

## **PENYUSUNAN MODEL KONSEPTUAL HUBUNGAN ANTARA PROSES LIMPASAN DENGAN PENCUCIAN UNSUR HARA**

### ***DEVELOPMENT OF CONCEPTUAL MODEL OF THE RELATIONSHIP BETWEEN RUNOFF GENERATION AND NUTRIENT FLUSHING***

**Nani Heryani<sup>1)</sup>, Hidayat Pawitan<sup>2)</sup>, M. Yanuar J. Purwanto<sup>3)</sup>, Kasdi Subagyo<sup>4)</sup>**

<sup>1)</sup>Peneliti Bidang Hidrologi, Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi,

<sup>2,3)</sup>Staf Pengajar di Institut Pertanian Bogor,

<sup>4)</sup>Sekretaris Badan Litbang Pertanian, Kementerian Pertanian

Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi, Jl. Tentara Pelajar No. 1A, Kampus Penelitian Pertanian  
Cimanggu, Bogor 16111

E-mail: heryani\_nani@yahoo.com

Diterima: 26 Desember 2012; Disetujui: 22 Maret 2013

#### **ABSTRAK**

*Model konseptual hubungan proses aliran air dengan ketersediaan air dalam DAS hanya mencakup proses di dalam DAS yang memengaruhi kimia air atau yang memberi pertanda kimia dalam aliran. Penelitian dilakukan di DAS mikro Cakardipa, DAS Ciliwung Hulu, Jawa Barat. Tujuan penelitian yaitu menyusun model konseptual hubungan antara proses limpasan atau aliran air dengan ketersediaan air dan pencucian hara. Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan yaitu: pemasangan jaringan alat pengamatan hidrokimia dan hidrometrik, analisis separasi hidrograf secara geokimia dan hidrometrik, analisis dinamika aliran bawah permukaan, analisis hubungan konsentrasi unsur hara (hidrokimia) dan debit. Berdasarkan hasil-hasil analisis tersebut disusun model konseptual hubungan antara proses aliran air dengan ketersediaan air di dalam DAS dan pencucian hara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa berdasarkan separasi hidrograf secara geokimia terdapat kontribusi air tanah (groundwater) sebesar 47,3%, air lahan(soil water) sebesar 28,0%, dan curah hujan sebesar 24,7%, sedangkan separasi hidrograf secara hidrometrik menunjukkan bahwa dengan curah hujan sebesar 46,5 mm selama 8 jam 35 menit menghasilkan debit dengan volume sebesar 2.377 m<sup>3</sup>. Potensial air dan jalur aliran tempat air mengalir juga memengaruhi perbedaan konsentrasi kimia air yang melalui lereng hingga ke sungai. Akumulasi unsur hara cenderung tinggi pada bagian hilir DAS. Hubungan antara konsentrasi unsur kimia air dengan debit adalah linier, dalam hal ini terjadi penurunan unsur hara pada saat terjadi peningkatan debit.*

**Kata kunci:** Limpasan, kimia air, debit, pencucian hara, model konseptual

#### **ABSTRACT**

*The conceptual model of the relationship of water flow process and water availability in a watershed only covers processes in a watershed affecting water chemistry or chemistry foreshadow in the flow. A study was conducted in Cakardipa micro watershed, upper Ciliwung watershed, West Java. The objective of this study is to establish a relation conceptual model between runoff or flow generation and nutrient flushing, and was conducted through following steps: 1) installation of hydrochemistry and hydrometric test equipment, 2) analysis of geochemical and hydrometric hydrograph separation, 3) analysis of sub-surface flow dynamics, and 4) analysis of correlation between nutrients and discharge. The conceptual model of relationship between runoff generation and nutrient flushing was developed based on these analyses. Results show that by geochemical hydrograph separation there had been a contribution of groundwater, soil water and rainfall of 47.3%, 28.0% and 24.7% respectively. Whereas, hydrometric hydrograph separation indicated that 46.5mm of rainfall for 8 hours 35 minutes produced 2.377 m<sup>3</sup> of discharge. Water potential and flow paths also affected the water chemical concentration that flowing through the slope to the river. Nutrient accumulation tends to be high at downstream. Relationship between water chemistry and discharge is linear. There is a decreasing of water chemistry concentration when the discharge increased.*

**Keywords:** Runoff, water chemistry, discharge, nutrient flushing, conceptual model

## PENDAHULUAN

Air sungai merupakan salah satu sumber air permukaan relatif lebih rentan terhadap pencemaran yang diakibatkan oleh kegiatan manusia dibandingkan air tanah. Penelitian tentang polusi air tanah dan mekanisme *recharge aquifer* merupakan beberapa aplikasi penting dari analisis kimia air (*hydrochemical*), namun masih jarang dilakukan. Di sisi lain analisis kimia air merupakan integrator yang berguna dalam beberapa proses biologi, kimia, dan fisik dalam daerah aliran sungai (DAS), seperti dekomposisi tanaman, pertukaran kation tanah, penurunan kualitas air secara kimiawi, dan mineralisasi. Selanjutnya pemahaman tentang pencucian unsur hara selama hujan penting karena aliran air selama hujan berperan dalam ekspor unsur hara seperti DOC (*dissolved organic carbon*) dan nitrogen (Hinton et al. 1997, Bernal et al. 2005). Meskipun telah banyak penelitian tentang pencucian unsur hara, namun penelitian tentang pemahaman mekanisme pencucian unsur hara secara pasti masih lemah. Penelitian McGlynn and McDonnell (2003) meskipun berhasil menemukan kontribusi aliran yang berasal dari riparian dan lereng melalui pengamatan DOC, namun belum dapat menentukan bagaimana mekanisme terjadinya pencucian unsur hara di lereng.

