

DAMPAK PERUBAHAN IKLIM (CURAH HUJAN) TERHADAP KEBERLANJUTAN INFRASTRUKTUR SUMBER DAYA AIR

Dyah Marganingrum¹, Dwina Roosmini¹, Pradono², dan Arwin¹

¹KK Teknologi Pengelolaan Lingkungan-Jurusan Teknik Lingkungan ITB

²KK Sistem Infrastruktur Wilayah dan Kota-SAPPK ITB

JL. Ganesha No. 10 Bandung

Email : dmarganingrum@yahoo.com

Abstract

The aims of this study is to describe the climate elasticity of stream flow level. That is needed related with the design criterion of water resources infrastructure evaluation as like Water Supply System and reservoir. The research is conducted in the Upper Citarum watershed with used statistical analysis approach using moving average method and tri variate model. Data analysis is done for 1986-2008. The result of analysis shows that climate change is portrayed as rainfall in the study area tended to decrease. Stream flow are measured at Maribaya station or Nanjung station on the contrary (minimum stream flow tends to decrease; the maximum stream flow tends to increase). The climate elasticity of stream at Maribaya station or Nanjung station is 64% and 76% respectively. The land use changes, from vegetation become built up on the conservation area in Bandung basin, to be one cause of stream flow extremes. In accordance with the law of mass balance, the fraction of rainfalls that become runoff more than infiltrated so maximum stream flow increases while base flow decreased. These conditions are a threat to water resources infrastructure that requires continuity of water resources, both in quantity and quality. Therefore we need better control of water sources by direct / indirect and engineering technology as a form of mitigation and adaptation to climate change.

Keywords: rainfall, stream flow, infrastructure, water supply system.

Abstrak

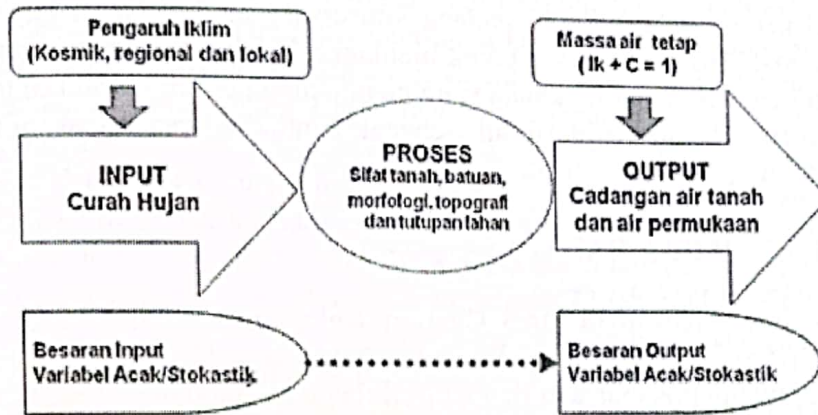
Studi ini bertujuan untuk menggambarkan tingkat elastisitas debit sungai terhadap perubahan iklim. Hal ini diperlukan terkait dengan evaluasi kriteria disain infrastruktur sumber daya air seperti SPAM dan waduk. Penelitian dilakukan di DAS Citarum Hulu dengan pendekatan analisa statistik menggunakan metode *moving average* dan *tri variate model*. Analisis data dilakukan dalam kurun waktu 1986-2008. Hasil analisa menunjukkan bahwa perubahan iklim yang digambarkan sebagai curah hujan di lokasi studi cenderung makin menurun. Sebaliknya debit aliran yang diukur di Pos Maribaya maupun Nanjung menunjukkan nilai yang ekstrim (debit minimum menurun, debit maksimum meningkat). Nilai elastisitas debit terhadap perubahan hujan baik di Pos Maribaya maupun Pos Nanjung masing-masing sebesar 64% dan 76%. Perubahan penggunaan lahan, dari lahan bervegetasi menjadi lahan terbangun (pemukiman), di kawasan konservasi DAS Citarum Hulu, menjadi salah satu penyebab terjadinya ekstrimitas debit. Sesuai dengan hukum kekekalan massa, maka fraksi hujan yang jatuh ke permukaan bumi lebih banyak menjadi *run off* sehingga menyebabkan debit maksimum meningkat. Sedangkan fraksi hujan yang meresap ke dalam tanah menurun sehingga *baseflow* berkurang. Kondisi ini mengancam keberlanjutan infrastruktur sumber daya air yang memerlukan kontinuitas sumber air. Oleh karena itu diperlukan pengendalian sumber air baik secara *direct/indirect* maupun rekayasa teknologi sebagai bentuk upaya mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim.

Kata kunci : curah hujan, debit sungai, infrastruktur, SPAM

1. PENDAHULUAN

Sumber daya air adalah sumber daya alam yang dapat diperbaharui melalui siklus hidrologi yang dipengaruhi oleh iklim (kosmik, regional, maupun lokal), dimana komponennya merupakan variabel acak dan cenderung stokastik (Arwin, 2009). Masalah

sumber daya air tidak bisa dilepaskan dari masalah DAS (Daerah Aliran Sungai), hujan dan iklim. Berbagai sumber menyebutkan bahwa definisi DAS adalah suatu daerah yang dibatasi oleh pemisah topografi, yang menerima hujan, menampung, menyimpan, dan mengalirkannya ke sungai dan seterusnya ke danau atau ke laut (Suripin, 2004, UU No. 7/2004). Dengan demikian DAS dapat digambarkan sebagai suatu model sistem input-output seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.1 (Suripin, 2004). Sebagai input DAS adalah curah hujan dan output DAS adalah debit aliran sungai (air permukaan) dan cadangan air tanah. Sedangkan proses yang terjadi dipengaruhi oleh kualitas DAS itu sendiri yang tergantung pada faktor topografi, morfologi, jenis tanah/geologi, dan perubahan tata guna lahan (Keppres 114/1999).



Gambar 1.1. Model fisik sistem input-output DAS.

Sumber : Arwin (2009), Suripin (2004) dengan modifikasi.

Perubahan curah hujan sebagai salah satu unsur iklim dan merupakan satu-satunya input dalam suatu sistem DAS, tentunya memberikan dampak terhadap debit aliran sungai. Menurut IPCC, hujan merupakan penyebab utama variabilitas keseimbangan jumlah air di permukaan bumi dalam skala ruang dan waktu sehingga perubahan hujan memiliki dampak penting terhadap hidrologi dan sumber daya air (Novotny dan Stefan, 2007).

