

ANALISIS MODEL CAMPURAN (*MIXING MODEL*) UNTUK MENENTUKAN SUMBER LIMPASAN DI DALAM DAERAH ALIRAN SUNGAI

Mixing Model Analysis to Define Source Area in Watershed

Nani Heryani¹, Hidayat Pawitan², Yanuar J. Purwanto³, Kasdi Subagyono⁴

ABSTRACT

Hydrometric measurement divided runoff into several components such as surface runoff, interflow, and baseflow. The current research carried out by hydrometric and hydrochemistry measurements to address obtain information about the flow contributors in watershed. End member mixing analysis (EMMA) used to define source area in watershed. This method require hydrochemistry data on event based. The stream chemistry was projected on to a subspace mixing (triangular space) and well bounded by third source area. To test the validity of EMMA model for the catchment studied, linear regression between predicted and measured of each solute concentration of stream water were performed. The research was conducted at Cakardipa micro watershed, Cisukabirus sub watershed, Upper Ciliwung watershed. Result of the research showed that source area of Cakardipa watershed predicted by end member mixing analysis (EMMA) using Ca and SO₄ tracer were groundwater, soil water, and rain water about 47,3%, 28 %, and 24,7% respectively.

Keywords: hydrochemistry, tracer, *source area*, EMMA.

PENDAHULUAN

Model campuran (*mixing model*) dapat dipergunakan dalam separasi hidrograf secara geokimia, yakni untuk memisahkan komponen runoff pada saat terjadi hujan. Karena kimia air sungai merupakan campuran dari berbagai input sumber aliran (*sources area*), maka identifikasi potensial sumber air yang berkontribusi terhadap kimia air sungai sangat penting. Hal ini memerlukan model campuran secara temporal dan geografis (Genereux dan Hooper, 1993). Pertimbangan untuk menggunakan pendekatan ini adalah bahwa seluruh komponen sumber air bercampur secara konservatif. Percampuran sifat kimia air secara konservatif terjadi karena komponen kimia air yang berasal dari sumber aliran mengalir mengikuti pergerakan air. Kimia air sungai merupakan turunan dari kimia air masing-masing komponen sumber aliran yang mengalir ke sungai, dengan prinsip bahwa air dapat membawa unsur atau komponen kimia air dari masing-masing sumber aliran tersebut.

Salah satu metode yang digunakan dalam mempelajari *mixing model* dalam hidrologi adalah metode EMMA (*End Member Mixing Analysis*). End member menggambarkan karakteristik air yang teridentifikasi dari unit hidrologi atau geologi

¹ Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi, Jl. Tentara Pelajar No. 1A Kampus Penelitian Pertanian Cimanggu, Bogor. 16110, Telp. 0251-8312760

²Laboratorium Hidrometeorologi, FMIPA IPB, Kampus IPB Darmaga Bogor

³Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, FATETA IPB, Kampus IPB Darmaga Bogor

⁴Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian (BBP2TP), Jl.Tentara Pelajar No.10 Kampus Penelitian Pertanian Cimanggu, Bogor 16114

yang berbeda. End member yang berbeda biasanya memiliki pertanda kimia yang berbeda. Penelitian ini menggunakan model campuran yang terdiri dari 3 komponen sumber aliran (*three end member*) dengan dua perunut konservatif. Ada beberapa asumsi jika menggunakan mixing model dalam pemodelan hidrologi, yaitu: a) perunutnya merupakan perunut konservatif (bukan merupakan reaksi kimia), b) seluruh komponen memiliki konsentrasi yang berbeda nyata paling tidak dengan satu perunut, c) Konsentrasi perunut dalam seluruh komponen secara temporal (*temporally*) konstan atau keragamannya diketahui, dan d) komponen yang tidak terukur memiliki konsentrasi perunut yang sama atau tidak berkontribusi secara nyata.

Model campuran dari perspektif geometrik memiliki karakter sebagai berikut: 1) untuk model dengan 2 perunut dan 3 komponen, mixing sub ruang ditentukan oleh 2 perunut, 2) jika diplotkan, seluruh contoh aliran harus terikat oleh segitiga 3 komponen sumber limpasan, 3) jika tidak terikat dengan baik, berarti perunut tidak konservatif atau komponen tidak terkarakterisasi dengan baik.

Beberapa peneliti telah mengidentifikasi sumber runoff secara spasial di dalam DAS melalui penggunaan tool seperti EMMA, pemisahan hidrograf berdasarkan perunut, dan analisis hidrometrik (Bernal et al 2006, Burns et al 2001, Hangen et al 2001, McGlynn and McDonnell 2003, Subagyono et al 2005, Wenninger et al 2004). Penelitian-penelitian tersebut telah berhasil mengkuantifikasi sejumlah limpasan dari sumber (*source*) yang berbeda dan juga menunjukkan kontribusi yang berbeda dengan kondisi kelembaban yang berbeda di dalam DAS. Identifikasi sumber runoff dari

unit DAS penting karena : a) membantu dalam mengembangkan model pengelolaan DAS yang lebih realistic, b) membantu mengidentifikasi sumber polutan, c) membantu evaluasi yang lebih baik tentang pengaruh perubahan penggunaan lahan terhadap kualitas air.

