

PEMBUATAN JARINGAN SUNGAI DAN KARAKTERISTIK TOPOGRAFI DAS DARI DEM- JATIM

Indarto

PUSLIT-PSDA, LEMLIT, UNEJ. Jl. Kalimantan no. 37 Kampus Tegalboto JEMBER 68121
email: ppsa@lemlit.unej.ac.id atau indarto@ftp.unej.ac.id

Sri Wahyuningsih

Lab. Teknik Pengendalian dan Konservasi Lingkungan(TPKL), J-TEP, FTP, UNEJ.

Ferdinan Usman

PUSLIT – PSDA, LEMLIT, UNEJ. Jl. Kalimantan no. 37 Kampus Tegalboto JEMBER 68121

Lutfi Rohman

Program Studi Fisika, FMIPA, UNEJ

Abstract

This article exposes the derivation of: river network, topographical and morphological properties of the several watersheds from DEM Jatim. The DEM are processed using CatchmentSim to derive river network, topographical and morphological properties of watersheds. Methodology comprise of: DEM conditioning, developing river network, watersheds delineation, and derivation of physical and morphological properties of watersheds. The research finding is useful for modeling and management of water resource project in East Java Province.

Keywords:

DEM JATIM, morphological, properties, River network, topographical,

PENDAHULUAN

Digital Elevation Model (DEM)

Digital Elevation Model atau DEM merupakan suatu model digital yang merepresentasikan permukaan topografi bumi kita dalam bentuk tiga dimensi.

Indarto et al., (2008) telah memproduksi DEM Jatim dengan resolusi pixel 100 x 100m. Salah satu contoh pemanfaatan DEM adalah untuk menurunkan jaringan sungai dan karakteristik DAS terkait dengan aplikasi hidrologi dan manajemen sumberdaya air. Untuk mendapatkan karakteristik DAS (yang mencakup: topografi, geomorfologi, jaringan sungai), DEM Jatim perlu diolah lebih lanjut dengan software pengolah DEM dengan software pengolah DEM.

Penelitian ini bertujuan untuk menurunkan: jaringan sungai (*river-network*), karakteristik topografi dan morfologi DAS se Jawa Timur. Hasil ekstraksi digambarkan dalam bentuk peta DAS. Analisis perbandingan dilakukan untuk beberapa DAS yang ada di Balai Bondoyudo mayang untuk menggambarkan perbedaan karakteristik masing-masing DAS.

DEM sudah lama dikenal dan diaplikasikan di berbagai belahan dunia. Penelitian dan publikasi

tentang DEM dapat dijumpai dalam: Beven and Kirkby (1979); Band (1986); Costa-Cabral and Burges(1994); Fairfield and Leymarie(1991); Garbrecht and Martz(1997); Grayson et al., (1992a,b); Jenson and Domingue (1988); Mark(1988); Mark et al., (1984); Montgomery and Dietrich, (1988, 1989); Moore and Grayson(1991); Quinn et. al.,(1991); Tarboton, D.G.,(1989,1997); Tarboton and Bras (1991); Turcotte et al., (2001); Wise (2000).

Sepanjang dasawarsa terakhir, penelitian dan aplikasi menunjukkan bahwa DEM telah memberikan hasil yang cukup signifikan dan dapat diterima secara ilmiah. Sehingga tidak dapat dipungkiri lagi perkembangan teknologi ini begitu pesat dan banyak dimanfaatkan orang untuk berbagai analisis keruangan. Saat ini DEM telah banyak dimanfaatkan untuk membantu analisis dalam berbagai bidang, seperti bidang: pertanian, erosi dan sedimentasi, kehutanan, manajemen sumber air dan pengelolaan DAS.

Software tersebut bisa berupa software tersendiri atau embedded dengan software GIS, yang berupa *plugin* atau *extension*.

Beberapa contoh modul (ektension) yang terintegrasi dengan Software GIS antara lain:

Topogrid di dalam ArcInfo; Hydrogrid dan AGWA dengan ArcView, SINMAP dengan Arcview dan ArcGIS; ArcHidroGIS dan TAUDem dengan ArcGIS.

Beberapa software pengolahan DEM yang relatif gratis misalnya, HEC-GeoHMS dan HEC-GeoRAS dengan Arcview; TauDEM dengan MapWindow. Contoh software pengolah DEM yang berdiri sendiri dan terpisah dari SoftwareGIS juga sudah dikembangkan misalnya: *CatchmentSIM*; *LandSerrif* dan *TAS (Terrain Analysis System)*.

Pengolahan DEM dilakukan dengan software *CatchmentSIM* (Ryan, 2003; 2005abc). Fitur dan fungsi *CatchmentSIM*, meliputi:

1. Membuat dan interpolasi DEM secara manual dari data kontur dan jaringan sungai,
2. Mengimport DEM dari sumber lain,
3. Memodelkan fungsi hidrologi pada DEM,
4. Menurunkan batas DAS menggunakan metode *Flow Routing* dan *metode D8* yang diadopsi dari software aplikasi lainnya.
5. Menurunkan jaringan sungai vektor dari DEM dengan menggunakan orde Horton/Strahler.
6. Membuat dan membagi DAS menjadi SubDAS secara otomatis berdasarkan orde Horton atau Strahler.
7. Menghubungkan impervious areas database dengan subDAS dan menentukan proporsi impervious area pada subDAS.
8. Sebagai tool untuk model aliran di daerah perkotaan, dan sebagai model tambahan dalam perencanaan saluran dan struktur selokan air (*Gutter structure*).
9. Menghitung parameter-parameter terkait dengan karakteristik DAS seperti: *area, slope, shape, impervious proportion, main stream length/slope, drainage density, bifurcation*, dll.
10. Perbandingan grafik: hubungan antar *bifurcation (bifurcation ratio), flow path length frequency distributions, drainage density versus Stream Area Threshold (SAT)*, kurva *hypometric*, dan *geomorphological correctness* untuk menghitung jaringan sungai.
11. Menyesuaikan hasil untuk diekport ke dalam bahasa pemrograman macro (*Macro language*), dengan fasilitas ini memungkinkan untuk membuat file text atau binary file dalam beberapa format.
12. Tersedianya fasilitas Macro Script untuk integrasi dengan model, seperti: WBNM, RAFTS, RORB, URBS, DRAINS, dan HEC – HMS.

