

# MODEL TEMPORAL CURAH HUJAN DAN DEBIT SUNGAI CITARUM BERBASIS ANFIS

**Ruminta**

*Universitas Padjadjaran Bandung*

*e-mail : r\_ruminta@yahoo.com*

## ABSTRACT

A study on temporal model of rainfall and river discharge based on ANFIS was carried out in Citarum river basin, West Java. The investigations based on monthly observations data of the rainfall, evapotranspiration, and river discharge from January 1968 to December 2000 and monthly data of the Global Temperature (GT) and Central Indian Precipitation (CIP) from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Identification of the temporal models of the rainfall and river discharge was based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). The results indicated that temporal models of the rainfall and river discharge based on ANFIS can simulate observations data accurately. The models is capable to minimize the bias (RMSE) and maximize the precision (E). This model is very potential to predict the rainfall and river discharge in the future. The rainfall and river discharge's prediction of the annually temporal model is more accurate than that of the monthly temporal model. The runoff coefficient (C) of Citarum River was very high (more than 53%) and has been increased significantly. The facts show that covered areas by forest has decreased. The value of  $Q_{max}/Q_{min}$  ratio was relatively high by about 2.17-15.48, this shows that water resources in the Citarum river basin has been degradation. The water storage was deficit and has decreased significantly. The facts show that the drought in Citarum river basin will occur.

## ABSTRAK

Penelitian terhadap model temporal curah hujan dan debit sungai berbasis ANFIS telah dilakukan di daerah aliran sungai Citarum, Jawa Barat. Penelitian tersebut menggunakan data bulanan hasil observasi curah hujan, evapotranspirasi, dan debit sungai dari Januari 1968 hingga Desember 2000 dan data bulanan *Global Temperature* (GT) dan *Central Indian Precipitation* (CIP) yang diperoleh dari *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). Identifikasi model temporal curah hujan dan debit sungai didasarkan pada *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa model temporal curah hujan dan debit sungai berbasis ANFIS dapat mensimulasi data observasi secara akurat. Model tersebut mampu meminimalisasi bias (RMSE) dan memaksimalkan presisi (E). Model tersebut sangat potensial untuk memprediksi curah hujan dan debit sungai di masa

datang. Prediksi curah hujan dan debit sungai dari model temporal tahunan lebih akurat dibanding model temporal bulanan. Koefisien limpasan ( $C$ ) sungai Citarum sangat besar (lebih dari 53%) dan cenderung naik secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa tutupan lahan oleh hutan cenderung makin berkurang. Nilai rasio debit sungai maksimum-minimum ( $Q_{max} / Q_{min}$  ratio) relatif tinggi yaitu berkisar antara 2.17 – 15.48, menunjukkan bahwa sumber daya air di daerah aliran sungai Citarum telah mengalami kerusakan. Cadangan air ( $\Delta S$ ) adalah defisit dan cenderung berkurang secara signifikan. Fakta ini menunjukkan bahwa kekeringan di daerah aliran sungai Citarum akan terjadi sangat rawan.

Kata kunci: Curah hujan, Debit sungai, ANFIS, Koefisien limpasan, Rasio  $Q_{max} / Q_{min}$

## 1 PENDAHULUAN

Pengetahuan mengenai dinamika temporal dari hidrometeorologi di suatu Daerah Aliran Sungai (DAS) multiguna sangat diperlukan untuk perencanaan yang optimal penyimpanan air dan jaringan drainase, dan untuk pengelolaan kejadian cuaca ekstrim, seperti banjir dan kekeringan (Islam dan Sivakumar, 2001). Mekanisme fisis yang berkaitan dengan karakteristik dan dinamika hidrometeorologi sangat kompleks, baik dalam skala temporal maupun spasial. Hidrometeorologi di suatu aliran sungai tidak hanya dipengaruhi perubahan iklim, tetapi juga dipengaruhi oleh jenis dan kondisi dari daerah aliran sungai itu sendiri, seperti penutupan lahan bervegetasi, penggunaan lahan, dan lain-lain. Di samping itu, semua mekanisme yang terlibat di dalam proses hidrometeorologi adalah tidak linier, sehingga permodelan dinamikanya tidak mudah.

Data numerik komponen hidrometeorologi dapat diekstrak menjadi model numerik yang dapat dipergunakan untuk berbagai keperluan, misalnya untuk keperluan irigasi dan regionalisasi (Boulet *et al.*, 2000), evaluasi neraca air jangka panjang (Domingo *et al.*, 2001), parameterisasi model hidrologi (Wooldridge dan Kalma, 2001), prediksi limpasan dan air tersedia (Toninelli *et al.*, 2003). Contoh model numerik tersebut adalah model hidro-meteorologi berbasis *Neural Networks* (Tokar dan Markus, 2000) dan berbasis *Canadian Regional Climate Model* (MacKay *et al.*, 2003).

Walaupun penerapan pendekatan linier (stokastik) sangat umum dalam mengkaji sistem fisis alamiah yang kompleks, seperti hidrometeorologi, perkembangan yang drastis dalam pengetahuan nonlinier dan pertumbuhan yang cepat dari sejumlah alat untuk menganalisis data deret waktu nonlinier telah membawa kemajuan penting dalam perkembangan metodologi (Sveinsson *et al.*, 2002). Di antara sejumlah penemuan penting dalam perkembangan metodologi analisis data deret waktu, analisis *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) mempunyai peranan penting dalam berbagai bidang pengetahuan fisis alamiah, termasuk bidang hidrometeorologi.

Penerapan ANFIS untuk berbagai aspek permodelan hidrometeorologis telah banyak dilakukan dalam sejumlah kajian pada beberapa tahun terakhir ini (Franc and Panigrahi, 1997; Mashudi, 2001; Ozelkan and Duckstein, 2001). Seperti telah diketahui, ANFIS sangat sesuai untuk permodelan sistem nonlinier. Zhu (2000) dan Shapiro (2002) telah menunjukkan bahwa ANFIS merupakan metode permodelan terbaik untuk menganalisis data numerik, karena dalam proses training didasarkan minimalisasi nilai kesalahan atau *root mean square error* (RMSE) dari *output*-nya.

Model ANFIS tersebut merupakan sistem yang paling baik untuk mengekstrak data numerik menjadi model numerik. Menurut penelitian Riyanto *et al.* (2000), ANFIS dapat memprediksi data deret waktu lebih akurat dibanding metode lainnya, seperti *Back Propagation Multilayer Preceptron* (BPMP) maupun autoregresi. Metode perhitungan ANFIS memberikan keuntungan dalam permodelan sistem fisis alamiah, terutama ketika hubungan fisis yang mendasarinya tidak dapat diketahui dengan pasti (Nayak *et al.*, 2004; Cigizoglu, 2003; Tokar and Markus, 2000). Menurut Zhu (2000) dan Shapiro (2002), ANFIS Sugeno merupakan model terbaik untuk analisis numerik dibanding model logika samar lainnya, karena dalam proses pembelajarannya (*training*) didasarkan pada upaya memperkecil nilai kesalahan dari *output*-nya. Hasil penelitian lainnya menunjukkan ANFIS dapat mengidentifikasi model curah hujan lebih akurat dibanding ARIMA (Ruminta, 2001).