Oleh karena itu analisis terhadap ketersediaan air selalu dikaitkan dengan evaluasi terhadap data hujan dan data debit yang terukur (Triatmodjo, 2009). Ketersediaan air adalah jumlah air (debit) yang diperkirakan terus menerus ada di suatu lokasi (bendung atau bangunan air lainnya) atau di sungai dengan jumlah tertentu dan dalam jangka waktu tertentu (Direktorat Irigasi, 1980 dalam Triatmodjo, 2009). Informasi mengenai keandalan ketersediaan air (debit andalan) diperlukan guna memperkirakan jumlah pemanfaatannya secara berkelanjutan. Debit andalan adalah debit minimum sungai dengan besaran tertentu dengan kemungkinan terpenuhi untuk pemanfaatan berbagai keperluan. Sebagai contoh adalah intake Bantar Awi (IPA Pakar). IPA tersebut mengambil air baku dari sungai Cikapundung. Kapasitas disain yang direncanakan adalah 600 liter/detik dengan keandalan sebesar 95% (periode ulang 20 tahun) artinya dalam 20 tahun hanya akan terjadi satu kali debit kurang dari 600 liter/detik.

Dengan demikian evaluasi perubahan iklim secara periodik (termasuk evaluasi kualitas DAS), cukup penting bagi kelangsungan infrastruktur sumber daya air, yang dalam kasus ini adalah berkaitan dengan sistem penyediaan air minum. Hal ini mengingat tingkat kebutuhan air bersih di Cekungan Bandung semakin meningkat seiring dengan laju pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi di Cekungan Bandung. Keadaan ini adalah konsekuensi logis ditetapkannya kawasan Cekungan Bandung sebagai kawasan strategis nasional sekaligus fungsi yang disandang Kota Bandung sendiri sebagai inti kawasan yang

memerlukan dukungan sarana dan prasarana, termasuk air bersih (Irhaz, 2008; Lampiran PP RI No. 26/2008).

Susbtitusi air tanah dengan air permukaan telah dicanangkan sejak tahun 90-an, namun sampai saat ini, pemanfaatan air tanah di kawasan Cekungan Bandung masih menjadi sumber utama untuk memenuhi kebutuhan domestik, *municipalities* (perkotaan) dan industri yang sering disebut Domestic Municipalities Industry (DMI). Pemerintah memberikan ijin penggunaan air tanah yang terbatas. Namun dengan semakin meningkatnya kebutuhan, sementara ketersediaan air dari sistem penyediaan air bersih (PDAM) tidak memenuhi, menjadi salah satu penyebab pemanfaatan air tanah semakin tidak terkendali. Kondisi ini masih tetap berlangsung dan menjadi *trigger* terjadinya penurunan tanah (*land subsidence*).

Oleh karena itu pemikiran tentang konservasi sumber air di kawasan Cekungan Bandung menjadi suatu keharusan untuk menjamin kontinuitas pembangunan di kawasan ini. Studi ini menjadi salah satu kajian yang mendukung perlunya evaluasi terhadap kriteria disain infrastruktur sumber daya air sebagai bentuk adaptasi dan mitigasi terhadap perubahan iklim.

2. LOKASI STUDI DAN DATA

Studi ini dilakukan di DAS Citarum Hulu dimana sebagian besar wilayahnya masuk dalam kawasan Cekungan Bandung (Gambar 2.1). Secara administratif DAS Citarum Hulu meliputi Kabupaten Bandung, Kabupaten Bandung Barat, tiga kecamatan di Kabupaten Sumedang, Kota Bandung, dan Kota Cimahi dengan luas DAS $\pm 2338 \text{ km}^2$. Muara dari DAS Citarum Hulu adalah waduk Saguling yang dikelola oleh PT. Indonesia Power. DAS Citarum Hulu memiliki 8 sub DAS besar yaitu sub DAS Cirasea, Cisangkuy, Ciwidey, Citarik, Cikeruh, Cikapundung, Cimahi-Cibereum, Ciminyak dan Cihaur. Kecuali sub DAS Ciminyak dan Cihaur, enam sub DAS lainnya bertemu di Nanjung sebelum masuk ke waduk Saguling. Sebesar 75% dari total inflow waduk Saguling berasal dari keenam sub DAS tersebut (Hart et al., 2002). Fungsi waduk Saguling pada saat dibangun direncanakan untuk PLTA dan irigasi.



Gambar 2.1. Lokasi studi.

Jumlah penduduk di Cekungan Bandung pada akhir tahun 2008 hampir mencapai \pm 7,7 juta jiwa (BPS, 2009). Berdasarkan klasifikasi kota berdasarkan populasi, dikategorikan sebagai Kota Metropolitan (Tamin, 2008). Sumber air bersih untuk kebutuhan masyarakat di kawasan ini diperoleh baik dari air permukaan, air tanah, mata air maupun jasa sistem penyediaan air minum (SPAM). Tingkat pelayanan SPAM yang dikelola oleh PDAM di kawasan ini tidak lebih dari 30% (Dinas Tata Ruang, Perumahan dan Permukiman Provinsi Jawa Barat, 2010). Dengan meningkatnya laju permintaan air bersih di kawasan Cekungan Bandung, maka perlu dicari sumber air yang terjamin kontinuitasnya, baik dari aspek kuantitas, kualitas maupun aspek ekonomis. Salah satu sumber air yang memiliki potensi adalah dari waduk Saguling. Sehingga fungsi waduk Saguling perlu ditingkatkan menjadi waduk multi sektor dengan pemanfaatan termasuk untuk kebutuhan air minum. Hal ini memerlukan kajian tentang hubungan antara hujan-debit guna mengantisipasi ketersediaan air di waduk Saguling agar tetap dapat memenuhi semua kebutuhan (keseimbangan *supply-demand*) dengan mempertimbangkan rencana pengembangannya.

Sumber data yang digunakan untuk studi ini diperoleh dari PT. Indonesia Power dan Dinas PSDA Provinsi Jawa Barat. Koleksi data yang terkumpul adalah data hujan dan debit harian dengan periode waktu 1986-2008. Data hujan meliputi data hujan harian dari 18 pos hujan yang tersebar diseluruh kawasan selama 23 tahun (1986-2008). Sedangkan data debit di Pos Nanjung dan Pos Maribaya masing-masing adalah 22 tahun dengan periode pengukuran 1986-2007 dan 21 tahun dengan periode pengukuran 1986-2006.