METODE

Inventarisasi Data

Data spasial untuk penelitian diperoleh dari database peta RBI digital yang ada di PUSLIT PSDA.

Pembuatan DEM

Proses pembuatan DEM dilakukan secara integral untuk seluruh Wilayah Jawa Timur. Pembuatan DEM dilakukan dengan software *CatchmentSIM* (Ryan, 2005abc).

Input utama adalah layer topografi yang berwujud kontur (garis ketinggian). Kualitas DEM yang dihasilkan tergantung pada ketelitian informasi kontur. Makin rapat interval kontur yang dimasukkan, makin baik proses pembuatan DEM. Layer jaringan sungai diperlukan untuk interpolasi lebih lanjut. Input lain diperlukan untuk menghasilkan DEM yang lebih realistis menggambarkan kondisi alam sebenarnya (misalnya: batas danau/waduk, garis pantai). Input data geografis tersebut selanjutnya digunakan untuk proses interpolasi DEM, yang pada prinsipnya terdiri dari sub-proses: (a) rasterisasi layer kontur; (b) integrasi layer jaringan sungai; (c) implementasi alat bantu interpolasi; (d) interpolasi raster DEM, dan (e) Stream burning. Proses ini akhirnya menghasilkan Digital Elevation Model (DEM) untuk seluruh wilayah Jawa Timur dengan ketelitian per pixel 100m x 100m.

Pengolahan DEM dan Jaringan Sungai

a. Pengkondisian DEM

Setelah proses interpolasi DEM selesai, langkah selanjutnya adalah: menghilangkan *flat-area* dan cekungan-cekungan (*sink atau pits*) untuk menjamin konektivitas: jaringan sungai, sehingga aliran tetap kontinyu dari hulu ke hilir.

Pada DEM biasanya terdapat cekungan yang mungkin merepresentasikan suatu danau, lembah, keberadaan sungai. Bisa juga terdapat *flat-area* yang melambangkan wilayah datar. Meskipun hal ini sebenarnya adalah representasi nyata dari keadaan yang ada di alam, tetapi kurang menguntungkan untuk pemodelan hidrologi.

Adanya *flat-area* dan cekungan menyebabkan algoritma untuk penelusuran aliran (*flow routing*) macet. Pixel-pixel pada *flat area* (cekungan) dan semua pixel yang mengalir ke lokasi tersebut akan tertahan dan tidak terakumulasi ke outlet sub-DAS, menyebabkan drainase internal di dalam DAS. Hal ini akan menyebabkan penurunan batas dan luas sub-das tidak sempurna, mengandung lubang (*hole*) dan perhitungan geo-statistik juga tidak sempurna. *CatchmentSIM* menyertakan dua algoritma untuk menghilangkan *flat-area* dan *cekungan* di dalam

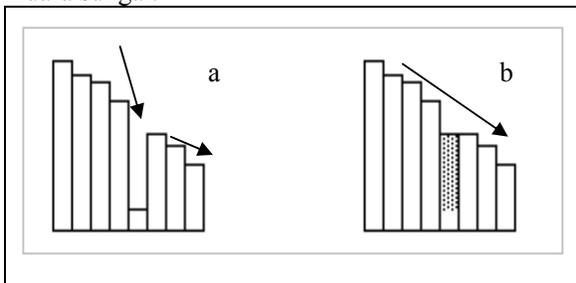
DEM. Yang pertama adalah algoritma pengisian (*filling algorithm*) yang menaikkan nilai elevasi pixel-pixel yang berada pada flat area dan cekungan sampai memungkinkan adanya aliran air. Yang kedua disebut sebagai *PSF-algorithm*: “an advanced breaching algorithm based on Priority First Search (PSF) weighted graph methodology (Ryan, 2005a)”.

Pada kasus dimana DEM dibuat sendiri dari proses interpolasi data kontur, disarankan untuk menggunakan *filling-algorithm* untuk menghilangkan sebagian besar *flat dan pit area* yang tergeneralisasi selama proses interpolasi DEM. Selanjutnya bisa digunakan *PFS-algorithm* untuk menghilangkan sisa cekungan dan flat area.

Jika DEM tidak dibuat sendiri, tetapi diimport dari aplikasi lain, maka disarankan untuk langsung menggunakan PFS-algorithm.

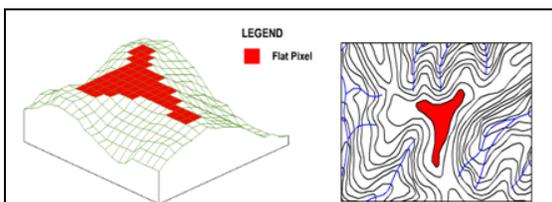
a1. Filling Algorithm

Pada Gambar (1) misalnya, adanya sumur menyebabkan aliran air dari pixel di hulu sumur akan masuk ke dalam sumur. Padahal kita menginginkan agar air mengalir secara kontinu ke muara sungai.



Gambar 1. Profil ketinggian sebelum proses dan sesudah proses filling.

Filling algoritma bekerja secara iteratif dengan menaikkan pixel-pixel yang berada pada lokasi cekungan atau flat area. Pertama, pixel-pixel pada wilayah cekungan dinaikkan nilai elevasinya setinggi nilai pixel terendah disekelilingnya, sehingga memungkinkan penentuan arah aliran. Selanjutnya, algoritma ini juga memungkinkan nilai pixel-pixel yang berada pada wilayah *flat area* untuk dinaikkan setinggi pixel-pixel disekelilingnya, sehingga membentuk puncak bukit yang lebih realistis untuk menggambarkan aliran air (Gambar 2).



Gambar 2: Pengaruh filling algoritma pada wilayah puncak bukit.

a2. Priority First Search (PFS) Algorithm

Algoritma PFS merupakan algoritma pemecah yang didisain untuk menyelesaikan permasalahan kompleks pada pixel-pixel cekungan dan flat area di dalam DEM. Algoritma ini mampu menyelesaikan semua permasalahan pixel-pixel pada wilayah tersebut dengan persyaratan diketahuinya nilai pixel terendah dimanapun di dalam DEM.