Dinamika temporal hidrometeorologi dalam jangka panjang tidak konsisten (Kim dan Stricker, 1995). Hal ini sangat jelas dari penelitian hidrometeorologi dengan menggunakan model GCM di wilayah Amazon (White *et al.*, 1998) dan sungai Mackenzie (Betts dan Viterbo, 1999). Adanya perubahan temporal hidrometeorologi di daerah aliran sungai, misalnya di Mississippi (Roads dan Betts, 1999) dan Fuji (Yao dan Terakawa, 1999), sangat dipengaruhi oleh adanya perubahan penggunaan lahan, perkembangan kota, dan perubahan iklim.

Kajian dinamika temporal hidrometeorologi pada suatu daerah aliran sungai harus didukung oleh karakteristik fisis dan klimatologis daerah tersebut. Karakteristik fisis meliputi topografi, geologi, jenis tanah, jenis vegetasi, dan penggunaan lahan (Stieglitz *et al.*, 1996; Niyogi *et al.*, 2001; Bullock dan Arceman, 2003). Sedangkan karakteristik klimatologis melibatkan variasi radiasi surya (Lau *et al.*, 1997), kelembapan (Trenberth *et al.*, 1998), temperatur (Yang *et al.*, 2003), gas rumah kaca (Arpe *et al.*, 1999), ENSO (Soden, 1999), efek pembakaran antropogenik dan perubahan iklim (Small *et al.*, 2000), dan lain-lain. Di samping kedua karakteristik tersebut, kajian dinamika dan mekanisme hidrometeorologi harus mempertimbangkan aspek pertumbuhan penduduk dan industri yang ada di kawasan tersebut (Bromley *et al.*, 1999).

Tujuan dari penelitian ini adalah mengidentifikasi model temporal curah hujan dan debit sungai berbasis ANFIS dan menggunakannya untuk memprediksi curah hujan dan debit sungai di masa datang. Di samping itu penelitian ini juga untuk mengkaji dinamika koefisien limpasan (C) dan cadangan air (*water storage*) daerah aliran sungai Citarum. Hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan informasi karakteristik model temporal curah hujan dan debit sungai Citarum sebagai masukan bagi perencanaan dan kebijakan pengelolaan tata air di daerah aliran sungai Citarum.

## 2 TEMPAT, BASIS DATA, DAN METODOLOGI

Penelitian model temporal hidrometeorologi berbasis ANFIS ini dilakukan di wilayah aliran sungai Citarum bagian hulu dengan luas 6.000 km<sup>2</sup> dan posisi geografis antara 6°43'-7°25' LS dan 107°08'-107°85'BT. Penelitian ini menggunakan data sekunder curah hujan, debit sungai, dan evapotranspirasi bulanan dari tahun 1961 hingga 2000. Data lainnya adalah *Global Temperature* (GT) dan *Central Indian Precipitation* (CIP) yang diperoleh dari *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP).

Identifikasi model temporal hidrometeorologi didasarkan pada model *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) Sugeno. ANFIS Sugeno adalah tipe model perhitungan yang mengadopsi konsep jaringan neural biologis. Perhitungan ANFIS didasarkan pada proses pembelajaran (Jang, 1993). Aplikasi ANFIS terhadap data deret waktu komponen hidrometeorologi terdiri dari dua tahap. Tahap pertama adalah *training* ANFIS yaitu menggambarkan data deret waktu dalam bentuk input dan output pada jejaring ANFIS untuk mendapatkan bobot simpul (*node*) antar penghubung dalam jejaring tersebut. Pada tahap training input digunakan oleh sistem ANFIS untuk menghasilkan output yang kemudian dibandingkan dengan data hasil observasi. Training ANFIS yang paling baik diperoleh jika RMSE (*Root Mean Square Error*) dan MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) mempunyai nilai paling kecil. Ketika tahap training telah selesai, ANFIS digunakan untuk testing data.

Kelayakan model hasil identifikasi ANFIS diuji dengan menggunakan RMSE dan MAPE (Salehfar *et al.*, 2000) yang dinyatakan oleh persamaan 2-1 dan 2-2,

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (Y'_t - Y_t)^2} \quad (2-1)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \left[ \sum_{t=1}^N \frac{(Y'_t - Y_t)}{Y_t} \right] 100\% \quad (2-2)$$

di mana  $Y'_t$  adalah output model ANFIS;  $Y_t$  adalah data hasil observasi; dan  $N$  adalah banyaknya data deret waktu yang dianalisis.

Kelayakan model hasil indentifikasi ANFIS Sugeno juga dapat diuji dengan menggunakan nilai  $\chi^2$  yang dinyatakan oleh persamaan 2-3. Model hidrometeorologi akan menjadi layak untuk dipergunakan menduga curah hujan dan debit sungai, jika nilai  $\chi^2_{hitung} \leq \chi^2_{tabel}$  pada taraf nyata dan derajat bebas masing-masing  $\alpha$  dan  $l-p$ ,

$$\chi^2 = N(N + 2) \sum_{l=1}^N \frac{(\rho_{(e)_i})^2}{(N - l)} \tag{2-3}$$

di mana  $l$  adalah banyaknya lag autokorelasi ( biasanya  $l = N/4$ );  $\rho_{(e)_i}$  adalah autokorelasi galat pada lag ke- $i$ ; dan  $N$  adalah banyaknya data deret waktu yang dianalisis.

Sementara itu tingkat ketelitian (*precision*) model atau kualitas model hasil identifikasi ANFIS dikaji menggunakan nilai  $E$  yang dinyatakan pada persamaan 2-4.

$$E = 1 - \frac{\sigma_c^2}{\sigma_o^2} \tag{2-4}$$

dimana  $\sigma_o$  adalah variasi data observasi dan  $\sigma_c$  adalah variasi perbedaan antara data hasil observasi dan data hasil output model. Prediksi curah hujan dan debit sungai dilakukan menggunakan model temporal hasil identifikasi ANFIS dari data numerik komponen hidrometeorologi yang telah diuji kelayakannya.

Neraca air dipergunakan untuk menganalisis perubahan komponen hidrometeorologi pada suatu daerah aliran sungai. Neraca air pada suatu daerah aliran sungai secara sederhana dapat digambarkan dengan adanya hubungan antara unsur masukan yaitu curah hujan dan keluaran yaitu berupa aliran (debit sungai), evapotranspirasi, perkolasi dan infiltrasi. Adanya hujan tertentu akan menghasilkan debit sungai tertentu pula. Debit sungai ini selain dipengaruhi oleh karakteristik daerah aliran sungai juga sangat tergantung pada karakteristik curah hujan.

