

Penentuan Debit Harian Menggunakan Pemodelan Rainfall Runoff GR4J untuk Analisa Unit Hidrograf pada DAS Citarum Hulu

Dhemi Harlan

Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132, E-mail: dhemi@si.itb.ac.id

Muljana Wangsadipura

Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132, E-mail: mulyana@si.itb.ac.id

Cecep Muhtaj Munajat

Program Studi Magister Pengembangan Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132, E-mail: gorbachev111@yahoo.co.id

Abstrak

Penelitian ini mengkaji pemodelan rainfall-runoff menggunakan metode GR4J (Ge'nie Rural a` 4 parame'tres Journalier) pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum hulu. Dalam studi ini digunakan input data berupa data hujan harian dan data evapotranspirasi potensial yang hasilnya dikalibrasi menggunakan data debit pengamatan harian. Dalam studi ini akan dicari nilai optimum dari parameter pemodelan GR4J yang menghasilkan simpangan atau error yang paling kecil. Ada dua tahapan dalam pemodelan ini, yaitu: kalibrasi model dan validasi model. Kalibrasi model menggunakan data lima tahun pertama dan validasi model menggunakan data lima tahun kedua. Untuk menghitung simpangan yang terjadi digunakan metode Nash-Sutcliffe Coefficient (NS) dan metode Relative Volume Error (RVE). Pemodelan ini mengoptimasi empat parameter bebas berupa Kapasitas Maksimum Production Store (X_1), Koefisien Perubahan Air Tanah (X_2), Kapasitas Maksimum Routing Store (X_3), dan Waktu Puncak Ordinasi Unit Hidrograf (X_4). Parameter waktu puncak ordinasi unit hidrograf (X_4) digunakan untuk keperluan studi banjir berupa analisa unit hidrograf yang menggunakan metode linear reservoir cascade. Kajian dilakukan dengan memanfaatkan DAS Sungai Citarum yang merupakan suatu DAS terukur. Kalibrasi menggunakan data pengamatan di stasiun debit Nanjung dan berdasarkan data pengamatan di beberapa stasiun hujan di dalam DAS. Hasil dari kajian ini menyimpulkan bahwa data lima tahun pertama memiliki parameter yang hampir sama dengan data lima tahun kedua. Hal ini menunjukkan pola curah hujan dan debit tidak mengalami perubahan yang berarti.

Kata-kata Kunci: Rainfall-runoff, metode GR4J, studi banjir, unit hidrograf.

Abstract

This research is to study the rainfall-runoff modeling using GR4J (Ge'nie Rural a` 4 parame'tres Journalier) on Citarum Hulu River Basin. In this study, the data input of daily rainfall and potential evapotranspiration are used, and the result will be calibrated with the observed data of daily discharge. In this study, the optimum value of GR4J model parameters will be observed to get the smallest error deviation. There are two stages in this modeling. Firstly is model calibration and secondly is model validation. Model calibration uses the first of five years of data input and model validation uses the following five years. The Nash-Sutcliffe Coefficient (NS) and The Relative Volume Error (RVE) methods are used to obtain the error deviation. This study is intended to optimize four free parameters, there are the maximum capacity of production store (X_1), the groundwater exchange coefficient (X_2), the maximum capacity of routing store (X_3), and the time base of unit hydrograph (X_4). The last parameter (X_4) is used to study flood discharge in the form of unit hydrograph analysis that uses linear reservoir cascade. This study uses gaged river basin, Citarum River Basin. Calibration uses the observed discharge data of Nanjung Station and based on the observed data of several rainfall stations inside the river basin. The result of this study shows that the first five years data has parameters quite similar with the second five years data. This shows rainfall and discharge pattern are not change significantly.

Keywords: Rainfall-runoff, GR4J method, flood study, unit hydrograph.

1. Pendahuluan

Menemukan model simulasi aliran sungai dengan pemodelan *rainfall-runoff* merupakan tujuan kebanyakan ahli hidrologi. Salah satu penemuan terbesar sepanjang tiga dekade terakhir adalah pengembangan model *rainfall-runoff* yang memungkinkan menggunakan data curah hujan secara komprehensif untuk memperkirakan besarnya debit. Pemodelan *rainfall-runoff* ini sering digunakan karena keterbatasan ketersediaan data debit dari aliran sungai yang ditinjau, biasanya disuatu daerah terutama di Indonesia, belum terpasang *AWLR* (*Automatic Water Level Recording*). Dari data hujan yang ada, banyak dikembangkan pemodelan untuk mendapatkan nilai debit, baik itu untuk mendapatkan debit andalan untuk kebutuhan irigasi dan air baku maupun debit puncak perioda ulang tertentu untuk keperluan analisa banjir.

Dalam pemodelan *rainfall-runoff* ini biasanya melibatkan analisa statistik untuk memperpanjang atau memprediksi data di masa depan. Tetapi biasanya terjadi kesulitan untuk membuat suatu struktur dalam suatu model karena pemodelan *rainfall-runoff* ini sangat bergantung kepada perilaku *catchment area*, dan teori tentang perilaku *catchment area* ini secara umum belum banyak diterima dalam ilmu hidrologi, karena karakteristik tiap *catchment area* berbeda. Selain itu struktur suatu model berhubungan dengan banyak parameter. Adanya anggapan bahwa terlalu sedikit parameter dianggap kurang memadai sedangkan terlalu banyak parameter akan menimbulkan kesulitan dalam pendefinisian parameter dan perhitungan model itu sendiri.

Beberapa pendekatan digunakan untuk membangun suatu pemodelan curah hujan menjadi debit aliran sungai, pendekatan ini sangat dipengaruhi oleh tujuan utama si pemodel dalam menentukan parameter yang akan dicari. Dalam suatu pemodelan, banyak parameter yang berpengaruh seperti input data, nilai dari parameter yang ditetapkan, struktur pemodelan dan lain-lain. Salah satu cara yang umum dari suatu pemodelan adalah mengembangkan model dari suatu pemodelan yang telah ada kemudian memodifikasinya. Model yang muncul saat ini kebanyakan adalah hasil pengembangan dari model terdahulu melalui proses yang panjang dan mengalami banyak penyempurnaan. Banyak model *rainfall-runoff* yang sudah dikembangkan diantaranya: *Tank model* (Sugawara, 1995), *IHACRES* (Ye, 1997), *HBV* (Lindstrom, 1997), *SMAR* (Tan dan O'Connor, 1996), *TOPMODEL* (Beven, 1986), *Xinanjiang* (Jayawardena dan Zhou, 2000) dan lain-lain.

Salah satu jenis pemodelan *rainfall-runoff* harian adalah *GR4J* (*Genie Rural a 4 parametres Journalier*) yang dikembangkan oleh Perrin (2003) dan sudah terbukti memiliki dasar yang kuat dan terbukti efisien

dalam pemodelan. Pemodelan *GR4J* ini merupakan pengembangan dari model sebelumnya yaitu *GR3J* yang pertama kali dikenalkan oleh Edijatno dan Mitchel (1989) kemudian disempurnakan oleh Nascimento (1995) dan Edijatno (1999).