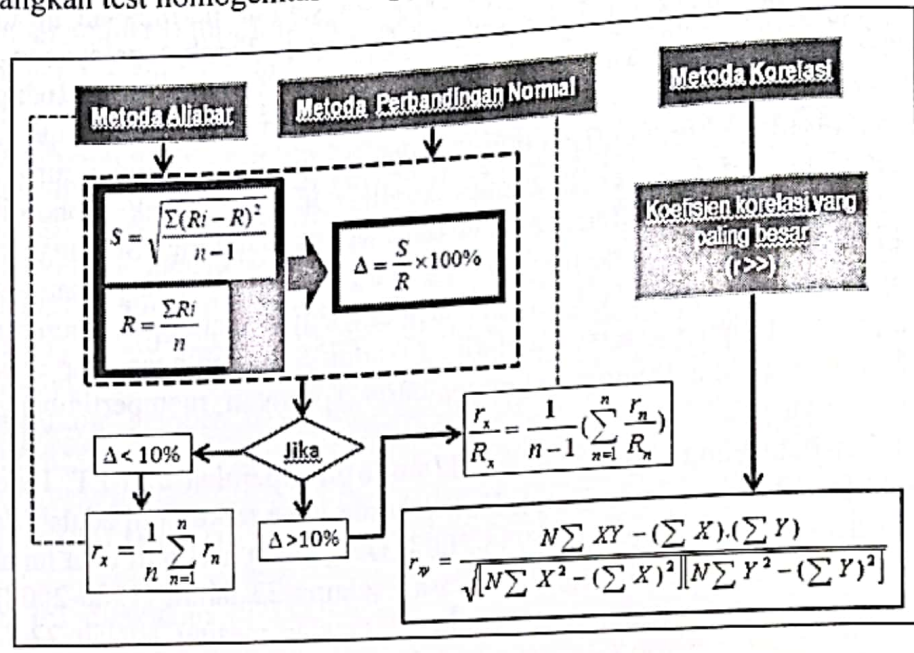
Pos debit Maribaya merupakan lokasi pengukuran debit sungai Cikapundung. Lokasi pos ini merupakan hulu dari intake IPA Bantar Awi (IPA Pakar) yang dikelola oleh PDAM Kota Bandung untuk daerah pelayanan Bandung Utara dengan kapasitas pengambilan 600 L/detik. Sedangkan pos debit Nanjung merupakan pos primer waduk Saguling.

3. METODE

Metode pengolahan data hujan dilakukan dengan metode analisis data hidrologi secara umum. Pengolahan data diawali dengan teknik melengkapi data yang hilang, test konsistensi, dan test homogenitas. Metode yang digunakan untuk melengkapi data yang hilang adalah dengan cara rata-rata aljabar atau metode perbandingan normal, dan regresi linier sederhana (Melinda, 2007; Arwin, 2009). Gambar 3.1 menunjukkan aliran keputusan pemilihan metode dalam melengkapi data hujan yang hilang. Metode rata-rata aljabar dan perbandingan normal adalah metode melengkapi data yang telah dan sering digunakan dalam studi-studi hidrologi. Metode rata-rata aljabar dilakukan dengan cara menghitung nilai rata-rata hitung stasiun terdekat. Metode ini dapat digunakan apabila perbedaan curah hujan tahunan normal antara stasiun pembanding dengan stasiun yang kehilangan data ($\Delta = S/R$) kurang dari 10%. Apabila nilai Δ lebih dari 10% maka digunakan metode perbandingan normal. Oleh karena itu sebelum memutuskan untuk memilih kedua metode tersebut, maka perlu menentukan nilai Δ terlebih dahulu atau selisih curah hujan tahunan normal antara stasiun pembanding (stasiun yang memiliki data lengkap) dengan stasiun yang datanya akan dilengkapi.

Sedangkan metode regresi linier adalah metode melengkapi data yang relatif baru dan belum banyak digunakan dalam analisis data hidrologi (Triatmodjo, 2009; Arwin, 2009). Metode regresi linier sederhana menggunakan nilai keterkaitan korelasi antar pos hujan yang ada, dimana pos-pos hujan dengan korelasi terbesar dapat digunakan untuk saling mengisi. Metode ini mengasumsikan bahwa dua pos hujan yang memiliki korelasi

terbesar memiliki peluang kejadian hujan yang sama, dimana besarnya tinggi hujan dapat digambarkan secara linier (Linsley, 1979). Data hujan yang telah lengkap, selanjutnya diuji konsistensi dan homogenitasnya. Test konsistensi dilakukan dengan metode kurva massa ganda. Sedangkan test homogenitas menggunakan nilai Tr dan uji Bartlet.



Gambar 3.1. Skema alur metode melengkapi data hujan.

Untuk analisis sumber daya air maka perlu dilakukan pendekatan dengan menentukan hujan rata-rata wilayah. Metode yang digunakan untuk menghitung hujan rata-rata wilayah adalah metode polygon thiessen. Pemilihan metode ini selain karena pertimbangan jumlah pos dan luas DAS, juga karena dasar teori bahwa setiap pos hujan memberikan pengaruh terhadap hujan wilayah di sebuah DAS dimana pos yang berdekatan memiliki korelasi kejadian hujan yang sama (Asdak,2002; Suripin, 2004; Sutjiningsih et al, 2008; Arwin, 2008).

Analisis kecenderungan (*trend*) dilakukan terhadap hujan wilayah, debit maksimum dan minimum menggunakan metode *moving average*. Metode *moving average* adalah salah satu teknik untuk mentransformasi rata-rata waktu yang dapat diterima untuk menggambarkan *trend* suatu data *time serries* (Koutsoyiannis, 2008). Sedangkan untuk mengetahui pengaruh perubahan iklim terhadap debit sungai (elastisitas P dan Q) dilakukan analisis terhadap data hujan dan debit tahunan (Novotny dan Stefan, 2007). Elastisitas debit sungai terhadap perubahan iklim dapat didefinisikan sebagai perbedaan proporsional antara perubahan debit sungai terhadap perubahan curah hujan seperti digambarkan dalam persamaan berikut (Schaake, 1990; Sankarasubramanian et al, 2001; Liu dan Cui, 2009).

$$\epsilon_p(P,Q) = \frac{dQ/Q}{dP/P} = \frac{dQ}{dP} \frac{P}{Q} \dots\dots\dots (3.1)$$

Dimana : ϵ_p adalah elastisitas debit sungai terhadap perubahan iklim, dQ/Q dan dP/P masing-masing adalah perubahan satuan debit dan perubahan satuan curah hujan. Sankarasubramanian et al (2001) menerapkan persamaan 3.1 pada nilai rata-rata variabel iklim (curah hujan) yang dapat dianggap sebagai ukuran untuk membandingkan respon debit aliran terhadap perubahan iklim. Sehingga persamaan 3.1 dapat ditulis sebagai berikut :

$$\epsilon_p (\mu_P, \mu_Q) = (dQ/dP) |_{(\mu_P/\mu_Q)} \dots \dots \dots (3.2)$$

Dimana : $(dQ/dP) |_{(\mu_P/\mu_Q)}$ adalah perubahan nilai rata-rata satuan debit dan hujan.