Pendekatan analisis neraca air pada suatu daerah aliran sungai secara alami (tanpa campur tangan manusia) dapat menggunakan persamaan berikut,

$$P = ET + Q + \Delta S \tag{2-5}$$

di mana  $P$  : curah hujan;  $ET$ : evapotranspirasi;  $Q$  : debit sungai, dan  $\Delta S$  : air cadangan.

Sementara itu, koefisien limpasan (*runoff*) rata-rata daerah aliran sungai dapat dihitung menggunakan metoda Rasional dengan persamaan berikut,

$$C = \frac{Q}{0.278.P.A} \quad (2-6)$$

di mana  $C$  : koefisien limpasan (*run off*),  $P$  = curah hujan;  $A$  : luas daerah aliran sungai, dan  $Q$  : debit sungai.

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Model Temporal Curah Hujan dan Debit Sungai Citarum Tahunan

Penerapan ANFIS untuk mengidentifikasi dan memprediksi model dinamika temporal curah hujan dan debit sungai periode tahunan mendapatkan hasil yang sangat baik. Dalam mengidentifikasi dan memprediksi model dinamika temporal curah hujan tahunan, penerapan ANFIS menunjukkan bahwa untuk simulasi selama tahap *training* dan testing menghasilkan nilai kesalahan (RMSE dan MAPE) sangat rendah dan nilai presisi (E) yang cukup tinggi dalam memprediksi curah hujan tahunan. Model temporal curah hujan tersebut menggunakan input evapotranspirasi dan temperatur global (GT). Nilai prediksi dan simulasi selama tahap training dibandingkan dengan nilai observasi ditunjukkan pada Gambar 3-1.

Pengukuran statistik menunjukkan kesesuaian yang sangat baik antara nilai prediksi dan nilai observasi dengan nilai RMSE untuk tahap *training* dan testing masing-masing adalah 1.16 mm dan 1.16 mm. Model temporal curah hujan tahunan mempunyai presisi (E) sebesar 69.3% (Tabel 3-1). Curah hujan tahunan hasil prediksi model berkisar antara 2905 mm hingga 4539 mm, hal ini tidak berbeda nyata dengan curah hujan hasil observasi yang berkisar antara 2932 mm hingga 4642 mm (Tabel 3-2).

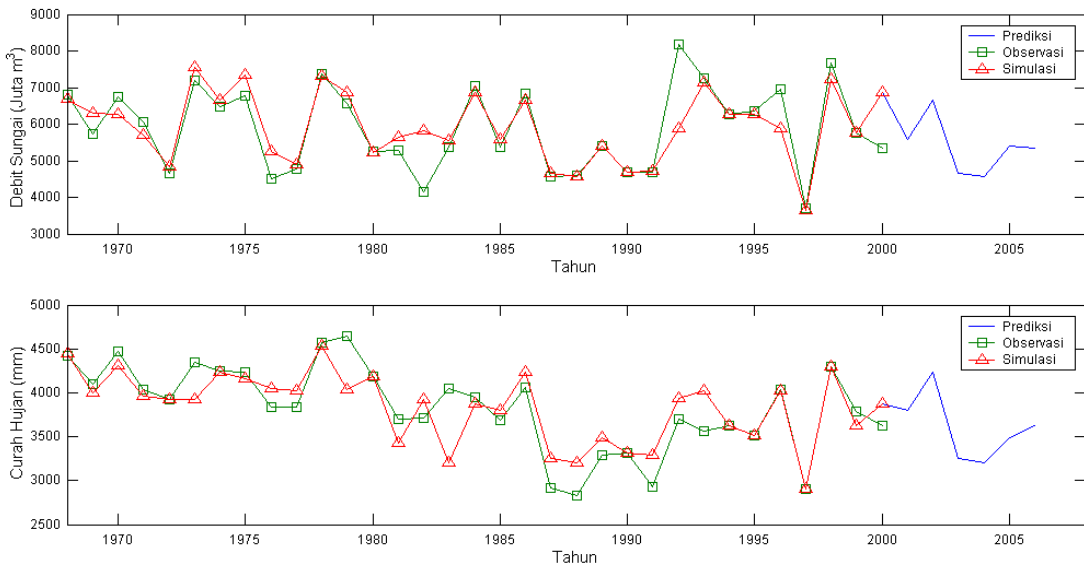
Penggunaan ANFIS untuk mengidentifikasi dan memprediksi debit sungai tahunan menunjukkan bahwa selama tahap simulasi training dan testing, ANFIS dapat memberikan nilai kesalahan (RMSE dan MAPE) cukup rendah dan nilai presisi (E) cukup tinggi untuk memprediksi debit sungai tahunan. Model temporal debit sungai tersebut menggunakan input evapotranspirasi dan curah hujan.

Pengukuran statistik menunjukkan ada pendekatan yang sangat baik antara nilai prediksi dengan nilai observasi dengan nilai RMSE untuk tahap training dan testing masing-masing adalah 18.87 juta m<sup>3</sup> dan 17.41 juta m<sup>3</sup>. Model dinamika temporal hasil identifikasi ANFIS mempunyai nilai presisi (E) sebesar 66.6%. Debit sungai tahunan hasil prediksi model berkisar antara 3611 juta m<sup>3</sup> hingga 7565 juta m<sup>3</sup>. Hal ini tidak berbeda nyata dengan debit sungai hasil observasi yang berkisar antara 3691 juta m<sup>3</sup> hingga 8170 juta m<sup>3</sup>.

Tabel 3-1: NILAI STATISTIK SIMULASI MODEL TEMPORAL CURAH HUJAN DAN DEBIT SUNGAI TAHUNAN

Model	Training		Testing	Presisi (E) (%)	Uji $\chi^2$	Ket.
	RMSE	MAPE	RMSE			
Debit Sungai	18.872	0.151	17.410	66.6	4.80	Layak
Curah Hujan	1.159	0.013	1.156	69.3	6.41	Layak

RMSE=(Root Mean Square Error) dan MAPE=(Mean Absolute Percentage Error)