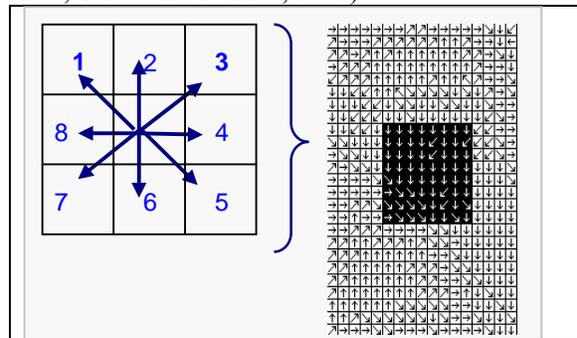
Untuk tiap pixel pada wilayah flat dan cekungan, algoritma PFS akan mencari pixel terendah disekelilingnya (sebagai outlet) dan menentukan arah drainase yang paling optimum antara pixel yang dimaksud dengan pixel di outlet. Selanjutnya, algoritma PFS akan menurunkan elevasi semua pixel sepanjang arah drainase untuk menentukan slope arah drainase dengan gradient yang konsisten dari pixel yang dimaksud sampai ke pixel outlet. Hal ini dilakukan dengan “*weighted graph methodology*” (Sedgewick, 1988) dan telah diuji untuk aplikasi hidrologi (Jones, 2002).

b. Flow Routing

Setelah interpolasi dan pengkondisian DEM, langkah selanjutnya adalah penelusuran aliran (flow routing). Algoritma penelusuran aliran (flow routing algorithm) selanjutnya bisa diterapkan untuk membuat batas sub-DAS, menentukan hubungan antar sub-DAS, dan menghitung karakteristik geofisik DAS.

b1. Sekilas tentang algoritma D8

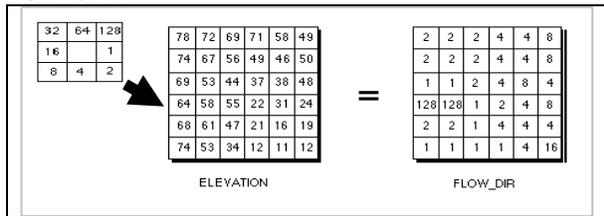
Algoritma yang umum digunakan dalam proses penentuan arah aliran adalah D8 method (Tarboton, 1989; Tarboton and Bras, 1991).



Gambar 3. Algoritma delapan arah mata angin (*D8-procedure*) untuk menentukan arah aliran antar pixel.

Penentuan arah aliran antar pixel menurut algoritma ini dilakukan dengan membandingkan ketinggian relatif satu pixel terhadap 8 pixel disekelilingnya. Selanjutnya, arah aliran ditentukan dari kemiringan tercuram terhadap pixel sekelilingnya.

Keluaran dari *Flow Direction* adalah pixel (grid) dalam format integer yang nilainya berkisar antara 1 sampai dengan 255. Nilai untuk tiap arah mata angin dilambangkan dengan integer seperti ilustrasi Gambar 4.



Gambar 4. Skema flow direction.

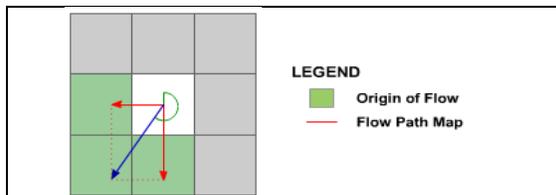
Pada grid (kiri atas) arah timur dinyatakan dengan (1), tenggara(2), selatan(4), barat-daya(8), barat(16), barat laut(32), utara(64) dan timur laut (128). Nilai Ini dikenal juga sebagai Aspect.

Algoritma **D8** digunakan oleh berbagai software pengolah DEM, antara lain: Topogrid ArcInfo, AGWA, TauDEM, hydrogrid, dll.

b2. Algoritma CatchmentSIM

CatchmentSIM menggunakan metode yang telah dimodifikasi dan mempunyai beberapa keunggulan dibanding algoritma D8. Algoritma ini menghitung sudut aliran ke bawah (*downslope flow angle*) untuk tiap pixel pada range 0 - 360°.

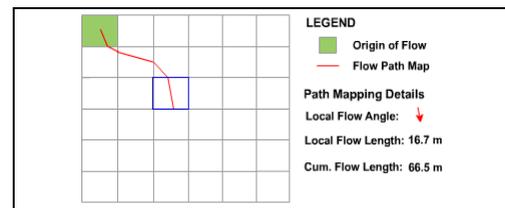
Arah aliran (*flow direction*) ditentukan sebagai vektor resultan dari kombinasi vektor aliran pixel non-diagonal dan pasangannya yang tegak lurus (90°). Aliran dari tiap pixel selanjutnya dilewatkan melalui semua ruas tersebut sampai dengan outlet Sub-DAS atau batas DEM tercapai (Gambar 5).



Gambar 5: Perhitungan arah aliran (*flow direction*) menurut metode **Lea**.

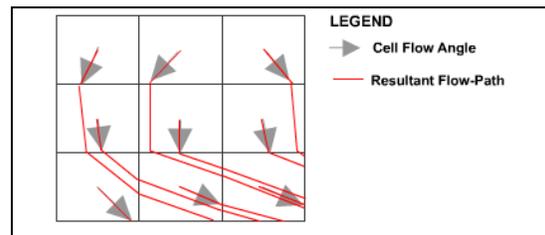
Algoritma ini menggambarkan ruas aliran sebagai garis dan menyimpan titik masuk dan keluar tiap ruas aliran pada semua pixel sebagai kuantitas vektor (Gambar 6).

Gambar (6) mengilustrasikan algoritma yang menggambarkan aliran sebagai kuantitas vektor yang mengalir melalui raster DEM. Pendekatan ini lebih menguntungkan dibanding metode konvensional yang biasa digunakan, yang menganggap aliran sebagai kuantitas raster.



Gambar 6. Vektor ruas aliran

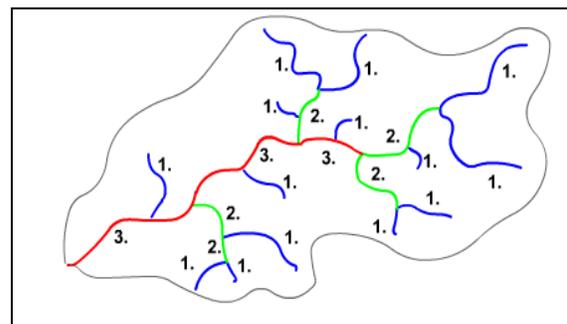
Metode ini memungkinkan penggambaran arah aliran yang lebih banyak pada puncak-puncak bukit dan lebih sensitif terhadap aliran yang konvergen dan divergen. Gambar (7) mengilustrasikan contoh kasus penentuan arah aliran pada 9 pixel berdekatan berdasarkan algoritma CatchmentSIM.