BAHAN DAN METODE

Tempat dan waktu Penelitian

Penelitian lapang dilakukan pada bulan Mei 2008 sampai Juni 2010 di DAS mikro Cakardipa Sub DAS Cisukabirus, DAS Ciliwung Hulu. Analisis tanah dan air dilakukan di laboratorium Balai Penelitian Tanah, sedangkan pemetaan dilakukan di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi.

Bahan dan Alat

Bahan dalam penelitian ini yaitu peta rupabumi skala 1:25.000, peta geologi skala 1:100.000, dan peta geohidrologi skala 1:250.000. Sedangkan peralatan yang digunakan yaitu: data tinggi muka air (debit); sifat fisik, kimia, dan mineral tanah; alat pengukur penetapan kedalaman air tanah; piezometer, tensiometer, *suction sampler* (pompa pengambil air tanah dan air bumi); botol untuk menyimpan sampel air; ring sampel; GPS (*Global Positioning System*); AWLR(*Automatic Water Level Recorder*); AWS (*Automatic Weather Station*); *Current meter*; bor tanah; dan seperangkat komputer, plotter, dan digitizer; software Arc-View ver. 3.3.

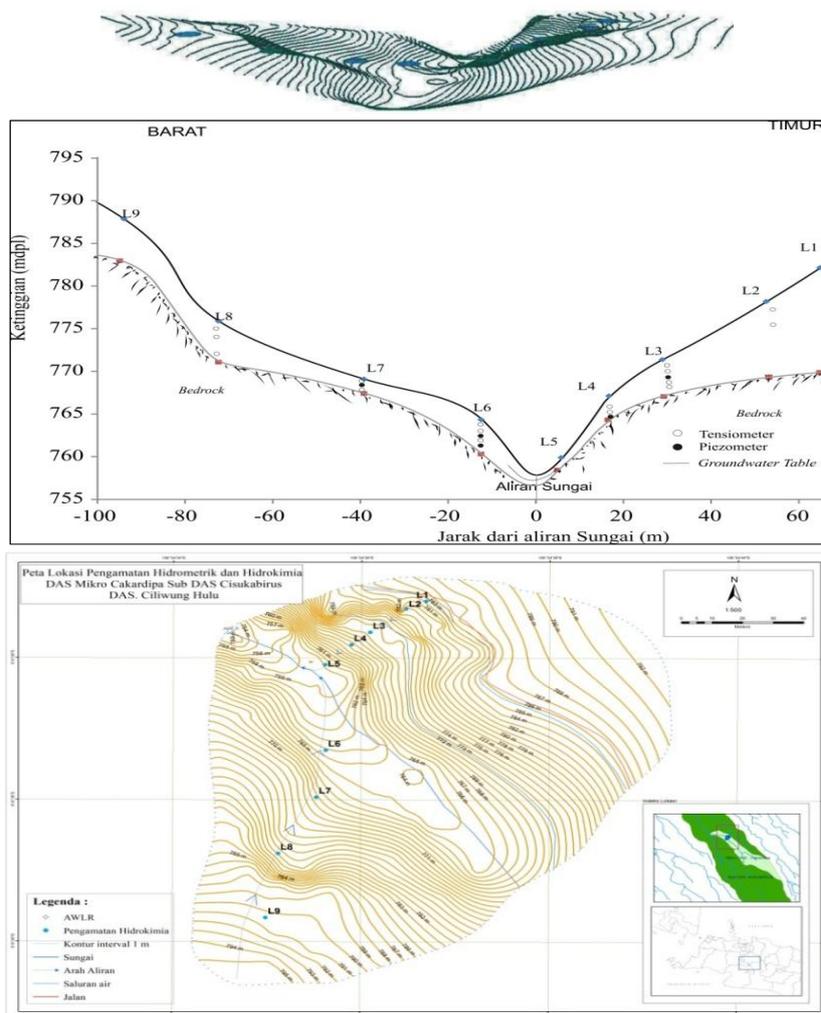
Metodologi

Pengamatan Kedalaman Batuan

Pengamatan kedalaman tanah dan batuan (*bedrock*) diperlukan sebagai dasar dalam menentukan kedalaman pemasangan jaringan peralatan pengamat hidrokimia (piezometer, tensiometer, dan *suction sampler*). Untuk menentukan

kedalaman batuan dilakukan pengeboran tanah pada setiap kedalaman 50 cm sampai 1 meter untuk melihat karakteristik dari tanah dan batumannya. Dari 10 titik pengamatan kedalaman batuan telah dilakukan pemasangan jaringan pengamatan hidrokimia berupa piezometer, tensiometer, dan *suction sampler* di 9 titik pengamatan. Pemasangan peralatan dilakukan pada suatu transek yang ditetapkan sesuai dengan jalur aliran air di lahan kering berlereng (*hillslope*) masing-masing, sebanyak 5 titik pada lereng arah timur dan 4 titik pada lereng arah barat dari sungai di DAS mikro

Cakardipa. Pemasangan alat pengamatan hidrokimia secara vertikal dan spasial disajikan pada Gambar 1. Jaringan alat pengamatan hidrokimia seluruhnya berjumlah 68 buah, terdiri dari 25 tensiometer, 16 piezometer, dan 27 *suction sampler* yang dipasang pada berbagai kedalaman. Tensiometer dipergunakan untuk mengukur potensial air tanah, piezometer digunakan untuk mengukur kedalaman muka air tanah dan pengambilan contoh air bumi, sedangkan *suction sampler* dipergunakan untuk menyedot sampel air tanah.