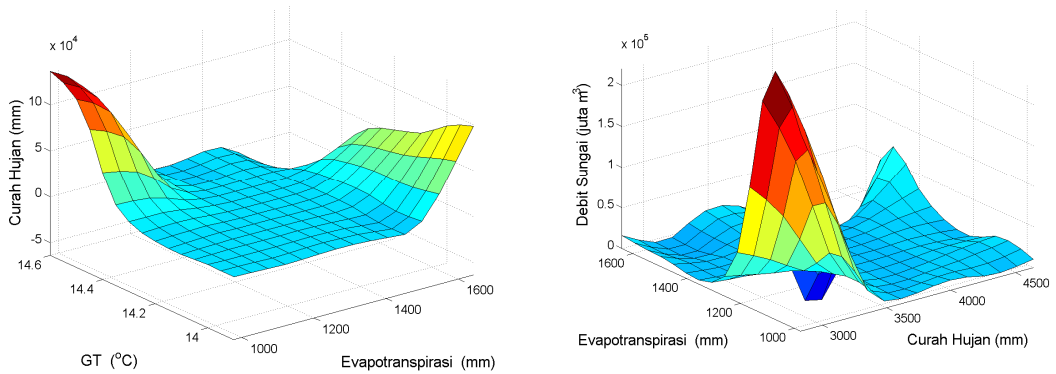


Gambar 3-1: Model dinamika temporal hidrometeorologi tahunan

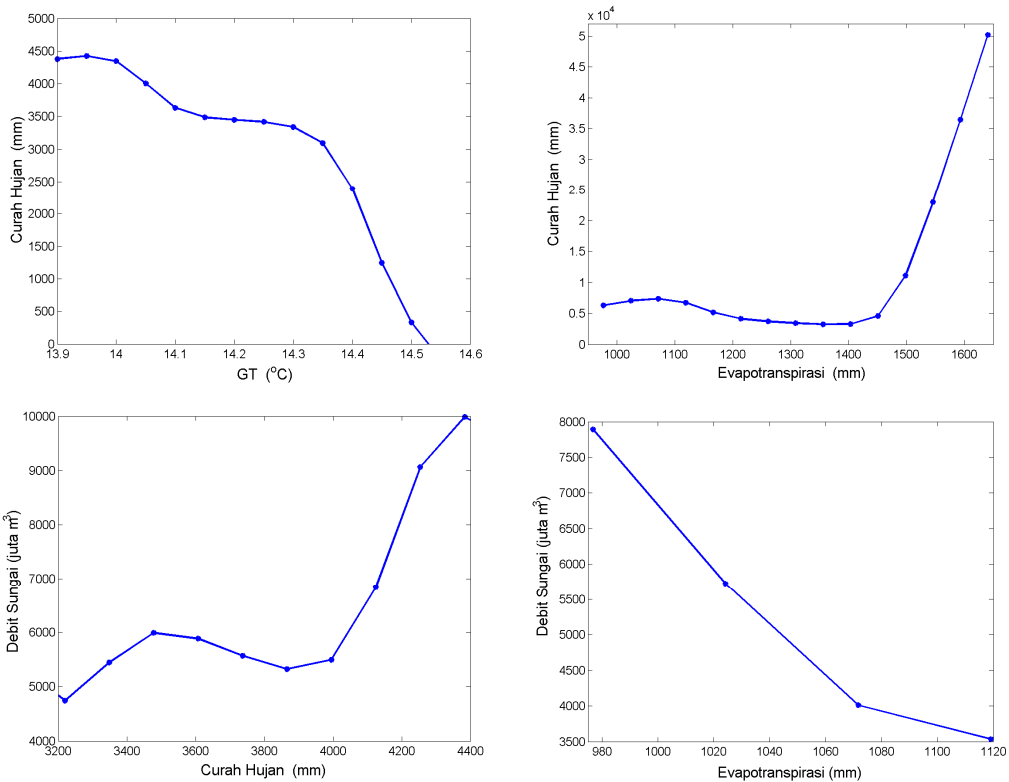
Tabel 3-2: NILAI STATISTIK HASIL PREDIKSI CURAH HUJAN DAN DEBIT SUNGAI TAHUNAN

Model	Data Prediksi		Data Observasi	
	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
Debit Sungai	3641 juta m <sup>3</sup>	7565 juta m <sup>3</sup>	3691 juta m <sup>3</sup>	8170 juta m <sup>3</sup>
Curah Hujan	2905 mm	4539 mm	2832 mm	4642 mm

Pola hubungan antara input dan output model temporal curah hujan dan debit sungai tahunan ditunjukkan pada Gambar 3-2 dan 3-3. Pengaruh individual temperatur global dapat menyebabkan pengurangan curah hujan tahunan. Sebaliknya pengaruh individual evapotranspirasi dapat menyebabkan peningkatan curah hujan tahunan.



Gambar 3-2: Hubungan antara input gabungan dan output model hidrometeorologi tahunan



Gambar 3-3: Hubungan antara input individual dan output model hidrometeorologi tahunan

Sementara itu pengaruh individual evapotranspirasi dapat menyebabkan pengurangan debit sungai tahunan. Sebaliknya pengaruh individual curah hujan dapat menyebabkan peningkatan debit sungai tahunan.



### 3.2 Model Temporal Curah Hujan dan Debit Sungai Citarum Bulanan

Sementara itu penerapan ANFIS untuk mengidentifikasi dan memprediksi model dinamika temporal curah hujan dan debit sungai periode bulanan juga memperoleh hasil yang cukup baik, walaupun tidak sebaik periode tahunan. Simulasi selama tahap *training* dan *testing* menunjukkan bahwa ANFIS tidak dapat memberikan nilai kesalahan (RMSE dan MAPE) dan nilai presisi (E) sebaik seperti pada model dinamika temporal periode tahunan.

Model temporal curah hujan bulanan menggunakan input monsoon India atau CIP dan evapotranspirasi, sedangkan model temporal debit sungai bulanan menggunakan input curah hujan dan evapotranspirasi. Nilai prediksi dan simulasi selama tahap *training* untuk curah hujan dan debit sungai bulanan ditunjukkan pada Gambar 3-4. Nilai statistik simulasi dan hasil prediksi dari model temporal curah hujan dan debit sungai bulanan disajikan masing-masing pada Tabel 3-3 dan 3-4.

Tabel 3-3: NILAI STATISTIK SIMULASI MODEL TEMPORAL CURAH HUJAN DAN DEBIT SUNGAI BULANAN

Model	Training		Testing	Presisi (E) (%)	Uji $\chi^2$	Ket.
	RMSE	MAPE	RMSE			
Debit Sungai	19.087	0.145	22.041	77.6	3.91	Layak
Curah Hujan	21.471	2.039	21.713	49.9	18.20	Layak

RMSE=(Root Mean Square Error) dan MAPE=(Mean Absolute Percentage Error)

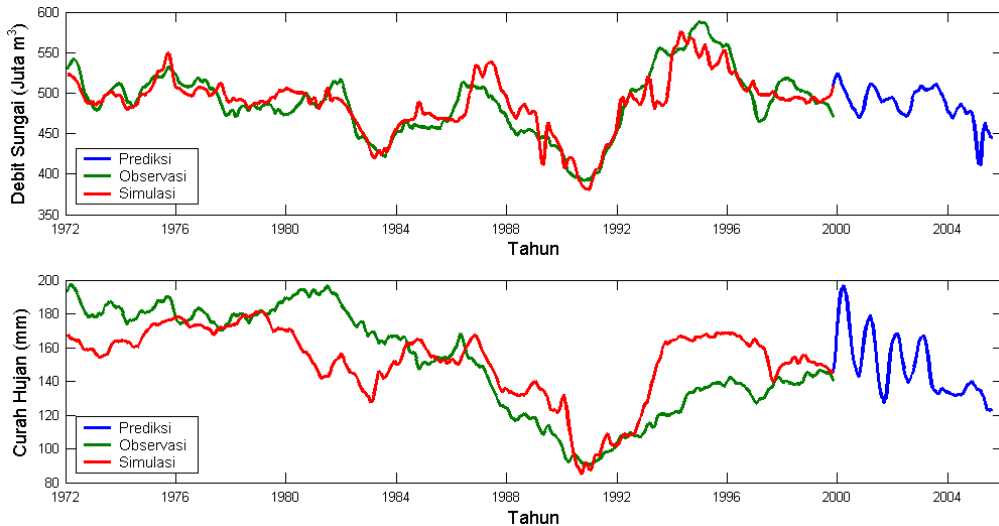
Tabel 3-4: NILAI STATISTIK HASIL PREDIKSI CURAH HUJAN DAN DEBIT SUNGAI BULANAN

Model	Data Prediksi		Data Observasi	
	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
Debit Sungai	381 juta m <sup>3</sup>	576 juta m <sup>3</sup>	392 juta m <sup>3</sup>	587 juta m <sup>3</sup>
Curah Hujan	85 mm	181 mm	90 mm	197 mm