Model konseptual merupakan sintesis dari suatu kumpulan konsep dan pernyataan yang menginterpretasikan konsep-konsep tersebut menjadi suatu kesatuan, yang dapat disajikan dalam bentuk grafik atau diagram dengan beberapa penjelasan. Model konseptual proses limpasan berdasarkan perunut hidrokimia dapat menjelaskan pola kontribusi ketiga *end member* (sebagai sumber limpasan) secara temporal (Wheater et al 1990, Jenkins et al 1994, dan Soulsby et al 1998, Inamdar dan Mitchell 2007). *End member* menggambarkan karakteristik air yang teridentifikasi dari unit hidrologi atau geologi yang berbeda. *End member* yang berbeda biasanya memiliki pertanda isotop atau kimia yang berbeda.

Van Verseveld et al. (2008), Frey et al. (2007), Joerin et al. (2002), dan Burns et al. (2001) menunjukkan bahwa secara eksplisit terdapat kaitan antara faktor internal dalam DAS (tanah dan larutan unsur kimia) dengan pengamatan kimia aliran (*stream chemistry*). Pada umumnya terdapat keragaman konsentrasi larutan di *outlet* berdasarkan pengukuran dibandingkan perhitungan berdasarkan model. Penelitian di DAS Maimai dan penelitian lain sampai awal tahun 1990-an menghasilkan kesepakatan umum yaitu: 1) *pre-event water (soil water)* yang disimpan di dalam DAS sebelum kejadian hujan merupakan kontributor dominan terhadap aliran di sungai,

rata-rata mencapai 75% (Buttle 1994), 2) aliran preferensial secara vertikal (sering juga secara lateral) merupakan fenomena yang ada di dalam tanah secara alami, terutama di DAS yang curam.

Kimia aliran merefleksikan pengaruh kumulatif beberapa proses hidrologi dan biogeokimia yang terjadi di seluruh DAS. Pemahaman proses-proses yang mengontrol kimia aliran sangat penting dalam pengelolaan air di dalam DAS itu sendiri. Beberapa penelitian menunjukkan pentingnya proses-proses hidrologi yang mengatur konsentrasi hara dalam air sungai, dan secara historis proses-proses ini telah digunakan untuk menduga status siklus dan retensi hara di ekosistem perairan. Bernal et al (2006) mengemukakan bahwa kimia aliran tidak dapat dijelaskan oleh *end member* selama musim kemarau.

Model konseptual hujan-limpasan (*runoff*) juga dapat digunakan untuk memisahkan hidrograf tahunan dari suatu jalur aliran (Soulsby dan Dunn, 2003). Dalam penelitian hidrometrik telah diidentifikasi beberapa proses kunci yang terdapat dalam produksi limpasan (*runoff*) di dalam DAS. Tiga komponen analisis campuran digunakan untuk memisahkan hidrograf dan menduga aliran permukaan (*overlandflow*), air bawah permukaan yang dangkal, dan air lahan (*groundwater*) dari suatu hidrograf tahunan. Berdasarkan penelitian hidrometrik dan perunut, tiga jalur aliran utama telah digunakan sebagai model konseptual proses hidrologi dan hidrokimia dalam DAS (Wheater et al. 1990, Jenkins et al. 1994, dan Soulsby et al. 1998). Model konseptual hubungan proses limpasan dengan ketersediaan air dalam DAS hanya mencakup proses di dalam DAS yang memengaruhi kimia aliran atau yang memberi pertanda kimia dalam aliran. Kuantifikasi mekanisme pencucian unsur hara pada skala DAS sangat penting dalam pengembangan model prediksi perubahan penggunaan lahan dan dampak perubahan iklim terhadap kualitas air permukaan.

Beberapa permasalahan yang dijumpai dalam pengelolaan sumber daya air di DAS Ciliwung sebagai lokasi penelitian antara lain sumber daya air yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai kepentingan semakin mahal dan langka baik kuantitas maupun kualitasnya, sehingga menimbulkan berbagai konflik antarsektor maupun antar wilayah. Di wilayah Jabodetabek, permasalahannya terjadi karena perubahan penggunaan lahan, kepadatan penduduk (*over population*) serta terjadinya degradasi dan deplesi sumberdaya air. Permasalahan kuantitas dan kualitas air telah menimbulkan konflik kepentingan antara pertanian, industri, dan munisipal, serta antara penggunaan air permukaan

dan air tanah seiring dengan pertumbuhan areal perkotaan yang makin cepat.

Penelitian ini menjadi penting karena masih terbatasnya informasi tentang mekanisme proses aliran (*runoff generation*) di Indonesia. Selain itu identifikasi mekanisme pencucian hara dalam skala DAS yang merupakan bagian dari penelitian ini penting dalam mengembangkan model prediksi dampak perubahan iklim dan penggunaan lahan terhadap kualitas air permukaan. Tujuan penelitian adalah menyusun model konseptual hubungan antara proses limpasan dengan pencucian hara secara spasial dan temporal untuk mendukung pengelolaan sumber daya air di dalam DAS secara berkelanjutan

## METODOLOGI

Penelitian lapang dilakukan pada bulan Mei 2008 sampai April 2010 di DAS mikro Cakardipa, DAS Ciliwung Hulu, Jawa Barat. Analisis air dilakukan di laboratorium Balai Penelitian Tanah, sedangkan analisis data dilakukan di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi.

