

Pengujian 9 Algoritma Untuk Pemisahan Aliran Dasar : Studi Di Wilayah UPT PSDA di Madiun

Sri Wahyuningsih

Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember, Jl. Kalimantan No. 37, Kampus Tegalboto, Jember 68121
E-mail: sriwahyuningsih.ftp@unej.ac.id

Indarto

Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember, Jl. Kalimantan No. 37, Kampus Tegalboto, Jember 68121
E-mail : indarto.ftp@unej.ac.id

Tri Galih Yudhatama

Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember, Jl. Kalimantan No. 37, Kampus Tegalboto, Jember 68121

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menguji sembilan (9) algoritma pemisahan aliran dasar yang terdiri dari: enam (6) algoritma pemisahan berbasis filter digital (Recursive Digital Filter/RDF) dan tiga (3) algoritma pemisahan berbasis grafis digital. Tahapan penelitian mencakup: (1) inventarisasi data, (2) pengolahan data, (3) kalibrasi dan validasi, dan (4) evaluasi kinerja. Ke 9 metode algoritma pemisahan tersebut dikalibrasi menggunakan data debit harian dari tahun 1996 sampai tahun 2015. Kalibrasi dilakukan per tahun pada sub-DAS Kalibrasi. Kalibrasi dilakukan selama puncak musim kemarau (Juli sampai September) setiap tahunnya. Pemilihan sub-DAS untuk kalibrasi mempertimbangkan kelengkapan data yang ada pada sub-DAS tersebut. Selanjutnya parameter optimal ditentukan dari nilai rerata parameter tahunan. Kemudian, nilai RMSE, koefisien determinasi yang didapatkan dari scatter-plot, visualisasi kurva-durasi-aliran, dan hidrograf aliran digunakan untuk mengevaluasi kinerja model. Proses validasi pada ke 3 sub-DAS lainnya menggunakan nilai parameter yang didapat dari DAS kalibrasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada prinsipnya semua algoritma dapat memisahkan aliran dasar dari debit total-nya. Namun demikian, algoritma Lyne & Hollick and EWMA menghasilkan kinerja yang lebih baik dari ke tujuh algoritma lainnya. Nilai rerata RMSE = 0,036 dan $r^2=0,87$ untuk metode Lyne & Hollick. Kinerja EWMA ditunjukkan oleh nilai rerata RMSE = 0,041 and $r^2=0,83$.

Kata-kata kunci: pemisahan, aliran dasar, metode grafis, metode filter

Abstract

This research aimed to evaluate nine (9) algorithms for baseflow separation. The six (6) recursive digital filter (RDF) and three (3) graphical separation algorithms were evaluated in this study. Four watersheds located at the administrative boundary of UPT PSDA Madiun were used. The methodology consists of (1) data inventory, (2) data processing, (3) calibration and validation, and (4) evaluating of models performance. The algorithms were calibrated using daily discharge data (from 1996 to 2015) for each year. The average values of the parameters obtained from calibration process were used to separate baseflow for the whole period record. Calibration watershed was determined by considering the completeness of recording discharge data (in this case: we use Nambangan sub-watershed). Validation process to others three (3) sub-watersheds conducted using parameter value from the calibrated watersheds. Then, RMSE, scatter plot, FDC and hydrograph were used to evaluate model performance during the dry season (July to September) both on calibrated and validated watersheds. The result shows that principally all of the nine (9) algorithms can be used to separate baseflow from the total flow. However, Lyne & Hollick and EWMA algorithms show the best performance compared to others algorithms. This conclusion based on the calculation of RMSE and R-Squared (r^2). The average value of RMSE = 0,036 and $R^2=0,87$ for Lyne & Hollick. Similarly, RMSE = 0,041 and $r^2=0,83$ for EWMA filter.

Keywords: Baseflow separation, method of graphic, recursive digital filter

1. Pendahuluan

1.1 Peran aliran dasar

Aliran air di sungai pada prinsipnya dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu : aliran dasar (*base flow*)

dan aliran cepat (*quick flow*) atau *Direct run off (DRO)*. *DRO* dikenal juga sebagai aliran permukaan. Komponen aliran cepat hasil pemisahan hidrograf bermanfaat untuk perkiraan besarnya aliran sungai yang berpotensi menjadi aliran permukaan (*run off*). Besarnya porsi aliran permukaan inilah yang berpotensi terhadap kejadian

banjir. Dalam perencanaan bangunan air maka aliran permukaan perlu dihitung untuk mengetahui potensi air yang dapat ditampung atau disimpan di dalam waduk atau reservoir.

Selanjutnya, aliran dasar merupakan komponen debit di sungai yang masih ada pada periode kering. Pada periode kering atau musim kemarau di sebagian besar sungai di Jawa Timur masih terdapat aliran air walaupun sudah lebih dari > 3 minggu tidak terjadi hujan di dalam DAS. Aliran semacam ini berasal dari aliran air di bawah permukaan tanah yang ke luar kembali ke Sungai. Aliran semacam inilah yang disebut sebagai aliran dasar. Komponen aliran dasar sebenarnya tetap ada walaupun pada musim penghujan, akan tetapi pada periode musim penghujan komponen yang lebih dominan adalah aliran permukaan. Kondisi lapisan tanah pada saat musim penghujan cenderung jenuh, sehingga air hujan yang jatuh sebagian besar berubah menjadi aliran permukaan (*Quick flow* atau *DRO*).

Sebaliknya, pada saat musim kemarau aliran di sungai lebih banyak disumbang oleh komponen aliran dasar. Gerakan horisontal dan vertikal aliran air lewat pori-pori tanah melalui proses interflow dan perkolasi (Indarto, 2010) dapat menyebabkan aliran air dari dalam lapisan tanah ke luar kembali ke badan sungai. Proses inilah yang menjaga aliran air di sungai tetap ada, walaupun pada periode kering (tidak ada hujan dalam waktu yang relatif lama). Selanjutnya, besarnya kontribusi aliran air dari lapisan tanah ini dapat diketahui secara maksimal pada saat musim kemarau. Pada saat musim kemarau, atau pada periode tidak ada hujan dalam waktu yang lama, maka dapat diasumsikan bahwa kontribusi aliran permukaan (*quick flow*) relatif kecil atau hampir mendekati NOL. Sehingga komponen terbesar aliran di sungai adalah berasal dari aliran dasar.

Informasi tentang ketersediaan aliran dasar diperlukan untuk membuat suatu perencanaan alokasi (pemanfaatan) air dalam rangka pengelolaan sumberdaya air. Selanjutnya, hasil pemisahan aliran dasar dapat bermanfaat untuk menghitung ketersediaan air pada saat musim kemarau (atau periode debit kecil atau periode kering). Manfaat lain dari perhitungan aliran dasar adalah untuk konservasi lingkungan perairan di Sungai. Selain manusia, banyak spesies hewan dan tumbuhan yang hidupnya tergantung pada ketersediaan aliran di sungai. Dengan mengetahui ketersediaan aliran dasar, kita dapat memperkirakan apakah lingkungan di sungai masih dapat mendukung dan menjamin keberlangsungan kehidupan biota dan jenis ikan yang ada di Sungai, terutama pada saat periode debit kecil.

Pada prinsipnya, aliran dasar (*base flow*) dan aliran cepat (*Quick flow*) tidak dapat dibedakan dari data debit yang teramati dan terukur di sungai, karena debit terukur di sungai merupakan gabungan dari kedua komponen tersebut. Pemisahan ke dua komponen dapat dilakukan menggunakan metode atau algoritma. Ada beragam metode yang telah dikembangkan untuk analisis komponen aliran dasar dari debit total di sungai. Salah satunya adalah dengan metode pemisahan komponen aliran dasar dari debit total yang terukur di

sungai. Literatur terkait dengan analisis aliran dasar, antara lain telah ditulis oleh Hall (1968), Boughton (1993), Nathan dan McMahon (1990ab), Tallaksen (1995), Sloto dan Crouse (1996), Chapman dan Maxwell (1996), Smakhtin (2001ab), Brodie dan Hostetler (2007), Furey (2003), Tularam dan Ilahee (2008), Eckhardt (2005, 2008), dan Gonzales et. al (2009) menunjukkan beberapa perkembangan pemahaman dan analisis terhadap aliran dasar.

Metode pemisahan aliran dasar umumnya membagi aliran menjadi aliran cepat dan aliran dasar menggunakan pemisahan otomatis berbasis waktu. Pada tulisan ini akan diulas dua metode pemisahan aliran dasar yaitu: metode filter digital dan metode grafis digital. Kedua jenis metode digunakan dalam penelitian ini karena cukup paktis untuk diterapkan.