Nilai kesalahan RMSE pada tahap *training* maupun *testing* untuk curah hujan cukup kecil masing-masing adalah 19.087 dan 22.043 mm. Demikian juga nilai kesalahan RMSE pada tahap *training* maupun *testing* untuk debit sungai cukup kecil masing-masing adalah 21.471 dan 21.713 juta m<sup>3</sup>. Presisi (E) model temporal curah hujan dan debit sungai bulanan masing-masing adalah 77.6 dan 49.9%.

Perbedaan antara nilai prediksi dengan data observasi curah hujan dan debit sungai bulanan cukup kecil atau tidak berbeda secara signifikan (Tabel 3-3). Debit sungai bulanan minimum hasil prediksi dan data observasi masing-masing adalah 381 dan 392 juta m<sup>3</sup>. Sedangkan debit sungai bulanan maksimum hasil prediksi dan data observasi masing-masing adalah

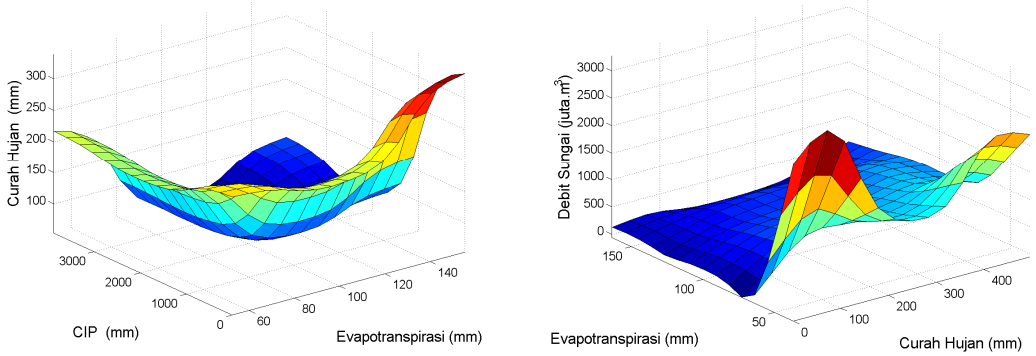
576 dan 587 juta  $m^3$ . Sementara itu curah hujan bulanan minimum hasil prediksi dan data observasi masing-masing adalah 85 dan 90 mm, sedangkan curah hujan bulanan maksimum hasil prediksi dan data observasi masing-masing adalah 181 dan 197 mm.



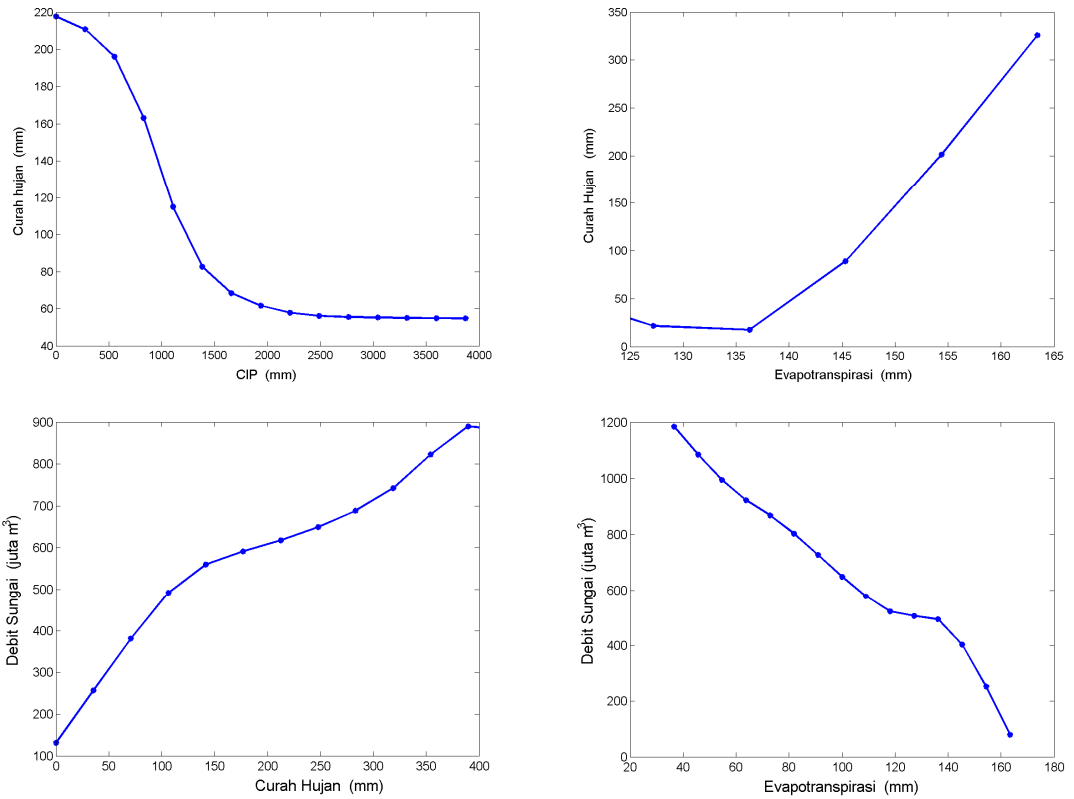
Gambar 3-4: Model dinamika temporal hidrometeorologi bulanan hasil transformasi

Pola hubungan antara input dan output model temporal curah hujan dan debit sungai periode bulanan tidak linier seperti ditunjukkan pada Gambar 3-5 dan 3-6. Secara individual monsoon India mempunyai hubungan yang berlawanan dengan curah hujan daerah aliran sungai Citarum. Pengaruh individual monsoon India atau CIP dapat menyebabkan penurunan curah hujan, sedangkan pengaruh individual evapotranspirasi dapat menyebabkan curah hujan naik. Sementara itu, pengaruh individual curah hujan dapat menyebabkan debit sungai bulanan naik, sebaliknya pengaruh individual evapotranspirasi dapat menyebabkan debit sungai turun.