Bahan yang dipergunakan dalam penelitian ini yaitu peta rupa bumi skala 1:25.000; peta geologi skala 1:100.000; peta geohidrologi skala 1:250.000; data kimia air; data sifat fisika, kimia, dan mineral tanah; data debit dan curah hujan. Peralatan yang digunakan yaitu: alat pengukur penetapan kedalaman air lahan; *piezometer*, *tensiometer*, *suction sampler* (pompa pengambil air lahan/*soil water*, dan air tanah); botol untuk menyimpan sampel air; ring sampel; GPS (*Global Positioning System*); *AWLR (Automatic Water Level Recorder)*; *AWS (Automatic Weather Station)*; *Current meter*; bor tanah; seperangkat komputer; software Arc-View ver. 3.3.

### Pemasangan Peralatan Pengamatan Hidrokimia

Pemasangan peralatan dilakukan pada suatu transek (penggalan) yang ditetapkan sesuai dengan

jalur aliran air di lahan berlereng (*hillslope*) masing-masing sebanyak lima titik pada lereng arah Timur dan empat titik pada lereng arah Barat dari sungai di DAS mikro Cakardipa. Jaringan alat pengamatan hidrokimia seluruhnya berjumlah 68 buah, terdiri dari 25 tensiometer, 16 *piezometer*, dan 27 *suction sampler* yang dipasang pada berbagai kedalaman disajikan pada Tabel 1, secara spasial dan vertikal disajikan pada Gambar 1.

### Separasi Hidrograf secara Hidrometrik dan Geokimia

Karakteristik aliran DAS mikro Cakardipa secara hidrometrik diamati melalui pengukur tinggi muka air otomatis (*Automatic Water Level Recorder*, *AWLR*) tipe pelampung. Persamaan lengkung debit pada bangunan *weir* berbentuk persegi panjang disusun berdasarkan persamaan sebagai berikut:

$$Q = C \times L \times H^{1.5} \times \sqrt{2g} \quad 1)$$

Keterangan:

Q, debit ( $m^3/s$ );

C, koefisien *weir* (0,35);

L, lebar mulut *weir* (m);

H, tinggi muka air pada *weir* (m);

g, percepatan gravitasi bumi ( $9,8 m/s^2$ ).

Untuk *weir* DAS mikro Cakardipa, persamaan kurva lengkung debit (Gambar 2) yang dihasilkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Ketinggian muka air < 29 cm, maka

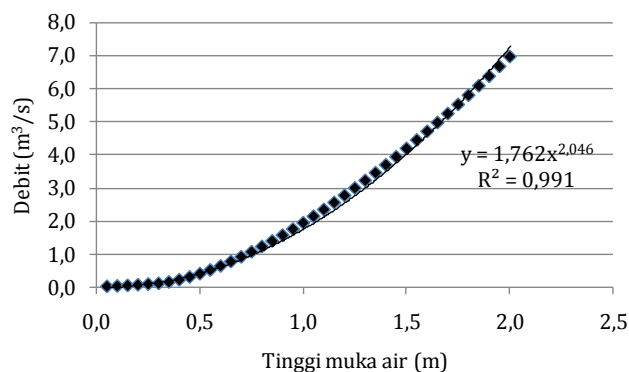
$$Q = 0,35 \times 0,9 \times H^{1.5} \times (2 \times 9,8)^{0,5} \quad 2)$$

Ketinggian muka air > 29 cm, maka

$$Q = 0,35 \times 0,39 \times (0,29)^{1,5} \times (2 \times 9,8)^{0,5} + 0,35 \times 1,98 \times (H - 0,29)^{1,5} \times (2 \times 9,8)^{0,5}$$

3)

Untuk mempelajari karakteristik hujan sesaat dilakukan instalasi pengamat hujan otomatis (*ARR: Automatic Rainwater Recorder*) tipe *HOBO*.