1.2 Metode filter digital

Metode filter digital (*recursive digital filter / RDF*) bekerja dengan mengolah data debit untuk memisahkan aliran dasar dari hidrograf. Cara kerja *RDF* serupa dengan filter digital yang umum digunakan dalam analisis sinyal (misalnya: frekuensi gelombang, sinyal suara, listrik, dll). Dalam hal ini sinyal dengan frekuensi tinggi dipisahkan dari sinyal normal atau dari sinyal frekuensi rendah menggunakan filter digital yang berkerja dengan kriteria tertentu.

Pada proses pemisahan aliran dasar, *RDF* digunakan untuk memisahkan komponen aliran cepat (*quickflow*) yang menyerupai sinyal frekuensi tinggi, memisahkannya dan menyisakan komponen aliran dasar (*baseflow*) yang dianalogikan dengan seri sinyal berfrekuensi rendah. Selanjutnya, *RDF* dapat bekerja dengan seluruh rekaman data debit di dalam hidrograf aliran sungai untuk menghasilkan hidrograf aliran dasar. Ada banyak persamaan atau model yang telah dikembangkan untuk pemisahan aliran dasar dari hidrograf menggunakan filter digital, hal ini dijumpai dalam artikel dan review terkait, misalnya: Nathan dan McMahon (1990ab), Chapman dan Maxwell (1996), Chapman (1999), Tallaksen dan Van Lannen (2004), Eckhardt (2005, 2008), Brodie dan Hostetler (2007), Murphy et. al (2009) dan Gregor (2012). Ada banyak algoritma *RDF* yang telah dikembangkan dan terangkum dalam review yang ditulis misalnya, oleh: Brodie and Hostetler (2007), dan Murphy et. al (2009). Ke enam persamaan *RDF* ditampilkan dalam **Tabel 1**.

Metode filter (persamaan 1 sd 6 pada **Tabel 1**) bekerja dengan prinsip menghitung aliran dasar hari ke i , dengan mempertimbangkan aliran total, aliran dasar, aliran cepat pada hari sebelumnya. Metode tersebut dapat menggunakan satu parameter (k atau α), dua parameter (k dan c) atau tiga (α , k dan c).

1.3 Metode grafis

Banyak metode pemisahan secara grafis telah dikembangkan untuk pemisahan aliran dasar (*baseflow separation*). Sloto dan Crouse (1996) memberikan contoh tiga metode pemisahan secara grafis: (a) metode interval

Tabel 1. Metode RDF untuk memisahkan aliran dasar dan menghitung BFI, Gregor (2012)

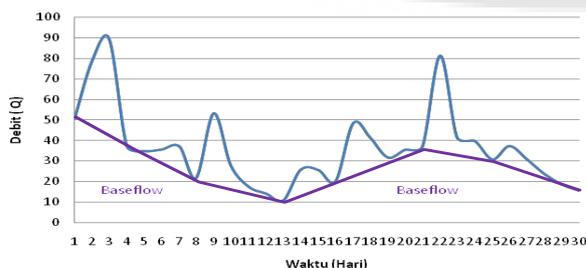
Nama Filter	Persamaan Filter
One-parameter algorithm (Chapman dan Maxwell, 1996)	$q_{b(i)} = \frac{k}{2-k} q_{b(i-1)} + \frac{1-k}{2-k} q_{(i)}$ (1)
Boughton two-parameter algorithm (Boughton, 1993; Chapman & Maxwell, 1996)	$q_{b(i)} = \frac{k}{1+C} q_{b(i-1)} + \frac{C}{1+C} q_{(i)}$ (2)
IHACRES three-parameter algorithm (Jakeman & Homberger, 1993)	$q_{b(i)} = \frac{k}{1+C} q_{b(i-1)} + \frac{C}{1+C} (q_{(i)} + \alpha_q q_{(i-1)})$ (3)
Lyne & Hollick algorithm (Lyne & Hollick, 1979; Nathan & McMahon, 1990ab)	$q_{f(i)} = \alpha q_{f(i-1)} + (q_{(i)} - q_{(i-1)}) \frac{1+\alpha}{2}$ (4)
Chapman algorithm (Chapman, 1991; Mau & Winter, 1997)	$q_{f(i)} = \frac{3\alpha-1}{3-\alpha} q_{f(i-1)} + \frac{2}{3-\alpha} (q_{(i)} - \alpha q_{(i-1)})$ (5)
EWMA filter (Tularam dan Ilahee, 2008).	$q_{b(i)} = \alpha q_{(i)} + (1+\alpha) q_{b(i-1)}$ (6)

Keterangan :

- $q_{(i)}$: nilai aliran total pada hari ke i
- $q_{b(i)}$: nilai aliran dasar pada hari ke i
- $q_{f(i)}$: nilai aliran cepat atau *quick flow/direct run off* pada hari ke i
- $q_{(i-1)}$: nilai aliran total pada hari ke $(i - 1)$
- $q_{b(i-1)}$: nilai aliran dasar pada hari ke $(i - 1)$
- $q_{f(i-1)}$: nilai aliran cepat pada hari ke $(i - 1)$
- k : parameter filter ~ konstanta resesi
- α : parameter filter
- C : parameter filter.

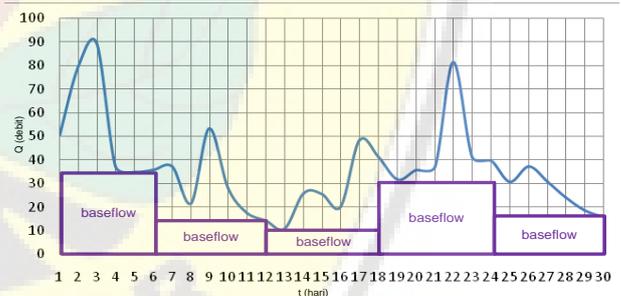
tetap (*Fixed-interval method*), (b) metode interval bergerak (*Sliding-interval method*) dan (c) metode minimum lokal (*Local-minimum method*). Cara kerja metode minimum lokal (*local-minimum*) Pettyjohn dan Henning (1979), dijelaskan oleh Sloto & Crouse (1996), sebagai berikut.

Metode minimum-lokal akan mengevaluasi debit setiap harinya untuk menentukan apakah hari tersebut termasuk debit terendah atau tidak, dengan menggunakan interval waktu yang dinyatakan oleh: $[0,5 (2N^* - 1)$ hari]. Nilai N didapatkan secara empiris dari persamaan $N = A^{0,2}$, dimana A : adalah luas daerah aliran sungai (DAS) dalam satuan mil^2 . Selanjutnya debit terendah pada setiap interval dihubungkan dengan garis lurus untuk menentukan *baseflow* (Gambar 1). Pada (Gambar 1) *local minimum* terjadi pada tanggal 8, 13, 16, dan 23 Januari 1990.



Gambar 1. Ilustrasi metode minimum lokal, menggunakan hidrograf DAS Rawatamtu, bulan Januari 1990 (Indarto et al., 2016)

Selanjutnya, metode interval tetap (*Fixed Interval Method*) menggunakan debit terendah dalam setiap interval. Banyaknya hari dalam setiap interval ditentukan dengan menggunakan rumus $(2N^* \text{Hari})$. N merupakan jumlah hari setelah limpasan permukaan berakhir. Nilai N didapatkan secara empiris dari rumus $N = A^{0,2}$ (Linsley et al., 1958), dimana A : adalah luas daerah aliran sungai (DAS) dengan satuan mil^2 . Metode ini dapat digambarkan dengan diagram batang yang ditarik ke atas hingga bersentuhan dengan debit terendah pada setiap interval (Gambar 2).

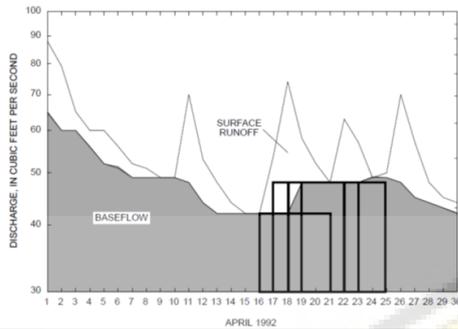


Gambar 2. Ilustrasi metode interval tetap (*fixed interval method*), menggunakan hidrograf DAS Rawatamtu, bulan Januari 1990 (Indarto et al., 2016).

Aliran dasar untuk interval berikutnya ditentukan dengan menggeser diagram batang pada interval yang sama hingga bersentuhan dengan hidrograf pada debit terendah pada interval berikutnya. Proses tersebut diulang pada semua interval berikutnya.