Dalam tulisan ini akan digunakan daerah studi Citarum Hulu, dimana DAS Citarum Hulu ini terletak di 4 kabupaten dan kota di Provinsi Jawa Barat. Pada DAS Citarum Hulu mengalir sungai utama yaitu Citarum yang merupakan sumber air bagi tiga waduk, yaitu Saguling, Cirata dan Jatiluhur. Air dari ke tiga waduk dipergunakan untuk berbagai keperluan, seperti sumber air minum, pertanian, perikanan, irigasi, serta pembangkit tenaga listrik bagi pulau Jawa dan Bali. Tulisan ini menjelaskan hasil penelitian yang telah dilakukan untuk mendapatkan nilai optimum dari parameter bebas dari pemodelan *rainfall-runoff* metode *GR4J* di DAS Citarum Hulu untuk keperluan analisa unit hidrograf.

2. Gambaran Umum DAS Citarum Hulu

Luas DAS Citarum secara keseluruhan adalah 6.000 km², dan DAS Citarum Hulu luasnya 1.771 km² (29,5%) dimana cekungan di antara pegunungan yang dinamakan dataran Bandung sebagian besar dikelilingi oleh pegunungan vulkanik *quaternary* dan limpasan permukaan pada akhirnya mengalir ke Sungai Citarum. Elevasi dataran Bandung berkisar dari El. 656 m di barat (dekat Curug Jompong) hingga sekitar El. 725 m pada ketiga sisi lainnya (Cicalengka di timur dan Majalaya-Ciparay-Banjaran-Soreang di selatan) dengan kemiringan tanah berkisar dari 0,5% hingga 1,5%. Panjang dataran sekitar 40 km pada arah utara-selatan dan lebar 15 km pada arah barat-timur. Pegunungan vulkanik di sekelilingnya mencapai elevasi antara 2.000 m dan 2.600 m. Di sisi barat, dataran Bandung dipisahkan dari dataran Batujajar oleh sederetan bukit.

Daerah Bandung Utara didefinisikan sebagai sisi utara dari DAS Citarum Hulu dengan elevasi tanah lebih tinggi dari 750 m. Luas totalnya 455 km² dimana 117 km² (25,7%) berada di luar DAS Citarum Hulu. Di daerah Bandung Utara, sub-DAS terbesar Sungai Cikapundung menyediakan sebagian besar sumber air permukaan bagi Kota Bandung. Sekitar 88,4% Sub-DAS Cikapundung dengan elevasi tanah lebih tinggi dari El. 750 m berada di daerah Bandung Utara.

Sebagian besar dataran Bandung ditutupi oleh aluvium yang terbentuk oleh endapan sungai dan situ. Endapan aluvial yang menjadi aquifer utama di DAS umumnya tertutup oleh produk vulkanik kuartar yang dibentuk oleh material *pyroclastic* dan aliran lava. Permeabilitas produk vulkanik cukup bervariasi, dan biasanya sangat bervariasi pada material yang tidak terkonsolidasi atau aliran lava berongga. Produk vulkanik ini memainkan peranan penting pada aquifer DAS.

Produk vulkanik kuarter ditutupi oleh batuan sedimenter dari zaman tersier. Batuan sedimenter ini, yang membentuk rangkaian pegunungan di bagian selatan dan barat dataran Bandung, tersusun atas pasir, lempung, *marl* (campuran tanah liat dan kapur), breksi dan batu kapur yang sebagian besar bercampur. Permeabilitas tanah umumnya rendah namun sangat bervariasi pada batu kapur. Sungai Citarum bersumber dari daerah pegunungan di bagian selatan dan bermuara ke daerah pesisir di bagian utara Jawa Barat. Akibat pengaruh gunung api aktif, jenis tanah di DAS Citarum Hulu - yang berada di bagian selatan - bervariasi. Di beberapa tempat, ditemukan satu jenis tanah yang berada bersama dengan jenis tanah lainnya pada kedalaman yang berbeda.

Sungai-sungai utama mengalir secara intensif dari arah Selatan ke Utara yaitu Sungai Citarum dan Cipunegara. Tiga bendungan besar yang multiguna pada Sungai Citarum yaitu Saguling, Cirata dan Jatiluhur berfungsi mengatur aliran sungai.

Total aliran air dari sungai-sungai di wilayah ini yang belum diatur dan dikelola masih cukup besar dan berpotensi untuk dikembangkan. Air sungai Citarum diambil secara intensif yang digunakan untuk air minum, pembangkit tenaga listrik, Industri serta Irigasi.

Penggunaan air yang sangat intensif dan berlebihan menyebabkan volume limpasan langsung di pos pengamatan Nanjung menjadi sangat kecil bila dibandingkan dengan volume hujan yang terjadi di DAS Citarum.

Volume pengambilan air terus meningkat dari tahun 1900 (0,5 juta m³/thn), tahun 1985 (38,6 juta m³/thn), dan tahun 1996 (76,8 juta m³/thn), sedangkan penurunan terjadi pada tahun 1997 (50,1 juta m³/thn), serta tahun 2002 (47,4 juta m³/thn).

Volume produksi air dari anak-anak sungai di wilayah sungai Citarum sangat rendah bila tidak didukung oleh adanya waduk-waduk penyimpanan air. Terdapat sedikit sekali lokasi-lokasi yang potensial untuk menempatkan bendungan-bendungan di wilayah sungai ini. Terkecuali Sungai Cikapundung yang pada bagian hulunya menerima aliran dari sumber-sumber air tanah dari Lembah Lembang, dan Sungai Cisangkuy yang memiliki dua danau serta kemungkinan transfer air antar wilayah sungai yang berasal dari Sungai Cilaki. Sumber-sumber potensial terbesar bagi penyediaan air rumah tangga, perkotaan dan industri ke cekungan Bandung adalah dari Sungai Cisangkuy dan Waduk Saguling yang memiliki cadangan air tak terbatas untuk kebutuhan di hulunya. Namun demikian, pemompaan dan pengelolaan air waduk Saguling akan sangat mahal. Perbedaan ketinggian bisa mencapai sekitar 100 m untuk jarak antara 15 km sampai 25 km.

3. Deskripsi Model

Model *GR4J* adalah pemodelan *rainfall-runoff* diukur berdasarkan 4 parameter bebas yang diperoleh dari data curah hujan harian. Model *GR4J* dikembangkan dari model sebelumnya yang dikembangkan dari metode aslinya yang ditemukan oleh Edijatno dan Michel (1989) kemudian disempurnakan oleh Nascimento (1995) dan Edijatno (1999). Model *GR4J* mengoptimasi empat parameter bebas yaitu:

- X_1 Kapasitas maksimum dari *production store* (mm)
- X_2 Koefisien perubahan *groundwater* (mm)
- X_3 Kapasitas maksimum *routing store* (mm)
- X_4 Waktu saat debit puncak unit hidrograf *UHI* (hari)

Dari penelitian-penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Perrin dan kawan-kawan (2003), dapat diketahui bahwa pemodelan *GR4J* ini memberikan hasil pemodelan yang sangat baik dibandingkan dengan model *rainfall-rainoff* lainnya seperti *Tank model*, *IHACRES*, *HBV*, *SMAR*, *TOPMODEL*. Dalam laporan penelitian (Perrin, 2003) disebutkan juga bahwa dalam penelitiannya Perrin menggunakan 429 DAS yang berbeda kondisi iklimnya termasuk iklim tropis (Brazil), sehingga pemodelan ini bisa digunakan untuk wilayah Indonesia yang juga memiliki iklim tropis.