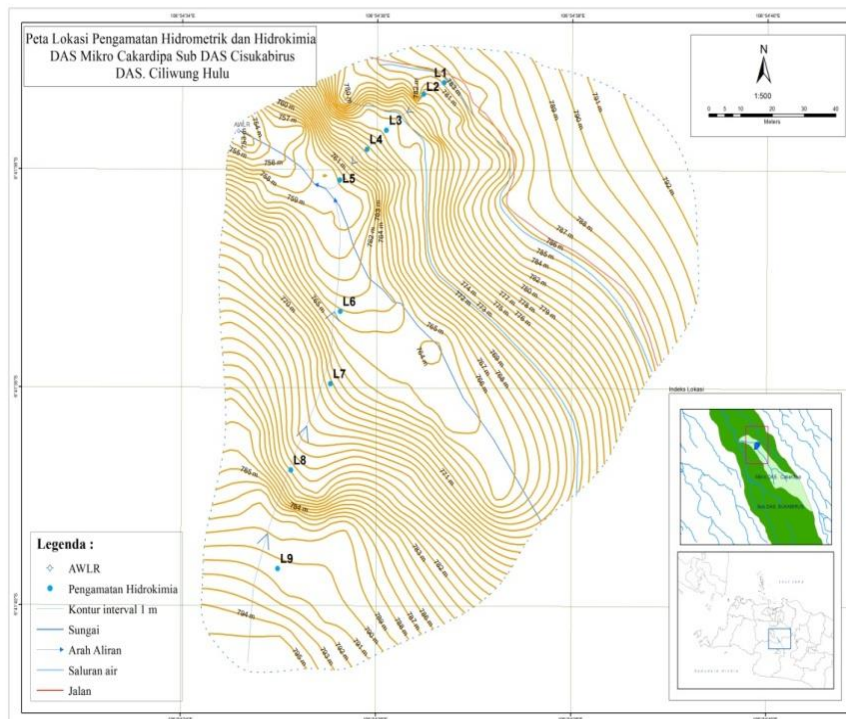
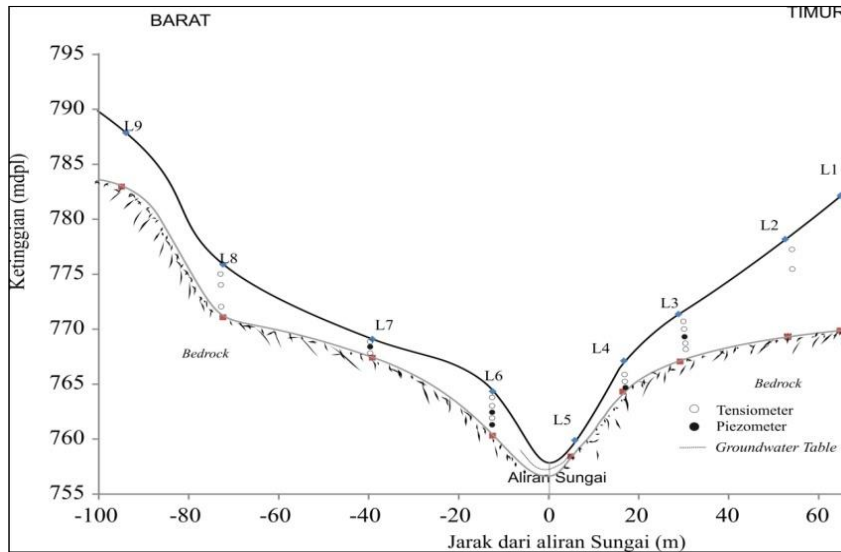
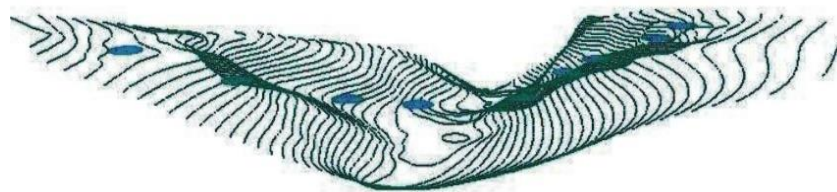


**Gambar 2** Lengkung debit DAS mikro Cakardipa, DAS Ciliwung Hulu, Jawa Barat

**Tabel 1** Distribusi peralatan pengamatan hidrometrik dan hidrokimia

|                    | Kedalaman<br>(cm) | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | Alur<br>sungai | L6 | L7 | L8 | L9 |
|--------------------|-------------------|----|----|----|----|----|----------------|----|----|----|----|
| <i>Piezometer</i>  | 25                |    |    |    |    |    |                | v  | v  |    |    |
|                    | 50                |    |    |    |    |    | v              | v  | v  |    |    |
|                    | 100               |    |    |    |    | v  |                | v  | v  |    |    |
|                    | 150               |    |    |    |    |    |                | v  | v  |    |    |
|                    | 200               |    |    |    | v  |    |                | v  | v  |    |    |
|                    | 250               |    |    |    |    |    |                |    |    |    |    |
|                    | 300               |    |    |    |    |    |                |    |    |    |    |
|                    | 400               |    |    | v  |    |    | v              | v  |    |    |    |
| <i>Tensiometer</i> | 25                |    |    |    |    | v  |                |    | v  |    |    |
|                    | 50                | v  | v  |    |    |    |                |    |    |    |    |
|                    | 100               |    |    | v  |    | v  |                | v  |    | v  |    |
|                    | 150               |    |    |    | v  |    |                |    | v  |    |    |
|                    | 200               |    |    | v  | v  |    |                |    | v  |    |    |
|                    | 250               | v  | v  |    |    |    |                | v  |    | v  |    |
|                    | 300               |    |    |    |    |    |                | v  |    |    |    |
|                    | 350               |    |    | v  |    |    |                |    |    |    |    |
|                    | 400               |    |    |    |    |    |                | v  |    | v  |    |
|                    | 550               |    |    |    |    |    |                |    |    |    |    |
|                    | 650               |    |    |    |    |    |                |    |    |    |    |
|                    | 900               | v  |    |    |    |    |                |    |    |    |    |
| <i>Suction</i>     | 25                |    |    |    |    | v  |                |    | v  |    |    |
| <i>Sampler</i>     | 50                | v  | v  | v  |    |    |                |    |    |    |    |
|                    | 100               |    |    |    | v  | v  |                | v  |    | v  |    |
|                    | 150               |    |    | v  |    |    |                |    | v  |    |    |
|                    | 200               |    |    |    | v  |    |                |    | v  |    |    |
|                    | 250               |    |    | v  | v  |    |                | v  |    | v  |    |
|                    | 300               |    |    |    |    |    |                | v  |    |    |    |
|                    | 350               | v  | v  | v  |    |    |                |    |    |    |    |
|                    | 400               |    |    |    |    |    |                | v  |    | v  |    |
|                    | 550               |    |    |    |    |    |                |    |    |    |    |
|                    | 650               |    |    |    |    |    |                |    |    |    |    |
|                    | 900               | v  |    |    |    |    |                |    |    |    |    |