Selanjutnya, metode interval bergerak (*Sliding-interval*) menggunakan satu setengah interval minus 1 hari untuk menentukan debit terendah. Jumlah hari dalam setiap interval ditentukan dengan rumus $0,5*(2n-1)$ hari, dihitung sebelum dan setelah hari dengan debit paling kecil. Metode ini menampilkan pergerakan sebuah bar $2n^* \text{Hari}$ ke atas sehingga bersinggungan dengan nilai minimal dari hidrograf. Selanjutnya, debit pada titik tersebut dijadikan sebagai median interval. Diagram batang kemudian bergerak ke atas untuk hari berikutnya,

dan proses tersebut selanjutnya diulang (Pattyjohn *et al.*, 1979, Sloto dan Crouse, 1996) (**Gambar 3**).



Gambar 3. Ilustrasi metode sliding interval (Sloto dan Crouse, 1996).

Ringkasan literatur tersebut di atas menunjukkan sebagian perkembangan metode pemisahan aliran dasar. Saat ini telah banyak dikembangkan tool yang menerapkan metode tersebut untuk keperluan praktis pemisahan aliran dasar. Tool tersebut ada yang tersedia baik *off-line* maupun secara *on-line* berbasis web. Salah satu tool yang dikembangkan adalah modul-BFI 3.0+ (Gregor, 2012). BFI dapat dijalankan sebagai aplikasi berdiri sendiri atau dijalankan di atas platform HydroOffice (Gregor, 2015). Tool ini secara praktis sangat membantu untuk pemisahan aliran dasar. Hasil penelitian tentang penerapan berbagai metode pemisahan aliran dasar pada DAS-DAS di wilayah Jawa Timur telah dilakukan, antara lain oleh: Puspitasari (2015), Priyanto (2015), Ratnasari (2015), dan Indarto *et. al.* (2016). Penelitian ini merupakan lanjutan dari penelitian yang telah dilakukan. Pengujian ke 9 metode pemisahan aliran dasar dilakukan pada 4 sub-DAS di wilayah UPT PSDA di Madiun.

1.4 Tujuan penelitian

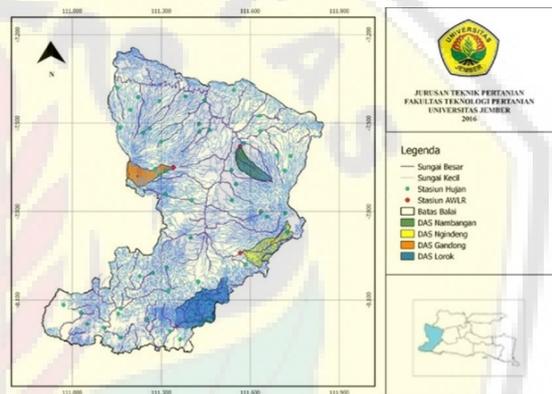
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk: (1) mengkalibrasi dua jenis metode pemisahan aliran dasar, (2) memvalidasi apakah parameter yang telah dikalibrasi untuk menghitung aliran dasar pada salah satu DAS, dapat digunakan untuk menentukan aliran dasar pada DAS lain di sekitarnya, dan (3) menentukan nilai baseflow index di wilayah UPT PSDA di Madiun. Dua jenis metode pemisahan aliran dasar yang digunakan yaitu: (1) pemisahan berbasis filter (*Recursive Digital Filter/ RDF*) dan metode berbasis Grafis digital. Enam (6) metode pemisahan aliran dasar dari kelompok RDF yaitu: one-parameter (Chapman dan Maxwell, 1996), Boughton two-parameter (Boughton, 1993; Chapman dan Maxwell, 1996), IHACRES three-parameter (Jakeman & Hornberger, 1993), Lyne & Hollick filter (Lyne & Hollick, 1979; Nathan & McMahon, 1990), Chapman algorithm (Chapman, 1991; Mau & Winter, 1997) dan EWMA Filter (Tularam dan Illahee, 2008). Pemisahan aliran dasar pada penelitian ini juga menggunakan tiga (3) metode berbasis grafis digital yang telah dikembangkan oleh Sloto dan Crouse (1996) yaitu: *local-minimum*, *fixed-interval*, dan *sliding interval*. Semua metode tersebut tersedia di dalam modul-BFI dari HydroOffice (Gregor, 2012, 2015). Hasil penelitian diharapkan dapat merekomendasikan metode pemisahan yang

cocok untuk wilayah tersebut dan memberikan gambaran tentang kondisi aliran dasar pada wilayah tersebut.

2. Metodologi

2.1 Lokasi dan waktu penelitian

Penelitian dilakukan di wilayah kerja UPT PSDA (Unit Pelaksana Teknis – Pengelolaan Sumberdaya Air) Provinsi Jawa Timur di Madiun. UPT PSDA merupakan salah satu unit teknis dari Dinas PU pengairan Provinsi Jawa Timur. Pada penelitian ini, dipilih empat (4) sub-DAS di wilayah UPT tersebut yaitu: Nambangan, Gandong, Keang-Ngindeng, dan Lorok, yang merupakan anak sungai Bengawan Solo (DAS Bengawan solo) sebagai sampel pengujian (Gambar 5). Pengolahan data dilakukan di Lab TPKL, PS Teknik Pertanian, FTP-UNEJ. Penelitian dilakukan dari bulan Februari sampai dengan Desember 2016.



Gambar 4. Lokasi penelitian: 4 Sub-DAS di wilayah UPT PSDA Madiun

2.2 Input data dan peralatan

Selanjutnya, Tabel (1) menampilkan karakteristik fisik DAS (bentuk, luas, jenis tanah, peruntukan lahan) dari ke 4 sub-DAS. Prosentase luas jenis tanah per sub-DAS diolah dari peta RBI digital 25K yang diunduh dari Badan Informasi Geospasial (BIG). Prosentase luas untuk tiap jenis tanah diolah dari peta tanah Peta Tanah Tinjau Provinsi Jawa Timur Skala 1 : 250.000.

Bentuk sub-DAS relatif memanjang, dengan hilir (outlet) mengarah pada sungai Bengawan Solo (DAS Bengawan Solo). Luas sub-DAS antara 66 sd 200 km². Jenis tanah bervariasi antar sub-DAS, mencakup: aluvial, andosol, grumosol, regosol, litosol, dan mediteran. Peruntukan lahan didominasi oleh: pemukiman, sawah irigasi, lahan tadah hujan, kebun, hutan, perladangan dan semak belukar. Prosentase luas tiap jenis peruntukan lahan bervariasi antar satu sub-DAS dengan lainnya. Dari Tabel (1) dapat disimpulkan bahwa karakteristik fisik ke empat DAS relatif berbeda. Dalam hal ini, bentuk, luas, distribusi jenis tanah, dan jenis dan prosentase luas peruntukan lahan pada tiap sub-DAS relatif berbeda.

Input utama untuk proses pemisahan aliran dasar adalah data debit. Data debit tersedia untuk periode rekaman

1996 sd 2015 yang terukur pada stasiun pengukuran debit tiap sub-DAS. Pada penelitian ini juga digunakan data hujan yang berasal dari lokasi pengukuran hujan yang ada. Data hujan digunakan sebagai ilustrasi untuk menyatakan keterkaitan antara hujan rerata yang diterima oleh sub-DAS dengan debit yang terjadi pada tiap sub-DAS. Data hujan tidak menjadi masukan yang diperhitungkan bagi tiap metode yang digunakan. Data hujan tersedia untuk periode 1996 sampai dengan 2015. Data debit dan data hujan diperoleh dari kantor UPT PSDA di Madiun, melalui skema kegiatan kerjasama : magang mahasiswa dan penelitian.

Tabel 2. Karakteristik fisik sub-DAS, hasil analisis data

Nama DAS	Nambangan	Gandong	Keang-Ngindeng	Lorok
Luas DAS (Km ²)	66,6	80,41	109,85	199,6
Bentuk DAS	memanjang	memanjang	memanjang	memanjang
Jenis Tanah (% Luas)				
Aluvial	40,4	0,00	0,3	0,00
Andosol	2,9	32,76	85,57	50,1
Grumosol	0,00	36,8	2,4	0,00
Mediteran	0,00	30,21	0,00	0,00
Regosol	56,69	0,19	11,75	0,00
Litosol	0,00	0,00	0,00	49,9
Peruntukan Lahan (%Luas)				
Hutan	0,00	0,00	7,6	0,00
Kebun	0,18	38,94	23,12	43,06
Ladang	6	10,2	17,75	37,01
Pemukiman	12,37	13,49	15,12	7,77
Sawah Irigasi	45,67	1,29	3,34	0,1
Sawah Tadah Hujan	22,52	24,87	21,42	8,21
Semak Belukar	10,23	9,94	9,1	3,6
Tanah Kosong/belukar	3	1,24	2,51	0,06
Danau/ Bendungan	0,00	0,00	0,00	0,2

Selanjutnya, data DEM didownload dari website ASTER G-DEM2 dan diklip sebatas wilayah UPT. Selanjutnya, DEM digunakan untuk menurunkan batas DAS, jaringan sungai, bentuk dan luas DAS.