Gambar 1. Lokasi pengamatan batuan untuk pemasangan jaringan pengamatan hidrokimia secara vertikal(atas) dan pemasangan peralatan pengamatan secara spasial di lereng sebelah barat dan timur DAS mikro Cakardipa (bawah).

Penentuan Sumber Aliran melalui Metode End Member Mixing Analysis (EMMA)

EMMA dilakukan sesuai dengan prosedur yang telah digunakan oleh Hooper (2001) dan Christophersen dan Hooper (1992) serta Burns *et al.* (2001) sebagai berikut:

1. Menyusun data set air bumi (groundwater), air tanah (soil water), air hujan, aliran permukaan, air saluran, dan air sungai yang diukur pada periode bulanan dan periode hujan di DAS mikro Cakardipa.

Dari unsur yang dianalisis yaitu: K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , SiO_2 , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , Cl^- , dan HCO_3^- sejumlah 874 contoh, terdapat 9 unsur terpilih yaitu: K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2 , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , dan HCO_3^- sebanyak 497 set data. Set data diberi simbol X yang menggambarkan matriks berukuran $n \times p$ (terdiri dari n contoh dan p pelarut/unsur terpilih).

2. Normalisasi data dengan cara mengurangi data konsentrasi unsur dengan rata-rata konsentrasi unsur dan dibagi dengan standar deviasi masing-masing unsur

Matriks X dinormalkan dengan cara membagi (masing-masing data hasil pengamatan dikurangi masing-masing data rata-rata seluruh pengamatan) dengan standar deviasi masing-masing unsur. Matriks hasil standarisasi diberi simbol X^* . Jika \bar{x}_j merupakan rata-rata pengamatan dari masing-masing pelarut dan s_j merupakan standar deviasinya, maka nilai setiap elemen dari matrik yang terstandarisasi adalah:

$$x_{ij}^* = (x_{ij} - \bar{x}_j) / s_j \dots\dots\dots(1)$$

3. Melakukan analisis statistik multivariate dengan menggunakan proyeksi ortogonal dari matrik nilai yang sudah dinormalkan ke dalam

mixing subspace (plot kimia air sungai)

Pada penelitian ini analisis komponen utama dilakukan terhadap data kimia air terpilih seperti pada point (1) dari beberapa sumber aliran. Eigenvectors matriks korelasi diperoleh dengan menggunakan program Minitab Release 14.

V merupakan matriks yang terdiri dari dua baris pertama eigenvectors matriks korelasi menjadi dasar dalam menentukan dimensi sub ruang. Nilai air sungai terproyeksi diperoleh dengan menggandakan eigenvectors dengan nilai pelarut tyang sudah dinormalkan. Nilai air sungai terproyeksi ini akan diplotkan di dalam dimensi sub ruang. Proyeksi ortogonal dari matriks X^* dapat diketahui melalui persamaan :

$$\hat{X}^* = X^*Vt(VVt)^{-1}V \dots\dots\dots(2)$$

\hat{X}^* dapat di normalkan kembali dengan menggandakan kembali dengan standar deviasi dari masing-masing pelarut ditambah dengan rata-ratanya sehingga menjadi \hat{X} . Masing-masing elemen dari matrik ini adalah

$$\hat{x}_{ij} = \hat{x}_{ij}^* \cdot s_j + \bar{x}_j \dots\dots\dots(3)$$

Residu antara nilai pelarut terproyeksi dengan data asli diplot terhadap konsentrasi unsur yang dimonitor melalui persamaan:

$$E = \hat{X} - X \dots\dots\dots(4)$$

Untuk mengetahui fluktuasi data, digunakan juga bias relatif/relative bias (RB) dan relative root mean square error (RRMSE). Bias relatif untuk setiap pelarut (solute) ke j ditentukan melalui persamaan berikut:

$$b_j = \frac{\sum_{k=1}^n (\hat{x}_{kj} - x_{kj})}{\bar{x}_j} \dots\dots\dots(5)$$

Sedangkan RRMSE untuk pelarut ke j ditentukan melalui persamaan berikut:

$$r_j = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_{ij} - x_{ij})^2}}{n \cdot \bar{x}_j} \dots\dots\dots(6)$$

- (1) Untuk menguji bahwa kimia air dari sumber air yang menuju sungai menyebar di dalam plot kimia air sungai, data kimia air sungai diproyeksikan ke dalam mixing subspace (kimia air sungai)
- (2) Data kimia air yang diprediksi dengan EMMA dibandingkan dengan konsentrasi terukur pada saat

pengamatan selama hujan tertentu menggunakan regresi linear

Kontribusi setiap sumber air selama proses limpasan yang diprediksi menggunakan EMMA kemudian dihitung menggunakan metode kesetimbangan massa untuk air dan total unsur sesuai dengan formula sebagai berikut (Hinton *et al.*, 1994):

$$Q_1 = Q_T \frac{[(c_T - c_2)(C_3 - C_2) - (C_2 - C_T)(c_2 - c_3)]}{[(c_1 - c_2)(C_3 - C_2) - (C_2 - C_1)(c_2 - c_3)]} \dots\dots\dots(7)$$

$$Q_2 = Q_T \frac{[(c_T - c_1)(C_3 - C_1) - (C_1 - C_T)(c_1 - c_3)]}{[(c_2 - c_1)(C_3 - C_1) - (C_1 - C_2)(c_1 - c_3)]} \dots\dots\dots(8)$$