Persamaan 3.2 menggambarkan *intrinsic property of catchment* (Chiew, 2006). Untuk mengestimasi nilai ϵ_p pada persamaan 3.2, dapat dilakukan dengan dua pendekatan (Sankarasubramanian et al, 2001):

1. Menggunakan pendekatan nonparameter alami (*the natural nonparametric approach*):

$$\epsilon_p = \text{median} (Q_t - \bar{Q})\bar{P} / (P_t - \bar{P})\bar{Q} \dots \dots \dots (3.3)$$

Dimana : ϵ_p adalah elasisitas debit sungai terhadap perubahan iklim, Q_t dan P_t masing-masing adalah nilai debit dan hujan pada waktu t , \bar{Q} dan \bar{P} masing-masing adalah debit rata-rata dan hujan rata-rata dari seri data yang ditentukan.

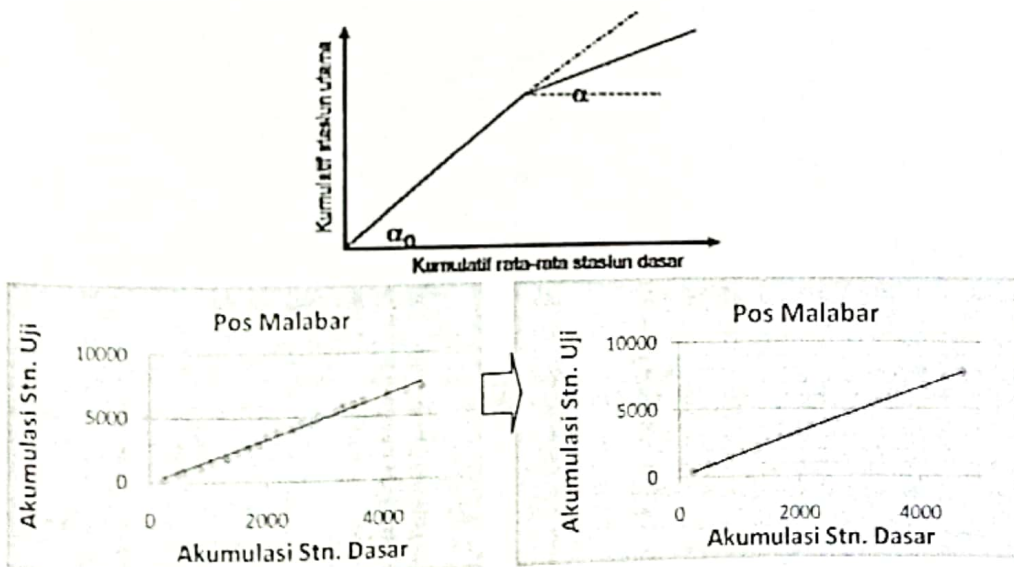
2. Menggunakan model tiga variat (*tri-variate model*) sebagai estimator kedua :

$$\epsilon_p = \rho_{Q,P}(C_Q/C_P) \dots \dots \dots (3.4)$$

Dimana : ϵ_p adalah elasisitas debit sungai terhadap perubahan iklim, $\rho_{Q,P}$ adalah koefisien korelasi antara Q dan P , sedangkan C_Q dan C_P masing-masing adalah koefisien variasi Q dan P .

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

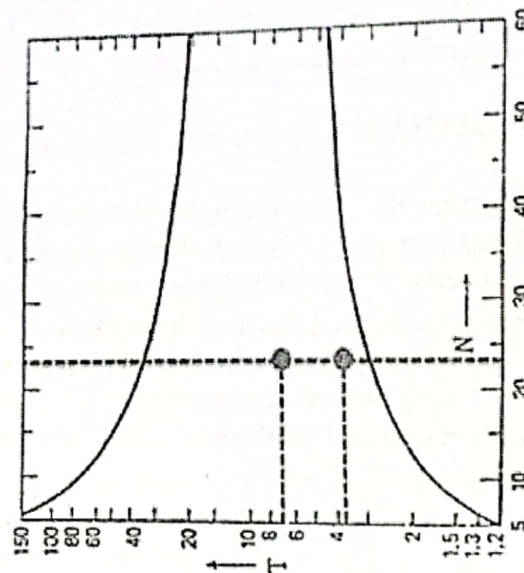
Data hujan kosong dilengkapi dengan metode perbandingan normal dan regresi linier sederhana. Kedua metode tersebut diterapkan untuk data hujan bulanan. Test konsistensi diterapkan pada data hujan bulanan untuk setiap pos hujan. Dari 18 pos hujan, satu pos menjadi stasiun uji dan 17 pos lainnya menjadi stasiun dasar. Test konsistensi dilakukan sebagai bentuk justifikasi bahwa data yang diperoleh dari setiap pos tidak mengalami perubahan lokasi, prosedur, dan cara pengukuran, atau pengukuran curah hujan tidak terhalang oleh vegetasi atau bentuk penghalang lainnya.



Gambar 4.1. Hasil test konsistensi untuk pos Malabar pada bulan Desember.

Metode yang digunakan adalah dengan teknik kurva massa ganda (*double mass curve technique*). Akumulasi rata-rata hujan stasiun dasar dan stasiun utama mulai dengan mengamati kalender terakhir di lotkan sebagai sumbu x dan y ada suatu grafik. Jika terjadi perubahan slope maka data dikalikan rasio dengan suatu faktor koreksi ($\tan \alpha / \tan \alpha_0$). Gambar 4.1 menunjukkan salah satu contoh hasil test konsistensi.

Test homogenitas juga dilakukan setiap bulan untuk 18 pos hujan. Hasil analisis menunjukkan bahwa data hujan dari 18 pos hujan yang tersebar di DAS Citarum Hulu adalah homogen. Artinya nilai T_r hasil perhitungan dengan jumlah $N = 23$ tahun berada di dalam lengkung daerah homogen, yaitu antara 3,9 – 7,2 (Gambar 4.2). Selain itu dari uji Bartlett dengan test χ^2 menunjukkan bahwa χ^2 hitung (= 3,1) lebih kecil dari χ^2 tabel (= 28) yang artinya bahwa data homogen. Data hujan yang telah lengkap, konsisten, dan homogen, baik dengan metode normal maupun regresi dilakukan uji t untuk melihat perbedaannya. Hasil uji t untuk uji hipotesis dua *mean* (rata-rata) varians yang homogen menunjukkan bahwa kedua metode tersebut tidak memberikan perbedaan yang signifikan. Oleh karena itu untuk analisis selanjutnya menggunakan data hujan yang telah dilengkapi dengan menggunakan metode regresi linier, baik untuk menentukan hujan rata-rata wilayah maupun korelasi dengan data debit.



Gambar 4.2. Hasil tes homogenitas 18 pos hujan data hujan bulanan (Januari-Desember).

