

APLIKASI SISTEM INFORMASI GEOGRAFI UNTUK MENDUGA KUANTITAS KOMPONEN SUMBERDAYA AIR BULANAN SECARA SPASIAL DENGAN METODA CN-NRCS, TEGANGAN AIRTANAH DAN KONDUKTIVITAS HIDRAULIK DI HULU DAS CITARUM

M. Rahman Djuwansah dan Ida Narulita

ABSTRAK Keberadaan metodologi pendugaan yang lebih rinci tentang ketersediaan sumberdaya air secara spasial telah menjadi keperluan mendesak. Selama beberapa dekade terakhir terjadi perluasan pesat daerah urban, utamanya di Pulau Jawa, dimana beberapa diantaranya kini mengalami krisis air. Sistem Informasi Geografi telah dimanfaatkan untuk menduga kuantitas komponen sumberdaya air di hulu DAS Citarum. Data yang digunakan adalah model elevasi digital (DEM), citra satelit, data curah hujan dari 22 stasiun yang tersebar di daerah kajian, peta tanah dan peta geologi. Pendugaan kuantitas komponen sumberdaya air didasarkan pada metoda CN (SCS/NRCS), distribusi tegangan airtanah (pF) dan perbedaan konduktivitas hidraulik. Hasil penelitian menghasilkan basis data spasial kuantitas komponen sumberdaya air yang dapat disajikan baik sebagai data tabular, diagram, maupun peta tematik untuk keseluruhan daerah penelitian maupun khusus untuk daerah yang dipilih. Validasi dilakukan dengan membandingkan antara hasil pendugaan dengan hasil pengukuran luah aliran Sungai Citarum di Stasiun Nanjung. Model pendugaan memperlihatkan validitas yang baik untuk kuantifikasi air larian bulanan. Untuk air infiltrasi serta total aliran, validitas baik hanya diperoleh untuk waktu kumulatif tahunan. Hasil pendugaan ini memadai untuk disajikan setara dengan informasi peta pada skala 1: 50 000.

Pemahaman tentang keterbatasan model diperlukan untuk meminimalkan kemungkinan kesalahan dalam pengambilan keputusan yang didasarkan atas informasi hasil pendugaan.

Kata Kunci: Sistem Informasi Geografis, sumberdaya air, konduktivitas hidraulik, DAS Citarum

ABSTRACT The existence of more detailed estimation method of spatial water resources availability is actually an urgent necessity. In the last several decades urban area has expanded rapidly, mainly in the Java island, some of which are actually subjected to water crisis. Geographic information system has been used to estimate the quantity of water resources components in the upstream of Citarum Watershed. The data used are Digital Elevation model (DEM), satellite images, rainfall data collected from 22 stations spread out at the study area, soil map and geologic map. The estimation of water resources components quantity was carried out using CN(SCS/NRCS), distribution of soil water tension (pF) and hydraulic conductivity (k) difference. The result is a spatial database of water resources components that can be presented as tabular data, diagrams, and thematic maps for whole study area as well as for the selected area. Validation has been done by comparing estimation results to measurement results of the Citarum River discharge at Nanjung station. Estimation model shows a good validity for monthly run off quantification. For infiltration water and total flow, good validity was obtained only for yearly cumulative results. The estimation result is adequate to be presented as 1:50000 mapscale information. The understanding of model limitation is required to minimize decision making error derived from estimation results information.

Naskah masuk : 02 Maret 2010

Naskah diterima : 08 Desember 2011

M. Rahman Djuwansah
Pusat Penelitian Geoteknologi - LIPI
Jl. Sangkuriang Bandung 40135
Email : djuwansah@yahoo.co.id

Ida Narulita
Pusat Penelitian Geoteknologi - LIPI
Jl. Sangkuriang Bandung 40135
Email : narulita_ida@yahoo.co.id

Keyword: *Geographic information systems, water resource, hydraulic conductivity, Citarum Watershed*

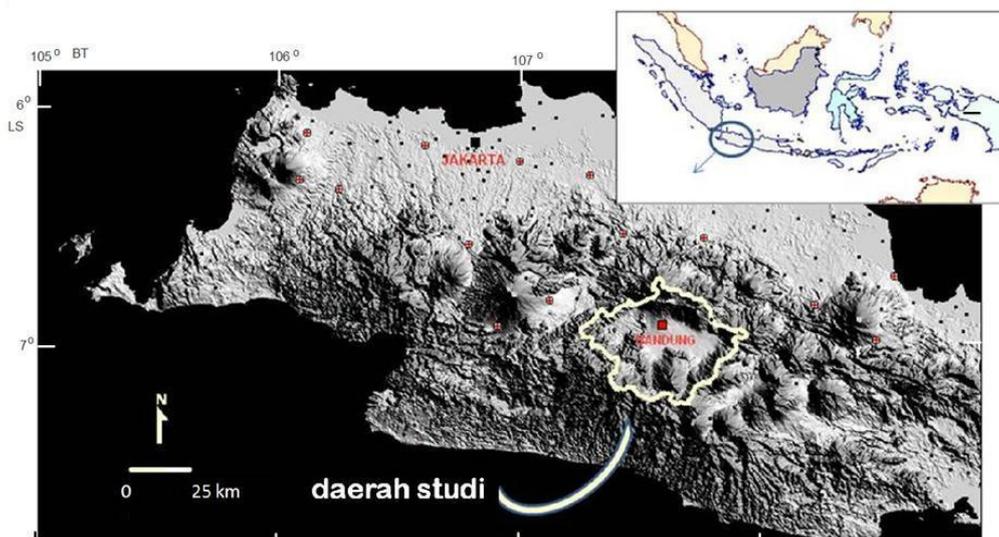
PENDAHULUAN

Beberapa kawasan di Indonesia terutama di daerah berpenduduk padat telah mengalami krisis air, ditandai dengan kurangnya sediaan air atau penurunan kualitas air pada musim kemarau serta kerap dilanda banjir dan bencana air lainnya pada musim hujan. Penyebab utama krisis air adalah karena sumberdaya air dan lahan telah dieksploitasi melebihi batas daya dukungnya. Selama beberapa dekade terakhir ini beberapa daerah urban meluas dengan pesat, utamanya di Pulau Jawa. Daerah urban yang dicirikan oleh kepadatan penduduk dan kepadatan aktivitas, membutuhkan pasokan sumberdaya air yang jumlahnya bisa mencapai beberapa kali lipat kebutuhan daerah rural. Untuk menghindari terputusnya kelangsungan produktivitas akibat hilangnya daya dukung sumberdaya air, maka cara pemanfaatan di wilayah wilayah (DAS atau sub DAS) yang pesat perkembangannya perlu ditata ulang. Tata kelola baru ini harus didasarkan pada data ketersediaan air yang rinci dan terukur, dengan mempertimbangkan sebanyak mungkin faktor alam yang mempengaruhinya (Black, 1996) serta meliputi aspek konservasi dan penggunaan lahan. Untuk keperluan tersebut di atas, metodologi pendugaan yang lebih rinci tentang ketersediaan sumberdaya air di suatu daerah telah menjadi keperluan yang mendesak.

Memperkirakan daya dukung sumberdaya air suatu wilayah memang tidak mudah karena menyangkut perkiraan jumlah keberadaan air yang selalu berfluktuasi, karena air selalu bergerak dan berubah bentuk menurut daur hidrologi. Ketersediaan air di suatu daerah merupakan fungsi dari dinamika banyak faktor alam seperti Iklim, Bentuk Wilayah, Geologi, Tanah dan Tutupan serta Penggunaan Lahan. Setiap pemanfaatan air atau perubahan salah satu faktor hidrologi akan mempengaruhi ketersediaan air di tempat lain, terutama di bagian hilir dari DAS yang bersangkutan.

Jumlah air pada suatu daerah biasa dihitung melalui pengukuran luah air secara kontinyu pada saluran sungai utama. Tetapi jumlah stasiun pengukur luah di sungai-sungai di Indonesia sangat terbatas, sehingga data tentang kuantitas air yang tersedia terbatas hanya untuk sub-DAS tertentu saja. Cara lain untuk menduga ketersediaan air adalah dengan Neraca Air (Thornwaite, 1957) yang biasa dihitung berdasarkan besaran faktor-faktor iklim (temperatur, intensitas penyinaran matahari, kecepatan angin, kelembaban udara, dsb.) dan menghasilkan luaran berupa perbandingan antara curah hujan, sebagai masukan, dan evapotranspirasi, air larian dan bahkan air tanah sebagai luaran (Scanlon dkk., 2002).

Dengan adanya program Sistem Informasi Geografi (SIG), terbuka kemungkinan untuk menyimpan berbagai data faktor hidrologi secara kuantitatif dan memiliki acuan koordinat spasial untuk kemudian diintegrasikan ke dalam suatu operasi perhitungan (Luijten dkk., 2000).