Kemudian, Q_3 dihitung sebagai berikut:

$$Q_3 = Q_T \frac{[(c_T - c_2)(C_1 - C_2) - (C_2 - C_T)(c_2 - c_1)]}{[(c_3 - c_2)(C_1 - C_2) - (C_2 - C_3)(c_2 - c_1)]} \dots\dots\dots (9)$$

Q adalah debit: c adalah konsentrasi unsur 1 dan C adalah konsentrasi unsur 2; serta 1, 2, 3, dan T berturut-turut adalah aliran masuk ke sungai dari *sumber aliran 1*, *sumber aliran 2*; *sumber aliran 3*, dan T adalah kombinasi total aliran keluar (*total outflow*).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Multivariate. Setelah menyusun set data dan melakukan normalisasi terhadap data yang ada, tahap selanjutnya adalah analisis multivariate dengan menggunakan analisis komponen utama (PCA: *Principal Component Analysis*). Dalam penelitian ini analisis multivariate dengan menggunakan PCA adalah untuk menguji model campuran aliran kimia air menggunakan solute K, Na, Ca, Mg, SiO₂, SO₄, NO₃, Cl, dan HCO₃ terhadap beberapa sumber limpasan seperti air tanah, air bumi, air sungai, dan air hujan.

Pada Tabel 1 disajikan eigenvalue yang merupakan nilai varian komponen utama. Hasil analisis menunjukkan eigenvalue untuk komponen utama pertama (F1) dan kedua (F2) masing-masing sebesar 5.070 dan 3.001. Eigenvalue kedua komponen utama

mewakili 56.3% dan 33.3% dari seluruh variabilitas. Bila diakumulasikan, kedua komponen utama menyatakan 89.6% dari total variabilitas. Ini berarti apabila kesembilan variabel (K, Na, Ca, Mg, Si, SO₄, NO₃, Cl, dan HCO₃) direduksi menjadi 2 variabel, maka kedua variabel baru dapat menjelaskan 89.6% dari total variabilitas kesembilan variabel.

Pada Tabel 2 disajikan korelasi Pearson's, angka-angka positif yang ditulis tebal menunjukkan adanya hubungan yang tinggi antar unsur yang satu dengan yang lainnya. Sebaliknya angka-angka negatif yang ditulis tebal menunjukkan adanya hubungan berbanding terbalik yang tinggi antar unsur yang satu dengan yang lainnya. Kation K dengan SiO₂, Na dengan Mg, Ca dengan Mg dan HCO₃, serta Mg dengan HCO₃ menunjukkan hubungan yang tinggi satu dengan yang lainnya, sedangkan K dengan Cl, Na dengan

SO₄ dan NO₃, Mg dengan SO₄ dan NO₃ memiliki hubungan berbanding terbalik.

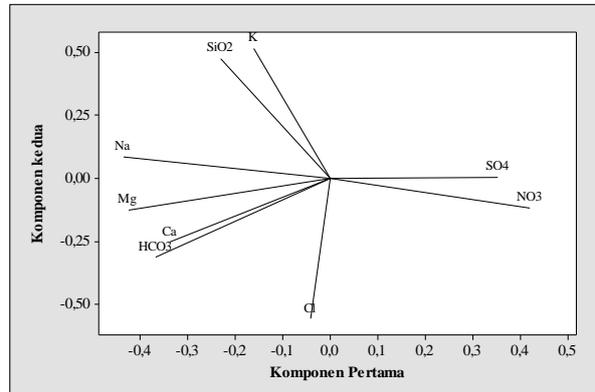
Tabel 1. Hasil eigenvalue dengan sembilan variabel K, Na, Ca, Mg, SiO₂, SO₄, NO₃, dan HCO₃

	F1	F2	F3	F4	F5
Eigenvalue	5.070	3.001	0.661	0.153	0.115
Variabilitas (%)	56.3	33.3	7.3	1.7	1.3
Kumulatif (%)	56.3	89.6	97.0	100	100

Tabel 2 Korelasi Pearson's

Variabel	K	Na	Ca	Mg	SiO ₂	SO ₄	NO ₃	Cl	HCO ₃
K	1								
Na	0,491	1							
Ca	-0,150	0,660	1						
Mg	0,141	0.931	0.792	1					
SiO ₂	0,933	0,638	0,113	0,334	1				
SO ₄	-0,337	-0.771	-0,347	-0.741	-0,273	1			
NO ₃	-0,564	-0.943	-0,641	-0.826	-0,642	0,804	1		
Cl	-0,864	-0,055	0,428	0,298	-0.798	-0,172	-0,115	1	
HCO ₃	-0,213	0.739	0.911	0.923	0,011	-0,576	-0,650	0,589	1

Gambar 2 menunjukkan hubungan faktor 1 dengan faktor 2. Jika variabel satu dengan yang lainnya saling berdekatan berarti nyata berkorelasi positif (r mendekati 1), sedangkan jika ortogonal berarti tidak berkorelasi (r mendekati nol). Jika variabel tertentu terletak berlawanan arah dari pusat, berarti variabel tersebut nyata berkorelasi negatif dengan variabel lainnya (r mendekati -1). Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa SiO₂ dan K, Ca dan HCO₃, SO₄ dan NO₃ memiliki hubungan positif, sedangkan SO₄ dan NO₃ yang letaknya bersebrangan dari titik pusat menunjukkan adanya korelasi negatif dengan Na, Mg, Ca, dan HCO₃.