Curah hujan ekstrim rendah kurang dari 63 mm/bulan (Quartil 1) terjadi jika CIP lebih dari 1400 mm/bulan dan evapotranspirasi kurang dari 142 mm/bulan. Sementara itu curah hujan ekstrim tinggi lebih dari 234 mm/bulan (Quartil 3) terjadi jika CIP sangat rendah (0 mm/bulan) dan evapotranspirasi lebih dari 157 mm/bulan (Gambar 3-6). Sementara itu, debit sungai ekstrim rendah kurang dari 239 juta  $m^3$ /bulan (Quartil 1) terjadi jika curah hujan kurang dari 30 mm/bulan dan evapotranspirasi lebih dari 155 mm/bulan. Sedangkan debit sungai ekstrim tinggi lebih dari 702 juta  $m^3$ /bulan (Quartil 3) terjadi jika curah hujan lebih dari 295 mm/bulan dan evapotranspirasi kurang dari 95 mm/bulan.



Gambar 3-5: Hubungan antara input gabungan dan output model hidrometeorologi bulanan



Gambar 3-6: Hubungan antara input individual dan output model hidrometeorologi bulanan

### 3.3 Koefisien Limpasan dan Air Cadangan

Hasil analisis beberapa parameter yang berkaitan dengan neraca air di daerah aliran sungai Citarum disajikan pada Tabel 3-5. Rata-rata koefisien limpasan (C) di daerah tersebut cukup besar (di atas 52%) baik untuk periode bulanan, DJF, JJA, maupun tahunan. Padahal menurut Suprpto (2003) koefisien limpasan pada kawasan hutan bervegetasi berkisar antara 20 % - 40 %. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi penutup lahan oleh hutan di daerah sungai Citarum telah mengalami kerusakan, sehingga memerlukan perhatian dan penanganan serius. Pola dinamika koefisien limpasan cenderung naik secara signifikan baik untuk periode DJF, JJA, maupun tahunan (Gambar 3-7). Fakta ini menunjukkan bahwa kondisi penutup lahan oleh hutan di daerah aliran sungai Citarum makin berkurang. Daerah terbuka dan penutupan oleh bangunan, beton, dan lain-lain makin bertambah akibat makin berkembangnya pembangunan di daerah tersebut. Di samping itu juga akibat adanya proses pendangkalan di sepanjang badan sungai Citarum yang semakin serius akibat adanya proses sedimentasi yang sangat tinggi.

Nilai rasio debit sungai maksimum-minimum ( $Q_{max}/Q_{min}$  ratio) sungai Citarum relatif tinggi yaitu berkisar antara 2.17 - 15.48. Meskipun batasan nilai rasio  $Q_{max}/Q_{min}$  berbeda untuk setiap sungai, namun data tersebut memberikan gambaran bahwa telah terjadi kerusakan sumber daya air di daerah aliran sungai Citarum.

Rata-rata cadangan air ( $\Delta S$ ) daerah aliran sungai Citarum menunjukkan defisit baik untuk periode bulanan, DJF, JJA, maupun tahunan (Tabel 3-5). Fakta ini menunjukkan bahwa daerah aliran sungai Citarum merupakan daerah yang sangat rawan kekeringan terutama pada musim kemarau (JJA). Hal ini sejalan dengan adanya bukti bahwa curah hujan di daerah aliran sungai tersebut yang cenderung berkurang (Ruminta dkk., 2007).

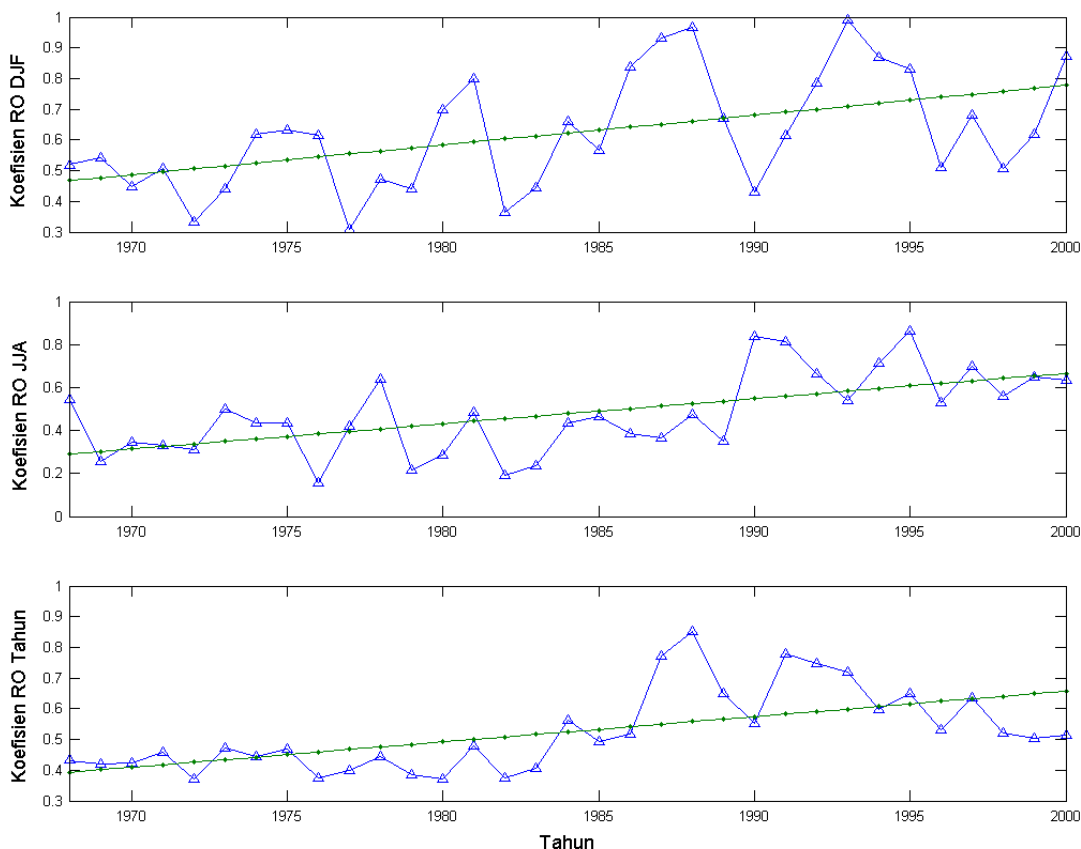
Tabel 3-5: NILAI RASIO  $Q_{max}/Q_{min}$ , RATA-RATA KOEFISIEN LIMPASAN DAN AIR CADANGAN DAERAH ALIRAN SUNGAI CITARUM

Parameter	Periode		
	DJF	JJA	Tahunan
$Q_{max}$ (juta m <sup>3</sup> )	3075	1610	6170
$Q_{min}$ (juta m <sup>3</sup> )	1415	104	3691
Rasio $Q_{max}/Q_{min}$	2,173	15,481	2,213
Koefisien Limpasan	0.623 (s = 0.188)	0.478 (s = 0.188)	0.525 (s = 0.133)
Cadangan Air ( $\Delta S$ ) (juta m <sup>3</sup> )	-400 (s = 1066)	-1460 (s = 670)	-2142 (s = 3085)