Gambar 1. Lokasi daerah studi.

Cara ini diuji-coba menggunakan lokasi kasus di bagian paling hulu Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum yang secara hidrologis merupakan salah satu daerah yang telah mengalami kerusakan paling parah di Indonesia.

Daerah Studi

Daerah studi yang meliputi area sekitar 18000 km², adalah bagian paling hulu DAS Citarum. Batas hilirnya adalah stasiun pemantau luah Sungai Citarum di Nanjung yang datanya digunakan untuk validasi hasil pendugaan. Daerah ini terletak antara 6°44'53" s/d 7°14'16" LS dan 107°22'50" s/d 107°57'03" BT, pada ketinggian antara 600 s/d 2500 m dpl. Geologi daerah ini dicirikan oleh berbagai formasi vulkanik. Lereng bawah dan tengah cekungan didominasi oleh formasi vulkanik tua, sedangkan di bagian puncak umumnya lebih muda. Bagian terendah tertutupi endapan danau purba yang berkali-kali menggenangi daerah ini semenjak Pleistosen sampai akhir Holosen. Endapan danau pada perioda terakhir, meliputi kawasan terluas dataran, terdiri dari endapan danau berbutir halus (Dam, 1994). Sebagian besar dataran kini telah dikembangkan menjadi daerah pertanian, daerah hunian dan industri. Perkebunan umumnya terletak pada lereng bagian atas, sedangkan hutan umumnya terletak di daerah puncak.

Bahan

Bahan untuk penyusunan basis data spasial bulanan sumberdaya air adalah data dasar yang ditransformasi menjadi data tematik sbb.:

- Data curah hujan, dikumpulkan dari 22

stasiun cuaca yang tersebar di daerah penelitian, di transformasi menjadi peta isohyet.

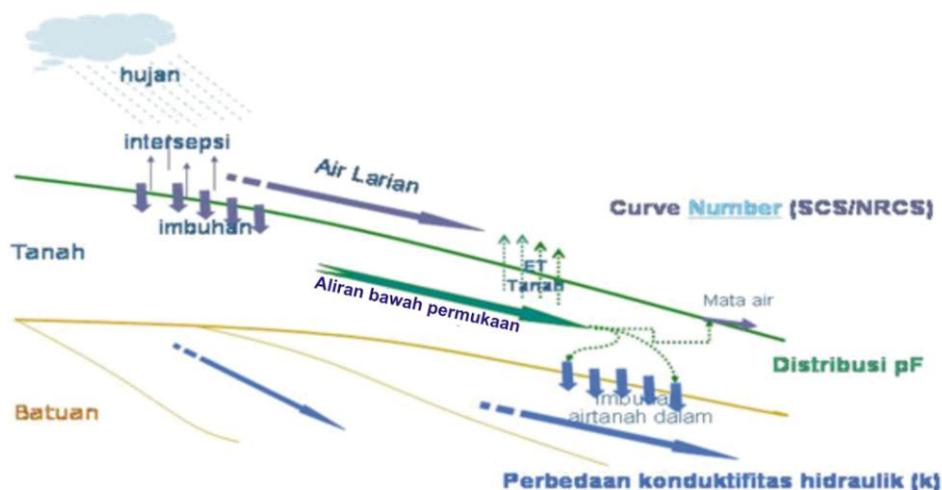
- Peta topografi yang ditransformasi menjadi data Model Elevasi Digital (DEM)
- Citra Satelit (Landsat dan Aster) yang kemudian ditafsirkan dan disimpan dalam bentuk peta sebaran tutupan lahan.
- Peta tanah (Puslit Tanah dan Agroklimat) skala 1:50.000, yang kemudian ditransformasikan menjadi peta permeabilitas tanah dan peta kelas hidrologi tanah.
- Peta Geologi yang kemudian ditransformasikan menjadi peta permeabilitas batuan.
- Data tahun 2001 dan 2004 digunakan untuk studi ini.

METODOLOGI

Kuantifikasi Komponen Sumberdaya Air

Komponen sumberdaya air yang dimaksud adalah bentuk ketersediaan air di alam yang biasa dipisahkan menjadi air permukaan, airtanah dangkal dan airtanah dalam.

Kuantitas setiap komponen sumberdaya air yang dihasilkan di suatu lokasi diperkirakan dengan proses perhitungan terhadap data spasial (peta) tematik faktor-faktor sumberdaya air di lokasi tersebut. Faktor-faktor tersebut meliputi iklim, bentuk lahan, tanah, batuan dan tutupan atau penggunaan lahan. Perhitungan dilakukan melalui tiga tahapan (Gambar 2).



Gambar 2. Komponen aliran pada daur air dan metoda yang diadopsi untuk pemilahannya.

Pertama, memisahkan kuantitas air hujan menjadi air larian atau limpasan, penguapan (intersepsi) dan infiltrasi dengan metoda Curve Number (CN).

Kedua, air infiltrasi ke dalam tanah dipilah lagi menjadi air yang menguap (evapotranspirasi) dan aliran airtanah. Tahap ini dihitung berdasarkan distribusi tegangan air (pF) pada berbagai ukuran pori tanah (Chamayou dan Legros 1989).

Ketiga, aliran airtanah (perkolasi) dipisahkan lagi menjadi aliran bawah permukaan yang akan keluar menjadi mata air dan pengisian airtanah dalam berdasarkan perbedaan konduktivitas hidraulik (k) tanah dan batuan (Freeze dan Cherry 1979). Prinsip setiap metoda yang dipakai pada setiap tahapan kuantifikasi komponen tersebut di atas adalah sebagai berikut:

Metoda CN

Metoda CN dikembangkan oleh *US-National Resources Coservation Services (US-NRCS)* didasarkan pada asumsi proporsi infiltrasi air hujan ke dalam tanah pada berbagai jenis tanah dengan vegetasi atau tutupan lahan yang berbeda (Mc Cuen, 1982; Chow dkk., 1988). Pada pendugaan ini, digunakan data hujan harian sebagai masukan. Data lainnya yang diperlukan untuk menentukan proporsi air larian dan air infiltrasi adalah kelompok hidrologi tanah dan kelembaban tanah awal (AMC) yang besarnya ditentukan oleh tekstur tanah dan laju infiltrasi tanah. Jumlah curah pada setiap kali hujan (P) di atas tanah dengan potensi maksimal tanah untuk menahan (*retention*) air (S) tertentu, akan terbagi menjadi tiga komponen; Air larian (Q), Infiltrasi (F) dan Abtraksi awal (*Initial Abstraction: IA*), dengan hubungan :

$$Q = (P - Ia)^2 / (P - Ia) + S \quad \dots(1)$$

Menurut pengalaman empiris di banyak tempat (di Amerika Serikat) diperoleh :

$$Ia = 0,2 S \quad \dots(2)$$

Dan dari hubungan di atas maka nilai Q bisa diperoleh dari input P berdasarkan persamaan:

$$Q = (P - 0,2S)^2 / (P + 0,8S) \quad \dots(3)$$

Q dan P dapat diketahui dari hasil pengukuran, sedangkan S dan Ia merupakan parameter yang tidak diketahui. Penetapan nilai S dilakukan

dengan melalui nilai *Runoff Curve Number (CN)* dengan rumus:

$$S = (25400/CN) - 254 \quad \dots(4)$$

untuk S dalam satuan mm

Nilai CN berkisar antara 0 sampai 100. Indeks CN mencerminkan kombinasi tiga faktor hidrologi tanah yaitu: jenis (tekstur) tanah, tutupan lahan dan kelembaban tanah awal. NRCS mengelaskan tanah menjadi empat kelas (tabel 1). Setiap jenis tutupan lahan pada keempat jenis tanah tersebut memiliki nilai CN yang berbeda-beda. Nilai CN pada persamaan (4) di atas adalah nilai CN (II), berlaku untuk kelembaban tanah normal yaitu setara kelembaban tanah rata-rata setelah hujan pada lima hari terakhir yang bercurah antara 35 s/d 52,5 mm. SCS mengelaskan kelembaban tanah awal (*antecedent moisture classes: AMC*) menjadi tiga kelas. AMC I untuk tanah yang lebih kering daripada kelembaban normal atau AMC II, dan AMC III untuk tanah dengan kelembaban yang melebihi AMC II. Untuk keadaan AMC I dan AMC III, nilai CN yang dipakai pada perhitungan berubah sbb.:

untuk AMC I:

$$CN(I) = 4,2 CN(II) / \{10 - 0,058CN(II)\} \quad \dots(5)$$

untuk AMC III:

$$CN(III) = 23CN(II) / \{10 - 0,13 CN(II)\} \quad \dots(6)$$

Apabila P dan Q sudah diketahui maka berarti S juga sudah diketahui sehingga Ia dan F dapat dihitung melalui:

$$F = (P - Ia) - Q \quad \dots(7)$$

Tabel 1. Kelompok Hidrologi Tanah

Kelompok Tanah	Laju Infiltrasi (mm/jam)	Tekstur Tanah
A	8 - 12	Pasir, Pasir berlempung, lempung berpasir
B	4 - 8	Lempung berdebu, lempung
C	1 - 4	Lempung pasir berliat
D	<1	Lempung berliat, lempung berdebu

Sumber: Mc. Cuen, 1982

Tabel 2. Jenis tutupan lahan hasil penafsiran Citra Landsat 2001 dan nilai CN yang dipakai untuk menduga proporsi intersepsi, air larian, dan infiltrasi di Hulu DAS Citarum.