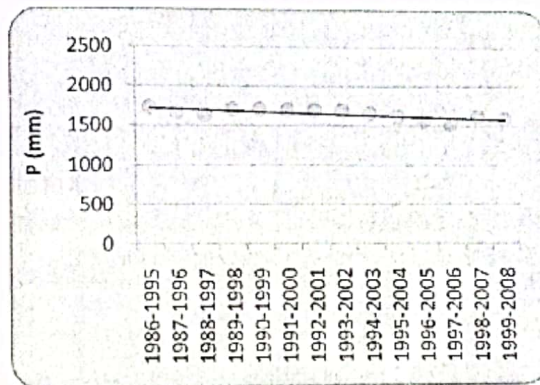
Pola hujan di setiap pos hujan yang tersebar di DAS Citarum Hulu menggambarkan tipe hujan monsoon yang hampir sama. Bulan basah terjadi antara bulan November-April dan bulan kering terjadi pada bulan Juni-September. Sedangkan bulan Mei dan Oktober adalah masa peralihan. Tabel 4.1 menunjukkan hasil perhitungan hujan rata-rata wilayah menggunakan metode polygon Thiessen. Selama kurun waktu tersebut memperlihatkan adanya kecenderungan bahwa hujan di DAS Citarum Hulu mengalami penurunan dengan nilai rata-rata hujan tahunan sebesar 1672 mm (Gambar 4.3).

Hasil analisis data debit di Pos Maribaya maupun Nanjung menunjukkan karakteristik acak sebuah komponen hidrologi (Gambar 4.4).

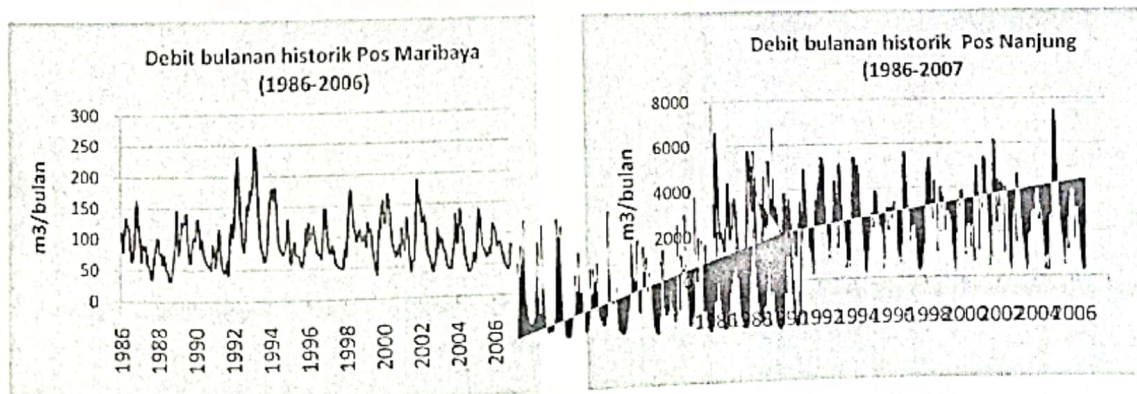
Tabel 4.1. Hujan Rata-rata Wilayah

Tahun	Curah Hujan (mm)	Tahun	Curah Hujan (mm)
1986	2346	1998	2304
1987	1601	1999	1788
1988	1590	2000	1544
1989	1761	2001	1538
1990	1672	2002	1639
1991	1578	2003	1436
1992	1653	2004	1257
1993	1758	2005	1281
1994	1660	2006	1342
1995	1842	2007	2187
1996	1721	2008	1983
1997	1259		

Sumber : Hasil perhitungan, 2010



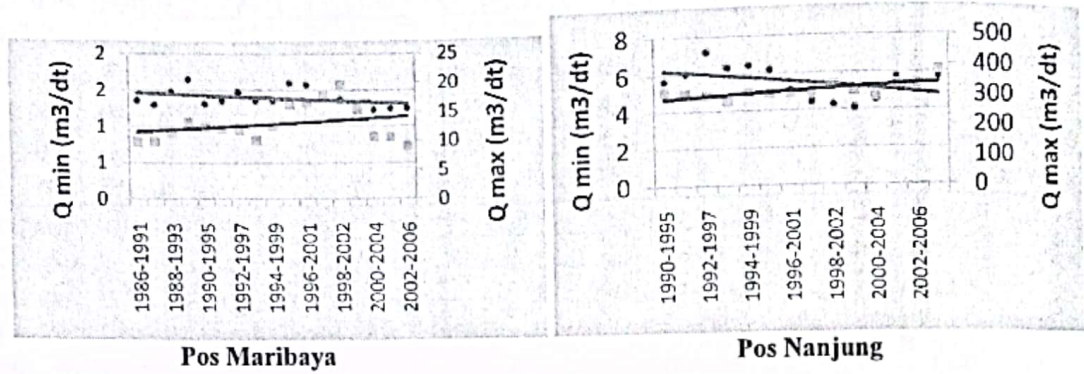
Gambar 4.3. Sensibilitas hujan wilayah di DAS Citarum Hulu periode 1986-2008



Gambar 4.4. Debit bulanan historik yang terukur di Pos Maribaya dan Pos Nanjung

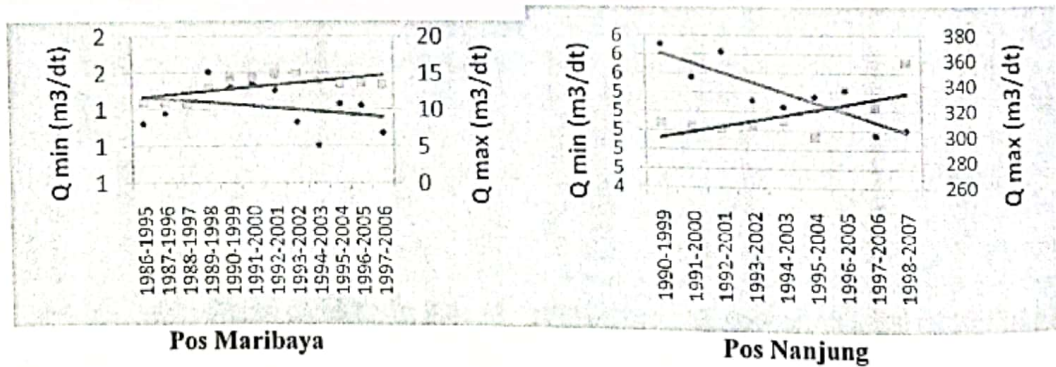
Untuk mengetahui kecenderungan data tersebut dilakukan metode *moving average* (5 tahun dan 10 tahun). Dengan metode *moving average* terlihat bahwa debit minimum dan maksimum tahunan di Pos Maribaya maupun Nanjung memberikan kecenderungan yang sama. Debit minimum yang dimaksud adalah debit satu hari terendah dalam satu tahun. Analisis debit minimum ini diperlukan untuk perencanaan air baku. Sedangkan debit maksimum yang dimaksud adalah debit harian tertinggi dalam satu tahun. Analisis debit maksimum dikaitkan dengan pengendalian banjir. Baik debit minimum maupun maksimum, keduanya merupakan variabel acak. Namun demikian, untuk tujuan

perencanaan perlu diketahui kecenderungannya (pola suksesifnya sepanjang tahun atau dalam periode tahun tertentu) menggunakan metode *moving average*. Hasil analisis data menunjukkan bahwa debit minimum cenderung mengalami penurunan sedangkan debit maksimum cenderung meningkat selama periode 1986-2008 (Gambar 4.5 dan Gambar 4.6). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa telah terjadi ekstrimitas debit.