Gambar 7. Algoritma CatchmentSIM untuk menentukan arah aliran.

c. Penurunan jaringan sungai

Langkah pertama dalam pembentukan jaringan sungai adalah mengidentifikasi hulu-hulu anak sungai (*channel head*), yakni titik awal terbentuknya aliran air. Proses pembentukan jaringan dilakukan dengan mempertimbangkan akumulasi jumlah pixel yang mengandung aliran. Selanjutnya aliran dipetakan dari tiap ruas sungai di bagian hulu dan interkoneksi jaringan sungai direkam dengan metode penomoran orde sungai Horton/Strahler (Strahler, 1967)(Gambar 8).



Gambar 8: Pemberian orde sungai berdasarkan metode Strahler's (1957), revisi dari metode Horton.

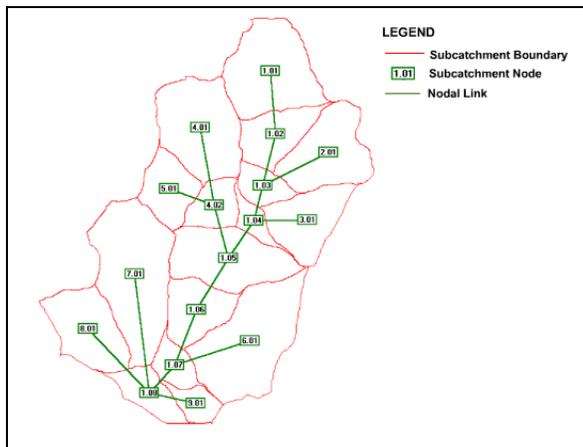
d. Pembentukan DAS dan Sub-DAS

Untuk membuat batas-DAS, terlebih dahulu ditentukan titik outlet DAS. Titik ini bisa ditentukan secara manual dengan memberi tanda

pada suatu lokasi tertentu di dalam DEM atau dengan mengimport batas DAS dari layer GIS. Proses pembentukan sub-DAS atau DAS dapat dilakukan secara otomatis dengan dua algoritma: (1) *Flow-accumulation-jump analysis* atau (2) *Horton catchment break-up*.

Pada metode yang pertama(1) pengguna: hanya menentukan jumlah sub-DAS yang akan dibentuk dan algoritma secara otomatis membagi DAS menjadi sejumlah sub-DAS yang diinginkan. Algoritma ini bekerja dengan mencari pixel yang mengandung nilai akumulasi aliran air (*flow accumulation*) terbesar diantara ruas sungai dan saluran sungai di bawahnya.

Pada metode ke dua, user cukup diminta untuk menentukan orde berapa yang akan digunakan untuk membagi DAS menjadi sub-DAS. Misalnya, jika ditentukan orde 3, maka semua titik percabangan sungai yang berorde lebih ≥ 3 , selanjutnya ditentukan sebagai outlet sub-DAS.



Gambar 9. Penyusunan jaringan hidrologis sub-DAS

e. Pembentukan jaringan sub-DAS

Semua sub-DAS yang telah ditentukan batas-batasnya, selanjutnya secara otomatis dihubungkan ke dalam suatu jaringan hidrologis dan diberi identifikasi dengan suatu sistem penomoran tertentu. (Gambar 9).

Pembuatan Grafik Karakteristik DAS

Analisa lebih lanjut terhadap DEM dan jaringan sungai yang terbentuk di dalam DAS, dengan CatchmentSIM menghasilkan parameter karakteristik DAS sebagai berikut: *Downslope distance vs % pixel*; *Drainage density vs threshold*; *Bifurcation ratio*; *Cumulative stream length vs stream orders*; *Hypsometric curve*.

Penurunan grafik dilakukan untuk masing-masing DAS di dalam balai, sehingga bisa dibandingkan karakteristik masing-masing DAS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Input DEM untuk penelitian ini adalah DEM Jatim. DEM dengan resolusi (100 x 100m) tersebut dibuat dari masukan berupa data kontur dan jaringan sungai untuk seluruh wilayah Jawa Timur. Proses pembuatan menggunakan CatchmentSIM, sedang visualisasi dilakukan dengan MapWindows GIS (Indarto et al., 2007).

Sebagai contoh Gambar (10), menampilkan DEM untuk balai Bondoyudo-mayang dan hasil pembuatan batas DAS untuk beberapa DAS di dalam Balai tersebut.

Jarak tempuh ke muara vs prosentase pixel

Grafik pada Gambar (11) memplotkan jarak tempuh ke arah muara (*downslope distance*) vs prosentase pixel di dalam DAS yang berhasil mencapai jaringan sungai (anak sungai) selama waktu perjalanan tersebut. Jarak semakin panjang, maka pixel yang mencapai sungai semakin banyak (100%). Pada prinsipnya, grafik tersebut menggambarkan seberapa cepat suatu DAS (sub-DAS) akan terdrainase. Pada Gambar (11) terlihat bahwa DAS(sub-DAS) no 6 lebih cepat terdrainase dibanding sub-DAS liannya.

