permasalahan sosial akan terjadi manakala komunikasi antara pengelola (dalam hal ini Pemerintah dan swasta) dan masyarakat sekitar tidak berlangsung dengan baik. Di kawasan perkotaan, seperti KSN Cekungan Bandung dengan pertumbuhan penduduk yang tinggi, ketergantungan terhadap waduk sebagai sumber air baku sangatlah krusial.

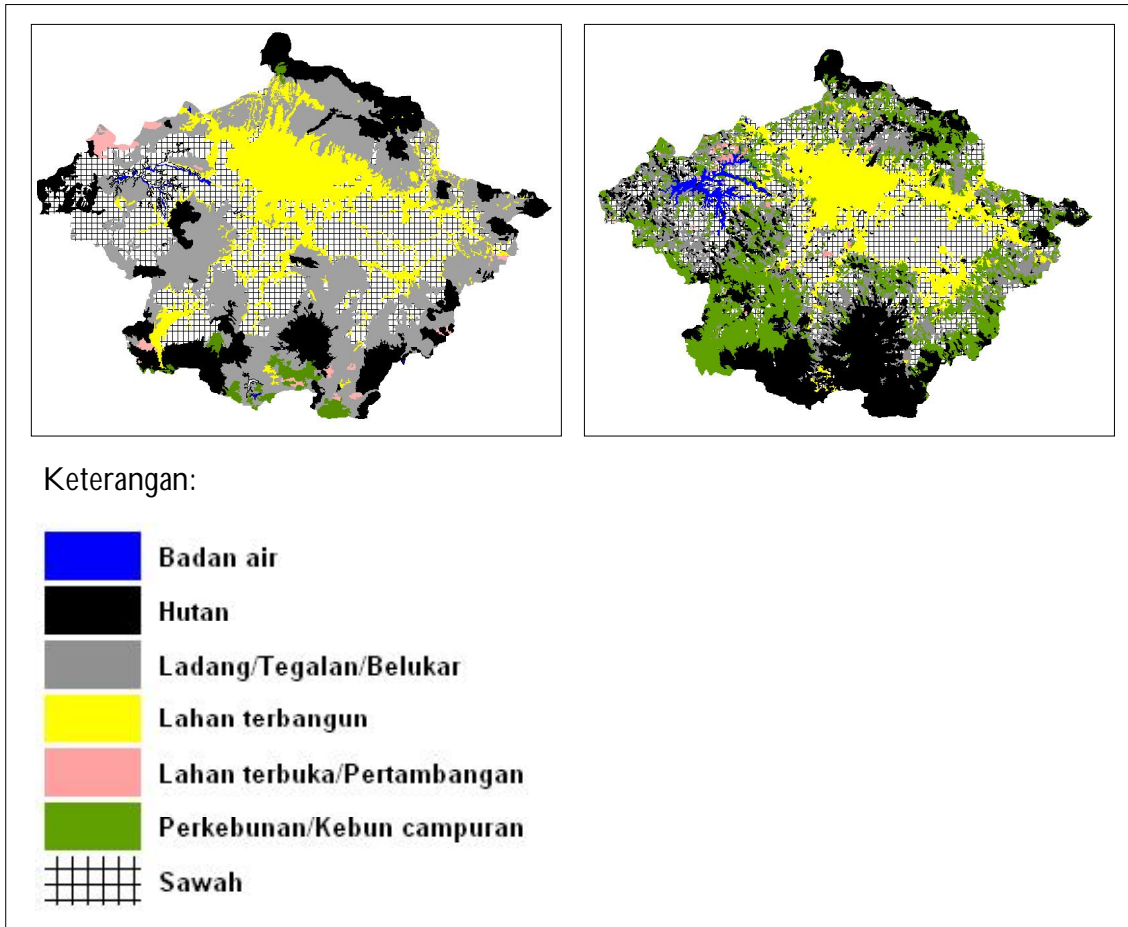
Salah satu dampak dari laju pertumbuhan penduduk adalah eksploitasi lahan. Konversi lahan secara suksesif menjadi pemicu terjadinya ekstrimitas debit dan hujan di lokasi studi. Perubahan tutupan lahan, dari hutan berturut-turut menjadi budidaya, permukiman pedesaan dan urban berdampak semakin besarnya debit limpasan. Tutupan lahan bervegetasi di DAS Citarum Hulu turun sebesar  $\pm 10\%$  selama kurun waktu 10 tahun yaitu tahun 1994-2004 (Gambar 5 dan Gambar 6). Selain sebagai indikator penurunan kualitas DAS, perubahan tutupan lahan tentu saja mempengaruhi perubahan iklim dalam skala mikro maupun meso.