Tutupan Lahan DAS Citarum	Kelas Hidrologi			
	A	B	C	D
Sungai/Tubuh Air/Danau/Waduk/Situ	98	98	98	98
Hutan Primer	25	55	70	77
Hutan Sekunder	30	58	71	78
Hutan Pinus	45	66	77	83
Perkebunan	49	69	79	84
Kebun Campuran	64	75	83	87
Ladang / Tegalan	68	79	85	88
Padang Rumput/Ilalang	72	82	88	90
Permukiman	81	88	91	93
Kawasan dan Zona Industri	89	92	94	95
Sawah	59	70	78	81
Semak Belukar	49	69	78	81
Tanah Kosong / Terbuka	77	86	91	94
Kawasan Pertambangan / Galian	79	87	92	94

Sumber: dimodifikasi dari Mc. Cuen, 1982.

Jenis tutupan lahan dan sebarannya ditentukan dengan penafsiran Citra satelit Landsat (tahun 2001) dan Aster (tahun 2004) yang dilakukan dengan metoda klasifikasi otomatis. Penafsiran Citra satelit menghasilkan 14 jenis Tutupan Lahan. Nilai CN ditetapkan (Tabel 2) dengan mengacu pada tabel nilai CN-SCS (Mc Cuen, 1982). Karena beberapa jenis tutupan lahan di Indonesia tidak terdapat di Amerika Serikat dan sebaliknya, adaptasi metoda ini di Indonesia memerlukan penyesuaian, terutama dalam menentukan nilai CN untuk jenis tutupan lahan khas (mis.: sawah, kebun campuran) yang tidak terdapat padanannya pada tabel SCS.

Distribusi Ukuran Pori

Pemisahan air infiltrasi menjadi komponen air (perkolasi) dan air yang menguap kembali (evapotranspirasi), didasarkan atas prinsip pengisian kelembaban tanah (Foth dan Turk, 1972). Air infiltrasi pertama-tama akan mengisi pori-pori halus, sedangkan pori-pori yang lebih kasar diisi setelah pori-pori halus dijenuhi. Pada penglepasannya, pori-pori berukuran kasar akan dikosongkan terlebih dahulu. Air pengisi pori-pori kasar (pori drainase) tertahan oleh tanah dengan tegangan yang lebih lemah dari gaya gravitasi ($pF < 2$) dan akan mengalir ke lapisan di bawahnya atau kemudian keluar lagi sebagai mata air di sebelah hilir. pF (=logaritma desimal tekanan

ketinggian kolom air dalam cm) adalah ekspresi tegangan air (Baize, 1988). Air yang masuk ke dalam pori-pori kecil (pori kapiler), tertahan oleh tegangan besarnya melebihi gravitasi ($pF > 2$) sehingga hanya bisa dilepaskan dari tanah dengan hisapan akar atau penguapan. Sedangkan pada pori-pori yang sangat halus akan ditahan sangat kuat oleh tanah ($pF > 4,2$) dan akan tetap berada di dalam tanah. Pendugaan proporsi berbagai tegangan air pada jenis tanah berbeda didekati berdasarkan perbedaan tekstur dan permeabilitas (Chamayou dan Legros, 1989).

Jumlah air perkolasi pada setiap kali hujan adalah jumlah air Infiltrasi dikurangi jumlah air yang mengisi pori kapiler. Pada bulan basah pori kapiler yang diisi kembali pada setiap kali hujan diperkirakan hanya 1/5 dari keseluruhan pori kapiler, sedangkan pada musim kemarau diperkirakan setengahnya.

Jumlah air perkolasi (p) adalah:

$$p = (F/S - 0.2 k) F \text{ pada bulan basah, dan (8)}$$

$$p = (F/S - 0.5 k) F \text{ pada bulan kering(9)}$$

Dimana

k = persentasi pori kapiler

F = air infiltrasi

S = kapasitas simpan tanah

Batas bulan basah dan bulan kering pada curah hujan bulanan = 60 mm.

Perbedaan Nilai Konduktivitas Hidraulik

Pergerakan air di dalam tanah dan batuan di tentukan oleh besarnya konduktivitas hidraulik (k) setiap jenis batuan. Air di dalam tanah/batuan jenuh memiliki tekanan yang berasal dari beban air di atasnya sampai dengan dari paras air tanah. Apabila terdapat kekosongan atau penurunan tekanan di dalam akifer airtanah sebagai akibat kebocoran (*leakage*) atau pengambilan, maka akan ada aliran mengarah ke lokasi yang tekanannya lebih rendah. Apabila k tanah (k_1) lebih besar daripada k batuan (k_2), luah (q) air tanah yang mengisi batuan adalah sebesar:

$$k_1 q_1 = k_2 q_2 \text{ atau } q_2 = k_2/k_1 * q_1 \quad \dots\dots(10)$$

sedangkan sisanya akan mengalir secara lateral dan akan keluar ke permukaan sebagai mata air. Apabila k_1 lebih besar atau sama dengan k_2 maka debit air pada tanah dan batuan akan sama besar.

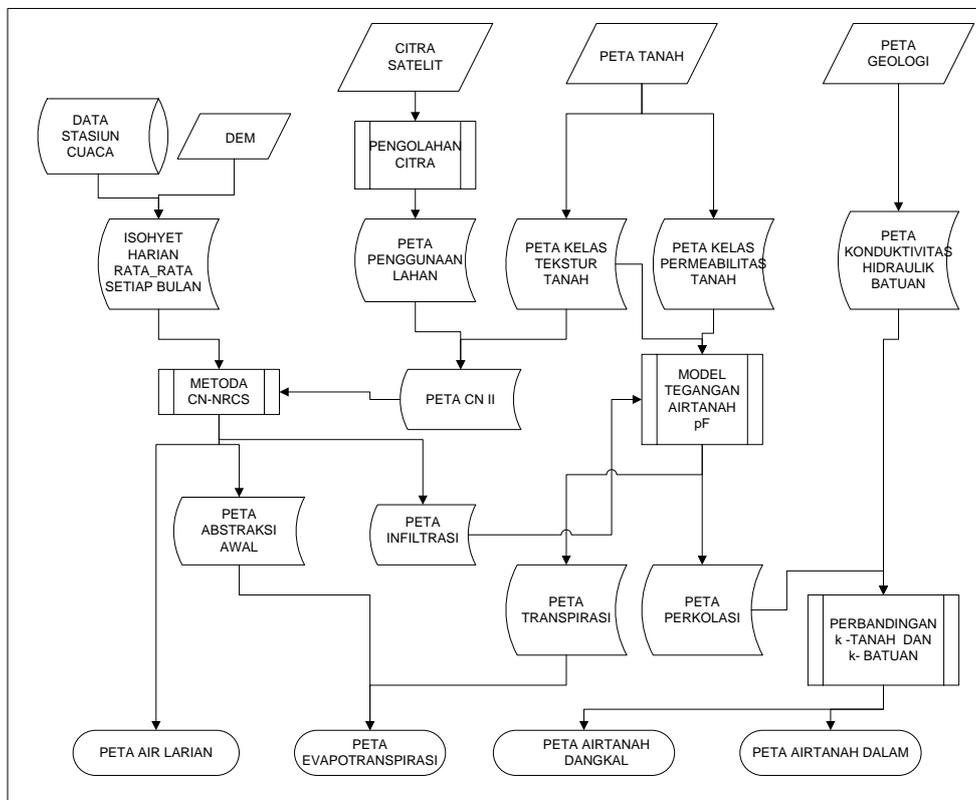
Penyesuaian spasial dan temporal

Metoda CN didisain untuk menduga perbandingan air hujan dan air larian pada setiap kali hujan di

atas tanah tertentu. Untuk mendapatkan luaran spasial, perhitungan dilakukan untuk satu satuan lahan dengan karakteristik tanah, geologi dan tutupan lahan yang seragam. Sedangkan untuk mendapatkan gambaran tentang variasi temporal, perhitungan secara spasial dilakukan untuk setiap bulan. Data masukan curah hujan yang dipakai pada perhitungan adalah curah hujan harian rata-rata (curah hujan bulanan total/hari hujan), kemudian hasilnya dikalikan kembali dengan jumlah hari hujan pada bulan yang bersangkutan.