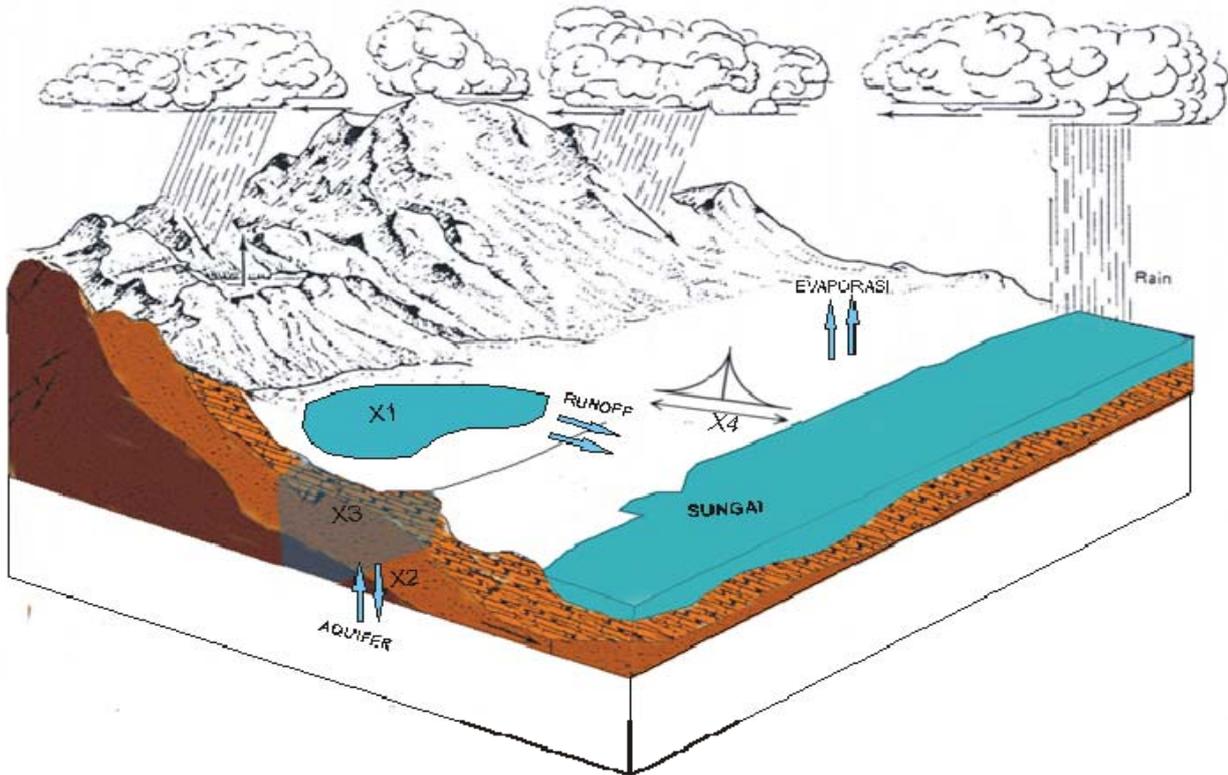
Production Store (X_1) adalah tampungan dipermukaan tanah yang bisa menampung air dari hujan yang terjadi. Tampungan ini mengalami proses evapotranspirasi dan perkolasi. Besarnya tampungan ini sangat dipengaruhi oleh jenis tanah yang ada pada suatu DAS, semakin kecil porositas tanah maka semakin besar *production store* yang ada.

Koefisien Perubahan *Groundwater* (X_2) adalah fungsi dari perubahan air tanah yang mempengaruhi besarnya *routing store*. Ketika memiliki nilai negatif maka air masuk ke *aquifer* dalam dan ketika memiliki nilai positif maka air dari *aquifer* keluar dan masuk ke tampungan (*routing storage*).

Routing storage (X_3) adalah kapasitas air yang bisa ditampung dalam pori-pori tanah. Besarnya nilai *routing store* ini tergantung dari jenis dan kelembaban tanah.

Time Peak (X_4) adalah waktu saat puncak ordinat unit hidrograf banjir yang dihasilkan pada pemodelan *GR4J*. Ordinat unit hidrograf ini dihasilkan dari runoff yang terjadi, dimana 90% aliran merupakan aliran lambat yang masuk ke dalam tanah dan 10% aliran merupakan aliran cepat yang mengalir di permukaan tanah.

Berikut adalah gambaran fisik dari pemodelan *GR4J* dari mulai proses turunnya hujan sampai dengan debit yang terkumpul di sungai



Gambar 1. Gambaran fisik model rainfall-runoff GR4J

Seperti terlihat pada Gambar 2 seluruh perhitungan kuantitas air diekspresikan dalam satuan mm dengan cara membagi volume air dengan luas catchment area.

Langkah pertama kita masukan data curah hujan harian (P) dan evapotranspirasi potensial (E). kemudian definisikan P menjadi Net rainfall P_n dan E menjadi Net evapotranspirasi E_n . Berikut adalah persamaan untuk memperoleh P_n dan E_n .

$$\text{Jika } P \geq E \text{ maka } P_n = P - E \text{ dan } E_n = 0 \quad (1)$$

$$\text{Jika } P < E \text{ maka } E_n = E - P \text{ dan } P_n = 0 \quad (2)$$

Langkah selanjutnya adalah mencari nilai P_s dari P_n yaitu nilai P_n yang mengisi production store, dirumuskan sebagai berikut:

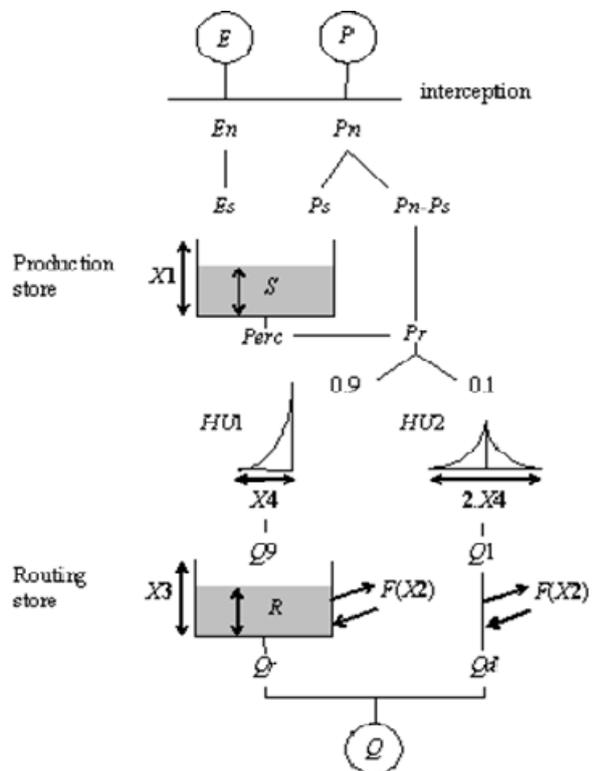
$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S}{x_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)}{1 + \frac{S}{x_1} \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)} \quad (3)$$