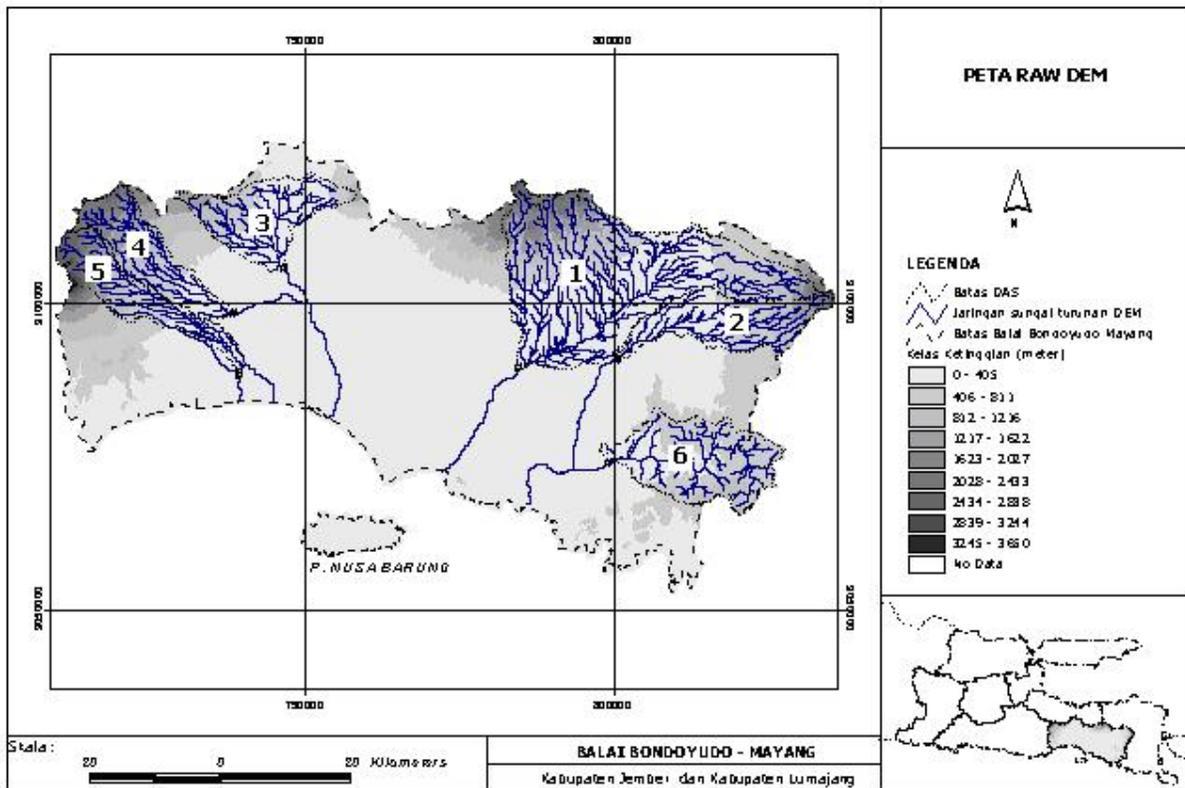
Drainage density vs Area Threshold

Grafik pada Gambar (12) memplotkan variasi kerapatan jaringan sungai (raster) sebagai fungsi SAT (*Stream area threshold*). Kerapatan jaringan sungai (*drainage density*) merupakan perbandingan jumlah pixel di dalam suatu daerah tangkapan (*subcatchment*) yang memiliki akumulasi aliran (*flow accumulation*) lebih dari SAT. DAS dengan kerapatan jaringan sungai yang tinggi akan menyebabkan air mudah terdrainase lewat jaringan sungai tersebut.

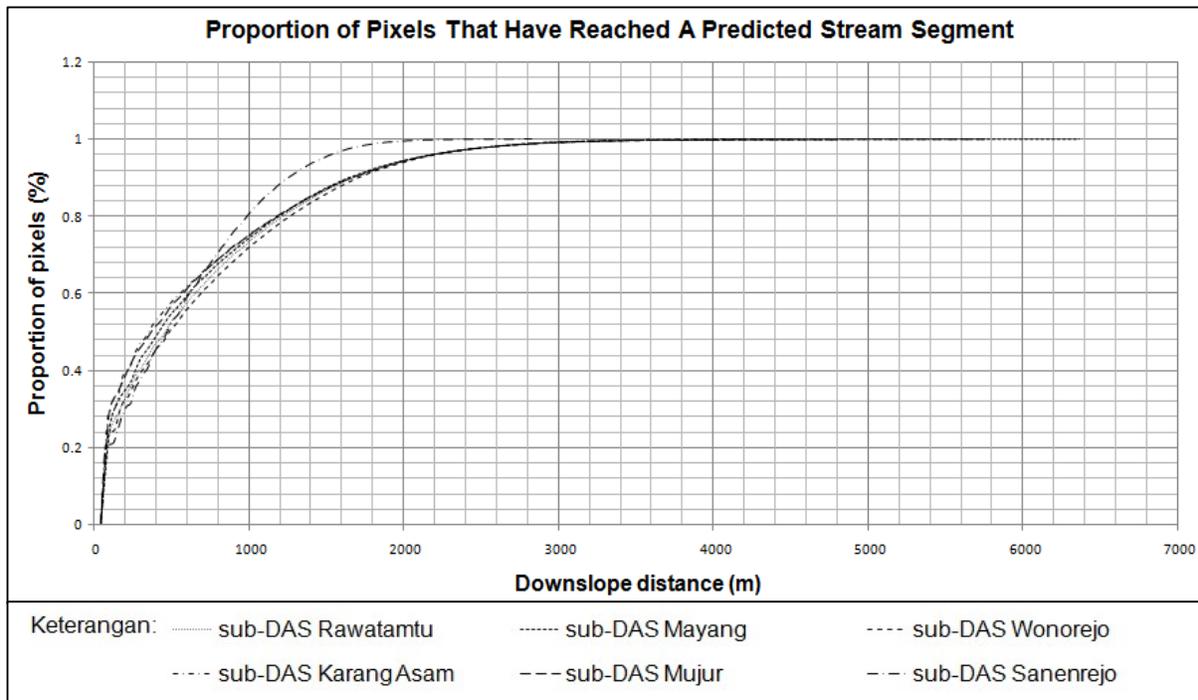
Bifurcation rasio (Stream Order vs # Streams)

Grafik bifurcation ratio didasarkan pada sistem peng-orde-an sungai menurut Horton (1945) atau Strahler (1952, 1957). Gambar (13) menunjukkan hubungan antara orde sungai dan logaritmik jumlah ruas-sungai pada orde tersebut untuk kedua sub-DAS.