Aplikasi SIG

Disamping pembuatan peta tutupan lahan, semua proses pengolahan data untuk pendugaan kuantitas komponen sumberdaya air (air permukaan, airtanah dangkal dan airtanah dalam) secara spasial dilakukan pada perangkat SIG. Perangkat lunak yang dipilih adalah MapInfo. Proses pengolahan data selengkapnya (Gambar 3) meliputi tahapan sbb.:



Gambar 3. Diagram alir pengolahan data untuk pendugaan kuantitas komponen sumberdaya air dengan pemanfaatan citra hasil penginderaan jauh dan SIG.

Pembuatan isohyet hujan harian rata-rata setiap bulan.

Pemetaan distribusi hujan dengan cara isohyet dipilih karena keterangan daerah studi yang bervariasi. Berdasarkan data yang diperoleh dari 22 stasiun cuaca yang tersebar di daerah penelitian, persamaan korelasi terbaik antara ketinggian tempat dan curah hujan bulanan terlebih dahulu ditentukan (Narulita, 2004). Disamping itu, dibuat pula persamaan korelasi terbaik antara curah hujan bulanan dengan jumlah hari hujan pada setiap bulannya. Persamaan korelasi curah hujan dan ketinggian kemudian di plot pada peta DEM yang diturunkan dari peta topografi skala 1:25000. Perhitungan dilakukan dengan data masukan rata-rata hujan harian untuk setiap bulan, pada setiap titik (lokasi) di daerah studi.

Penurunan peta tanah menjadi peta kelas hidrologi tanah dan peta permeabilitas tanah.

Peta tanah pertama-tama diturunkan menjadi peta tekstur tanah. Peta permeabilitas kemudian diturunkan dari peta tekstur. Nilai permeabilitas yang dipakai adalah nilai tengah dari kisaran nilai pada setiap kelas tekstur. Prosentase pori kapiler pada setiap kelas tekstur tanah ditetapkan pula (Chamayou dan Legros, 1989). Peta kelas hidrologi tanah diturunkan dari peta tekstur dan peta permeabilitas (Tabel 1).

Pembuatan peta CN.

Pembuatan peta CN(II) dari *intersect* peta-peta tutupan lahan hasil penafsiran citra satelit dan peta kelas hidrologi tanah. Nilai CN I diaplikasikan pada bulan-bulan kering dengan curah hujan bulanan kurang dari 60(mm), sedangkan nilai CN (III) diaplikasikan ketika curah hujan bulanan lebih besar dari 100 mm.

Penurunan peta konduktivitas hidraulik (k) Batuan.

Peta konduktivitas hidraulik (k) diturunkan dari peta geologi. Setiap jenis batuan dianggap memiliki nilai k yang seragam yang besarnya sama dengan nilai rata-rata aritmetik kisaran k jenis batuan dimaksud (Freeze and Chery, 1979).

Perhitungan.

Penerapan rumus-rumus perhitungan (1) s/d (10) dilakukan terhadap data tabular dengan melakukan operasi matematis antar kolom. Program operasi perhitungan dan pemetaan kembali hasilnya ditulis dalam bahasa *map basic* yang sudah tersedia di dalam perangkat lunak *MapInfo*.

Validasi

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan terhadap hasil pengukuran luah di Stasiun Nanjung (Tabel 3). Jumlah air larian dan air infiltrasi yang terperkolasi dibandingkan terhadap total luah air larian bulanan (*Total Flow = TF*). Luah air larian terhitung, dibandingkan terhadap aliran tinggi (*Highflow=HF*), sedangkan imbuhan airtanah dibandingkan terhadap aliran rendah (*Baseflow=BF*). Aliran tinggi adalah volume lonjakan luah sungai yang diakibatkan oleh melimpahnya air limpasan beberapa saat setelah hujan. Sedangkan aliran rendah adalah luah yang berasal dari air yang sempat meresap ke dalam tanah, kemudian mengalir di bawah permukaan (*subsurface runoff*) dan keluar lagi pada mata-mata air. Aliran tinggi dan aliran rendah pada kurva hidrograf (Gambar 5) dipisahkan dengan persamaan *recursive digital filter* (Nathan & McMahan, 1990), sbb:

$$q_1 = \alpha q_{i-1} + \beta (1 + \alpha) (Q_i - Q_{i-1}) \dots\dots(11)$$

dan

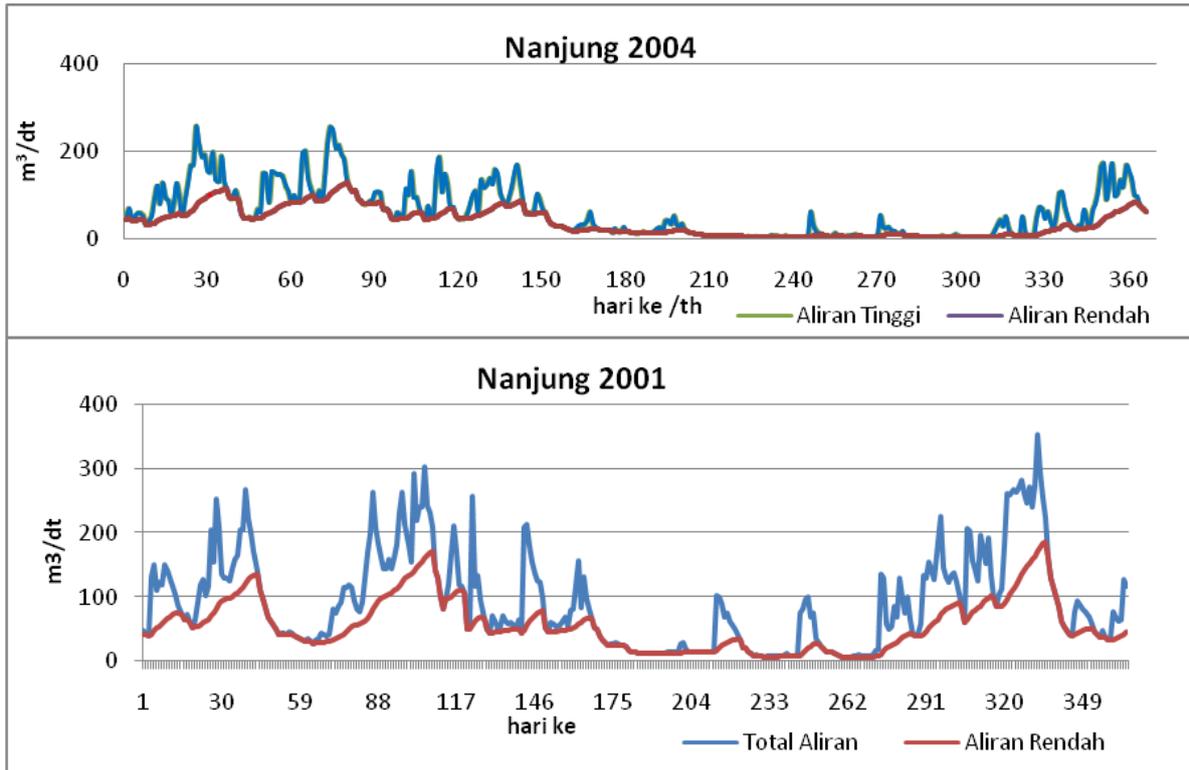
$$q_{B_1} = Q_1 - q_1 \dots\dots(12)$$

dimana :

- Q_1 = Seri luah total TF
- q_1 = Seri komponen aliran tinggi (*high flow*) HF
- q_{B_1} = Seri komponen aliran rendah (*base flow*) BF
- i = indeks waktu (hari) ke
- α, β = parameter pemisah ($\alpha = 0.95; \beta = 0,5$)

Luah aliran total adalah jumlah aliran rendah dan aliran tinggi, atau:

$$TF = HF + BF \dots\dots\dots (13)$$



Gambar 4. Hidrograf dan luah aliran rendah yang dipisahkan dengan *recursive digital filter* untuk data dari Stasiun Nanjung tahun 2001 dan 2004.