Tabel 2. Perhitungan Elastisitas Debit-Hujan (Lagtime Satu Bulan)

<b>1950-1980 :</b>			
<b>Sebelum Waduk Saguling Dibangun</b>	<b>Q-N</b>	<b>Q-S</b>	<b>P-Wil</b>
Rata-rata	1801	2675	4977
Stdandard deviasi	752	878	1005
Koefisien Variansi	0.42	0.33	0.20
Nilai korelasi, r	0.75	0.67	
Elastisitas	1.55	1.09	
<b>1986-2008:</b>			
<b>Setelah Waduk Saguling Dioperasikan</b>	<b>Q-N</b>	<b>Q-S</b>	<b>P-Wil</b>
Rata-rata	2232	2833	3818
Stdandard deviasi	510	677	693
Koefisien Variansi	0.23	0.24	0.18
Nilai korelasi, r	0.54	0.57	
Elastisitas	<b>0.68</b>	<b>0.75</b>	

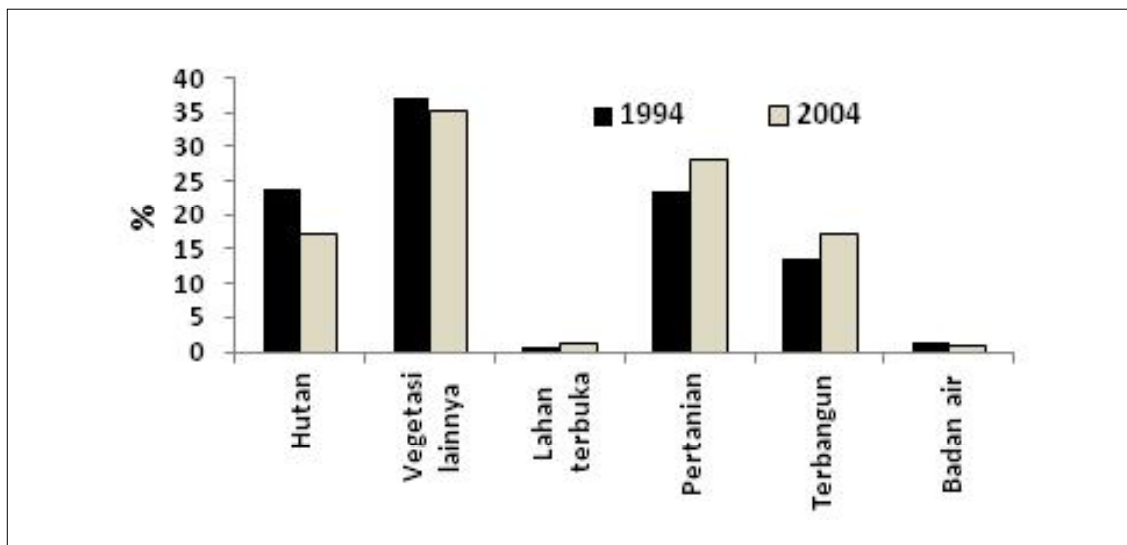
Sumber: hasil analisis





Sumber: hasil analisis

Gambar 5. Perubahan Guna Lahan di Das Citarum Hulu (1994-2004)