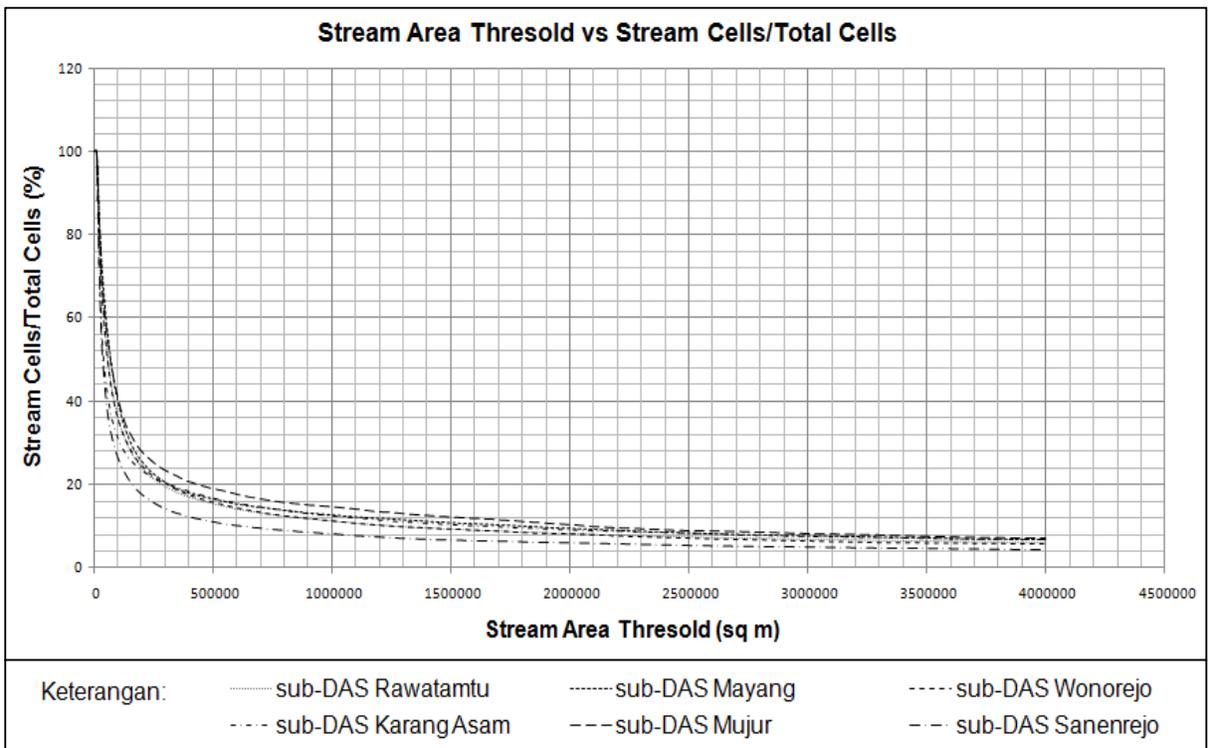
Bifurcation adalah kemiringan grafik garis tersebut. Nilai Bifurkasi(Bf) dan R (keakuratan grafik) untuk ke 6 sub-DAS antara 3,6 s/d 4,1. Sedang nilai R berkisar 1. Nilai Bf yang tinggi menunjukkan bahwa jaringan sungai lebih fractal (lebih banyak ruas sungai yang berada pada orde 1) dan lebih terdrainase dengan baik.



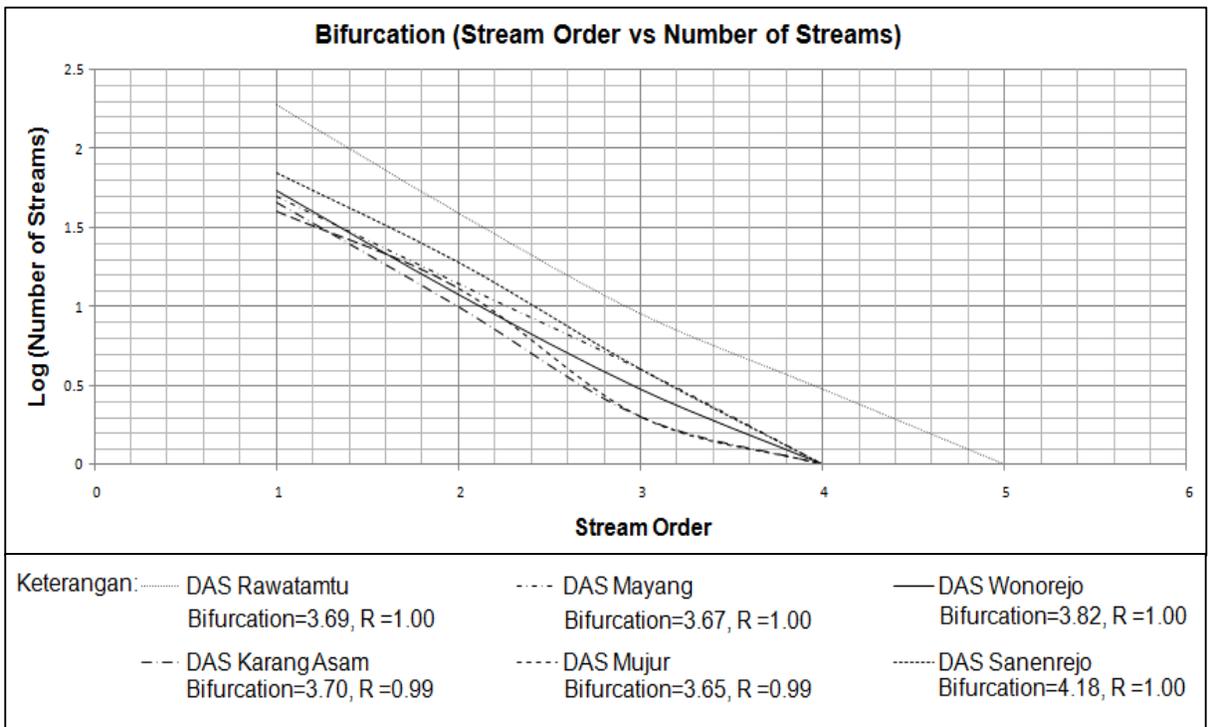
Keterangan: (1) Rawatamtu; (2) Mayang; (3) Wonorejo; (4) Karang Asam; (5) Mujur; (6) Sanen Rejo
Gambar 10. DEM untuk balai Bondoyudo-mayang dan hasil pembuatan batas beberapa sub-DAS di dalam Balai tersebut.