Keterangan: L1–L9 adalah lokasi pemasangan alat



Keterangan:

L1, L2, L8, L9 : terdiri dari tensiometer dan suction sampler

L3, L4, L5, L6, L7 : terdiri dari tensiometer, piezometer, dan suction sampler

**Gambar 1** Lokasi pengamatan kedalaman batuan (*bedrock*) untuk pemasangan jaringan pengamatan hidrokimia secara vertikal (atas) dan pemasangan peralatan pengamatan secara spasial di lereng sebelah Barat dan Timur DAS mikro Cakardipa (bawah)

Kontribusi setiap sumber aliran selama proses limpasan diprediksi menggunakan EMMA (End Member Mixing Analysis), kemudian kontribusi setiap sumber aliran (air tanah, air lahan, dan air hujan) terhadap aliran sungai dianalisis dari separasi hidrograf secara geokimia menggunakan perunut Ca<sup>2+</sup> dan SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dan formula menurut Hinton et al (1994):

$$Q_1 = QT = \frac{[(cT - c_2)(C_3 - C_2) - (C_2 - CT)(c_2 - c_3)]}{[(c_1 - c_2)(C_3 - C_2) - (C_2 - C_1)(c_2 - c_3)]}$$

$$Q_2 = QT = \frac{[(cT - c_1)(C_3 - C_1) - (C_1 - CT)(c_1 - c_3)]}{[(c_2 - c_1)(C_3 - C_1) - (C_1 - C_2)(c_1 - c_3)]}$$

$$Q_3 = QT = \frac{[(cT - c_2)(C_1 - C_2) - (C_2 - CT)(c_2 - c_1)]}{[(c_3 - c_1)(C_1 - C_2) - (C_2 - C_3)(c_2 - c_1)]}$$

4)

Keterangan:

Q, debit (m<sup>3</sup>/s);

c, konsentrasi Ca<sup>2+</sup> (mg/l);

C, konsentrasi SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg/l);

1, air tanah (*groundwater*);

2, air lahan (*soil water*);

3, curah hujan (mm/5 menit);

T, aliran total (m<sup>3</sup>/s).

#### Penentuan Arah Aliran Air secara Vertikal dan Lateral

Jalur aliran ditentukan di wilayah lereng atas, tengah, dan bawah sampai ke jalur sungai. Jalur aliran bawah permukaan ditetapkan berdasarkan garis equipotensial yang menggambarkan titik-titik yang memiliki potensi air yang sama. Arah aliran bawah permukaan secara vertikal dan lateral ditentukan berdasarkan perbedaan (*gradient*) tinggi hidraulik air tanah antara dua titik pengamatan pada kedalaman yang berbeda di areal lereng tengah dan bawah. Menurut Subagyono dan Tadashi (2007), gradien tinggi hidraulik secara vertikal ( $\partial H/\partial z$ ) dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$\partial H/\partial z = (H_2 - H_1)/(z_2 - z_1) \quad 5)$$

Keterangan: H<sub>1</sub> dan H<sub>2</sub> adalah tinggi hidraulik pada kedalaman pemasangan alat pengamatan hidrokimia (tensiometer) terendah (0,25 m) dan tertinggi (9 m), serta z<sub>1</sub> dan z<sub>2</sub> adalah ketinggian tempat titik pengamatan.

Gradien tinggi hidraulik (yang diperoleh dari data potensial air yang terbaca pada tensiometer) secara lateral ( $\partial H/\partial z$ ) dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$\partial H/\partial z = (H_b - H_a)/(z_b - z_a) \quad 6)$$

Keterangan: H<sub>a</sub> dan H<sub>b</sub> tinggi hidraulik pada titik pengamatan L<sub>4</sub> dan L<sub>5</sub>, sedangkan z<sub>a</sub> dan z<sub>b</sub> adalah ketinggian tempat pada titik pengamatan L<sub>4</sub> dan L<sub>5</sub> (Gambar 1).

#### Analisis Konsentrasi dengan Debit (*Discharge*)

Untuk kuantifikasi hubungan antara proses hidrologi dan hidrokimia yang terjadi selama kejadian hujan, C-Q diagram yang pernah didemonstrasikan oleh Evans dan Davies (1998) dan Evans *et al* (1999) digunakan dalam penelitian ini. Konsentrasi unsur K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SiO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, dan HCO<sub>3</sub> sebagai unsur terpilih diplot terhadap debit (*discharge*). Plot data tersebut dikombinasikan dengan plot data debit observasi secara temporal dan variasi unsurnya.