Gambar 2. Grafik hubungan antara faktor 1 dan faktor 2 untuk melukiskan keeratan antar unsur hidrokimia

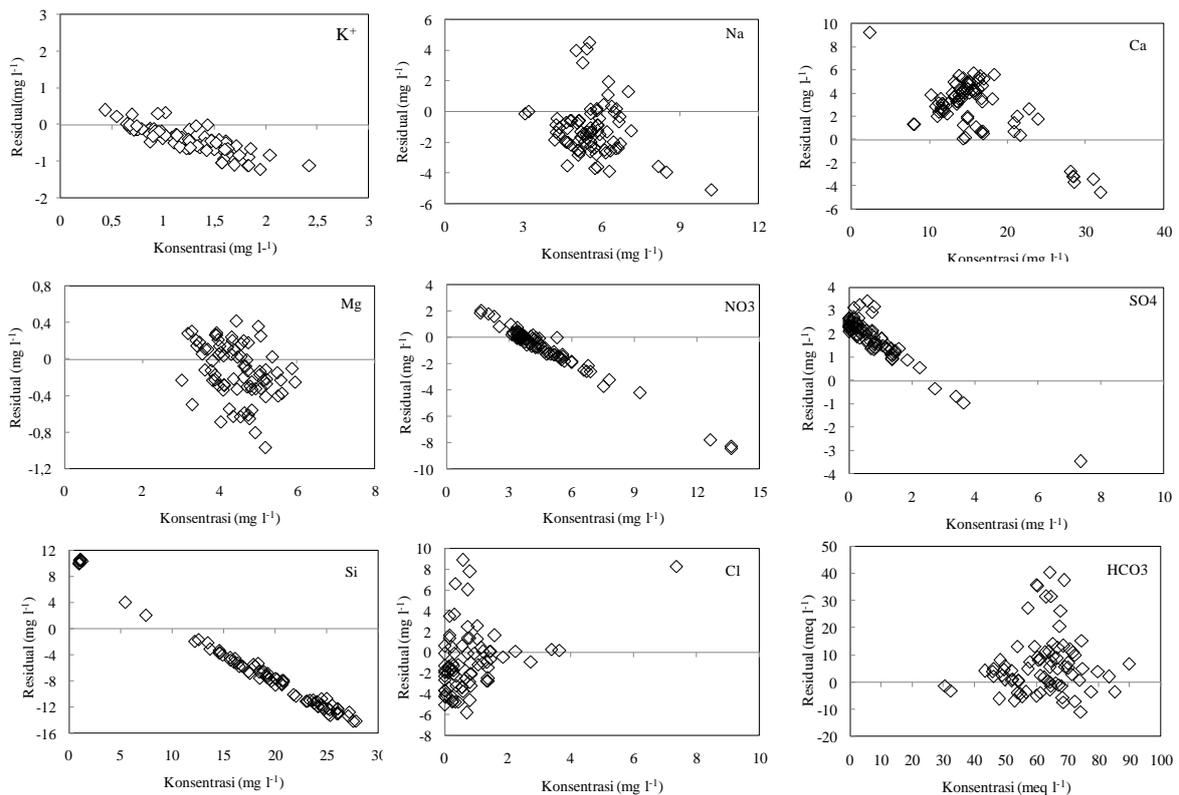
Analisis Campuran (Mixing Model) secara Hidrokimia Untuk Menentukan Sumber Limpasan. Mixing model dari perspektif geometrik memiliki karakteristik seperti berikut: 1) Untuk model dengan 2 perunut dan 3 komponen misalnya, mixing antara sub ruang ditentukan oleh 2 perunut, 2) Jika

diplotkan, 3 komponen puncak dari segitiga dan seluruh contoh aliran harus terikat oleh segitiga, 3) Jika tidak terikat dengan baik, berarti perunut tidak konservatif.