Kasus lain jika $P < E$ maka E_s dirumuskan sebagai berikut:

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{x_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{x_1} \right)} \quad (4)$$

E_n mengurangi jumlah production store, Dalam pemodelan ini production store S tidak pernah melebihi x_1 . sehingga production store dirumuskan sebagai berikut:

$$S = S - E_s + P_s \quad (5)$$



Gambar 2. Diagram model rainfall-runoff GR4J (Perrin, 2003)

Di dalam *production store*, Perkolasi dirumuskan sebagai berikut:

$$Perc = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4S}{9x_1} \right)^4 \right]^{-1/4} \right\} \quad (6)$$

Perc dianggap selalu lebih rendah dari *S*. Sehingga nilai tampungan bisa dirumuskan sebagai berikut:

$$S = S - Perc \quad (7)$$

Sebagian $P_n - P_s$ dari P_n dan sebagian perkolasi dari *production store* bergabung dan mencapai *routing store*

$$P_r = Perc + (P_n - P_s) \quad (8)$$

Jumlah air yang mencapai *routing store* dibagi menjadi aliran cepat dan aliran lambat. Aliran cepat di *routing* dengan unit hidrograf *UH1* dan aliran lambat dengan *UH2*. 90% dari P_r dirouting oleh unit hidrograf *UH1* dan sisanya di *routing* dengan *UH2*.

UH1 didefinisikan berdasarkan waktu, *t* sebagai berikut:

$$\text{untuk } t \leq 0, SH1(t) = 0 \quad (9)$$

$$0 < t < X_4, SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4} \right)^{5/2} \quad (10)$$

$$\text{untuk } t \geq X_4, SH1(t) = 1 \quad (11)$$

Seperti *SH1*, *SH2* dicari sebagai berikut:

$$\text{untuk } t \leq 0, SH2(t) = 0 \quad (12)$$

$$\text{untuk } 0 < t < X_4, SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4} \right)^{5/2} \quad (13)$$

$$\text{untuk } 0 < t < 2X_4, SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X_4} \right)^{5/2} \quad (14)$$

$$\text{untuk } t \geq X_4, SH2(t) = 1 \quad (15)$$

UH1 dan *UH2* dirumuskan sebagai berikut

$$UH1 = SH1_j - SH1_{j-1} \quad (16)$$

$$UH2 = SH2_j - SH2_{j-1} \quad (17)$$

Perubahan *groundwater*, *F* dirumuskan sebagai berikut:

$$F = X_2 \left(\frac{R}{X_2} \right)^{7/2} \quad (18)$$

Dimana *R* adalah ketinggian dari *routing store*, dengan catatan *R* tidak pernah melebihi X_3 , ketinggian *routing*

store berubah seiring bertambahnya Q_9 dari *UH1* dan *F*, sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$R = \max(0; R + Q_9 + F) \quad (19)$$

Debit Q_r dari tampungan dapat dihitung dengan persamaan:

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{x_3} \right)^4 \right]^{-1/4} \right\} \quad (20)$$

Dimana Q_r selalu lebih rendah dari *R*. Ketinggian tampungan kemudian dapat dihitung dengan persamaan:

$$R = R - Q_r \quad (21)$$

Air yang berasal dari *routing* (penelusuran) disebut Q_d dan dihitung dengan persamaan:

$$Q_d = \max(0; Q_1 + F) \quad (22)$$

Debit total, Q bisa dihitung dengan persamaan

$$Q = Q_r + Q_d \quad (23)$$

4. Kalibrasi Model

Untuk mengkalibrasi model diperlukan data debit harian dari sungai Citarum di daerah outlet selama 5 tahun untuk memperoleh keempat parameter dari pemodelan *GR4J* dimana pengolahan data hujan ini menggunakan Program *MATLAB 7.0*. Dengan bantuan program ini akan diperoleh nilai parameter yang optimal sehingga penyimpangan atau error yang terjadi paling kecil.

Data hujan yang dipakai adalah curah hujan wilayah hasil perhitungan menggunakan Poligon Thiessen dari stasiun hujan yang ada di wilayah DAS Citarum Hulu. Berikut adalah curah hujan wilayah DAS Citarum Hulu dari tahun 1997 s.d 2006.

Dalam menghitung penyimpangan yang terjadi metode *Nash-Sutcliffe Coefficient (NS)* digunakan untuk menghitung perbedaan jumlah kuadrat dari data observasi dengan data hasil pemodelan dan metode *Relative Volume Error (RVE)* untuk menghitung volume dari data observasi dengan data hasil pemodelan (Booij, 2005).

Persamaan umum *Nash-Sutcliffe Coefficient*

$$R^2 = 1 - \frac{MSE(Q)}{VAR(Q_{ons})} \quad (24)$$

Persamaan umum *Relative Volume Error*

$$VE = \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})}{\sum (Q_{obs})} \quad (25)$$

5. Hasil Pemodelan

Model *GR4J* ini diimplementasikan pada data hujan harian untuk DAS Citarum Hulu dari tahun 1997 sampai tahun 2001. Kemudian setelah didapat nilai parameter yang menghasilkan nilai simpangan yang paling kecil, maka model ini divalidasi menggunakan data hujan dari tahun 2002 sampai tahun 2006. Semua perhitungan dalam pemodelan yang dilakukan menggunakan Program *Matlab 7,0*.

Dalam perhitungan digunakan nilai batas untuk setiap parameter dengan kepercayaan 80%, dimana nilai ini diperoleh dari penelitian-penelitian terdahulu. Data debit hasil pengamatan sebanyak 1825 buah (5 tahun) digunakan sebagai data kalibrasi untuk mendapatkan nilai parameter yang menghasilkan nilai simpangan yang paling kecil. Dalam pemodelan ini nilai kalibrasi dari *Nash-Sutcliffe coefficient (NS)* harus mendekati 1 (satu) dan nilai kalibrasi dari *Relative Volume Error (RVE)* harus mendekati 0 (nol), dengan kata lain yang paling mendekati yang paling baik.

Untuk mendapatkan hasil yang paling optimum, tiap nilai parameter harus dievaluasi dengan memilih parameter yang menghasilkan nilai yang paling optimum, apabila didapat parameter baru dari hasil iterasi yang menghasilkan nilai yang lebih baik, maka parameter terdahulu diganti dengan yang baru. Sehingga apabila tidak ada nilai parameter yang lebih baik lagi maka nilainya tidak akan berubah. Dari skema ini kita juga dapat menyimpulkan relasi antara kenaikan nilai parameter dan besarnya simpangan yang dihasilkan.