Tingkat perbedaan antara hasil pendugaan dan hasil pengukuran dinyatakan dalam bentuk tingkat kesalahan (*error of estimate*), dihitung dengan rumus:

$$E = (A-B)/(A+B) \dots\dots\dots (14)$$

Dimana: E = Tingkat kesalahan (Error)
 A = Hasil pendugaan
 B = Hasil pengukuran

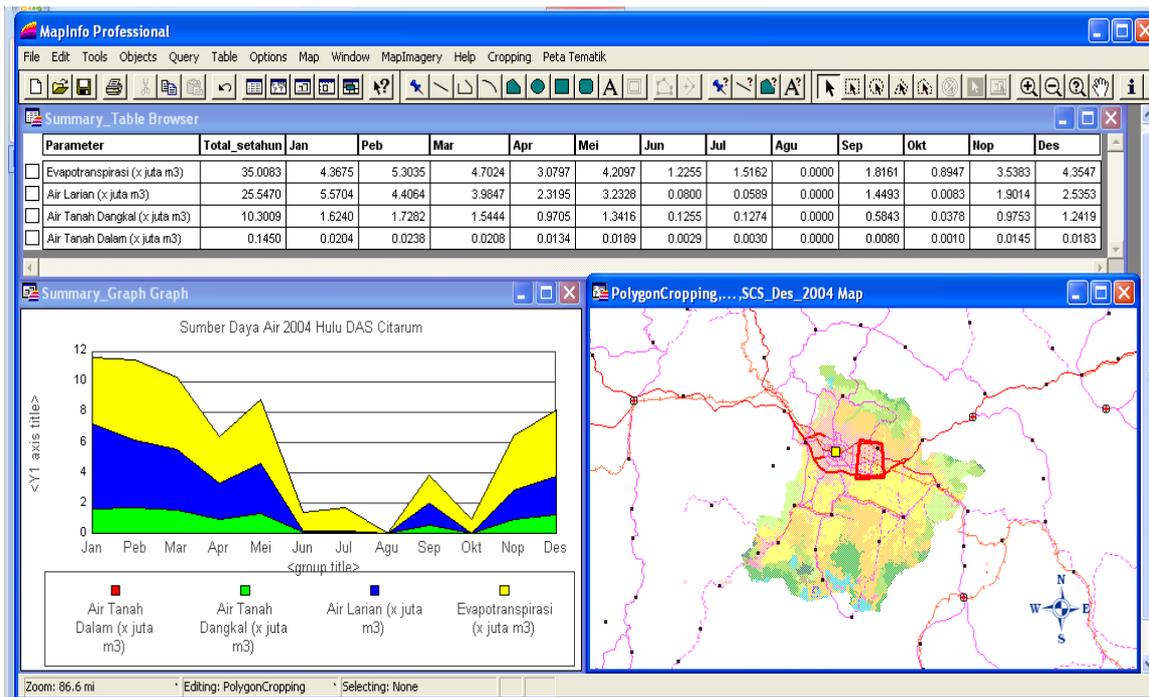
Validitas hasil dievaluasi pula melalui uji korelasi antara hasil penghitungan dan hasil pengukuran untuk setiap komponen yang diduga (Gambar 5).

Tabel 3. Besaran-besaran yang diperbandingkan untuk mengukur tingkat kesalahan.

Hasil Pendugaan	Hasil pengukuran
Air Larian (Pe) + Perkolasi (Imbuhan Air tanah)	Total Luah Aliran (TF)
Air Larian (Pe)	Luah Aliran Tinggi (HF)
Perkolasi (Imbuhan Air Tanah)	Luah Aliran rendah (BF)

HASIL

Data masukan dan hasil perhitungan tersimpan di dalam basis data sebagai tabular yang memiliki referensi geografis. Hasil tersebut dapat ditampilkan dalam bentuk peta tematik, tabel atau diagram. Hasil dapat disajikan baik untuk keseluruhan daerah studi maupun untuk sebagian daerah terpilih yang diinginkan. Tampilan otomatis hasil proses akan menyajikan peta keseluruhan daerah studi, daerah terpilih yang dianalisis, dan besaran bulanan komponen-komponen sumberdaya air yang terdapat pada daerah yang dianalisis selama tahun analisis (Gambar 3) dalam bentuk tabel dan diagram. Basis data faktor-faktor sumberdaya air dapat pula dipakai untuk menduga, dengan cara simulasi, ketersediaan sumberdaya air pada saat dimana kondisi tutupan lahan dan fluktuasi iklim yang berbeda dari keadaan aktual saat ini. Simulasi pengaruh perubahan iklim tahunan dan penggunaan lahan terhadap ketersediaan sumberdaya air dapat dilakukan dengan mengganti data tutupan lahan dan isohyet pada database (Djuwansah, 2010).



Gambar 5. Tampilan hasil proses pendugaan kuantitas komponen sumberdaya air bagi sebagian daerah yang diinginkan (polygon merah).

Validitas

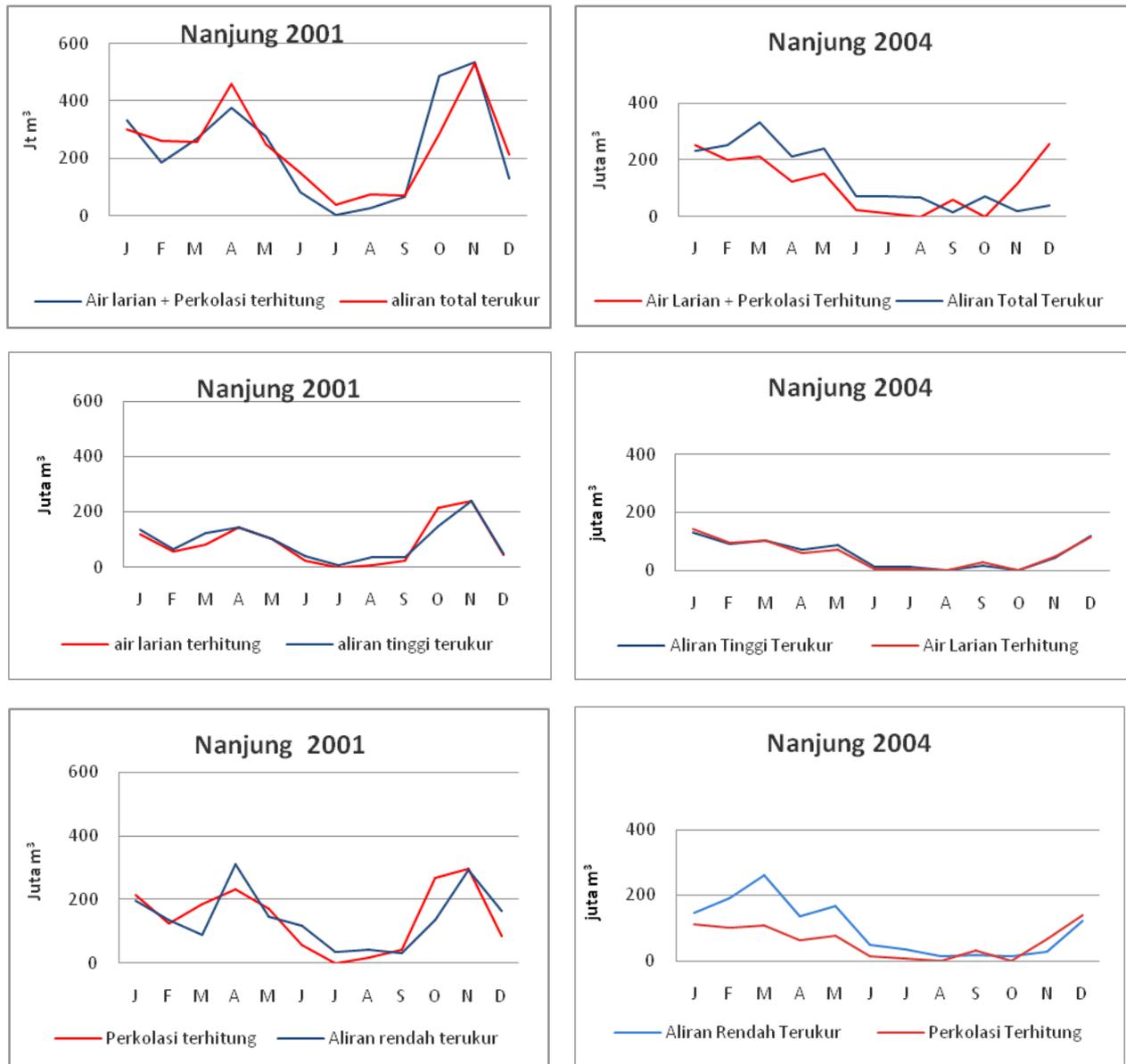
Perbandingan luah bulanan antara hasil pendugaan dan hasil pengukuran (Gambar 6 dan Tabel 4) pada tahun 2001 dan 2004 umumnya memperlihatkan kecenderungan fluktuasi yang sejalan, meskipun perbedaan kuantitas antara keduanya sangat variatif pada setiap bulannya.