#### Menyusun Model Konseptual Hubungan Proses Aliran Permukaan dengan Pencucian Hara

Konsep hubungan proses limpasan dengan ketersediaan air memiliki beberapa karakteristik, yaitu:

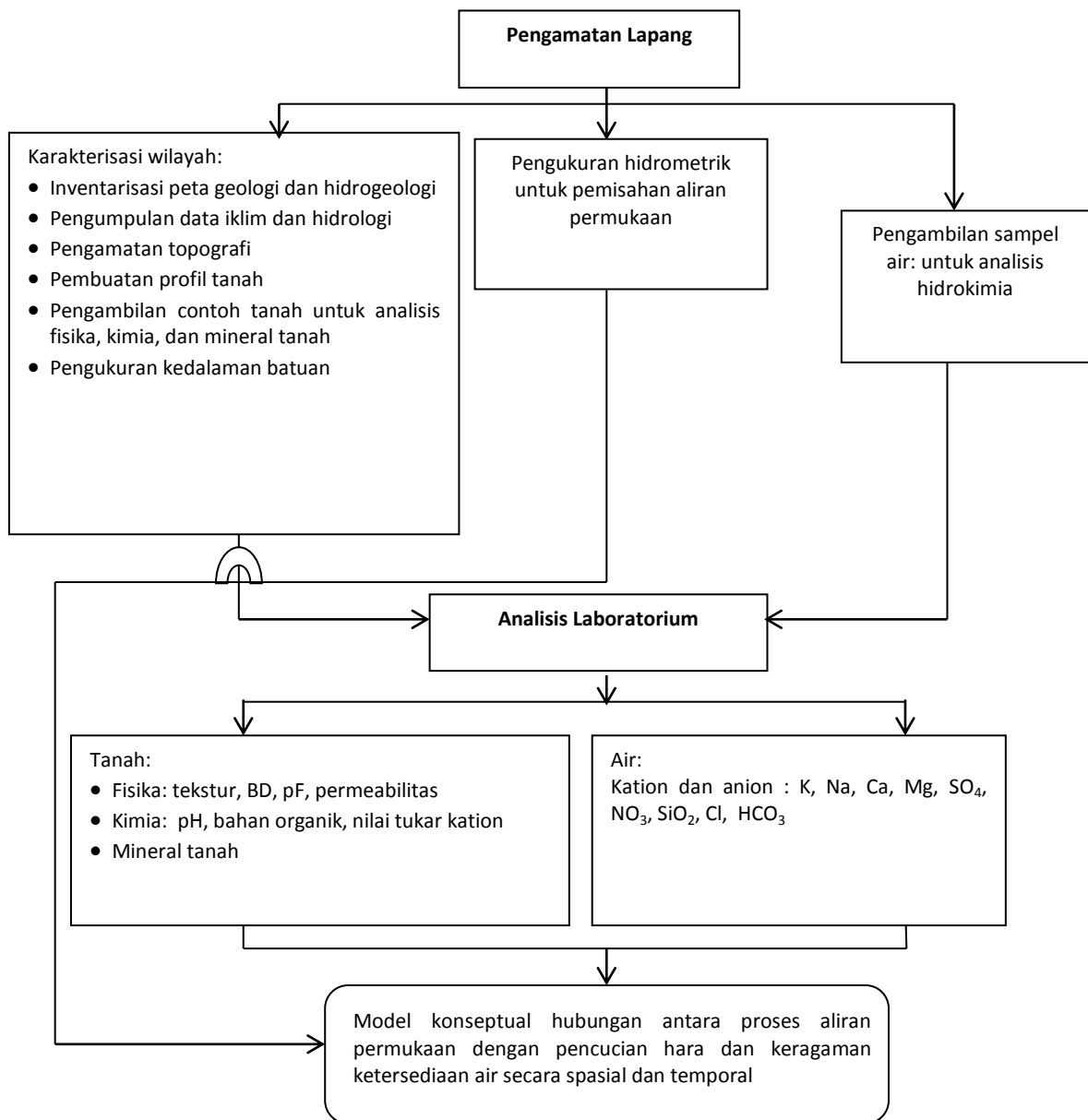
- 1) Secara eksplisit terdapat hubungan antara faktor internal dalam DAS (tanah dan larutan unsur kimia) dengan pengamatan kimia aliran (*stream chemistry*),
- 2) Keragaman konsentrasi pelarut di *outlet* berdasarkan pengukuran mungkin lebih besar dibandingkan berdasarkan model. Pengukuran berdasarkan hidrometrik juga akan menunjukkan perbedaan dibandingkan dengan *end member*,
- 3) Hanya mencakup proses dalam DAS yang memengaruhi kimia aliran sampai dengan hilir suatu DAS. Dengan demikian hanya membangun model yang berisi informasi yang memberi pertanda kimia dalam aliran.

Model konseptual memberikan informasi tentang wilayah (lereng, lembah atau lainnya) terjadinya pencampuran pelarut (*solute mixing*) paling intensif terjadi, wilayah mana respons aliran lebih lambat atau lebih cepat, dan wilayah mana pencucian hara paling banyak atau sedikit terjadi. Diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 3.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Debit

Karakteristik debit DAS mikro Cakardipa diketahui melalui analisis hidrograf secara hidrometrik selama periode Juni-Desember 2009 dan Januari-Februari 2010. Secara rinci karakteristik hidrograf DAS mikro Cakardipa disajikan pada Tabel 2. Selama awal musim hujan di tahun 2009, curah hujan maksimum yang terekam di DAS mikro Cakardipa sebesar 61,5 mm dengan intensitas maksimum sebesar 10,2 mm/5 menit atau setara dengan intensitas hujan 122 mm/jam. Curah hujan dengan intensitas tersebut telah membangkitkan debit puncak sebesar 58,2 l/s. Koefisien aliran permukaan yang dihitung berdasarkan analisis pemisahan hidrograf



**Gambar 3** Diagram alir penelitian mekanisme proses limpasan di DAS mikro Cakardipa, DAS Ciliwung Hulu.

menunjukkan variasi nilai antara 0,03% sampai dengan 0,59%.