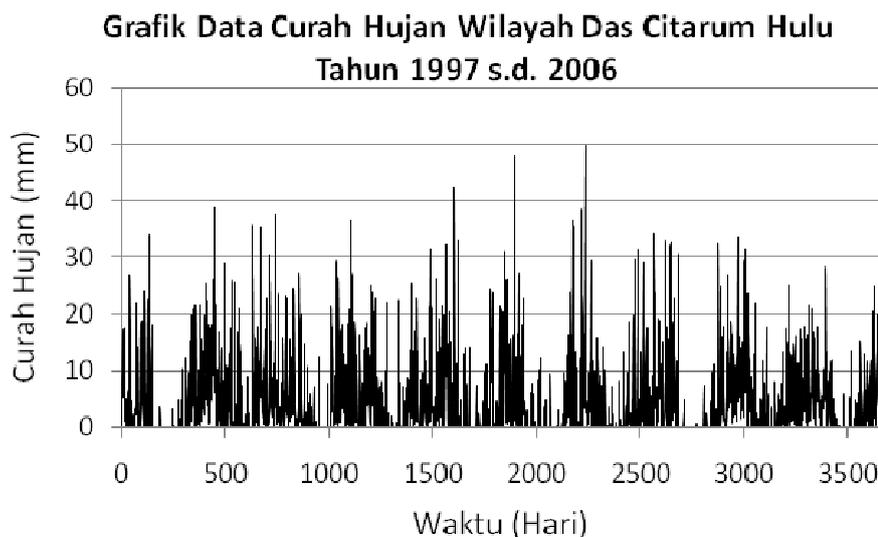
Dari perhitungan yang dilakukan diperoleh nilai simpangan seperti yang dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Dari hasil di atas dapat dilihat bahwa simpangan dengan menggunakan metode *Nash-Sutcliffe coefficient* memberikan nilai 0,75 dengan validasi model menghasilkan nilai 0,73. Hal ini menunjukkan bahwa data kalibrasi dan data validasi memiliki pola yang hampir sama. *Nash-Sutcliffe* ini menggambarkan nilai kemiripan suatu debit hasil pemodelan dibandingkan dengan debit pengamatan. Jika nilainya semakin mendekati satu, maka debit hasil pemodelan memiliki pola yang mirip dengan debit pengamatan. Debit pemodelan yang memiliki pola yang mirip dengan debit pengamatan belum tentu dianggap baik, karena nilainya belum tentu sama. Untuk itu diperlukan suatu batasan lain untuk menghitung nilai simpangan ini, selain memiliki pola yang mirip juga harus memiliki nilai yang mendekati. Untuk itu digunakan metode penghitungan simpangan untuk menghitung volume error yang ada. Dalam Penelitian ini digunakan metode *RVE (Relative Volume Error)*. Dengan batasan dua jenis metode pemeriksaan simpangan ini yaitu

Tabel 1. Nilai optimum dari parameter GR4J dan simpangannya

Koefisien	(1997-2001)		(2002-2006)	
	NS	RVE (%)	NS	RVE (%)
x1	880.68			
x2	3.92			
x3	48.53	0.75	0.96	0.73
x4	0.93			11.08

Sumber: Hasil analisa



Gambar 3. Data curah hujan wilayah DAS Citarum Hulu

Nash-Sutcliffe coefficient dan *Relative Volume Error* diharapkan didapat parameter-parameter *GR4J* yang menghasilkan nilai simpangan paling minimum. Nilai *RVE* yang didapat disajikan dalam besaran persentase. Dari **Tabel 1** dapat dilihat bahwa nilai *RVE* yang didapat adalah 0,96 % untuk kalibrasi dan untuk validasi model didapat 11,08 %. Nilai *RVE* yang paling baik adalah mendekati nol sehingga nilai simpangan yang diperoleh bisa dianggap baik karena dibawah 5%.

Gambar 4 adalah grafik debit pengamatan dibandingkan dengan debit hasil pemodelan yang dihitung menggunakan nilai parameter-parameter yang menghasilkan simpangan paling kecil.

6. Validasi Model

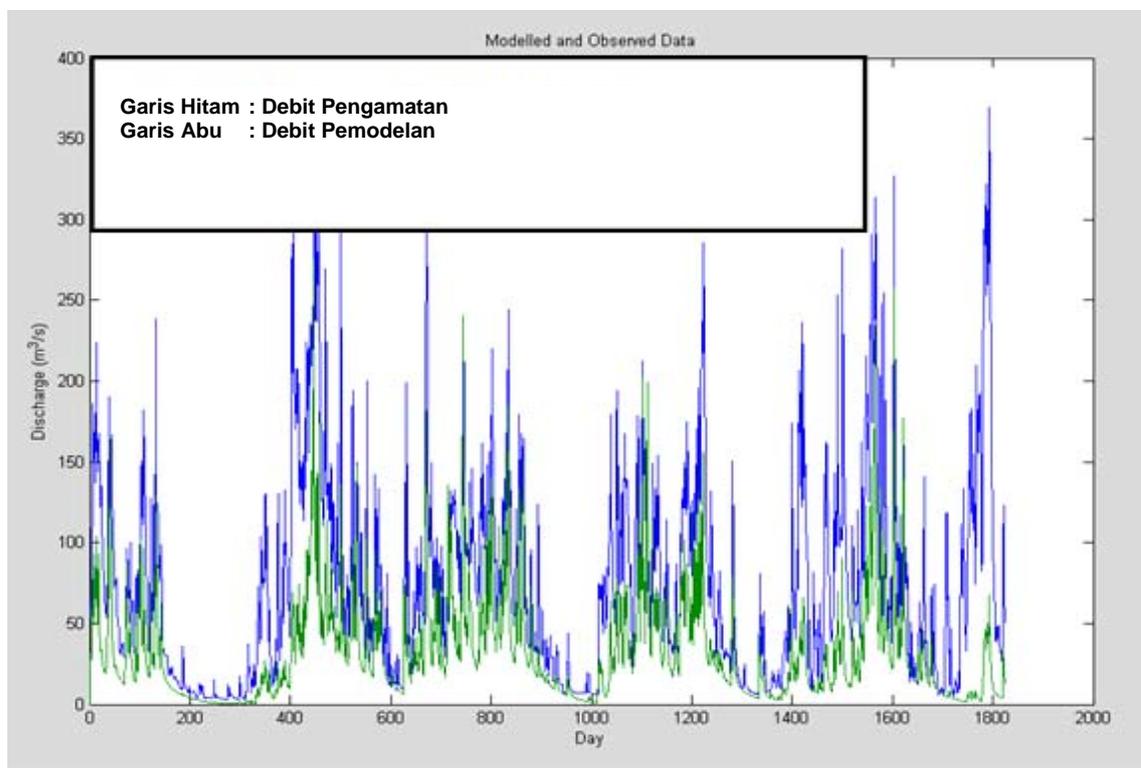
Untuk memvalidasi parameter-parameter yang dianggap paling optimum dan menghasilkan simpangan paling kecil maka digunakan data lima tahun kedua yaitu tahun 2002-2006. Di sini kita tidak mengubah parameter apapun dalam persamaan pemodelan yang sudah dilakukan sebelumnya, hanya datanya saja yang diganti (curah hujan harian, evapotranspirasi potensial, dan debit pengamatan), kita menggunakan parameter yang sama yang kita dapat dengan menggunakan data lima tahun pertama yaitu tahun 1997-

2001. **Gambar 5** adalah grafik debit pengamatan dan debit hasil pemodelan yang didapat dengan menggunakan data tahun 2002-2006.