Pra-pengolahan data dilakukan untuk data debit dan hujan. Data debit diurutkan ke dalam 2 kolom (tanggal, data). Selanjutnya disimpan dalam file text (*.csv, *.txt) sehingga dapat diakses oleh modul BFI. Pemisahan baseflow dari hidrograf dilakukan menggunakan modul modul BFI, di atas platform Hidrooffice 2012 (Gregor, 2012, 2015). Preparasi input data, pengolahan, analisis dan interpretasi terhadap data debit dan hujan dilakukan di atas PC/Laptop, menggunakan perangkat lunak: *Excel/Calc*, dan *HydrOffice 2012* (Gregor, 2012, 2015). Perangkat lunak GIS digunakan untuk mengolah data DEM, membuat jaringan sungai dan batas DAS.

2.3 Tahap pelaksanaan

2.3.1 Analisis karakteristik hidrologi DAS

Data debit dan hujan harian digunakan untuk menggambarkan karakteristik hidrologi DAS. Analisis statistik dilakukan terhadap data debit harian dan hujan harian menggunakan perangkat lunak RAP (Marsh, 2004) dan HydroOffice (Gregor 2012), sebagai berikut:

- Menghitung nilai statistik ringkasan, yang mencakup nilai: maksimum (Max), percentile(P10, ... P90),

rerata (Mean), median (MED). Nilai maksimum menunjukkan aliran maksimum selama periode rekaman. Mean atau debit rerata menunjukkan nilai rerata debit harian selama periode rekaman dan menunjukkan ketersediaan air dalam aliran sungai setiap harinya. Median adalah nilai tengah dari semua data yang terekam (nilai yang frekuensinya lebih dari 50%).

- Menghitung nilai distribusi statistik yang mencakup: *Standard Deviation (SD)*, *Coefficient of variation (CV)*, *Kemiringan atau Skewness (skew = mean/median)*, *variability (VAR)*, *S log*, dan *Lanes Variability Index (Lane)*. *Skewness (Skw)* menyatakan seberapa jauh perbedaan antara mean dan median. Variabilitas (variability) didasarkan pada nilai median. VAR = (range nilai)/(nilai median). *Range* ditentukan oleh pengguna dengan ukuran 5 percentile dari aliran, RAP memberikan nilai default setting untuk range adalah selisih antara nilai percentile 10 dan percentile 90. *Standard deviation of the log of daily flows (S_Log)* adalah perkiraan standar deviasi dari logaritma (basis 10) debit harian. *S log* digunakan untuk mengurangi tingkat kecondongan. *S log* dapat digunakan untuk mengukur tingkat perubahan distribusi debit harian. *Lanes variability index (Lanes)* digambarkan sebagai standar deviasi dari logaritma dari P5, P15, P25, ..., P85 dan P95.
- Menghitung nilai percentile P5, P10, P15, P20, ..., P85, P95, dan P100 dari rekaman data debit dan hujan harian yang ada untuk selanjutnya membuat Kurva Durasi Aliran (KDA) atau *flow duration curve (FDC)* (Indarto et. al, 2013) untuk tiap DAS sesuai kebutuhan. Persentil 10 dan 90 adalah ukuran yang membagi sekelompok nilai menjadi 100 bagian yang sama, nilai ini dapat menentukan posisi persentil 10 dan 90. Visualisasi KDA dilakukan menggunakan Excel.
- Menghitung indek variabilitas aliran (*flow-variability-index*) atau kemiringan KDA menggunakan rumus :

$$S_{KDA} = \frac{\ln(Q_{33\%}) - \ln(Q_{66\%})}{(0,66 - 0,33)} \quad (7)$$

dimana :

S_{KDA} = kemiringan grafik KDA,

$Q_{33\%}$ = besarnya debit pada percentil 33%, dan

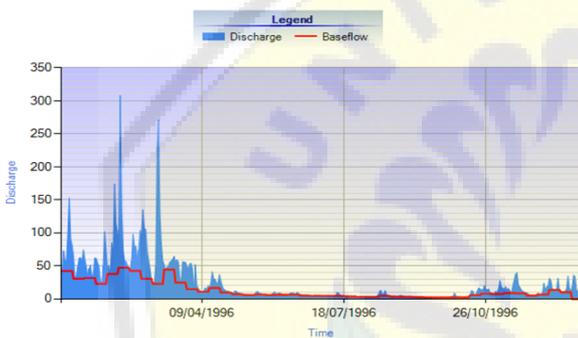
$Q_{66\%}$ = nilai debit pada percentil 66%.

Salah satu cara menghitung kemiringan grafik KDA (SFDC) adalah dengan menghitung kemiringan grafik pada quantil ke 33 (Q_{33}) dan ke 66 (Q_{66}), dengan alasan bahwa pada ruas tersebut grafik KDA menunjukkan bagian yang linear. Kemiringan grafik yang curam menunjukkan regim aliran yang sangat bervariasi, sementara nilai kemiringan grafik pada ruas ini yang landai, menunjukkan regim atau pola aliran yang cukup stabil sepanjang tahun. Kestabilan regim aliran dapat dihasilkan dari kombinasi kejadian hujan yang terdistribusi

merata ke semua bagian DAS dan terjadi hampir merata sepanjang tahun. Tidak ada batas ekstrim jumlah curah hujan per musim. Kemiringan grafik yang cukup landai juga menunjukkan kontribusi aliran air tanah (*groundwater*) yang cukup signifikan (Indarto, 2016).

2.3.2 Kalibrasi

Kalibrasi dilakukan pada setiap sub-DAS secara terpisah. Proses kalibrasi dilakukan pada bulan kering atau musim kemarau, dalam kasus ini dipilih periode antara bulan Juli sd September. Kalibrasi dilakukan secara manual yaitu dengan menaikkan dan menurunkan nilai parameter (α , c , k , N , dan f) sampai menghasilkan aliran dasar yang sesuai untuk tiap tahunnya. Penentuan parameter akan dihentikan apabila grafik debit terukur (garis merah) pada bulan kering berimpit dengan grafik luasan (biru) (gambar 5).



Gambar 5. Contoh proses kalibrasi menggunakan metode digital grafis pada DAS Rawatantu (Indarto et al., 2016)

Kemudian, nilai parameter pada setiap DAS ditentukan dari nilai rerata parameter setiap tahunnya. Proses kalibrasi dilakukan dengan cara yang sama pada DAS yang lain, sehingga didapatkan range nilai parameter tiap DAS dan nilai rata-ratanya. Dalam hal ini, diasumsikan bahwa pada bulan Juli sd September di wilayah tersebut hanya terdapat sedikit hujan atau tidak ada hujan dalam jangka waktu yang cukup lama, sehingga tidak ada aliran permukaan (*quick flow*), tetapi di sungai masih terdapat debit air. Debit air yang kita jumpai di sungai tersebut berasal dari kontribusi aliran bawah tanah yang ke luar kembali ke sungai. Aliran ini kita sebut sebagai aliran dasar (*baseflow*) yang terukur.

Setelah didapatkan nilai parameter optimal maka kalibrasi dilakukan untuk semua tahun yang tersedia dan hasil perhitungan aliran dasar (*baseflow terhitung*) dibandingkan dengan debit total (terukur) untuk periode bulan juli sd september pada semua tahun yang tersedia. Hasil perbandingan ini dievaluasi menggunakan uji statistik *Root Mean Square Error* (RMSE) sebagai berikut:

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum(Q_M - Q_0)^2}}{n} \quad (8)$$

Keterangan:

Q_M : debit aliran dasar (baseflow) terhitung

Q_0 : debit terukur (debit baseflow terukur)

n : jumlah sampel

2.3.3 Validasi : Nilai parameter sub-DAS Nambangan digunakan untuk ke tiga sub-DAS lainnya

Proses validasi digunakan untuk menguji apakah parameter optimal yang dihasilkan pada proses kalibrasi pada salah satu sub-DAS tersebut, dapat digunakan untuk sub-DAS lain disekitarnya. Sub-DAS Nambangan dipilih sebagai Sub-DAS kalibrasi. Ke tiga sub-DAS lainnya dipilih sebagai sub-DAS untuk proses validasi, untuk menguji apakah nilai parameter optimal yang didapat dari sub-DAS kalibrasi dapat digunakan untuk simulasi pemisahan aliran dasar dari hidrograf pada sub-DAS lain. Penentuan sub-DAS Nambangan sebagai sub-DAS kalibrasi didasarkan pada ketersediaan data debit yang cukup lengkap. Selanjutnya, dibandingkan nilai debit aliran dasar yang terhitung pada setiap sub-DAS Validasi (untuk periode juli sd september pada semua tahun) dengan nilai debit total terukur di Sungai. Perbandingan menghasilkan nilai RMSE sub-DAS validasi. Terakhir, nilai RMSE sub-DAS validasi dibandingkan dengan RMSE Sub-DAS Kalibrasi untuk mengevaluasi kinerja ke 9 metode pemisahan hidrograf tersebut.