Perbedaan antara hasil pendugaan jumlah air hujan yang mencapai tanah (setelah dikurangi dengan intersepsi dan evapotranspirasi) dengan luah aliran total terukur bervariasi untuk setiap bulannya. Untuk tahun 2001, tingkat perbedaan (*error*) terbesar didapat pada bulan Juli (0.93) dan terkecil pada bulan November (<0.01). Sedangkan untuk luah aliran total selama setahun didapat tingkat perbedaan yang relatif kecil (-0,03). Untuk tahun 2004, Tingkat perbedaan terbesar didapat pada bulan Agustus (1), terkecil pada bulan Januari (0.04), dengan tingkat perbedaan total setahun sebesar -0.08.

Perbedaan terbesar air larian berdasarkan data tahun 2001, dijumpai pada bulan Juli (0.87) yang merupakan bulan terkering, sedangkan perbedaan

terendah (0,01) dijumpai pada bulan April, dan perbedaan tahunan sebesar -0,03. Untuk Data tahun 2004, perbedaan terbesar dijumpai pada bulan Agustus (1) yang karena tidak ada hujan, sedangkan perbedaan terendah (0,01) dijumpai pada bulan Maret dan Desember ketika curah hujan tinggi, walaupun bukan merupakan bulan terbasah, sedangkan perbedaan tahunan sangat rendah (0,003).

Untuk imbuhan airtanah, berdasarkan data tahun 2001, perbedaan terbesar dijumpai pada bulan Juli (0,94) yang merupakan bulan terkering, sedangkan perbedaan terendah (0,01) dijumpai pada bulan November, dengan perbedaan tahunan yang lebih kecil dari 0,01. Untuk data tahun 2004, perbedaan terbesar juga dijumpai pada bulan Agustus (1) karena tidak ada hujan, sedangkan perbedaan terendah (0,03 dan -0.03) dijumpai pada bulan April dan Mei ketika curah hujan tinggi, perbedaan tahunannya cukup tinggi dengan nilai sebesar -0,15. Secara umum tampak pula bahwa tingkat kesalahan perhitungan ini semakin besar apabila curah hujan yang jatuh semakin kecil.



Gambar 6. Perbandingan hasil perhitungan total larian dan perkolasi, air larian dan imbuan airtanah terhadap aliran total, aliran tinggi dan aliran rendah yang dipisahkan pada hidrograf terukur di stasiun Nanjung untuk data 2001 dan 2004.

Tabel 4. Perbandingan kuantitas bulanan antara komponen-komponen aliran air terhitung dan terukur di Hulu DAS Citarum sampai dengan Stasiun Pengukur Muka Air Nanjung untuk Tahun 2001 dan 2004, dalam juta m³. Tingkat kesalahan dihitung dengan *Error of Estimates* = (a-b)/(a+b), tanpa satuan.

2001													
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Larian + Perkolasi Terhitung	333.2	182.4	268.7	377.2	274.8	81.8	1.4	25.3	66.3	485.1	534.3	130.0	2760.4
Total Luah Aliran Terukur	304.5	261.9	258.7	463.0	251.4	150.3	39.7	77.0	70.2	286.9	533.8	213.2	2910.8
Tingkat Kesalahan	0.05	-0.18	0.02	-0.10	0.04	-0.30	-0.93	-0.51	-0.03	0.26	0.00	-0.24	-0.03
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Air Larian Terhitung	117.90	58.45	82.95	145.27	102.05	24.27	0.34	7.81	23.87	216.42	238.79	45.30	1063.42
Aliran Tinggi Terukur	136.97	65.66	124.17	142.40	103.51	38.88	4.96	35.29	37.59	149.49	240.38	47.80	1127.10
Tingkat Kesalahan	-0.07	-0.06	-0.20	0.01	-0.01	-0.23	-0.87	-0.64	-0.22	0.18	0.00	-0.03	-0.03
Imbuan Airtanah/Perkolasi	215.35	123.96	185.74	231.89	172.72	57.54	1.03	17.47	42.41	268.68	295.49	84.72	1697.01
Aliran Rendah	167.54	196.27	134.56	320.64	147.89	111.45	34.77	41.70	32.62	137.39	293.47	165.37	1783.68
Tingkat Kesalahan	0.12	-0.23	0.16	-0.16	0.08	-0.32	-0.94	-0.41	0.13	0.32	0.00	-0.32	-0.02
2004													
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Larian + Perkolasi Terhitung	254.03	198.58	213.18	124.39	150.10	22.51	12.29	0.00	60.66	1.07	115.18	256.16	1408.15
Total Luah Aliran Terukur	280.20	270.58	358.98	133.20	163.95	23.47	50.60	15.66	36.21	19.16	73.92	243.54	1669.49
Tingkat Kesalahan	-0.05	-0.15	-0.25	-0.03	-0.04	-0.02	-0.61	-1.00	0.25	-0.89	0.22	0.03	-0.08
Air Larian Terhitung	142.37	97.77	104.81	61.27	73.70	7.67	4.07	0.00	30.14	0.16	49.27	117.47	688.70
Aliran Tinggi Terukur	132.69	84.52	102.60	70.67	87.14	12.40	15.38	0.58	18.65	3.56	48.97	116.14	693.30
Tingkat Kesalahan	0.04	0.07	0.01	-0.07	-0.08	-0.24	-0.58	-1.00	0.24	-0.91	0.00	0.01	0.00
Imbuan Airtanah/Perkolasi	111.66	100.81	108.36	63.13	76.40	14.84	8.22	0.00	30.52	0.91	65.91	138.70	719.45
Aliran Rendah	147.51	186.07	256.38	62.53	76.81	11.08	35.22	15.08	17.56	15.59	24.96	127.40	976.19
Tingkat Kesalahan	-0.14	-0.30	-0.41	0.00	0.00	0.15	-0.62	-1.00	0.27	-0.89	0.45	0.04	-0.15

PEMBAHASAN

Informasi yang dianggap memadai untuk pengelolaan sumberdaya air yang menyangkut penataan ruang pada suatu wilayah adalah peta tinjau (*reconnaissance*) atau semi detail yang memiliki resolusi spasial setara dengan peta skala 1 : 50.000. Sedangkan resolusi temporalnya minimal bulanan (Dunne dan Leopold. 1978). Informasi ketersediaan air yang dapat diandalkan untuk tingkat ketelitian seperti ini masih sulit diperoleh karena jaringan stasiun pengukuran hujan yang ada umumnya rendah kerapatannya. Bahkan untuk daerah dengan jumlah stasiun yang relatif banyak seperti halnya di Hulu DAS Citarum ini pun, resolusi spasial distribusi ketersediaan sumberdaya air pada skala 1: 50.000 sulit dipetakan tanpa melalui suatu pemodelan. Dengan memanfaatkan SIG, peta ketersediaan air terduga

dapat disusun melalui pendekatan model yang menyertakan pula data spasial faktor-faktor hidrologi terpenting. Meski demikian, hasilnya masih memiliki tingkat kesalahan yang harus kita perhatikan. Sumber kesalahan-kesalahan tersebut terletak pada perbedaan karakteristik distribusi antara data masukan untuk perhitungan (pendugaan) dengan data hasil pengukuran yang dipakai untuk validasi, baik dari sisi distribusi temporal maupun spasial.

Metoda CN merupakan suatu model *lumped* dan *deterministic* (Chow, 1988), yang dioperasikan dengan data masukan serta luaran tunggal atau rata-rata dari suatu distribusi baik spasial maupun temporal. Pada awalnya model dipakai untuk menduga proporsi jumlah air larian air infiltrasi dan air yang menguap kembali pada setiap kali hujan pada suatu luasan dengan Nilai CN yang

dirata-ratakan untuk suatu luasan tertentu (Mc Cuen, 1982). Dengan karakter seperti di atas, maka model bisa pula dioperasikan untuk menghasilkan luaran yang terdistribusi secara spasial asal data masukannya terdistribusi pula secara spasial. Pengoperasian secara spasial ini, kini dimudahkan dengan adanya perangkat lunak SIG. Dengan metoda yang digunakan, hasil pendugaan memberikan nilai tentang jumlah komponen sumberdaya air (air permukaan, airtanah dangkal dan airtanah dalam) yang dihasilkan oleh sejumlah curah hujan yang jatuh di suatu lokasi, tidak termasuk adanya penambahan dan pengurangan jumlah air yang diakibatkan oleh adanya aliran masuk dan keluar ke dan dari lokasi tersebut, sebagai akibat antara lain adanya perbedaan ketinggian tempat.