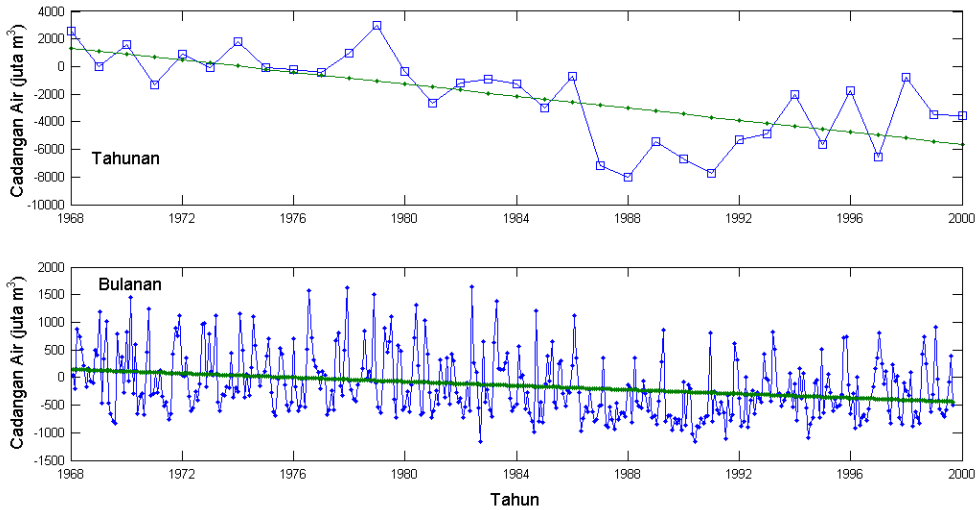
Ket. : Q = Debit sungai; max = maksimum; dan min = minimum  
s = standar deviasi

Pola dinamika cadangan air ( $\Delta S$ ) cenderung berkurang secara signifikan baik untuk periode bulanan maupun tahunan (Gambar 3-8), terutama dari tahun 1968 hingga 1988. Fakta ini menunjukkan bahwa daerah resapan air, reservoir, dan luas hutan di daerah aliran sungai Citarum makin berkurang, sehingga air hujan yang dapat disimpan sebagai cadangan air di daerah tersebut makin berkurang. Hal ini berkaitan dengan makin pesatnya pembangunan di daerah tersebut.

Kondisi ini sangat mengkhawatirkan karena di masa datang daerah aliran sungai Citarum semakin rawan kekeringan kalau upaya lain tidak dilakukan. Namun sejak dilakukannya hujan buatan yang cukup teratur di daerah aliran sungai Citarum kondisi air cadangan perlahan naik lagi dari tahun 1989 hingga 2000 walaupun kenaikannya tidak begitu drastis. Nampaknya proses hujan buatan harus tetap dilakukan di daerah aliran sungai Citarum untuk mempertahankan atau meningkatkan air cadangan di wilayah tersebut.



Gambar 3-7: Pola dinamika koefisien limpasan (RO) daerah aliran sungai Citarum



Gambar 3-8: Pola dinamika cadangan air ( $\Delta S$ ) daerah aliran sungai Citarum

#### 4 KESIMPULAN

Hasil penelitian model temporal curah hujan dan debit sungai Citarum dapat memberikan beberapa kesimpulan penting sebagai berikut.

- Model dinamika temporal curah hujan dan debit sungai Citarum dapat diidentifikasi secara akurat oleh ANFIS. ANFIS dapat memberikan nilai kesalahan ( $RMSE$ ) yang cukup kecil (kurang dari 22.04) dan nilai presisi ( $E$ ) yang cukup besar (lebih dari 66.6% kecuali untuk curah hujan bulanan). Model temporal curah hujan dan debit sungai periode tahunan memberikan hasil yang lebih akurat dibanding model temporal curah hujan dan debit sungai periode bulanan.
- Model temporal hasil identifikasi ANFIS sangat layak dipergunakan untuk memprediksi curah hujan dan debit sungai. Model temporal curah hujan bulanan menggunakan input CIP dan evapotranspirasi, sedangkan model temporal debit sungai bulanan menggunakan input curah hujan dan evapotranspirasi.
- Koefisien limpasan ( $C$ ) di daerah aliran sungai Citarum cukup besar (di atas 53%). Hal ini menunjukkan bahwa kondisi penutup lahan oleh hutan di daerah tersebut telah mengalami kerusakan dan kensekuensinya daerah tersebut rawan banjir terutama musim hujan (DJF). Pola dinamika koefisien limpasan cenderung naik secara signifikan. Fakta ini menunjukkan bahwa kondisi penutup lahan oleh hutan di daerah aliran sungai Citarum cenderung makin berkurang.
- Nilai rasio debit sungai maksimum-minimum ( $Q_{max} / Q_{min}$  ratio) sungai Citarum relatif tinggi yaitu berkisar antara 2.17 – 15.48. Hal ini menunjukkan bahwa telah terjadi kerusakan sumber daya air di daerah aliran sungai Citarum.

- Cadangan air ( $\Delta S$ ) daerah aliran sungai Citarum menunjukkan defisit. Fakta ini menunjukkan bahwa daerah tersebut sangat rawan kekeringan terutama pada musim kemarau (JJA). Pola dinamika cadangan air ( $\Delta S$ ) cenderung berkurang secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa daerah resapan air, reservoir, dan luas hutan daerah aliran sungai Citarum makin berkurang.

## DAFTAR RUJUKAN

- Arpe, K. and Roegner, E., 1999. *Simulation of the Hydrologic Cycle over Europe, Model Validation and Impacts of Increasing Green House Gases*. *Adv. Water Res.*, 23, 105-119.
- Betts, A. K. and Viterbo, P., 1999. *Hydrological Budgets and Surface Energy Balance of Seven Subbasins of the Mackenzie River from the ECMWF Model*. *J. Hydrometeorology*, 1 (1), 47-60.
- Boulet, G.; Chehbouni, A.; Braud, I.; Vauclin, M.; Haverkamp, R.; and Zammit, C., 2000. *A Simple Water and Energy Balance Model Designed for Regionalization and Remote Sensing Data Utilization*. *J. Agricultural and Forest Meteorology*, 105 (1-3), 117-132.
- Bromley, J.; Butterworth, J. A.; Mac-donald, D.M.J.; Lovell, C.J.; Mharapara, I.; and Batchelor, C.H., 1999. *Hydrological Processes and Water Resources Management in a Dryland Environment*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 3 (3), 322-332.
- Bullock, A. and Arceman, M., 2003. *The Role of the Wetlands in the Hydrological Cycle*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7 (3), 358-389.
- Cigizoglu, H.K., 2003. *Estimation, Forecasting, and Extrapolation of River Flows by Artificial Neural Networks*. *Hydrology Science Journal*, 48 (3), 349-361.
- Domingo, L.; Villagarcia, M.; Boer, M.; Arboledas, L.A.; and Puigdefabregas, J., 2001. *Evaluating the Long-term Water Balance of Arid Zone Stream Bed Vegetation Using Evapotranspiration Modeling and Hillslope Runoff Measurements*. *J. Hydrology*. 243 (1-2), 17-30.
- Franc, J.L. and Panigrahi, S., 1997. *Artificial Neural Network Models of Wheat Leaf Wetness*. *J. Agricultural and Forest Meteorology*, 88 (1-4), 57-65.
- Islam, M.N. and Sivakumar, B., 2002. *Characterization and Prediction of Runoff Dynamics, a Nonlinear Dynamical View*. *Adv. in Water Resource*, 25, 179-190.
- Jang, J.S.R., 1993. *ANFIS: Adaptive-Neural-Network-Based Fuzzy Inference System*. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 23 (3), 665-685.
- Kim, C.P. and Stricker, J.N.M., 1995. *Consistency of Modeling the Water Budget over Long Time Series: Comparison of Simple Parameterizations and a Physically Based Model*. *J. Applied Meteorology*, 35 (5), 749-768.