2.3.4 Visualisasi KDA

Visualisasi KDA ini dilakukan untuk melihat metode mana yang paling optimal untuk menghasilkan proses pemisahan aliran dasar paling baik. Visualisasi dilakukan dengan memplot baseflow hasil perhitungan dari 9 metode dan dibandingkan dengan kurva debit terukur dalam satu grafik KDA. Metode pemisahan yang berkinerja baik akan menghitung aliran dasar pada bulan Juli sd September mendekati debit terukur (debit total di Sungai), sebaliknya pada musim hujan (misalnya: periode Oktober sd April) maka metode tersebut dapat memisahkan komponen aliran dasar dari debit total.

2.3.5 Visualisasi hidrograf

Visualisasi hidrograf dilakukan dengan memplot kurva aliran dasar terhitung dan kurva debit terukur untuk beberapa periode (kemarau, penghujan, dan periode tahunan). Data hujan juga diplotkan ke dalam grafik hidrograf untuk menunjukkan hubungan antara hujan rerata DAS yang jatuh dan debit total yang terjadi di Sungai.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik hidrologi

Tabel (2) menampilkan karakteristik hidrologi sub-DAS. Debit maksimum sangat bervariasi antar sub-DAS. Debit rerata harian juga relatif bervariasi antara 1,43 m³/detik pada sub-DAS Gandong, 6,96 m³/detik pada sub-DAS Lorok, 7,62 m³/detik pada sub-DAS Ngindeng, dan 16,82 m³/detik pada sub-DAS Nambangan.

Tabel 3. Karakteristik hidrologi ke 4 sub-DAS, hasil analisis data

Debit (m ³ /det)	Nambangan	Gandong	Keang-Ngindeng	Lorok	Rrt	StDev	CV
Maximum	288,00	72,51	407,12	325,31	273,24	142,76	20381,84
Mean	16,82	1,43	7,62	6,96	8,21	6,38	40,67
Median	5,89	0,34	2,88	3,49	3,15	2,28	5,20
Stdev	27,90	4,36	14,83	13,23	15,08	9,71	94,25
Skewness	2,86	4,22	2,64	1,99	2,93	0,94	0,88
Variance	1,65	3,03	1,94	1,90	2,13	0,61	0,38
P10	0,74	0,01	0,02	0,00	0,19	0,37	0,13
P20	1,19	0,05	0,19	0,00	0,36	0,56	0,31
P25	1,60	0,09	0,37	0,10	0,54	0,72	0,52
P30	2,08	0,11	0,59	0,22	0,75	0,91	0,83
P33	2,45	0,14	0,81	0,38	0,95	1,04	1,08
P50	5,89	0,34	2,88	3,49	3,15	2,28	5,20
P66	12,47	0,58	5,92	7,07	6,51	4,88	23,78
P70	14,49	0,66	7,13	8,37	7,66	5,67	32,14
P75	18,00	0,79	8,58	8,78	9,04	7,04	49,54
P80	23,30	1,01	10,59	9,29	11,05	9,20	84,72
P90	48,12	2,96	20,63	15,91	21,91	19,01	361,23
P100	288,00	72,51	407,12	325,31	273,24	142,76	20381,84
V Lane	0,57	0,25	0,51	0,46	0,14	0,02	
S_log	0,53	0,25	0,46	0,43	0,42	0,12	0,01
Slope FDC	4,93	4,31	6,03	8,86	6,03	2,01	4,06

Hujan (mm/hari)	Nambangan	Gandong	Keang-Ngindeng	Lorok	Rrt	StDev	CV
Maksimum	106,00	86,70	148,00	141,00	120,43	29,04	843,06
Mean	8,30	5,70	5,00	5,10	6,03	1,55	2,40
Median	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Std. deviation	13,60	11,47	11,50	12,02	12,15	1,00	1,00
Koefvariance	1,64	2,00	2,30	2,34	2,07	0,32	0,11
Skewness	2,26	2,68	3,80	3,87	3,15	0,81	0,65

Nilai statistik pada tabel (2) menunjukkan bahwa pada prinsipnya debit yang diterima ke empat Sub-DAS relatif berbeda. Tabel (2) bagian bawah menunjukkan hasil statistik ringkas tentang data hujan Sub-DAS. Data hujan diperoleh dari rerata jumlah hujan yang diterima oleh beberapa stasiun yang terletak di hulu outlet Sub-DAS. Tabel (2) menunjukkan hujan rerata yang relatif sama, kecuali pada Sub-DAS Nambangan.

3.2 Hasil kalibrasi pada setiap Sub-DAS

Tabel (3) memuat rentang nilai parameter yang didapatkan dari masing-masing metode. Nilai parameter yang tercantum pada tabel (3) adalah nilai yang diujikan pada tiap Sub-DAS, selama proses *trial & error*, pada periode tahunan. Range nilai parameter hasil *trial* dan *error* sangat beragam yang tergantung pada fluktuasi debit pada masing-masing sub-DAS setiap tahunnya. Fluktuasi kisaran nilai parameter menggambarkan variasi kondisi debit musim kemarau setiap tahunnya. Selanjutnya, tabel (4) memuat nilai parameter optimal untuk masing-masing model. Nilai parameter optimal diperoleh dari nilai rerata parameter tiap tahunnya. Secara umum (tabel 3) metode RDF (*one parameter, two parameter, IHACRES, Chapman, Lyne & Hollick, dan EWMA*) menunjukkan range nilai parameter yang lebih sempit (atau dapat dikatakan lebih stabil), jika dibandingkan dengan metode Grafis (*Local minimum, Fixed interval, dan sliding interval*). Misalnya, range nilai parameter *k* pada one-parameter, two-parameter dan IHACRES berkisar antara 0,90 sd 0,99. Range nilai parameter *k* antara DAS juga relatif seragam antara 0,90 sd 0,99. Demikian juga untuk parameter α , range nilai parameter relatif seragam antar sub-DAS, dengan nilai α antara 0,94 sd 0,95 pada IHACRES. Selanjutnya, nilai α antara: 0,96 sd 0,99 pada *Lyne & Hollick* dan antara 0,0016 sd 0,0018 pada *EWMA*. Beberapa metode

(*Fixed Interval, Sliding Interval, Chapman Algoritma*) menunjukkan nilai range parameter yang relatif lebar pada ke empat sub-DAS. Range nilai parameter pada sub-DAS Gandong relatif berbeda dengan ke tiga (4) sub-DAS lainnya, hal ini disebabkan karena karakteristik data debit yang ada pada sub-DAS Gandong, yang relatif berbeda dengan sub-DAS lainnya.