Untuk mempelajari dinamika aliran bawah permukaan dilakukan analisis separasi hidrograf pada kejadian hujan tanggal 14 Februari 2010. Separasi hidrograf secara geokimia menunjukkan bahwa air tanah berkontribusi sebesar 47,3%, air lahan 28,0%, dan curah hujan sebesar 24,7%. Separasi hidrograf secara hidrometrik menunjukkan bahwa dengan curah hujan sebesar 46,5 mm selama 8 jam 35 menit menghasilkan debit total dengan volume 2.377 m<sup>3</sup>. Hasil analisis separasi hidrograf secara hidrometrik dan geokimia disajikan pada Tabel 3.

### Dinamika Aliran Bawah Permukaan

Gambar 4 menyajikan dinamika aliran bawah permukaan pada saat puncak kejadian hujan tanggal 14 Februari 2010. Aliran air yang cepat jelas terjadi di lereng selama terjadi hujan, sehingga memungkinkan unsur kimia tercuci dari bagian lereng ini. Potensial air dan jalur aliran tempat air mengalir juga memengaruhi perbedaan konsentrasi kimia air yang melalui lereng hingga ke sungai. Beberapa hasil penelitian menyatakan bahwa area yang memiliki lereng curam, tanah tipis, air akan bergerak secara vertikal, lalu tertahan pada lapisan antara tanah dan batuan (*soil-bedrock interface*), dan kemudian bergerak secara lateral (McDonnell 1990, Tani 1997, Sidle *et*

al 2000, Freer *et al* 2002, Uchida *et al* 2002). Di daerah lereng air akan terinfiltrasi dengan cepat ke dalam tanah diikuti oleh meningkatnya tingkat kebasahan pada zona bawah permukaan yang dangkal, sehingga di daerah lereng sering tidak terjadi aliran permukaan. Menurut Subagyono (2002) air akan terdistribusi ke dalam profil tanah dan sebagian akan bergerak ke lereng bagian

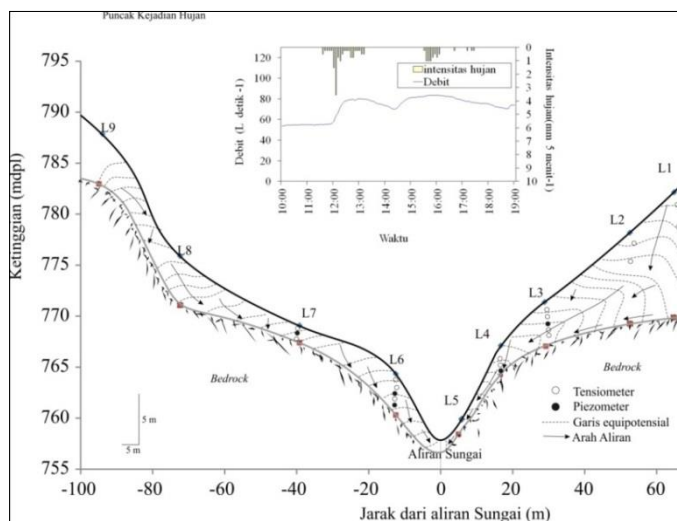
bawah pada kedalaman 1 meter dan ini merupakan aliran bawah permukaan. Pada penelitian ini perbedaan kedalaman tanah dan batuan serta posisi titik pengamatan yang sangat berbeda ketinggiannya terdapat pada titik L4 dan L5, L5 dengan L6 serta L5 dan L6 dengan alur sungai. Akumulasi unsur hara pada umumnya meningkat di titik L5 dibandingkan dengan L4.

**Tabel 2** Karakteristik Hujan dan Debit DAS mikro Cakardipa untuk Setiap Episode yang Tercatat Selama Bulan Oktober–Februari 2010

| Episode Hujan–Debit | Curah Hujan (mm) | Intensitas Hujan Maksimum (mm/5menit) | Debit Maksimum (l/s) | Koefisien Aliran Permukaan (%) | Waktu Naik (menit) | Waktu Konsentrasi (menit) |
|---------------------|------------------|---------------------------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------|---------------------------|
| 13 -10 -09          | 14,2             | 3,8                                   | 10,7                 | 0,03                           | 35                 | 25                        |
| 14 -10 -09          | 31,2             | 8,6                                   | 21,2                 | 0,23                           | 35                 | 15                        |
| 22 -10 -09          | 55,9             | 8,6                                   | 28,3                 | 0,20                           | 30                 | 15                        |
| 24 -10 -09          | 21,3             | 4,3                                   | 17,7                 | 0,22                           | 35                 | 20                        |
| 27 -10 -09          | 48,3             | 7,1                                   | 22,0                 | 0,21                           | 40                 | 20                        |
| 31 -10 -09          | 61,5             | 10,2                                  | 58,2                 | 0,39                           | 45                 | 40                        |
| 11 -11 -09          | 38,1             | 5,8                                   | 16,3                 | 0,18                           | 45                 | 20                        |
| 17 -11 -09          | 14,5             | 8,4                                   | 21,4                 | 0,59                           | 30                 | 10                        |
| 10 -02 -10          | 30,5             | 10,9                                  | 44,6                 | 0,53                           | 40                 | 10                        |