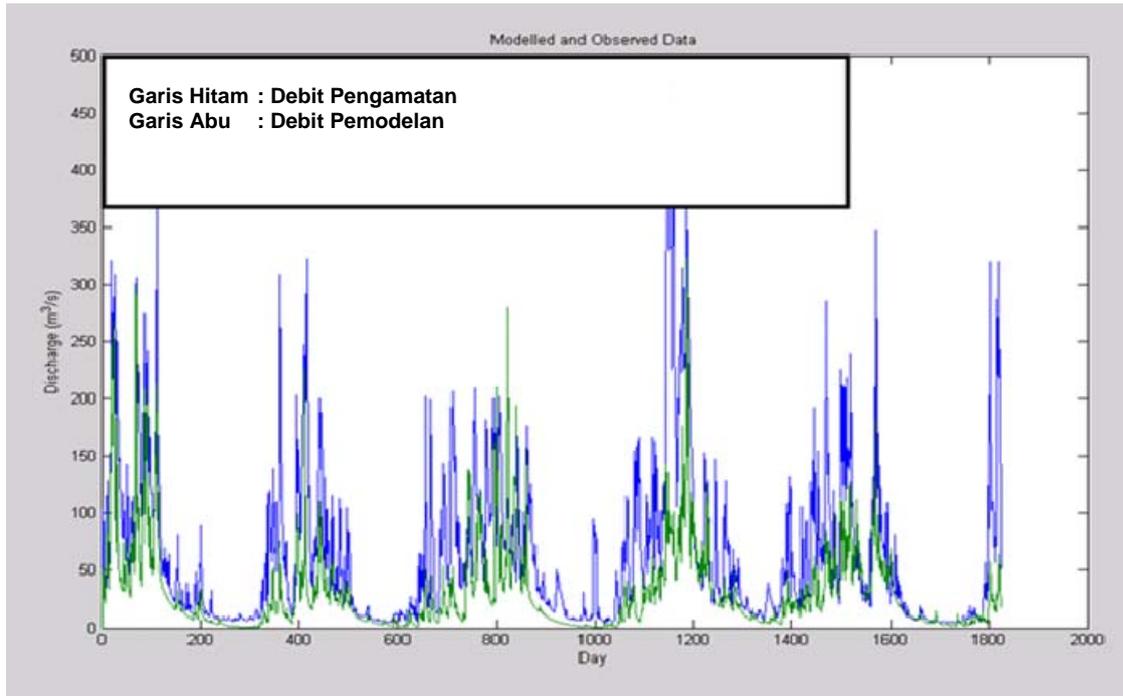
7. Analisa Sensitivitas

Setelah dilakukan validasi model, maka tahap berikutnya adalah melakukan analisa sensitivitas dengan cara mengubah nilai X_1 , X_2 , X_3 , dan X_4 yang meliputi berbagai jumlah kombinasi dari nilai batas yang ditetapkan. Nilai kombinasi yang paling optimal kemudian dijadikan input dalam pemodelan. Di bawah ini disajikan grafik sensitivitas pengaruh perubahan nilai parameter terhadap *NS* dan *RVE*.

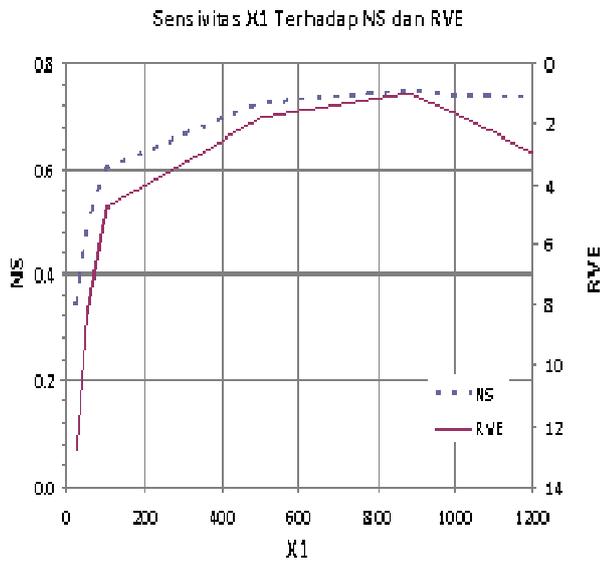
Dari **Gambar 6** dapat dilihat bahwa nilai optimum dari parameter X_1 adalah 880,68 karena menghasilkan nilai *NS* yang paling mendekati satu dan nilai *RVE* yang mendekati nol. Parameter X_1 ini adalah Kapasitas maksimum dari *production store* (mm) yaitu kapasitas dari tampungan di *surface area* yang dipengaruhi langsung oleh besarnya curah hujan dan evapotranspirasi yang terjadi. Besarnya nilai X_1 ini tergantung dari jenis dan kelembaban tanah. Nilai kepercayaan 80 persen dari penelitian-penelitian terdahulu untuk parameter X_1 ini adalah antara 100 s.d 1200 mm. Dapat dilihat bahwa nilai X_1 masuk dalam batas nilai kepercayaan 80%. nilai 880,68 menunjukkan bahwa jenis tanah dipermukaan DAS Citarum Hulu memiliki nilai



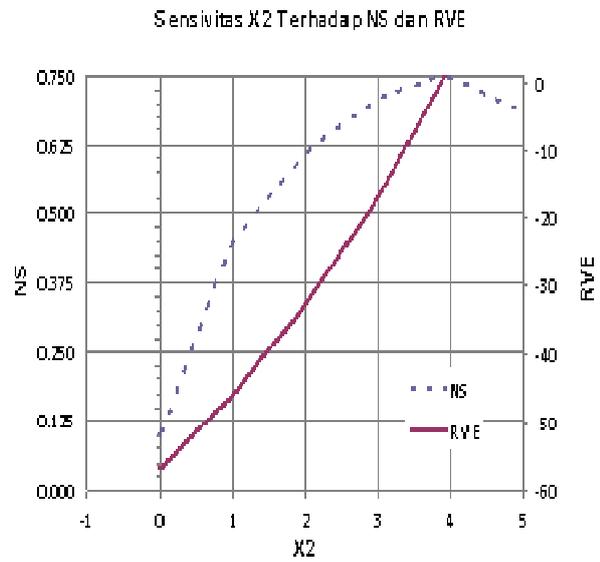
Gambar 4. Grafik debit pengamatan Vs debit hasil pemodelan



Gambar 5. Grafik debit pengamatan Vs debit hasil pemodelan



Gambar 6. Sensitivitas X_1 terhadap NS dan RVE



Gambar 7. Sensitivitas X_2 Terhadap NS dan RVE

porositas yang cukup kecil karena sebagian besar merupakan tanah lempung sehingga memiliki *production storage* atau tampungan di permukaan yang cukup besar ketika hujan mulai turun.