Untuk menguji bahwa kimia air dari sumber air yang menuju sungai menyebar di dalam plot kimia air

sungai, data kimia air sungai diproyeksikan ke dalam *mixing subspace*/subruang (ruang segitiga yang terikat oleh ketiga end member/sumber limpasan). Pencampuran hidrokimia dapat terjadi dengan baik apabila data hidrokimia sungai terikat dengan baik dalam tiga ikatan end member. Menurut Hooper (2001), dengan menggunakan model regresi,

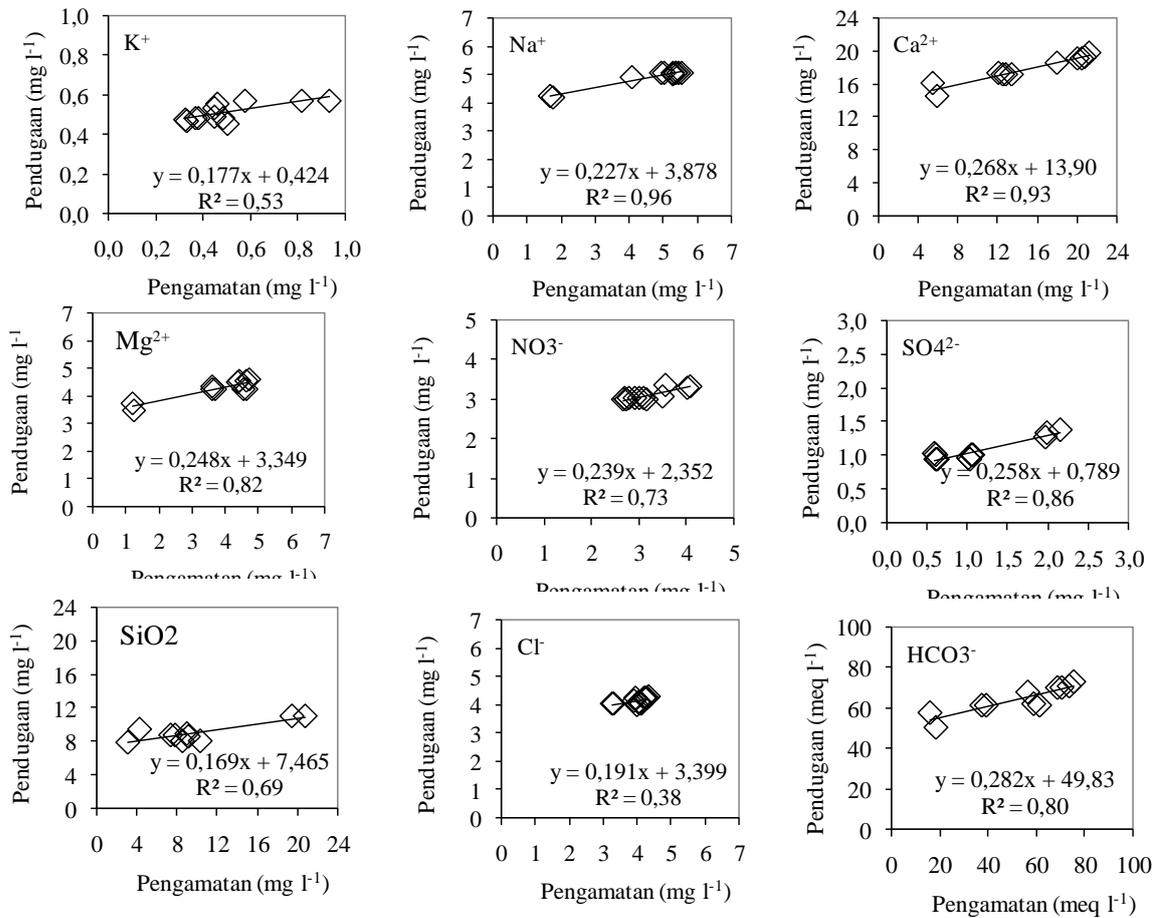
pencampuran yang baik di dalam subruang ditunjukkan oleh pola acak dari residual terhadap konsentrasi masing-masing unsurnya. Plot residual konsentrasi setiap unsur hidrokimia terhadap konsentrasi air sungai (Gambar 3) menunjukkan adanya pola acak pada Na, Ca, Mg, dan HCO₃, hal ini menggambarkan adanya mixing yang baik dalam subruang.



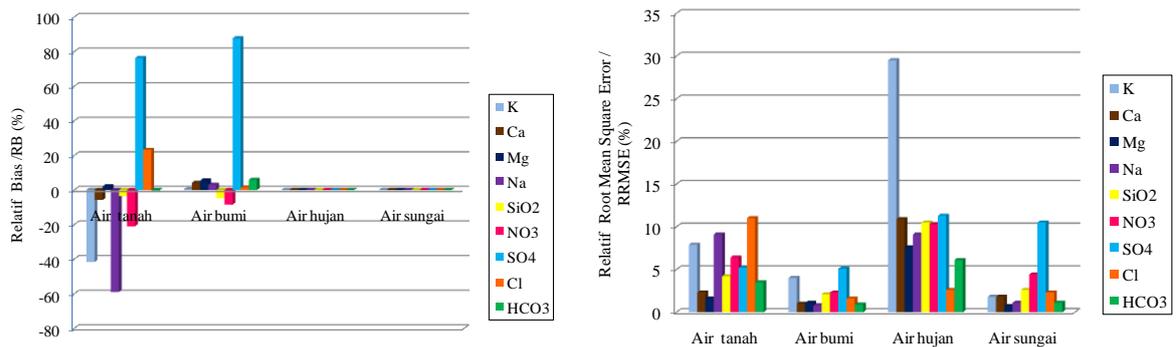
Gambar 3 Plot residual konsentrasi masing-masing unsur terhadap konsentrasi air sungai