Sumber: hasil analisis

Gambar 6. Persentase perubahan guna lahan di DAS Citarum Hulu (1994-2004)

Peranan vegetasi di suatu lokasi adalah meningkatkan indeks konservasi karena rekahan atau pori-pori tanah akan meningkatkan porositas, dan meningkatkan infiltrasi karena ruang tanah melebar sehingga dapat menampung banyak air dan mengurangi limpasan. Tabel 3 menunjukkan perubahan lahan (lahan bervegetasi dan lahan terbangun), perubahan hujan wilayah rata-rata tahunan, serta perubahan debit terukur di pos Nanjung (yang mewakili sebagian besar debit runoff dari Cekungan Bandung). Hasil perhitungan tersebut (Tabel 3) terlihat bahwa penurunan persentase lahan bervegetasi dan peningkatan lahan terbangun (dari tahun 1994-2004) seiring dengan penurunan hujan (baik rata-rata maupun tahunan), demikian halnya dengan data debit. Namun apabila melihat perubahan debit minimum terhadap hujan minimum, menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan. Artinya

perubahan hujan minimum hanya 8,33% memberikan perubahan debit minimum sebesar 46%. Dengan demikian fungsi atau peranan vegetasi dalam hal meningkatkan indeks konservasi semakin menurun dengan adanya perubahan atau konversi lahan dari lahan bervegetasi menjadi lahan terbangun.

Oleh karena itu untuk menjaga agar ketersediaan air tetap kontinu, diperlukan upaya mengendalikan kerusakan sumber air. Salah satu bentuk pengendalian kerusakan sumber air adalah mengendalikan konversi lahan dengan menetapkan batasan ruang hidrologis secara tegas antara kawasan konservasi dan kawasan budidaya/kerja. Dengan demikian pengendalian konversi lahan sama pentingnya dengan upaya adaptasi terhadap perubahan iklim yang ada dalam kerangka mencapai keberlanjutan (infrastruktur) sumber daya air.

Tabel 3. Perubahan Variabel Penggunaan Lahan, Hujan dan Debit Kurun Waktu 1994-2004

Variabel	Tahun		Persen Perubahan	
	1994	2004		
Penggunaan Lahan	Hutan (ha)	553.18	400.45	-27.61
	Vegetasi lainnya (ha)	865.41	824.26	-4.76
	Terbangun (ha)	315.76	396.78	25.66
Hujan (P)	$P_{\min}$ (mm/bln)	12	11	-8.33
	$P_{\text{rata-rata}}$ (mm/bln)	136.60	103.75	-24.05
	$P_{\text{tahunan}}$ (mm/th)	1639.21	1245.03	-24.05
Debit (Q)	$Q_{\min}$ ( $\text{m}^3/\text{dt}$ )	6.51	3.49	-46.39
	$Q_{\text{rata-rata}}$ ( $\text{m}^3/\text{dt}$ )	73.52	59.23	-19.44
	$Q_{\text{tahunan}}$ ( $12 \times \text{m}^3/\text{dt}$ )	882.25	710.70	-19.44

Sumber: hasil analisis

## KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian ini dapat diambil kesimpulan (1) Nilai elastisitas debit tercatat di pos Nanjung dan pos Saguling menurun dari sebelum waduk dibangun dan setelah waduk dioperasikan; (2) Debit tercatat di Pos Nanjung lebih sensitif terhadap variabilitas curah hujan daripada debit tercatat di Pos Saguling; (3) Pembangunan waduk memberikan efek positif dalam meredam pengaruh variabilitas iklim (hujan) terhadap debit aliran. Kestabilan debit aliran sangat diperlukan dalam mempertahankan keberlanjutan sumber air (infrastruktur sumberdaya air); (4) Dampak konversi lahan dalam proses input-output DAS (hujan menjadi debit) di lokasi studi terlihat signifikan yang artinya bahwa fungsi vegetasi sangat diperlukan dalam rangka mempertahankan