Tabel 4. Rentang nilai parameter yang diuji

Metode	Parameter	Nambangan	Gandong	Keang-Ngindeng	Lorok
Local Minimum	N	5-9	5-8	5-14	5-9
	f	0,80-0,90	0,79-0,87	0,80-0,90	0,80-0,90
Fixed Interval	N	11-16	3-8	12-15	12-14
Sliding Interval	N	22-27	8-18	23-28	24-27
One parameter	k	0,973-0,990	0,970-0,976	0,98-0,99	0,994-0,998
Two-parameter	k	0,97-0,98	0,90-0,93	0,93-0,95	0,95-0,97
	c	0,04-0,07	0,05-0,06	0,06-0,08	0,05-0,08
IHACRES	k	0,90-0,95	0,91-0,94	0,91-0,95	0,90-0,95
	α	0,93-0,94	0,93-0,94	0,93-0,96	0,93-0,96
	c	0,03-0,05	0,01-0,03	0,03-0,05	0,03-0,05
Chapman	α	0,73-0,87	0,60-0,76	0,70-0,86	0,75-0,86
Lyne & Hollick	α	0,992-0,998	0,94-0,98	0,996-0,999	0,995-0,999
EWMA	α	0,0011-0,0017	0,0012-0,0017	0,0015-0,0019	0,0015-0,0019

Tabel 5. Nilai parameter optimal

Metode	Parameter	Nambangan	Gandong	Keang-Ngindeng	Lorok
Local Minimum Method	N	8	5	8	8
	f	0,9	0,89	0,88	0,9
Fixed Interval Method	N	15	7	14	26
Sliding Interval Method	N	25	15	26	27
One parameter	k	0,981	0,971	0,987	0,996
	k	0,955	0,92	0,935	0,957
Two parameter	c	0,074	0,051	0,064	0,06
	k	0,919	0,93	0,918	0,916
IHACHRES	α	0,942	0,94	0,94	0,95
	c	0,038	0,027	0,038	0,039
Chapman Algorithm	α	0,8	0,657	0,744	0,998
Lyne & Hollick	α	0,994	0,965	0,997	0,997
EWMA	α	0,0016	0,0016	0,0018	0,0018

Secara prinsip metode Grafis (*fixed interval, sliding-interval dan local minimum*) adalah model atau metode konseptual, dimana seharusnya nilai parameter (N dan f) ditentukan berdasarkan rumus sebagaimana konsepnya, tetapi pada penelitian ini nilai parameter N ditentukan secara empiris berdasarkan proses kalibrasi menggunakan data debit terukur yang ada. Range nilai yang relatif lebar adalah hasil kalibrasi secara empiris.

3.3 Hasil validasi

Tabel (5) menampilkan hasil perhitungan statistik nilai RMSE dan koefisien determinasi (r^2) untuk Sub-DAS Nambangan (sebagai Sub-DAS Kalibrasi) dan ke tiga sub-DAS lain (Gandong, Ngindeng, Lorok) sebagai sub-DAS validasi. RMSE mengukur tingkat perbedaan hasil perhitungan (debit terhitung) menggunakan tiap metode terhadap debit terukur di sungai. Perhitungan RMSE menggunakan data bulan Juli sampai dengan September dari tahun 1996-2015. Selanjutnya, koefisien determinasi (r^2) menunjukkan korelasi antara debit terhitung dan terukur yang diperoleh dari *scatter-plot*. Nilai parameter pada ke tiga Sub-DAS validasi (Gandong, Ngindeng

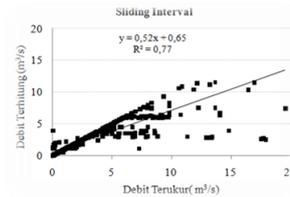
dan Lorok) menggunakan nilai parameter sub-DAS Nambangan.

Tabel 6. Nilai RMSE dan nilai R Square proses validasi

Metode	Sub-Das Kalibrasi		Sub-DAS untuk validasi					
	Nambangan		Gandong		Ngindeng		Lorok	
	RMSE	r ²	RMSE	r ²	RMSE	r ²	RMSE	r ²
One parameter	0,03	0,81	0,02	0,81	0,07	0,70	0,04	0,76
Two parameter	0,03	0,76	0,02	0,79	0,09	0,68	0,04	0,82
IHACRES	0,05	0,76	0,02	0,79	0,08	0,70	0,03	0,81
Chapman Algorithm	0,03	0,81	0,03	0,81	0,09	0,68	0,04	0,70
Lyne & Hollick	0,02	0,89	0,02	0,83	0,38	0,87	0,02	0,90
EWMA	0,02	0,88	0,02	0,83	0,45	0,82	0,02	0,83
Local Minimum	0,05	0,73	0,04	0,57	0,07	0,65	0,03	0,61
Fixed Interval Method	0,06	0,71	0,03	0,79	0,07	0,64	0,06	0,56
Sliding Interval Method	0,05	0,77	0,03	0,79	0,07	0,66	0,06	0,56

Tabel (5) menunjukkan bahwa penerapan nilai parameter sub-DAS Nambangan pada sub-DAS lain, dapat menghasilkan nilai RMSE yang lebih besar atau lebih kecil, tetapi semua hasil perhitungan RMSE mendekati nol (~ 0), baik pada sub-DAS Kalibrasi maupun sub-DAS Validasi. Hal ini menunjukkan bahwa secara prinsip nilai parameter yang sama (nilai parameter yang dikalibrasi sub-DAS Nambangan) dapat digunakan untuk ke tiga sub-DAS lain yang berdekatan.

Selanjutnya, Gambar (6) menampilkan *scatter-plot* dan nilai r² setelah proses kalibrasi di Sub-DAS Nambangan. Hasil Scatter-plot ditampilkan untuk semua metode. *Scatter-plot* menggunakan hasil analisis bulan Juli sampai September, dari tahun 1996 sampai dengan 2015. Nilai (r²) untuk ketiga sub-DAS validasi ditampilkan pada kolom 5,7, dan 9 di tabel (5). Secara umum, nilai (r²) pada semua sub-DAS untuk metode RDF lebih baik daripada metode grafis. Metode RDF menghasilkan (r²) ≥ 0,68 atau mendekati ~ 0,70 untuk semua sub-DAS.



Gambar 6. Contoh Hasil scatter plot untuk sub-DAS Nambangan

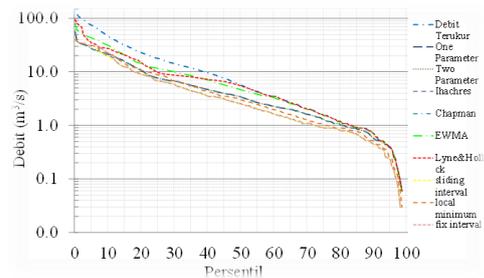
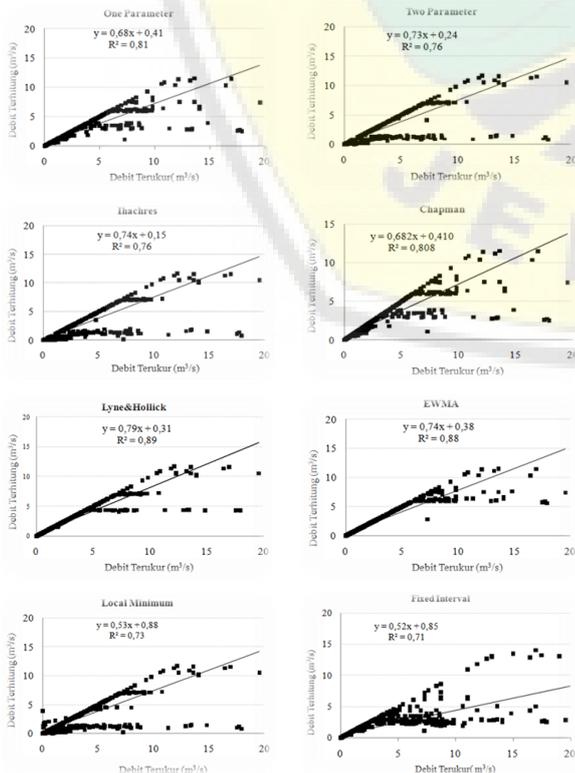
Metode RDF menghitung aliran dasar pada hari ke n, dengan mempertimbangkan data debit total atau baseflow pada hari ke n-1, selisihnya harian, sehingga tingkat kesalahan relatif kecil jika dibandingkan dengan debit total. Pada metode grafis (fixed, local, sliding) selisih perhitungan dengan debit terukur menjadi lebih besar karena pengaruh nilai parameter N, nilai N terkait dengan interval hari. Dimana beberapa hari dalam rentang N yang sama, dihitung nilai baseflow nya sama.

Hasil analisis statistik baik menggunakan RMSE maupun Scatter-plot menunjukkan bahwa beberapa metode filter menghasilkan nilai RMSE yang relatif mendekati 0 dan nilai r² yang mendekati 1, apabila dibandingkan dengan metode grafis. Validasi digunakan untuk mengevaluasi apakah parameter yang dihasilkan pada proses kalibrasi di Sub-DAS Nambangan dapat digunakan untuk memisahkan aliran dasar pada ke tiga Sub-DAS lainnya. Hasil validasi diuji dengan RMSE, dan ditampilkan menggunakan kurva durasi aliran (KDA) dan BFI (baseflow index).

3.4 Perbandingan kurva durasi aliran (KDA)

Flow Duration Curve (FDC) atau Kurva durasi aliran (KDA) digunakan untuk merangking semua data yang ada di dalam suatu rentang waktu tersebut dan memplotkannya dengan nilai persentase kemunculannya dari 0% hingga 100%. *FDC* menunjukkan beberapa parameter dalam bentuk kurva hubungan antara debit sungai dan persentase waktu yang menunjukkan proporsi debit yang sama dengan atau lebih dari nilai tertentu (Indarto, 2016).