- Lau, K.M.; Ho, C.H.; and Kang, L.S., 1997. *Anomalous Atmospheric Hydrologic Processes Associated with ENSO, Mechanisms of Hydrologic Cycle-Radiation Interaction*. J. Climate, 11, 800-815.
- MacKay, M.D.; Seglenieks, F.; Verseghy, D.; Soulis, E.D.; Snelgrove, K.R.; Walker, A.; and Szeto, K., 2003. *Modeling Mackenzie Basin Surface Water Balance During CAGES with the Canadian Regional Climate Model*. J. Hydrometeorology, 4 (4), 748-767.
- Mashudi, M. R., 2001. *Forecasting Water Demand Using Neural Networks in the Operation of Reservoirs in the Citarum Cascade, West Java, Indonesia*. Dissertation, The Faculty of The Engineering Management and Systems Engineering Department, The George Washington University.
- Nayak, P.C.; Sudheer, K.P.; Rangan, D.M.; and Ramasastri, K.S., 2004. *A neuro Fuzzy Computing Techni-que for Modeling Hydrological Time Series*. J. Hydrology, 291, 52-66.
- Niyogi, D.S.; Xue, Y.; and Raman, S., 2001. *Hydrological Land Surface Response in a Tropical Regime and a Midlatitudinal Regime*. J. Hydrometeorology, 3 (1), 39-56.
- Ozelkan, E.C. and Duckstein, L., 2001. *Fuzzy Conceptual Rainfall-Runoff Models*. J. Hydrology, 253 (1-4), 41-68.
- Riyanto, B.; Febrianto, F.; and Machbub, C., 2000. *Adaptive network based Fuzzy Inference System for foprecasting daily gasoline demand. Proceedings of the Sixth AEESEAP Triennial conference, Kuta, Bali, Indonesia, August 23-25, 2000*.
- Roads, J.O. and Betts, A., 1999. *NCEP-NCAR and ECMWF Reanalysis Surface Water and Energy Budgets for the Mississippi River Basin*. J. Hydrometeorology, 1 (1), 88-94.
- Ruminta, 2001. *Pendugaan Curah Hujan Di Wilayah Sumatra Dengan Menggunakan ANFIS*. Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung.
- Ruminta; Bayong, T.H.K.; Liong; T.H.; dan Soekarno, I., 2007. *Kecenderungan Hidrometeorologi di Daerah Aliran Sungai Citarum*. Padjadjaran Journal of Life and Physical Sciences, 9 (1), 23-37.
- Salehfar, H; Bengiamin, N.; and Huang, J., 2000. *A Systematic approach to linguistic fuzzy modeling based on input-output data*. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. J. A. Joines, R. R. Barton, K. Kang, and P. A. Fishwick, Eds., University of North Dakota, U.S.A.
- Shapiro, A F., 2002. *From Neural Networks, Fuzzy Logic, and Genetic Algorithms to ANFIS and Beyond*. A Proposal for the American Risk and Insurance Association 2002 Annual Meeting, University Park, USA.
- Sveinsson, O.G.B.; Salas, J.D.; Boes, D.C.; and Pielke, R.A., 2002. *Modeling Dynamics of Long-term Variability of Hydroclimatic Processes*. J. Hydro-meteorology, 4 (3), 489-505.



- Small, E.E.; Giorgi, F.; Sloan, L.C.; and Hostetler, S., 2000. *The Effects of Desiccation and Climatic Change on the Hydrology of the Aral Sea*. J. Climate, 14, 615-628.
- Soden, B.J., 1999. *The Sensitivity of the Tropical Hydrological Cycle to ENSO*. J. Climate, 3, 538-549.
- Stieglitz, M.; Rin, D.; Famiglietti, J.; and Rosenzweig, C., 1996. *An Efficient Approach to Modeling the Topographic Control on Surface Hydrology for Regional and Global Climate Modeling*. J. Climate, 10, 118-137.
- Suprpto, A., 2003. *Pemanfaatan Air Dan Sumber Air untuk Pertanian dalam Kondisi Keterbatasan Air dan Lingkungan*. Proseding Seminar Hari Air Sedunia, Jakarta 20 Maret 2003.
- Tokar, A.S. and Markus, M., 2000. *Precipitation-Runoff Modeling Using Artificial Neural Networks and Conceptual Models*. J. Hydrologic Engineering, 5 (2), 156-161.
- Toninelli, V.; Salvucci, D.G.; and Mancini, M., 2003. *Parameter Estimation Technique for a Water Balance Model and Application to Measured Data*. Hydrology Days, 192-206.
- Trenberth, K. E. and Guillemont, C.J., 1998. *Evaluation of the Atmospheric Moisture and Hydrological Cycle in the NCEP/NCAR Reanalyses*. Climate Dyn., 14, 213-231.
- White, L.D.; Tewari, M.; and Krishnamurti, T.N., 1998. *Application of a GCM to Study the Surface Hydrological Budget of Amazon*. J. Applied Meteorology, 37 (10) 1321-1331.
- Wooldridge, S.C. and Kalma, J.D., 2001. *Regional-Scale Hydrological Modelling Using Multiple-Parameter Landscape Zones and a Quasi-distributed Water Balance Model*. Hydrology and Earth System Sciences, 5 (1), 59-74.
- Yang, F.; A. Kumar, K.; Schlesinger, M.E.; and Wang, W., 2003. *Intensity of Hydrological Cycle in Warmer Climate*. J. Climate, 16 (14), 2419-2423.
- Yao, H. and Terakawa, A., 1999. *Distributed Hydrological Model for Fuji River Basin*. J. Hydrologic Engineering, 4 (2), 108-116.
- Zhu, Y., 2000. *ANFIS : Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*. EE Dept., Univ. of Missouri, Rolla.