Gambar 4.5. Debit minimum dan maksimum harian di Pos Maribaya dan Pos Nanjung (MA 5 Tahun).

Perencanaan infrastruktur sumber daya air, seperti SPAM (Sistem Penyediaan Air Minum) menuntut kontinuitas sumber air agar tetap dapat memberikan manfaat kepada masyarakat secara berkelanjutan. Artinya debit minimum kurang dari debit perencanaan diharapkan hanya satu kali terlampaui selama kurun waktu perencanaan infrastruktur tersebut. Dengan kondisi ekstrimitas debit yang terjadi selama 1986-2008 (23 tahun) maka evaluasi terhadap kriteria disain perlu dilakukan sebagai bentuk antisipasi kejadian 20 tahun yang akan datang. Untuk SPAM dengan sumber air baku permukaan, maka kriteria debit suksesif kering adalah 10-20 tahun (1-7 hari).



Gambar 4.6. Debit minimum dan maksimum harian di Pos Maribaya dan Pos Nanjung (MA 10 Tahun)

Neraca air yang hanya memperhitungkan aliran air permukaan dan dalam periode waktu yang relatif panjang (bulanan) dapat dinyatakan dengan persamaan (Triatmodjo, 2009):

$$P = Q + ET + I \rightarrow Q = P - ET - I \dots\dots\dots(4.1)$$

Dimana:

P = curah hujan

Q = debit sungai
 ET = evapotranspirasi
 I = infiltrasi

Evapotrasnpirasi dihitung dengan menggunakan metode Thornwaite, dengan persamaan berikut :

$$ET_{\text{bulan}} = 1,62 \left[\frac{10 \cdot T_m}{I} \right]^a$$

$$a = (675 \times 10^{-9} \times I^3) - (771 \times 10^{-7} \times I^2) + (492 \times 10^{-3})$$

$$I = \sum_{m=1}^{12} \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1,514}$$

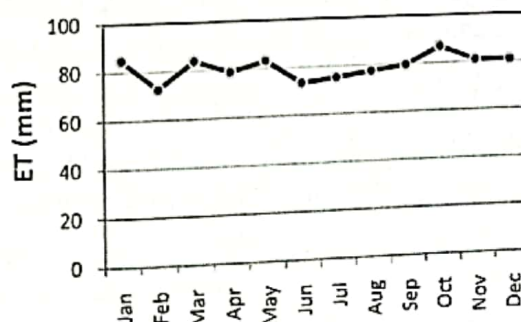
ET_{bulan koreksi} = ET_{bulan} x faktor penyesuaian.

Dimana T_m adalah temperatur rata-rata bulanan. Dengan menggunakan data iklim tahun 1994-2004 di 15 stasiun yang tersebar di wilayah DAS Citarum Hulu diperoleh nilai evapotranspirasi rata-rata bulanan DAS Citarum Hulu seperti ditunjukkan pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.7.

Table 4.2. Evaporasi rata-rata bulanan

Bulan	ET rata-rata (mm)	Bulan	ET rata-rata (mm)
Jan	84.70	Jul	75.14
Feb	72.69	Aug	77.37
Mar	83.76	Sep	79.37
Apr	78.86	Oct	86.69
May	83.05	Nov	80.92
Jun	73.38	Dec	80.83

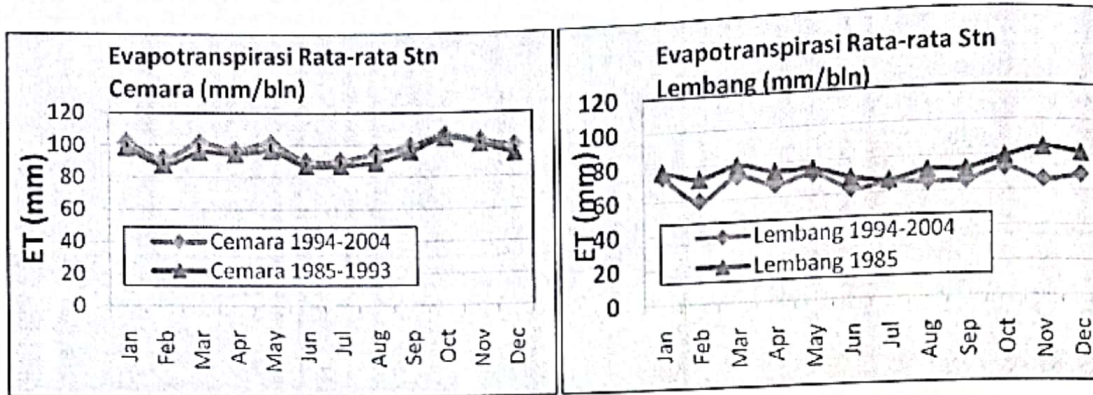
Sumber: Hasil perhitungan, 2010
 Keterangan : Diolah berdasarkan data iklim tahun 1994-2004



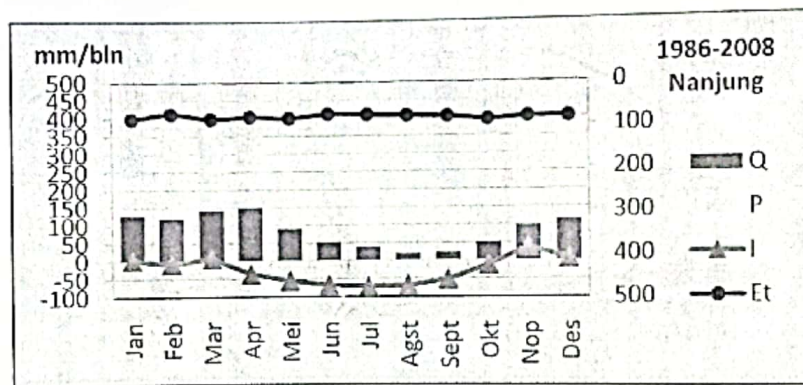
Gambar 4.7. Pola evapotranspirasi bulanan di DAS Citarum Hulu