Dari **Gambar 7** dapat dilihat bahwa nilai optimum dari parameter X_2 adalah 3,92 karena menghasilkan nilai *NS* yang paling mendekati satu dan nilai *RVE* yang mendekati nol. Parameter X_2 ini adalah koefisien perubahan air tanah yang terjadi, Nilai kepercayaan 80 persen dari penelitian-penelitian terdahulu untuk parameter X_2 ini adalah antara -5 s.d 3 mm. Ketika X_2 memiliki nilai negatif maka air masuk ke akuifer dalam, ketika menunjukkan nilai positif maka air dari akuifer keluar dan masuk ke tampungan (*storage*). Nilai 3,92 menunjukkan bahwa untuk DAS Citarum Hulu air dari akuifer memberikan kontribusi pada besarnya air yang terdapat pada tampungan (*storage*). Nilai X_2 ini diluar batasan nilai kepercayaan 80 persen, tetapi dipertahankan karena nilainya tidak terlalu jauh dari nilai batasan kepercayaan 80 persen.

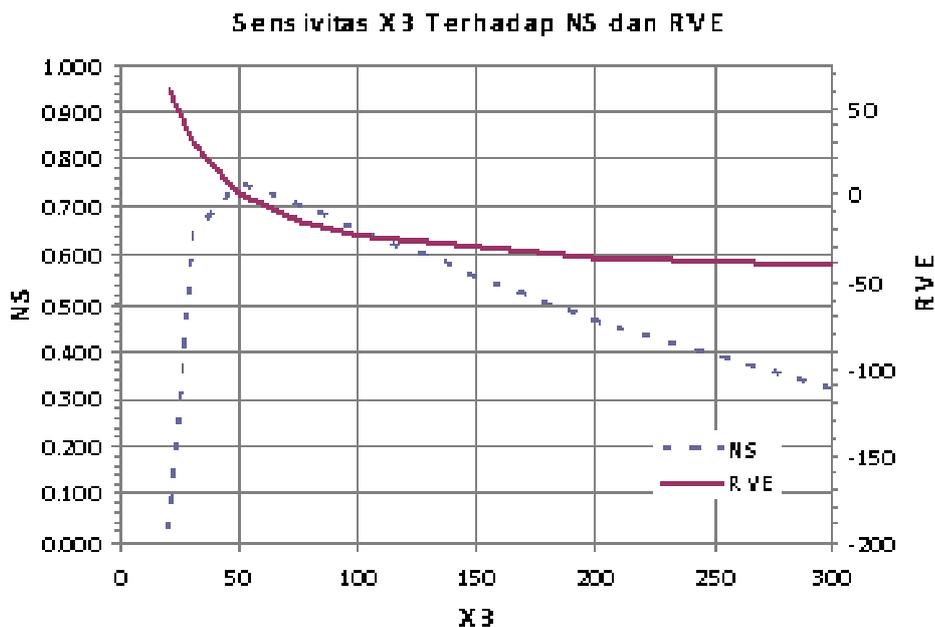
Gambar 8 menunjukkan bahwa nilai optimum dari parameter X_3 adalah 48,53 karena menghasilkan nilai *NS* yang paling mendekati satu dan nilai *RVE* yang mendekati nol. Parameter X_3 ini adalah Kapasitas maksimum *routing store* (dalam mm), kapasitas *routing store* ini adalah besarnya tampungan dari *runoff* yang masuk kedalam tanah. Besarnya aliran yang masuk kedalam tanah dari pemodelan *GR4J* ditentukan 90% dari total *runoff* yang terjadi dan menjadi aliran lambat. Nilai kepercayaan 80 persen dari penelitian-penelitian terdahulu untuk parameter X_3 ini

adalah antara 20 s.d 300 mm. Nilai 48,53 menunjukkan bahwa untuk DAS Citarum Hulu memiliki *routing storage* yang tidak terlalu besar karena pori-pori tanah cukup padat karena sebagian besar jenis tanah didaerah ini merupakan tanah lempung.

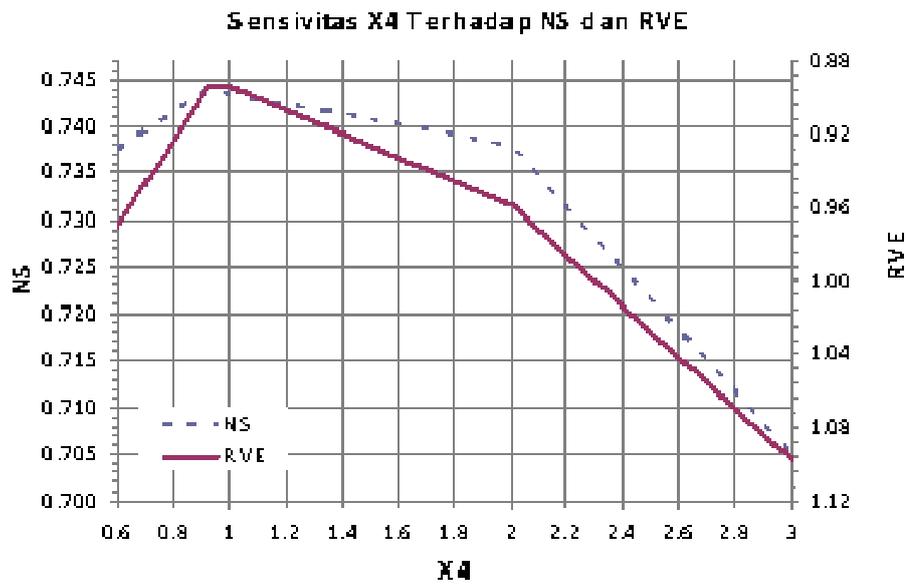
Dari **Gambar 9** dapat dilihat bahwa nilai optimum dari parameter X_4 adalah 0,93 karena menghasilkan nilai *NS* yang paling mendekati satu dan nilai *RVE* yang mendekati nol. Parameter X_4 ini adalah waktu puncak dari unit hidrograf dari debit banjir yang terjadi yaitu 10% dari *runoff*. Waktu puncak ini adalah waktu ketika debit yang paling tinggi terjadi. Nilai X_4 ini digunakan untuk menganalisa unit hidrograf untuk DAS Citarum Hulu. Dari hasil penelitian dalam pengembangan model *GR4J* ini, nilai dari X_4 dibatasi tidak kurang dari 0,5.