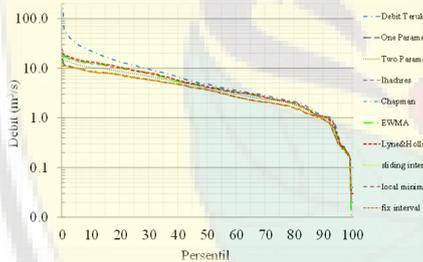
Gambar (7) sampai gambar (10) menampilkan grafik perbandingan KDA yang dihasilkan dari ke 9 algoritma yang diuji dengan KDA debit terukur untuk kasus sub-DAS Nambangan (gambar 7), sub-DAS Keang-Ngindeng (gambar 8), sub-DAS Gandong (gambar 9) dan sub-DAS Lorok (Gambar 10).



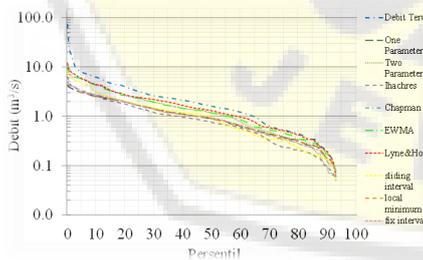
Gambar 7. Grafik KDA pada sub-DAS Nambangan periode panjang 1996-2015

Grafik menunjukkan bahwa semua KDA dari ke 9 algoritma berimpit dengan KDA debit terukur antara percentil 80 sampai dengan 100. Hal ini menunjukkan bahwa pada debit kecil, perbedaan antara debit terhitung oleh 9 algoritma dan debit terukur di sungai relatif tidak signifikan. Debit terhitung menunjukkan aliran dasar atau baseflow, sedangkan debit terukur menunjukkan total flow. Total flow = *baseflow* + *quick flow*. Hal ini berarti bahwa pada kejadian debit kecil (antara percentile 90 sd 100) atau debit pada musim kemarau maka tidak ada perbedaan antara *total flow* dengan *baseflow*, karena porsi dari *quick flow* relatif tidak ada. Hal yang relatif sama ditunjukkan pada ke tiga sub-DAS lainnya (gambar 8, 9 dan 10).

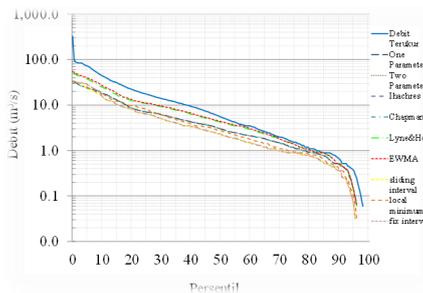
Secara kuantitatif selisih perhitungan debit terukur dan terhitung sudah dinyatakan dengan perhitungan RMSE dan r^2 pada penjelasan sebelumnya. Namun demikian, baik menurut perhitungan (RMSE dan r^2) maupun secara kualitatif (visualisasi KDA) sangat sulit untuk menghasilkan perhitungan yang mirip 100%, karena pada prinsipnya apa yang kita lakukan dalam proses pemodelan adalah pendekatan. Benar bahwa pada saat musim kemarau (dimana kalibrasi model dilakukan) relatif tidak ada hujan dan hakekatnya debit di sungai berasal dari kontribusi aliran dasar, tetapi perlu diingat bahwa kondisi riil di dalam DAS sangatlah kompleks.



Gambar 8. Grafik FDC pada SUB-DAS Keang-Ngindeng periode panjang 1996-2015



Gambar 9. Grafik FDC pada SUB-DAS Gandong periode panjang 1996-2015



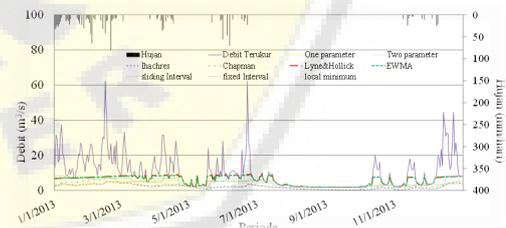
Gambar 10. Grafik FDC pada SUB-DAS Lorok periode panjang 1996-2015

Ada proses pengambilan air untuk irigasi dan keperluan lainnya yang tidak dapat dihitung sepenuhnya. Hal ini juga tergantung pada fluktuasi aliran dasar, yang spesifik untuk tiap DAS. Pada gambar 8, misalnya, grafik KDA untuk semua metode sangat berimpit dengan debit terukur-nya (pada range percentil antara 85 sampai dengan 100).

Selanjutnya, pada gambar (7) sampai gambar (10), distribusi kejadian debit besar (debit banjir) atau debit pada puncak musim penghujan dapat dilihat pada grafik di segmen kiri-atas. Segmen tengah KDA menunjukkan frekuensi kejadian debit yang sedang dan segment kiri-bawah KDA menunjukkan daerah frekuensi kejadian debit kecil. Metode pemisahan aliran dasar yang dapat bekerja dengan baik akan menghasilkan grafik yang berimpit antara debit terukur dengan debit terhitungnya pada segmen kanan-bawah. Sebaliknya, pada segmen kiri-atas (zona debit besar) maka algoritma pemisahan yang bekerja dengan baik akan menunjukkan perbedaan yang signifikan dengan debit terukur. Pada gambar (6) sd (9) kurva paling atas adalah debit terukur, terlihat adanya perbedaan yang mencolok antara debit terukur dengan debit terhitung yang dihasilkan dari ke 9 algoritma. Secara visual dengan melihat grafik KDA, metode *Lyne & Hollick* dan *EWMA* menunjukkan kinerja yang paling baik. Ke dua metode dapat memisahkan dengan baik debit besar (debit pada saat musim penghujan), tetapi relatif berimpit pada daerah debit kecil (debit pada saat musim kemarau).

3.5 Visualisasi hidrograf

Cara lain untuk menunjukkan kinerja algoritma pemisahan adalah dengan memplot aliran total (debit terukur) dan aliran dasar (debit terhitung) hasil pemisahan oleh ke 9 algoritma dalam suatu grafik hidrograf. **Gambar (11)** menunjukkan plot hidrograf debit terhitung dan debit terukur. Sampel grafik di zoom untuk periode 01 Januari sd 31 Desember 2013 pada kasus sub-DAS Nambangan.



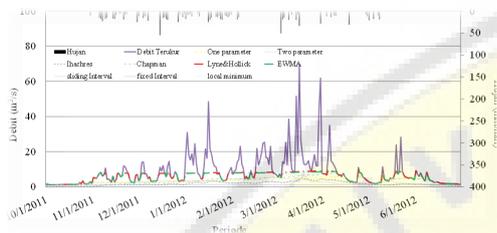
Gambar 11. Hidrograf debit total (debit terukur) dan aliran dasar (terhitung) pada SUB-DAS Nambangan.

Terlihat dari grafik pada **Gambar (10)** bahwa ke 9 algoritma pemisahan yang digunakan dapat memisahkan aliran dasar dari debit total-nya. Hal ini terlihat pada periode puncak-puncak musim penghujan. Selanjutnya, hasil pemisahan aliran ini, dapat digunakan untuk memperkirakan berapa besarnya potensi debit di musim penghujan (yang dapat dipanen atau yang dapat menimbulkan banjir).

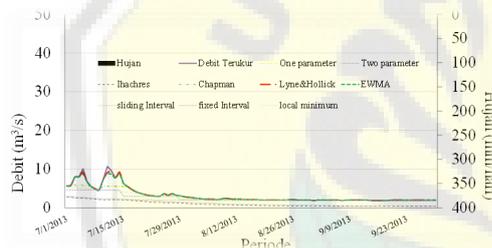
Gambar (12) menunjukkan hidrograf hasil pemisahan pada periode yang lebih pendek, zoom untuk musim penghujan bulan oktober 2011 sampai dengan Juni 2012. Selanjutnya, **Gambar (13)** menunjukkan hidrograf

hasil pemisahan aliran dasar pada periode musim kemarau (zoom untuk bulan Juli sampai dengan September 2013).

Dapat disimpulkan dari Gambar (11) sampai dengan Gambar (13) bahwa pada prinsipnya semua metode yang digunakan dalam penelitian ini dapat memisahkan aliran dasar dari debit total-nya pada musim penghujan. Namun demikian beberapa metode menghitung aliran dasar yang terlalu rendah pada musim penghujan maupun musim kemarau dan sebagian metode menghitung aliran dasar terlalu tinggi.



Gambar 12. Perbandingan hidrograf aliran dasar (terhitung) dan debit terukur pada Sub-DAS Nambangan, periode musim hujan.