Perhitungan evapotranspirasi dicoba pada dua stasiun yaitu Cemara dan Lembang untuk mengetahui perbedaannya dari tahun 1985-1993 dengan rata-rata tahun 1994-2004. Di kedua stasun tersebut diperoleh data iklim tahun 1985, namun tidak untuk stasiun lainnya. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa, nilai evapotranspirasi bulanan di dua Lembang maupun Cemara tidak memberikan perbedaan yang cukup signifikan pada periode yang berbeda (Gambar 4.8). Oleh karena itu hasil perhitungan evapotranspirasi

rata-rata bulanan di DAS Citarum Hulu pada periode 1994-2004 dicoba digunakan pada persamaan v bersama dengan hasil perhitungan debit di Pos Nanjung dan hujan rata-rata wilayah DAS Citarum Hulu (setelah dikurangi DAS lokal Saguling). Hasilnya ditampilkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.8. Perbedaan hasil perhitungan evapotranspirasi antara dua periode yang berbeda di dua stasiun iklim stasiun.



Gambar 4.9. Hasil analisis neraca air untuk aliran permukaan

Berdasarkan asumsi bahwa evapotranspirasi tidak memberikan perubahan volume yang signifikan, maka persamaan neraca massa untuk aliran permukaan (persamaan v) dapat disederhanakan sebagai berikut : $P = I + R$

Dimana berturut-turut P adalah curah hujan, I adalah fraksi air hujan yang tertahan dibawah permukaan tanah dan R adalah fraksi air hujan yang menjadi limpasan air permukaan. Bila neraca massa air tersebut dibuat non dimensi maka persamaan massa air menjadi:

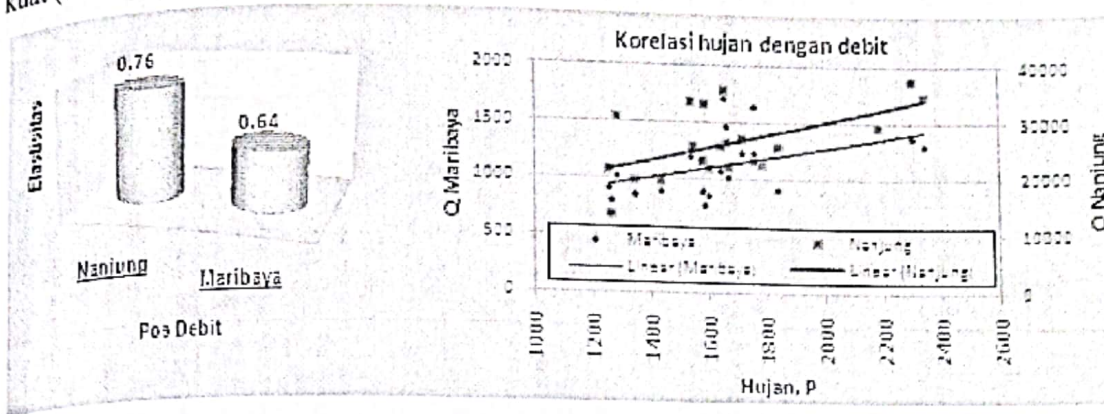
$$1 = \left(\frac{I}{P}\right) + \left(\frac{R}{P}\right) \rightarrow 1 = I_k + C$$

Dimana I_k disebut indeks konservasi dan C adalah koefisien *runoff*.

Gambar 4.5 dan 4.6 menunjukkan bahwa selama kurun waktu 1986-2008 memberikan indikator bahwa fraksi hujan yang mengalir diatas permukaan tanah (*runoff*) meningkat sedangkan penurunan debit minimum sebagai indikator menurunnya *baseflow*.

Selanjutnya untuk mengetahui dampak perubahan hujan terhadap debit aliran ditentukan berdasarkan nilai elastisitas debit. Elastisitas debit, baik di Pos Maribaya maupun Nanjung terhadap perubahan curah hujan cukup signifikan, yaitu masing-masing sebesar 64% dan 76% dengan nilai korelasi masing-masing sebesar 0,47 dan 0,58 (Gambar 4.10). Nilai korelasi tersebut menunjukkan bahwa pengaruh perubahan hujan wilayah

(perubahan iklim) di DAS Citarum Hulu terhdap perubahan debit di kedua pos debit cukup kuat (Soemantri, 2006).



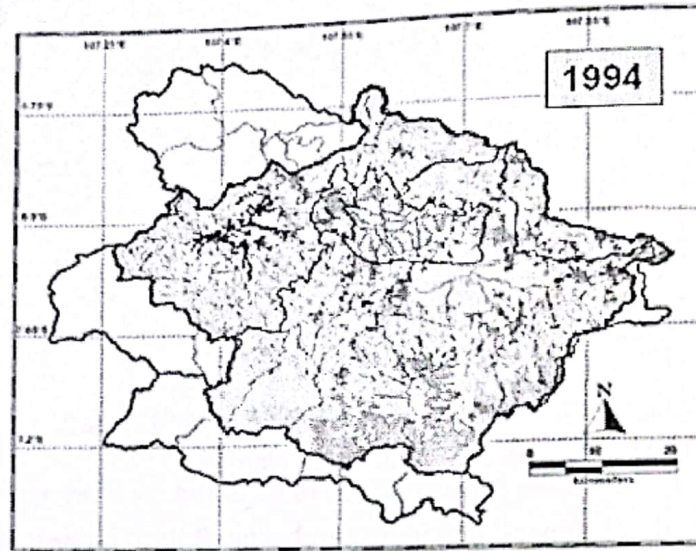
Gambar 4.10. Elastisitas dan korelasi debit sungai Citarum terhadap perubahan hujan yang diamati di Pos Maribaya dan Pos Nanjung.

Elastisitas debit sungai terhadap perubahan iklim (hujan) memberikan indikator bahwa debit sungai Citarum, khususnya yang diukur di Pos Maribaya dan Nanjung cukup sensitif terhadap perubahan hujan wilayah DAS Citarum Hulu. Dengan demikian, evaluasi terhadap debit rencana infrastruktur sumber daya air perlu dilakukan secara periodik (minimal 5 tahun sekali). Evaluasi debit di Pos Maribaya diperlukan dalam rangka ketersediaan air baku IPA Pakar (debit kering/minimum) dan PLTA Bengkulu (debit basah/debit maksimum). Sedangkan Debit yang terukur di Pos Nanjung merupakan 75% inputan bagi waduk Saguling yang digunakan untuk PLTA dan irigasi.