Kelemahan terbesar yang dimiliki oleh metoda CN menyangkut distribusi waktu (Morel-Seytoux dan Verdin, 1981). Untuk perhitungan secara kumulatif, metoda ini akan memberikan hasil terbaik apabila diterapkan untuk rentang waktu cukup pendek, setiap jam atau setiap beberapa jam (Chow, 1988), sedangkan untuk rentang waktu yang lebih panjang diperlukan penghitungan secara berturut-turut (*successive*). Tanpa cara ini, perhitungan untuk jumlah kumulatif dengan rentang waktu hujan yang lebih panjang akan memberikan hasil pendugaan yang berlebih untuk air larian dan pendugaan yang terlalu kecil untuk jumlah infiltrasi dan penguapan. Pada studi ini, penghitungan dengan memakai kumulatif rata-rata bulanan untuk setiap kali hujan masih memberikan tingkat kesalahan yang cukup berarti seperti diuraikan di atas. Masalahnya, stasiun penangkap hujan pada umumnya hanya mempublikasikan data hujan bulanan atau harian. Sedangkan stasiun yang bisa menyediakan data curah hujan setiap jam sangat sedikit. Disamping itu, distribusi spasial curah hujan pada rentang waktu pendek (isohyets setiap jam) akan memiliki tingkat kesalahan yang lebih besar pula. Sampai saat ini, variabilitas spasial hujan masih sulit dirumuskan dan masih merupakan sumber kesalahan utama dalam berbagai model hidrologi (Syed *et al.*, 2003; Tetzlaff dan Uhlenbrook., 2005).

Validasi di atas memperlihatkan tingkat kesalahan pendugaan yang bervariasi setiap bulannya dan kadang kadang terduga lebih (positif) atau kurang (negatif). Kecenderungan umum memperlihatkan pula bahwa tingkat kesalahan perhitungan ini semakin besar apabila curah hujan yang jatuh

setiap bulannya semakin kecil. Apabila kita perhatikan kembali bahwa pendugaan bulanan dihitung berdasarkan jumlah hujan yang jatuh, maka apabila terdapat bulan kering yang betul-betul tidak ada hujan akan memberikan hasil jumlah air larian dan imbuhan terhitung sama dengan nol. Padahal aliran air sungai, aliran rendah maupun tinggi tetap ada pada bulan tersebut sehingga kesalahan pada bulan ini menjadi 100 % atau 1.

Disamping diakibatkan oleh keterbatasan model, kesalahan-kesalahan pada distribusi temporal ini diakibatkan pula oleh adanya perbedaan waktu tempuh (*travel time*) dari lokasi jatuhnya hujan ke lokasi pengukuran luah. Jarak lurus dari batas DAS terjauh ke stasiun pengukuran luah Nanjung sekitar 50 km. Tetapi aliran air untuk mencapai stasiun akan menempuh jalur yang berkelok-kelok yang jaraknya bisa mencapai dua atau tiga kali jarak lurus. Kecepatan aliran permukaan akan bervariasi pula tergantung pada besarnya luahnya, kemiringan lereng dan jenis tutupan lahan, sehingga waktu tempuh aliran permukaan bisa bervariasi antara kurang dari satu jam sampai beberapa hari. Sementara itu kecepatan air yang berinfiltrasi kedalam tanah akan mengalami perlambatan yang lebih besar mengingat kecepatan aliran air di dalam tanah umumnya berkisar antara 0,1 sampai 25 cm per jam (Brassington, 1988; Chamayou dan Legros, 1989). Dengan demikian maka aliran air permukaan yang berasal dari suatu peristiwa hujan besar kemungkinan akan tercatat sebagai aliran tinggi pada bulan yang sama kecuali yang jatuh di hari-hari akhir bulan. Sedangkan untuk air yang berinfiltrasi ke dalam tanah kemungkinan besar baru akan tercatat sebagai aliran rendah pada bulan berikutnya atau bahkan sampai beberapa bulan ke depan.

Fenomena lain yang berpengaruh besar adalah mekanisme penjenuhan tanah. Hujan yang jatuh di akhir musim kering atau setelah perioda tanpa hujan yang cukup panjang (1 - 2 minggu), umumnya tidak menyebabkan kenaikan luah sungai yang berarti karena sebagian besar air hujan terserap tanah. Air limpasan akan terjadi hanya apabila bagian permukaan tanah sudah dijenuhi air atau apabila curah (intensitas) hujan lebih besar daripada kapasitas tampung keserasan tanah. Seringkali luah air sungai baru memperlihatkan kenaikan luah setelah beberapa minggu atau satu bulan setelah hujan mulai turun. Oleh karena itu, kenaikan luah air sungai seringkali terlambat

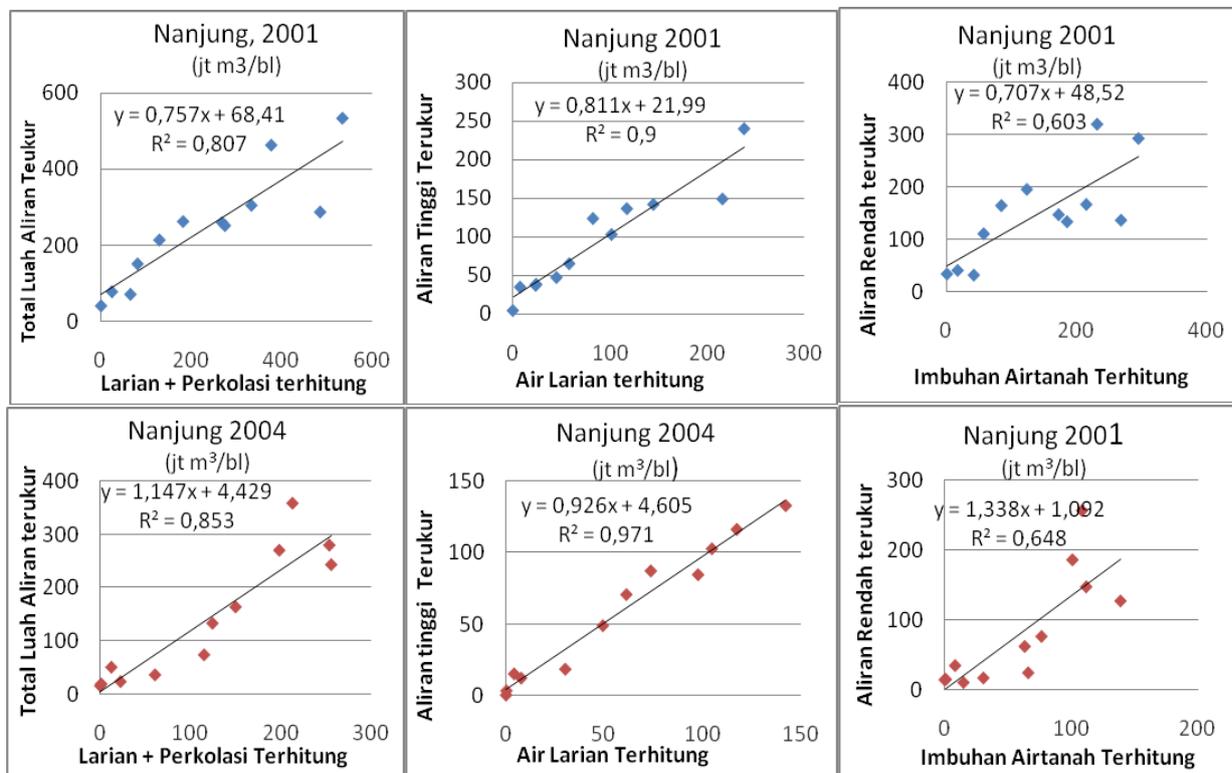
sampai dengan bulan berikutnya semenjak dimulainya musim hujan. Ketidakselarasan ini tampak lebih jelas pada fluktuasi aliran rendah yang merupakan bentuk lanjut dari air yang berinfiltrasi ke dalam tanah. Perlambatan fluktuasi luah aliran rendah sebagai respons terhadap luah air yang berinfiltrasi ke dalam tanah di DAS Citarum Hulu, secara teoretis, bisa mencapai periode lebih dari satu tahun. Dengan karakteristik kecepatan aliran seperti di atas, maka pendugaan nilai bulanan yang memiliki validitas tinggi hanya bisa diharapkan untuk air larian. Sedangkan untuk air infiltrasi serta total aliran validitasnya lebih rendah.

Untuk kedua komponen terakhir sebaiknya hanya menggunakan hasil pendugaan untuk waktu kumulatif tahunan karena kesalahannya lebih kecil daripada kesalahan rata-rata bulanan. Tingkat validitas hasil pendugaan untuk masing-masing komponen sumberdaya air ini tampak jelas pada koefisien regresi (R^2) dari korelasi antara air larian dan aliran tinggi, dimana nilai R^2 untuk validasi tahun 2001 dan 2004 memberikan nilai di atas 0,9 (Gambar 7).