Untuk mengetahui validitas EMMA, data kimia air yang diprediksi dengan EMMA dibandingkan dengan konsentrasi terukur pada saat pengamatan selama kejadian hujan dilakukan analisis regresi linier. Hasil pengujian disajikan pada Gambar 4. Dari 9 unsur kimia yang diamati, unsur Na, Ca, Mg, NO₃, SO₄, dan HCO₃ memiliki R² yang tinggi antara hasil pengamatan dan pendugaan berkisar

antara 0.73 sampai 0.96 dengan kemiringan berkisar antara 0.239 sampai 0.282. Nilai R² terbaik dicapai oleh Natrium, sedangkan empat unsur lain yaitu K, SiO₂, dan Cl, memiliki R² yang rendah. Berdasarkan hasil RB dan RRSME (Gambar 5) ketiga sumber area yang diproyeksikan terhadap air sungai sebagai referensi, ternyata air tanah tanah dan air bumi menunjukkan nilai terbaik di dalam sub ruang .



Gambar 4 Konsentrasi hidrokimia hasil pengamatan dan pendugaan berdasarkan EMMA



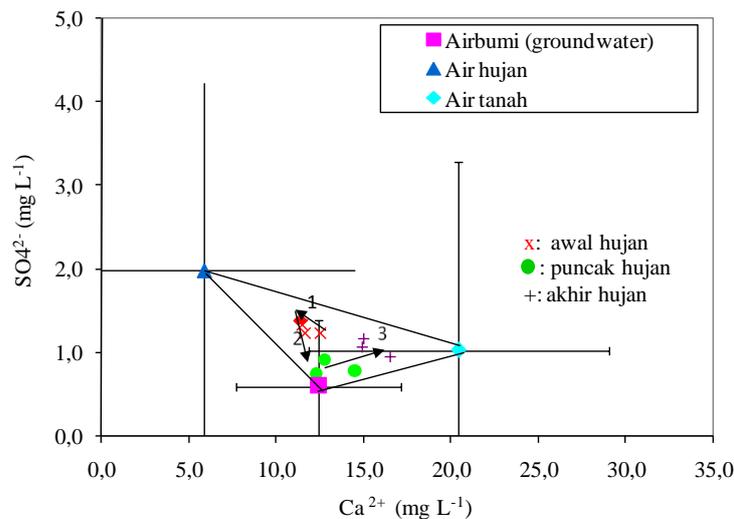
Gambar 5 Hasil analisis statistik relatif bias (RB) dan RRMSE terhadap tiga sumber area yang diproyeksikan terhadap 3 dimensi subruang air sungai.

Untuk melihat lebih jauh end member mana yang dapat mengikat kimia air sungai dengan baik, pengujian dilakukan terhadap episode hujan 14

Pebruari 2010. Gambar 6 menunjukkan diagram campuran (*mixing diagram*) antara Ca dan SO₄ dengan ketiga sumber aliran yang dapat mengikat

aliran sungai dengan baik. Dengan demikian Ca dan SO₄ dapat dipertimbangkan sebagai perunut konservatif pada DAS mikro Cakardipa. Hasil penelitian lain menunjukkan bahwa Ca²⁺ dan SO₄²⁻ dapat digunakan sebagai perunut konservatif dalam analisis *end member mixing* untuk mencirikan jalur aliran air dominan di dalam DAS (Mulholland, 1993). Pada Gambar 6 dapat dilihat, bahwa pada saat awal kejadian hujan (tanda panah no. 1) air sungai bergerak ke arah air hujan, dalam hal ini menunjukkan bahwa kimia air pada air sungai memiliki kemiripan dengan kimia air pada air hujan. Pada saat kurva hidrograf mulai meningkat sampai mencapai puncak hujan (tanda panah no. 2) air sungai bergerak ke arah air bumi, dalam hal ini menunjukkan

bahwa kimia air pada air sungai memiliki kemiripan dengan kimia air pada air bumi. Selanjutnya pada saat kurva hidrogrf menurun atau saat akhir kejadian hujan (tanda panah no. 3) air sungai bergerak ke arah air tanah, dalam hal ini menunjukkan bahwa kimia air pada air sungai memiliki kemiripan dengan kimia air pada air tanah. Dari ilustrasi ini dapat dijelaskan bahwa pada awal kejadian hujan atau pada saat baseflow sumber air di DAS mikro Cakardipa berasal dari air hujan. Pada saat mencapai debit puncak sumber airnya berasal dari air bumi, sedangkan pada saat kurva resesi sumber air berasal dari air tanah. Berdasarkan hasil *end member mixing analysis (EMMA)* menggunakan Ca dan SO₄ ditemukan bahwa sumber aliran sungai adalah dari air bumi, air tanah, dan air hujan.