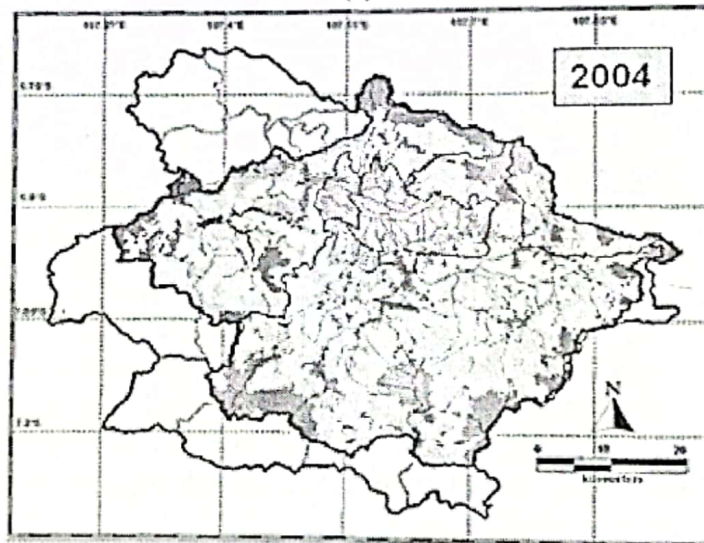
Konversi lahan secara suksesif menjadi pemicu terjadinya ekstrimitas debit dan hujan di lokasi studi. Perubahan tutupan lahan, dari hutan berturut-turut menjadi budidaya, permukiman pedesaan dan urban berdampak semakin besarnya debit limpasan. Tutupan lahan bervegetasi di DAS Citarum Hulu turun sebesar $\pm 10\%$ selama kurun waktu 10 tahun yaitu tahun 1994-2004 (Gambar 4.11). Selain sebagai indikator penurunan kualitas DAS, perubahan tutupan lahan tentu saja mempengaruhi perubahan iklim dalam skala mikro maupun meso. 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 4.3 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 4.3) 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% namun perubahan debit minimum mencapai 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

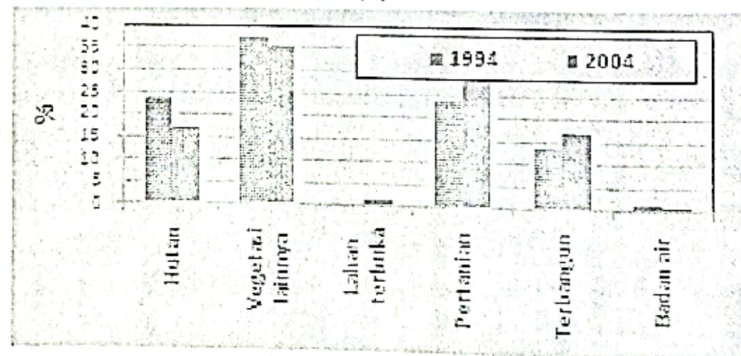
demikian pengendalian konversi lahan sama pentingnya dengan upaya adaptasi terhadap perubahan iklim yang ada dalam kerangka mencapai keberlanjutan (infrastruktur) sumber daya air. Keterkaitan antara iklim-land use-debit digambarkan dalam skema Gambar 4.12.



(a)



(b)



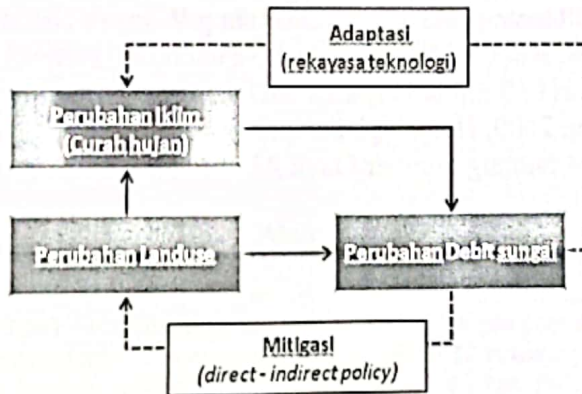
(c)

Gambar 4.11. Perubahan guna lahan di DAS Citarum Hulu (a) 1994 (b) 2004 (c) Grafik perubahan guna lahan.

Tabel 4.3. 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)	Pmin(mm/bln)	12	11	-8.33
	Prata2 (mm/bln)	136.60	103.75	-24.05
	Ptahunan (mm/th)	1639.21	1245.03	-24.05
Debit (Q)	Qmin (m3/dt)	6.51	3.49	-46.39
	Qrata2 (m3/dt)	73.52	59.23	-19.44
	Qtahunan (12 x m3/dt)	882.25	710.70	-19.44

Sumber : Hasil perhitungan, 2010



Gambar 4.12. Hubungan antara perubahan iklim, landuse, dan debit sungai.

5. KESIMPULAN

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.

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. Upaya pengendalian tersebut adalah bentuk usaha mitigasi. Sedangkan rekayasa teknologi sebagai bentuk upaya adaptasi dapat dilakukan dengan cara antara lain dengan melakukan evaluasi terhadap kriteria disain infrastruktur sumber daya air.

DAFTAR RUJUKAN

- 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.
- BPS, 2009, Kota Bandung; Kabupaten Bandung, Kabupaten Bandung Barat; Kota Cimahi; Kabupaten Sumedang ; Dalam Angka.
- Hart, B.T., Dok, Wendy van, dan Djuangsih, N, (2002), Nutrient budgent for Saguling Reservoir, West java, Indonesia. *Water Research*, 36, 2152-2160.
- Irhaz, 2008, Tekanan terhadap Cekungan Bandung, www.berpolitik.com, Diakses 19 Februari 2008.
- Keppres No. 114 Tahun 1999 tentang Penataan Ruang Kawasan Bogor-Puncak-Cianjur.
- Koutsoyiannis, D, 2008, On detectability of Nonstationary from data using statistical tool, European Geoscience Union General Assembly, Vienna-Austria.
- Melinda, Nike, 2007, Perencanaan Sistem Drainase Pada Daerah Aliran Sungai Cimahi di Kota Cimahi, Laporan TA-Jurusan Teknik Lingkungan ITB.
- Novotny, Eric V dan Stefan, Heinz G, 2007, Stream flow in Minnesota: Indikator of climate change, *Journal of Hydrology* 2007, Elsevier.
- PP No. 26 Tahun 2008 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Nasional.
- Somantri, Ating, 2006, Aplikasi Statistika dalam Penelitian, Pustaka Setia Bandung.
- Suripin, 2004, Pelestarian Sumber Daya Tanah dan Air, Penerbit ANDI-Yogyakarta.
- Triatmodjo, Bambang, 2009, Hidrologi Terapan, Beta Offset Jakarta
- UU No. 7 Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air.