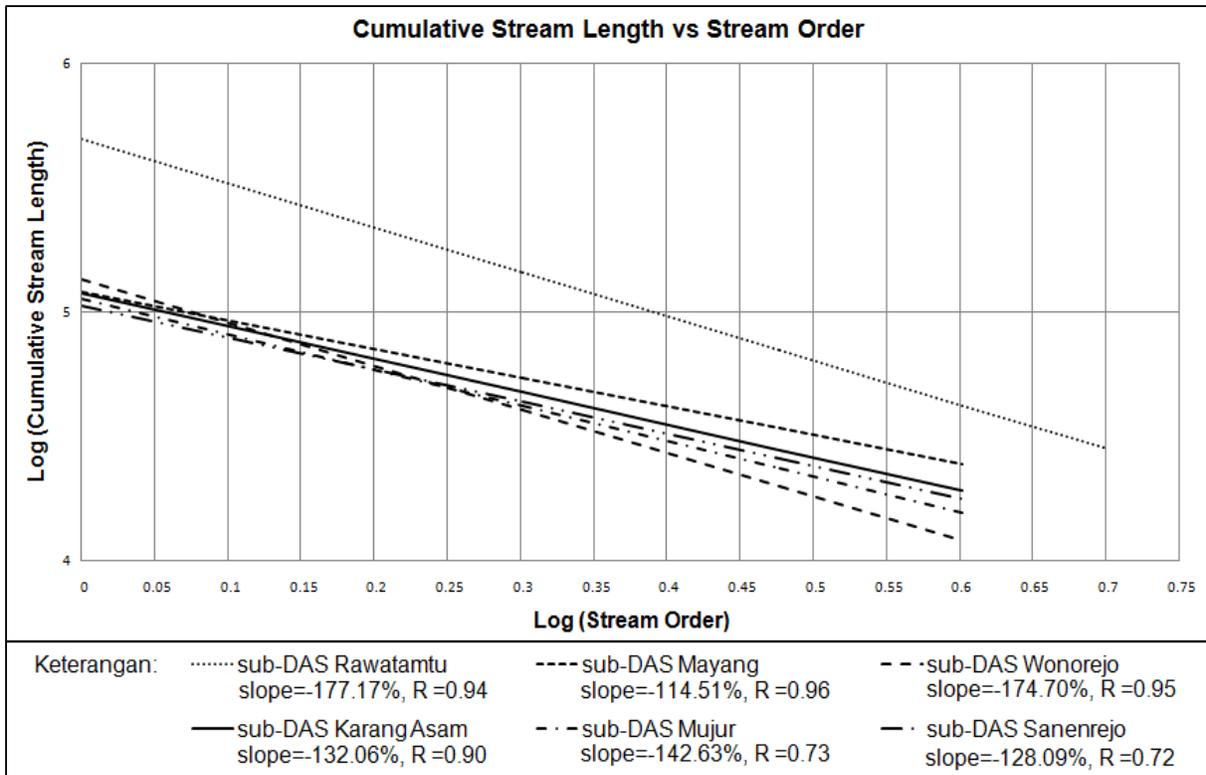
Gambar 11. Jarak tempuh ke muara vs prosentase pixel mencapai jaringan sungai



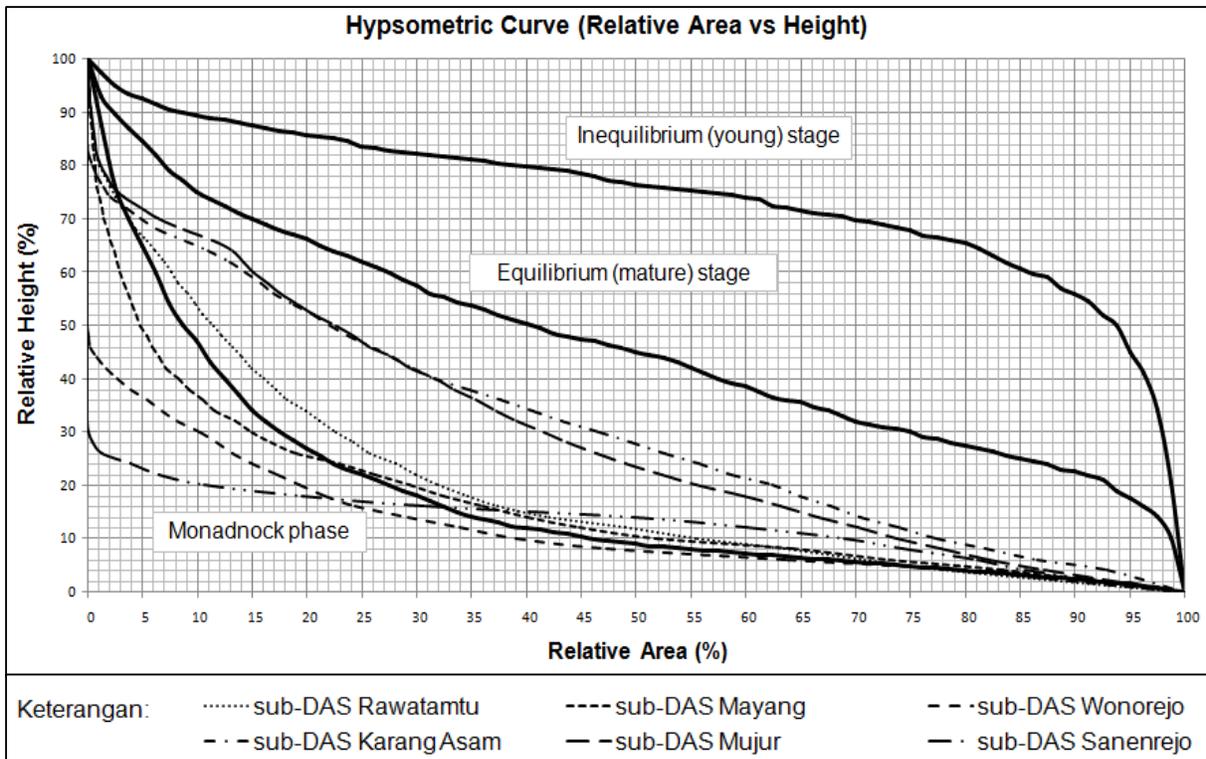
Gambar 12. Stream area threshold vs stream cells/total cells.



Gambar 13. Orde sungai vs logaritmik jumlah ruas sungai pada orde tersebut.



Gambar 14. Cumulative stream length vs stream order



Gambar 15. Kurva hipsometrik ideal

Cumulative Stream Length vs Stream Order

Grafik Gambar (14) menyatakan hubungan logaritmik dari panjang sungai secara kumulatif versus logaritmik dari orde sungai. Grafik ini bermanfaat untuk menilai sifat fractal dari suatu daerah tangkapan hujan, jika dikombinasikan dengan Bf dan parameter kerapatan jaringan sungai.