Gambar 13. Perbandingan hidrograf aliran dasar (terhitung) dan debit terukur pada Sub-DAS Nambangan, periode musim kemarau.

4. Kesimpulan

1. Aliran dasar relatif tidak terukur, namun perkiraan besarnya aliran dasar yang terjadi dari suatu seri data debit sangat bermanfaat untuk pengelolaan sumberdaya air baik pada musim kemarau ataupun musim penghujan. Penelitian ini menunjukkan aplikasi praktis dan pengujian 9 algoritma untuk memisahkan aliran dasar dari debit total di sungai.
2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada prinsipnya semua algoritma dapat memisahkan aliran dasar dari debit total-nya. Namun demikian, algoritma Lyne & Hollick and EWMA menghasilkan kinerja yang lebih baik dari ke tujuh algoritma lainnya. Nilai rerata RMSE = 0,036 dan $R^2=0,87$ untuk metode Lyne & Hollick. Kinerja EWMA ditunjukkan oleh nilai rerata RMSE = 0,041 and $R^2= 0,83$.
3. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa nilai parameter yang dikalibrasi pada suatu DAS (sub-DAS kalibrasi), dapat digunakan untuk menghitung aliran dasar pada lain (sub-DAS Validasi) yang berdekatan. Hal ini dapat berlaku karena ke empat sub-DAS yang digunakan dalam penelitian ini, meskipun berbeda karakteristiknya (fisik, hidrologi)

tetapi masih dalam satu wilayah dimana karakteristik iklim sama.

4. Nilai parameter yang dihasilkan pada penelitian ini, dapat digunakan untuk memperkirakan aliran dasar pada sub-DAS lain di wilayah UPT PSDA Madiun menggunakan metode yang sama.

5. Ucapan Terimakasih

Penelitian ini merupakan bagian dari skim Hibah Kompetensi berjudul “ Pengembangan Indikator untuk klasifikasi DAS dan antisipasi Bencana Hidro-meteorologis di Jawa Timur” tahun anggaran 2016 – 2017. Penelitian tahun 2017 dengan kontrak No 1799/UN25.3.1/LT/2017 periode 25 April sd 30 Oktober 2017. Ucapan terima kasih disampaikan kepada: Dirjen RISBANG kemenristek Dikti, Dinas Pengairan Provinsi Jawa Timur, para mahasiswa PS-TEP, dan kepada semua pihak yang telah membantu dalam penelitian ini.

Referensi

- Brodie, R., and Hostetler, S., 2007, *An overview of tools for assessing groundwater-surface water connectivity*. Bureau of Rural Sciences, Canberra. ross.s.brodie@brs.gov.au.
- Boughton, W.C., 1993, *A hydrograph-based model for estimating water yield of ungauged catchments*, Institute of Engineers Australia National Conference, Publ. 93/14, 317-324
- Chapman, T.G., 1991, *Comment on evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses*, by RJ Nathan and TA McMahon. *Water Resources Research*, 27(7), 1783-1784
- Chapman T.G., and Maxwell A.I., 1996, *Baseflow separation – comparison of numerical methods with tracer experiments*. Institute Engineers Australia National Conference, Publ. 96/05, 539-545.
- Chapman, T., 1999, *A Comparison Of Algorithms For Streamflow Recession And Baseflow Separation Hydrological Processes*. Australia: Institute of Engineers Australia. Vol. 13: 57-63.
- Eckhardt, K., 2005, *How to construct recursive digital filters for baseflow separation*, *Hydrological Processes* 19, 507-515.
- Eckhardt, K., 2008, *A comparison of base flow indices, which were calculated with seven different base flow separation methods*, *J. Hydrol.*, 352, 168–173.
- Furey, P. R., 2003, *Tests of Two Physically Based Filters for Base Flow Separation*, *Water Resources Research* 39 (10), doi:10.1029/2002WR001621.
- Gonzales, A. L., Nonner, J., Heijckers, J., and Uhlenbrook, S., 2009, *Comparison of different base flow separation methods in a lowland Catchment*.

- Hydrol. Earth Syst. Sci., 13, 2055–2068, 2009. www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/2055/2009/.
- Gregor, M., 2012, *Hydrooffice User Manual version 2012*. <http://hydrooffice.org>
- Gregor, M., 2015, *Hydrooffice User Manual version 2015*. <http://hydrooffice.org>
- Hall, F. R., 1968, *Baseflow recessions – a review*. Water Resources Research 4(5), 973-983
- Indarto, Suhardjo W., Agung P. S. 2013. Physical properties and flow Duration Curves of 15 Watersheds in East Java. Agritech. Vol 33, No. 4, November 2013.
- Indarto Indarto, Elida Novita, Sri Wahyuningsih, 2016, Preliminary Study on Baseflow Separation at Watersheds in East Java Regions. Agriculture and Agricultural Science Procedia, Volume 9, 2016, Pages 538-550. DOI: 10.1016/j.aaspro.2016.02.174.
- Indarto, 2016, Hidrologi – Metode Analisis dan tool untuk interpretasi Hidrograf Aliran Sungai, PT Bumi Aksara.
- Jakeman, A.J. and Hornberger, G.M., 1993, *How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model*. Water Resources Research 29, pp2637-2649.
- Lyne, V. , and Hollick, M., 1979, *Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling*. Institute of Engineers Australia National Conference, Publ. 79/10, 89-93.
- Linsley, R.K., Kohler M.A., Paulhus J.L.H., Wallace J.S., 1958, Hydrology for engineers. McGraw Hill, New York.
- Marsh, N., 2004, Time Series Analysis Module: River Analysis Package, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Melbourne Australia: Monash University.
- Mau, D.P., and Winter, T.C., 1997, *Estimating ground-water recharge from streamflow hydrographs for a small mountain watershed in a temperate humid climate*. New Hampshire, USA. Ground Water, 35(2), 291-304
- Murphy, R., Graszkwicz, Z., Hill, P., Neal, B., Nathan, R., Ladson. To., 2009. *Australian rainfall and runoff revision*. Project 7: baseflow for catchment simulation. Stage 1 report – volume 1 - selection of approach. AR&R Report Number, P7/S1/004, ISBN: 978-085825-9218, Engineers Australia, Engineering House 11, National Circuit, Barton ACT 2600.
- Nathan R.J. and McMahon T.A., 1990a. *Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis*. Water Resources Publications : USA. 26(7):1465-1473.
- Nathan R.J. and McMahon T.A., 1990b, *Estimating low flow characteristics in ungauged catchments*. Water Res. Manage. 6 85-100.
- Pettyjohn, W.A., and Henning R., 1979, Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio, Ohio State University Water Resources Centre Project Completion Report No 552, 323pp.
- Priyanto, I.D., 2015, Studi Baseflow Menggunakan Perbandingan Metode Grafis dan Metode RDF (Recursive Digital Filter) (Studi Kasus di Wilayah UPT PSDA Pasuruan). URI: <http://repository.unej.ac.id/123456789/64992>
- Puspitasari, N.D., 2015, Studi Baseflow Menggunakan Perbandingan Metode Grafis dan Metode RDF (Recursive Digital Filter) (Studi Kasus di Wilayah UPT PSDA Bondowoso URI: <http://repository.unej.ac.id/123456789/65381>. Date: 2015-12-01.
- Ratnasari, D. 2015. Study baseflow menggunakan perbandingan 6 metode RDF (*Recursive Digital Filter*) (Studi Kasus di DAS Wilayah UPT PSDA Bondowoso. URI: <http://repository.unej.ac.id/123456789/72841>. Date: 2016-01-28.
- Sloto, R.A., dan Crouse, M.Y., 1996, A Computer Program For Streamflow Hydrograph Separation And Analysis. U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations. Report 96-4040, Pennsylvania, 46 p.
- Smakhtin V.U., 2001a, *Estimating continuous monthly baseflow time series and their possible applications in the context of the ecological reserve*. Water SA 27(2) 213-217.
- Smakhtin, V.U., 2001b, *Low flow hydrology: a review*. J Hydrology 240, 147-186.
- Tallaksen, L., M., 1995, *A review of baseflow recession analysis*. Journal of Hydrology 165:349-370.
- Tallaksen, L., M., Vvan Lanen, H., A., J., van eds., 2004, *Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Developments in Water Science, 48. Amsterdam, Elsevier Science B.V, ISBN 0-444-51688-3, pp. 579.
- Tularam, G. A dan Ilahee, M., 2008, Exponential Smoothing Method of Base Flow Separation And Its Impact on Continuous Loss Estimates. American Journal of Environmental Sciences. Brisbane: Environment Engineering and Technology Griffith University (ENV). Vol. 4 (2): 136-138.