Gambar 6 Hasil mixing analisis antara Kalsium (Ca) dengan SO₄ pada episode hujan tanggal 14 Februari 2010

Berdasarkan *end member mixing analysis* seperti tersebut di atas dimana sumber aliran (*source area*) yang utama dari DAS mikro Cakardipa yaitu air bumi (*groundwater*), air tanah, dan

air hujan maka kontribusi setiap sumber aliran terhadap aliran sungai dianalisis dari separasi hidrograf menggunakan formula sebagai berikut:

$$Q_{AB} = Q_T \frac{[(C_T - C_{AT})(C_{CH} - C_{AT}) - (C_{AT} - C_T)(C_{AT} - C_{CH})]}{[(C_{AB} - C_{AT})(C_{CH} - C_{AT}) - (C_{AT} - C_{AB})(C_{AT} - C_{CH})]} \dots\dots\dots (10)$$

$$Q_{AT} = Q_T \frac{[(c_T - c_{AB})(c_{CH} - c_{AB}) - (c_{AB} - c_T)(c_{AB} - c_{CH})]}{[(c_{AT} - c_{AB})(c_{CH} - c_{AB}) - (c_{AB} - c_{AT})(c_{AB} - c_{CH})]} \dots\dots\dots(11)$$

$$Q_{CH} = Q_T \frac{[(c_T - c_{AT})(c_{AB} - c_{AT}) - (c_{AT} - c_T)(c_{AT} - c_{AB})]}{[(c_{CH} - c_{AT})(c_{AB} - c_{AT}) - (c_{AT} - c_{CH})(c_{AT} - c_{AB})]} \dots\dots\dots(12)$$

Dalam hal ini:

Q = debit; c = konsentrasi Ca⁺; C = konsentrasi SO₄; and AB, AT, CH, dan T masing-masing = air bumi, air tanah, curah hujan, dan aliran total.

Kontribusi setiap sumber aliran terhadap aliran sungai menggunakan persamaan 10-12, menunjukkan bahwa pada episode hujan (*storm event*) tanggal 14 Pebruari 2010, air bumi merupakan kontributor utama terhadap aliran sungai yaitu mencapai 47,3 %. Selain itu yang berkontribusi yaitu air tanah sebesar 28 % dan curah hujan sebesar 24,7 %.

KESIMPULAN

- 1 Ca dan SO₄ dapat dipertimbangkan sebagai perunut konservatif pada DAS mikro Cakardipa.
- 2 Tiga komponen separasi hidrograf yang diprediksi dengan *end member mixing analysis* (EMMA) menggunakan perunut Ca dan SO₄ menunjukkan bahwa air bumi, air tanah, dan air hujan merupakan sumber utama aliran di DAS mikro Cakardipa, berturut-turut berkontribusi sebesar 47,3%, 28%, 24,7%.

Ucapan TerimaKasih

Hasil penelitian ini merupakan bagian dari desertasi berjudul “Perunut Hidrokimia sebagai Indikator Kinerja Pengelolaan DAS : Studi Kasus di DAS Ciliwung Hulu”. Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kerjasama Kemitraan Penelitian Pertanian dan Perguruan Tinggi (KKP3T) (DIPA TA. 2009-2010) dan DIPA Balitklimat

(2008-2009) atas dukungan dana dalam pelaksanaan penelitian ini

DAFTAR PUSTAKA

Bernal S, Butturini A, Sabater F 2006. *Inferring Nitrate Sources Through End Member Mixing Analysis in An Intermittent Mediterranean Stream*. Abstract. Biogeochemistry 81, 269–289.

Burns DA, McDonnell JJ, Hooper RP, Peters NE, Freer J, Kendall C, Beven KJ 2001. *Quantifying Contributions to Storm Runoff Through Eend-Member Mixing Analysis and Hydrologic Measurements at the Panola Mountain Research Watershed (Georgia, USA)*. Hydrological Processes 15, 1903-1924.

Christophersen N, dan Hooper R P1992. *Multivariate analysis of stream water chemical data: the use of principal components analysis for the end member mixing problem*. Water Resour. Res., 28 (1), 99-107.

Genereux DP, Hooper RD 1998. *Oxygen and hydrogen isotopes in rainfall-runoff studies*. In *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, Kendall C, McDonnell J (eds). Elsevier.

Hangen E, M Lindenlaub, Ch Leibundgut, K von Wilpert

2001. *Investigating Mechanisms of Stormflow Generation by Natural Tracers and Hydrometric Data: A Small Catchment Study in The Black Forest, Germany*. Abstract. *Hydrological Processes* 15, 183–199.
- Hinton MJ, Schiff SL, dan English MC 1994. *Examining the contributions of glacial till water to storm runoff using two and three component hydrograph separation*. *Water Resour.Res.*30, 983-993.
- Hooper RP 2001. Applying the scientific method to small catchment studies: A review of the Panola Mountain experience. *Hydrological Processes* 15(10): 2039-2050.
- McGlynn BL, McDonnell JJ 2003. *Quantifying the relative contributions of riparian and hillslope zones to catchment runoff*. *Water Resources Research* 39 (11), 1310.
- Mulholland PJ 1993. *Hydrometric and stream chemistry evidence of three storm flowpaths in Walker Branch Watershed*. *J. Hydrol.* 151: 291–316.
- Subagyono K, Tanaka T, Hamada Y, Tsujimura M 2005. *Defining Hydrochemical Evolution of Streamflow Through Flowpath Dynamics in Kawakami Headwater Catchment, Central Japan*. Abstract. *Hydrological Processes* 19 (10), 1939–1965.
- Wenninger J, Uhlenbrook S, Tilch N, Leibundgut C 2004. *Experimental Evidence of Fast Groundwater Responses in a Hillslope/Floodplain Area in the Black Forest Mountains, Germany*. Abstract. *Hydrological Processes* 18, 3305–3322