Hypsometric Curve (Area vs Height)

Kurva hipsometrik (Gambar 15) umumnya digunakan untuk mengukur status geomorfologi dari suatu daerah tangkapan. Horton(1945) telah mengamati bahwa daerah tangkapan/sub-DAS/DAS (catchment area) yang telah berevolusi secara geomorfologi memiliki grafik hubungan antara tinggi dan luas relatif yang berbeda dari kondisi awalnya. Kondisi geomorfologi DAS yang masih baik, ditunjukkan oleh grafik equilibrium (kurva yang ditengah, pada Gambar 15). Grafik bagian atas menyatakan tipe geomorfologi DAS yang masih muda, sedang bagian bawah menyatakan grafik geomorfologi DAS tipe tua (*monadnock phase*). Gambar (15) menunjukkan bahwa ke enam (6) sub-DAS yang dimaksud sudah berada pada fase geomorfologi yang tua.

SIMPULAN

Penelitian telah menghasilkan Digital Elevation Model untuk seluruh wilayah Jawa Timur (DEM – JATIM). Tulisan di atas menunjukkan salah satu pemanfaatan DEM.

Penelitian juga menghasilkan karakteristik topografi DAS-DAS, yang selanjutnya bisa digunakan untuk mendukung pengelolaan Sumberdaya Air di Jawa Timur.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini didanai oleh PROGRAM HIBAH PEKERTI DP2M-DIKTI, dengan No Kontrak 040/SP2H/PP/DP2M/III/2007, tanggal 29 maret 2007. Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses penelitian ini.

REFERENSI

Band, L. E., 1986, "Topographic partition of watersheds with digital elevation models", *Water Resources Research*, 22(1): 15-24.

Beven, K. J. and Kirkby M. J., 1979, "A Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology", *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1): 43-69.

Costa-Cabral, M. and Burges S. J., 1994, "Digital Elevation Model Networks (DEMON): A Model of Flow Over Hillslopes for Computation of Contributing and Dispersal

Areas", *Water Resources Research*, 30(6): 1681-1692.

Fairfield, J. and Leymarie P., 1991, "Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models", *Water Resources Research*, 27(5): 709-717.

Garbrecht, J. and Martz L. W., (1997), "The Assignment of Drainage Direction Over Flat Surfaces in Raster Digital Elevation Models," *Journal of Hydrology*, 193: 204-213.

Grayson, R. B., Moore I. D., and McMahon T. A., 1992a, "Physically Based Hydrologic Modeling 1. A Terrain-Based Model for Investigative Purposes", *Water Res. Research*, 28(10): 2639-2658.

Grayson, R. B., Moore, I. D., and McMahon T. A., 1992b, "Physically Based Hydrologic Modeling 2. Is the Concept Realistic", *Water Resources Research*, 28(10): 2659- 2666.

Horton, R.E, "Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology", *Bul. Geol. Soc. Amer.*, 56, 275-370, 1945.

Jones, R. 2002, "Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples", *Computers & Geosciences*, vol. 28, no. 9, pp. 1051-1060

Jenson, S. K. and J. O. Domingue, (1988), "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11): 1593-1600.

Mark, D. M., (1988), "Network models in geomorphology," Chapter 4 in *Modelling in Geomorphological Systems*, Edited by M. G. Anderson, John Wiley., p.73-97.

Marks, D., J. Dozier and J. Frew, (1984), "Automated Basin Delineation From Digital Elevation Data," *Geo. Processing*, 2: 299-311.

Montgomery, D. R. and W. E. Dietrich, (1988), "Where do channels begin," *Nature*, 336: 232-234.

Montgomery, D. R. and W. E. Dietrich, (1989), "Source Areas, Drainage Density and Channel Initiation," *Water Resources Research*, 25(8): 1907-1918.

Moore, I. D. and R. B. Grayson, (1991), "Terrain-Based Catchment Partitioning and Runoff Prediction Using Vector Elevation Data," *Water Resources Research*, 27(6): 1177-1191.

Quinn, P., K. Beven, P. Chevallier and O. Planchon, (1991), "The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modeling

- Using Digital Terrain Models," *Hydrological Processes*, 5: 59-80.
- Ryan, C., and Boyd, M., 2003. "CATCHMENTSIM: a new Gis Tool for Topographic Geo-computation and hydrologic modeling. The Institution of Engineers", *Australia 28th International Hydrology and Water Resources Symposium 10 - 14 November 2003 Wollongong, NSW*.
- Ryan, C., 2005a. "CatchmentSIM a stand-alone GIS Based Terrain Analysis System", CRC for Catchment Hydrology, Australia. [Http://www.toolkit.net.au/catchmentsim](http://www.toolkit.net.au/catchmentsim).
- Ryan, C., 2005b. "CatchmentSIM User Guide. A Stand alone GIS based terrain analysis System", CRC for Catchment Hydrology, Australia. <http://www.toolkit.net.au/catchmentsim>
- Ryan, C., 2005c. "CatchmentSIM CSTalk Macro Reference Guide", CRC for Catchment Hydrology, Australia . <http://www.toolkit.net.au/catchmentsim>.
- Sedgewick, Algorithms, 2nd Edition, Addison-Wesley, Reading, MA, 1988.
- Strahler, A.N, 1952. "Quantitative geomorphology of erosional landscapes", 19th International Geology Conference, 13(3), 341-354.
- Strahler, A.N, 1957. "Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology", *Transactions, American Geophysical Union*, 38(6), 913-920.
- Turcotte R., Fortin J., Rousseau A.N., Massicotte S., Villeneuve J-P , 2001., "Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network", *Journal of Hydrology*, 240(3), 225-242.
- Tarboton, D. G., 1989, "The analysis of river basins and channel networks using digital terrain data, Sc.D. Thesis", Department of Civil Engineering, M.I.T., Cambridge, MA, (Also available as Tarboton D. G., R. L. Bras and I. Rodriguez-Iturbe.
- Tarboton, D G., Bras, R L. 1991, "On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data", *Hydrological Processes*, vol. 5, no. 1, pp. 81-100.
- Tarboton, D. G., 1997, "A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models", *Water Resources Research*, 33(2): 309-319.
- Wise S, 2000, "Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours", *Hydrological Processes*, 14(11), 1909-1929.