8. Analisa Unit Hidrograf

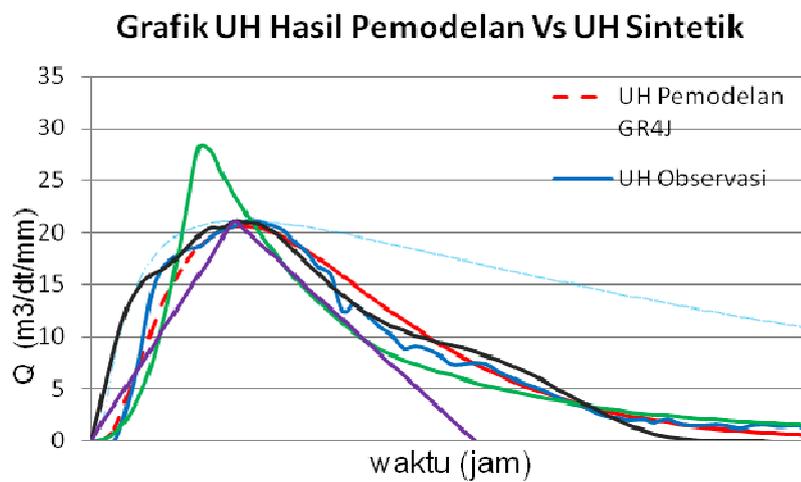
Dalam tulisan ini analisa unit hidrograf yang dilakukan menggunakan metode *Linear Reservoir Cascade* (Miranda Indra, 2007), karena pemodelan *GR4J* ini menganalogikan dua buah tampungan dalam pemodelannya. Dari hasil pemodelan didapat parameter X_4 yaitu time peak banjir sebesar 0,925 hari atau sekitar 22,2 jam. Dalam analisa unit hidrograf ini digunakan data curah hujan jam-jaman dari hasil penelitian terdahulu tentang unit hidrograf (Miranda Indra, 2007). **Gambar 9** adalah grafik dari hasil perhitungan yang dilakukan dibandingkan dengan perhitungan menggunakan metode *linear cascade reservoir* dengan menggunakan parameter hasil pemodelan dibandingkan dengan unit hidrograf hasil perhitungan dengan menggunakan metoda lain seperti *Nakayasu, Snyder dan SCS*.



Gambar 8. Sensitivitas X_3 terhadap *NS* dan *RVE*



Gambar 9. Sensitivitas X_4 terhadap NS dan RVE



Gambar 10. Grafik hasil UH pemodelan Vs UH observasi

Dari **Gambar 10** dapat dilihat besarnya *UH* hasil pemodelan memiliki nilai yang tidak berbeda jauh dengan *UH* Observasi. *UH* pemodelan *GR4J* memiliki waktu dan besaran puncak banjir yang hampir sama dengan *UH* observasi.

9. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Dalam suatu pemodelan diperlukan analisis sensitivitas untuk mengetahui pengaruh suatu parameter terhadap hasil pemodelan sehingga menghasilkan pemodelan yang paling dekat dengan kondisi nyata.
2. Dari hasil yang diperoleh dapat diketahui bahwa nilai *NS* pada validasi model mirip dengan *NS* pada kalibrasi model sehingga dapat disimpulkan bahwa data lima tahun pertama memiliki parameter yang hampir sama dengan data lima tahun kedua. Hampir samanya nilai parameter ini kemungkinan terjadi karena pencatatan data curah hujan dan debit yang terjadi dilakukan cukup konsisten. Tetapi nilai *NS* yang tidak melebihi 0,85 menunjukkan bahwa pemodelan *rainfall-runoff* menjadi debit banyak dipengaruhi oleh berbagai faktor eksternal, tidak hanya dipengaruhi oleh empat parameter pada pemodelan. Faktor tersebut dapat berupa pengambilan dan pembuangan air di DAS yang tidak menentu sehingga nilai curah hujan yang kecil tidak lantas menyebabkan debit yang kecil, demikian juga sebaliknya. Hal ini bisa dimaklumi karena DAS Citarum Hulu ini merupakan suatu DAS dengan aktivitas masyarakat yang sangat tinggi, banyak pemukiman dan industri yang mengambil dan membuang air. Hal ini menyebabkan pola curah hujan dengan debit yang teramat tidaklah sama.
3. Dari hasil penelitian didapat nilai parameter Kapasitas Production Store (X_1) adalah 880,68 mm, Koefisien Groundwater (X_2) adalah 3,92, Kapasitas Routing Store (X_3) adalah 48,53 mm dan Waktu Puncak Ordinat Unit Hidrograf (X_4) adalah 0,93 hari.

10. Rekomendasi

Berdasarkan hasil penelitian ini, ada beberapa rekomendasi yang bisa diajukan, antara lain:

1. Data curah hujan yang digunakan sebaiknya memiliki range yang cukup panjang, sehingga dapat menunjukkan karakteristik suatu DAS, sehingga nilai parameter yang didapat bisa lebih mewakili kondisi di DAS tersebut.

2. Dalam melakukan pemodelan hendaknya digunakan data hujan dalam kurun waktu yang pendek misalnya setahun atau dua tahun sehingga validasi yang dilakukan bisa lebih dari satu kali, contohnya tahun pertama digunakan untuk data kalibrasi sedangkan untuk data validasi digunakan data tahun kedua, tahun ketiga, tahun keempat dan seterusnya.
3. Penelitian sebaiknya dilakukan pada daerah aliran sungai yang masih alami, sehingga data observasi sesuai dengan karakteristik daerah aliran sungai yang sesungguhnya tanpa adanya pengambilan atau penambahan debit air yang cukup besar.
4. Referensi DAS yang digunakan dalam penelitian sebaiknya tidak hanya menggunakan satu DAS saja, tetapi dilakukan untuk beberapa kasus DAS.
5. Karena keterbatasan waktu dalam melakukan penelitian sehingga nilai *NS* yang didapat hanya mencapai 0,75, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk memperoleh nilai parameter yang lebih optimum sehingga nilai *NS* bisa lebih mendekati angka satu.

Daftar Pustaka

- Booij, M.J., 2005, Impact of Climate Change on River Flooding Assessed with Different Spatial Model Resolutions, *Journal of Hydrology*.
- Beven, K., 1986, *Hillslope Runoff Processes and Flood Frequency Characteristics*, In: Abrahams, A.D., (Ed), *Hillslope Processes*, pp. 187 – 202.
- Edijatno, Michel, C., 1989, *Un Modele Pluie-Debit Journalier a Trois Parametres*, *La Houille Blanche* (2), 113 – 121.
- Edijatno, 1999, GR3J: A Daily Watershed Model with Three Free Parameters, *Journal of Hydrology*.
- Indra, Miranda, 2007, *Kajian Unit Hidrograf dan Unit Hidrograf Sintetik pada Daerah Aliran Sungai Citarum*, Bandung: Departemen Teknik Sipil, ITB.
- Jayawardena, A.W., Zhou, M.C., 2000, A Modified Spatial Soil Moisture Storage Capacity Distribution Curve for The Xianjiang Model, *Journal of Hydrology* 227, 93 – 113.
- Lindstrom, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergstrom, S., 1997, Development and Test of The Distributed HBV-96 Hydrological Model, *Journal of Hydrology* 201, 272 – 288.

- Nascimento, N.O., 1995, *Appreciation a L'aide D'un Modele Emirique Des Effets D'action Anthropiques Sur La Relation Pluie-Debit a L'echelle Du Bassin Versant*, PhD Thesis, CERGRENE/ENPC, Paris: France, 550 pp.
- Perrin, M., dan Andre'assian, 2003, Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, *Journal of Hydrology*.
- Sugawara, M., 1995, *Tank Model*. In: Singh, V.P., (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, pp. 165 – 214, Chapter 7.
- Tan, B.Q., O'Connor, K.M., 1996, Application of An Empirical Infiltration Equation in The SMAR Conceptual Models, *Journal of Hydrology* 185, 275 – 295.
- Ye, W., Bates, B.C., Viney, N.R., Sivapalan, M., Jake-man, A.J., 1997, *Performance of Conceptual Rainfall-runoff Models in Low Yielding Ephemeral Catchments*, *Water Resources Research* 33 (1), 153 -166.