debit aliran dasar yang diperlukan untuk keberlanjutan infrastruktur sumberdaya air; (5) Elastisitas debit sungai terhadap perubahan iklim di lokasi studi (DAS Citarum Hulu) berkaitan erat dengan perubahan penggunaan lahan. Perubahan penggunaan lahan memberikan pengaruh terhadap perubahan iklim. Konversi lahan dari lahan bervegetasi menjadi lahan terbangun, selain memberikan pengaruh terhadap perubahan iklim baik secara mikro maupun meso, juga memberikan dampak terhadap perubahan debit aliran sungai secara langsung; (6) Untuk mengurangi tingkat elastisitas debit terhadap perubahan iklim, diperlukan pengendalian konversi lahan, baik secara tidak langsung (*indirect*) dengan peraturan perundangan, atau secara langsung (*direct*) dengan insentif-disinsentif.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anna, Alif Noor, Suharjo, Munawar Cholil. (2011). Analisis Fluktuasi Hujan dan Morfologi Sungai Terhadap Konsentrasi Banjir Daerah Surakarta. *Forum Geografi*. Vol. 25, No. 1, Juli 2011: 41 – 52.
- Arwin, Sirtadian, A.D., Juwana, I. (2002). Studi Statistika Komponen Utama Hidrologi di Daerah Aliran Sungai dalam Rangka Ketersediaan Sumber Air Bersih. *Jurnal ITENAS*, No.3, Vol. 6, Sept-Nov 2002, 86-97.
- Arwin. (1993). Rainfall-runoff Watershed Model by Multiple Regression Method for Optimizing Hydroelectric Power of Saguling with Uncertain Future. *Conference Paper 4<sup>th</sup> IAWQ (International Association on Water Quality) Vol. 1 on Water Conservation and Pollution Control*, Jakarta 5-9 October 1993, Indonesia.
- Arwin. (2009). Perubahan Iklim, Konversi Lahan, dan Ancaman Banjir dan Kekeringan di Kawasan Terbangun. *Pidato Ilmiah Guru Besar ITB-Majelis Guru Besar ITB*. CV Senatama Wikarya-Bandung.
- Chiew, F.H.S. (2006). Estimation of Rainfall Elasticity of Streamflow in Australia. *Hydrological Science Journal*, 51, 613-625

- Hart, B.T., Dok, Wendy van, and Djuangsih, N. (2002). Nutrient budgent for Saguling Reservoir, West Java, Indonesia. *Water Research*, 36, 2152-2160.
- Koutsoyiannis, D. (2008). On Detectability of Nonstationary from Data Using Statistical Tool. *European Geoscience Union General assembly, Vienna-Austria 13-18 April 2008*.
- Liu, Qiang dan Cui, Baashan. (2009). Impact of Climate Change/Vulnerability on the Stream Flow in The Yellow River Basin, China. *Ecolological Modeling xxx (2009)*, xxx-xxx, Elsevier Publisher-(article in press)
- NUDS (*National Urban Development and Strategy*). (1985). *Penyusunan Kerangka Struktur Ruang Metropolitan Bandung*. Ditjen Ciptakarya-Departemen PU.
- Pribadi, K. N dan Oktavia, P. (2007). Pengelolaan Sumber Daya Air Terpadu Melalui Pengembangan Kebijakan Pembangunan Berkelanjutan di Cekungan Bandung. *Jurnal Perencanaan Wilayah dan Kota*, Vol. 18 No. 2, 1-32.
- Sankarasubramanian, A. and Vogel, R.M., Limbrunner, J.F. (2001). Climate elasticity of streamflow in the United States. *Water Resources Research*, 37, 1771-1781.
- Tjasyono, Bayong. (2004). *Klimatologi*. ITB Press, Bandung.