Antara total luah dan total air larian ditambah perkolasi, R^2 yang diperoleh untuk tahun 2001 menunjukkan angka yang cukup baik (0.807)

demikian pula untuk tahun 2004 (0,853). R^2 untuk aliran rendah dengan imbuan air tanah tidak sebaik aliran tinggi dan total aliran, tetapi masih memperlihatkan adanya hubungan antar keduanya. Berdasarkan data curah hujan tahunan cekungan Bandung tahun 1986 sampai dengan 2006 (Narulita dkk., 2010), Curah hujan tahunan 2001 sedikit lebih basah dari Curah hujan tahunan rata-rata, sedangkan tahun 2004 sedikit lebih kering, tetapi keduanya masih dalam batas-batas kisaran normal.

Kesalahan mungkin pula berasal dari pemisahan aliran tinggi dan aliran rendah. Pada pemisahan otomatis dengan *recursive digital filter*, perbandingan aliran tinggi dan aliran rendah ditentukan oleh besarnya nilai α dan β yang diberikan. Misalnya untuk kasus di Afrika selatan, nilai yang dianggap paling cocok adalah $\alpha = 0.975$; $\beta = 0,25$ (Smakhtin, 2001). Sedangkan nilai yang diadopsi pada penelitian ini ($\alpha = 0.95$; $\beta = 0,5$) merupakan nilai yang paling umum digunakan dan grafik yang dihasilkannya tidak berbeda jauh dengan yang pernah dilakukan secara manual untuk hidrograph Kali Ondo di Banyumas Jawa Tengah (Bruijnzeel, 1982).



Gambar 7. Korelasi hasil pendugaan (terhitung) dan hasil pengukuran komponen sumberdaya air di Hulu DAS Citarum, data 2001 dan 2004.

Kemungkinan kesalahan lainnya berasal dari variabilitas spasial yang diakibatkan oleh keragaman faktor-faktor hidrologi. Seperti disebutkan terdahulu bahwa perhitungan dilakukan untuk setiap satu satuan lahan dengan karakteristik tanah, geologi dan tutupan lahan yang dianggap seragam dengan nilai besaran yang dirata-ratakan. Peluang kesalahan dalam penyeragaman dan penentuan nilai rata-rata amat besar, misalnya dengan adanya penentuan nilai-nilai CN untuk tutupan lahan spesifik yang tidak terdapat padanannya pada tabel CN-NRSCS. Tingkat kesalahan spasial ini akan meningkat dengan penambahan resolusi (skala peta) yang dikeluarkan.

Hasil pendugaan ini cukup memadai untuk disajikan sebagai informasi spasial tentang distribusi ketersediaan air yang setara dengan peta skala 1 : 50.000. Pada tingkat ketelitian data/informasi seperti ini, dampak pemanfaatan sumberdaya air dan lahan di suatu lokasi terhadap lokasi lainnya, terutama di hilirnya dalam suatu DAS, dapat diperkirakan. Dengan memahami keterbatasan model, maka kemungkinan kesalahan pengambilan keputusan yang didasari oleh hasil pendugaan ini akan dapat diminimalkan. Sedangkan untuk keperluan penggunaan yang lebih detail, seperti misalnya untuk disain enjineri, akan diperlukan studi yang lebih rinci secara setempat di sekitar lokasi yang akan dikembangkan.

KESIMPULAN

Sistem Informasi Geografi dapat diaplikasikan untuk menduga kuantitas ketersediaan sumberdaya air bulanan beserta distribusi spasialnya. Perumusan hubungan antar faktor yang berpengaruh terhadap hidrologi setempat menghasilkan validitas yang baik untuk kuantifikasi air larian bulanan. Sedangkan untuk air infiltrasi serta total aliran, sebaiknya hanya menggunakan hasil pendugaan untuk waktu kumulatif tahunan karena kesalahannya lebih kecil daripada kesalahan rata-rata bulanan. Untuk evaluasi ketersediaan air suatu wilayah, hasil pendugaan ini dapat dimanfaatkan setara dengan informasi peta pada skala 1: 50.000. Pemahaman tentang keterbatasan model yang menyebabkan bias antara hasil pendugaan dan hasil pengukuran diperlukan untuk meminimalkan kemungkinan kesalahan dalam pengambilan keputusan yang didasarkan atas dasar informasi hasil pendugaan.

Ucapan Terimakasih

Terimakasih kami ucapkan pertama-tama kepada Bpk. Prof. Dr. Ir. Hidayat Pawitan untuk saran dan diskusinya yang membuka ide untuk topik penelitian ini. Terimakasih pula kami ucapkan pula kepada Bpk. Ir. Tjoek Azis MSc. untuk bantuan dan diskusinya tentang penafsiran citra satelit, Harry Rahjoewibowo ST. untuk operasi dan pemograman SIG. Sebagian besar dana untuk penelitian ini didapat dari Program Kompetitif LIPI tahun 2006 s/d 2009.

DAFTAR PUSTAKA

- Baize D., 1988. Guide des analyse courantes en pedologie: choix, expression, presentation, interpretation. Institute National de la Recherche Agronomique, Paris.
- Black P. E., 1996. Watershed Hydrology. Lewis Publishers, London-New York.
- Brassington R., 1988. Field Hydrogeology. Professional Handbook series -Geological Society of London. Joh Wiley and Sons - London.
- Bruijnzeel, L.A., 1982. Hydrological and biogeochemical aspects of man made forests in South Central Java. Academisch proefschrift, Vrije Universiteit Amsterdam.
- Chow V.T., D.R. Maidment and L.W. Mays., 1988. Applied Hydrology. Mc. Graw Hill co.
- Chamayou H., and J.P. Legros., 1989. Les bases physiques, chimiques et mineralogiques de la science du sols. Presses universitaire de France - Paris.
- Dam M.A.C., 1994. The late Quaternary evolution of the Bandung Basin, West Java, Indonesia. Academisch proefschrift, Vrije Universiteit Amsterdam.
- Djuwansah M., 2010. Simulasi ketersediaan air bulanan secara spasial faktor-faktor sumberdaya air: kasus Sub-DAS Hulu Citarum. Teknologi Indonesia Vol.33, No.1. Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.
- Dunne, T., Leopold, L.B. 1978. Water in Environmental Planning, W.H. Freeman and Company, San Fransisco, USA

- Foth H. D., and L.M. Turk., 1972. *Fundamental of Soil Sciences: Energy Concept of Soil water*. Willey International Edition.
- Freeze R.A and J.A. Cherry., 1979. *Groundwater*. Prentice Hall Publ.
- Luijten, J.C, J.W. Jones and E.B. Knapp., 2000. *Spatial soil water balance model and GIS Hydrological tools*. International Consortium For Agricultural System Application. Agricultural and Biological Engineering - Univ. of Florida.
- Mc. Cuen R.H., 1982. *A Guide to hydrologic analyses using SCS methods*. Prentice Hall Publ.
- Moyrel-Seytoux H.J. and J.P. Verdin., 1981. *Extension of the soil Conservation Service rainfall run off methodology for ungauged watersheds*. Federal Highway Administration , Washington DC.
- Narulita I., and M. Djuwansah., 2004. *Some rainfall characteristics in Bandung basin*. Proc. Int. Symp. Geotechnical hazards: Prevention, Mitigation, and Engineering Response. LIPI - Eng. Geol. Congress - CODATA - IAGI. Pp. 105-118.
- Narulita I., S.Y. Cahyarini and M. Djuwansah., 2010. *Korelasi antara fenomena ENSO dan Dipole Mode dengan distribusi Curah hujan di Cekungan Bandung*. Bulletin Geologi tata Lingkungan, Vol 20, no. 2. Agustus 2010.
- Nathan R.J. and T.A. McMahon., 1990. *Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis*. Water Resource Research, Vol.26, PP. 1465-1473
- Scanlon B.R., R.W. Healy and P.G. Cook., 2002. *Choosing Appropriate Techniques for Quantifying Groundwater Recharge*. Hydrogeology Journal, Vol.10 no.1
- Smakhtin V.U., 2001. *Estimating continuous monthly base flow time series and their possible application in the context of the ecological reserve*. Water S.A. vol. 27. pp.213-218.
- Syed, K. H., Goodrich, D. C., Myers, D. E., and Sorooshian, S., 2003. *Spatial characteristics of thunderstorm rainfall fields and their relation to runoff*, J. Hydrol., 271, 1–21, 2003.
- Thornwaite,. Mather., 1957. *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Publication in Climatology. Brexel Institute of Technology, Centreton - New Jersey.
- Tetzlaff D. and U. Uhlenbrook., 2005. *Effects of spatial variability of precipitation for process-orientated hydrological modelling: results from two nested catchments*. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 2, 119–154, 2005. European Geosciences Union.