**Tabel 3** Hasil Separasi Hidrograf Secara Hidrometrik dan Geokimia pada Kejadian Hujan 14 Februari 2010 di DAS Mikro Cakardipa

| Total Curah hujan (mm) | Total debit       |                          |                               | Debit puncak (l/s) | Kontribusi sumber limpasan (%) |           |           |
|------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------------|-----------|-----------|
|                        | Durasi jam, menit | Volume (m <sup>3</sup> ) | Aliran permukaan langsung (%) |                    | Air tanah                      | Air lahan | Air hujan |
| 46,5                   | 8,35              | 2.377                    | 22                            | 83,4               | 47,3                           | 28        | 24,7      |



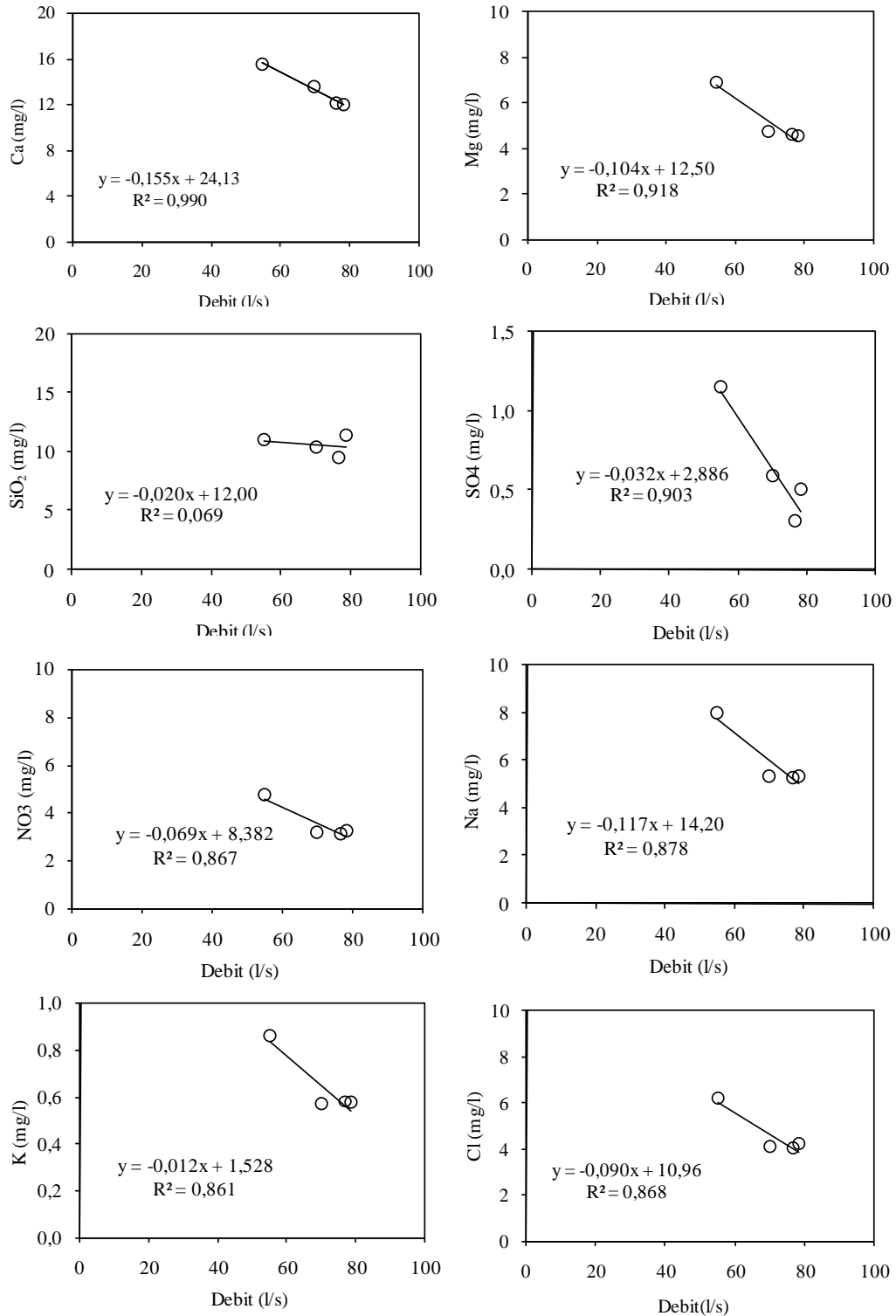
**Gambar 4** Dinamika Aliran Bawah Permukaan pada Puncak Kejadian Hujan 14 Februari 2010 di DAS Mikro Cakardipa, DAS Ciliwung Hulu



### Hubungan Konsentrasi dan Debit

Hubungan antara konsentrasi kation dan anion utama pada air tanah dengan debit pada saat kejadian hujan 14 Februari 2010 disajikan pada Gambar 5. Hubungan antara konsentrasi K, Na, Ca, Mg, SiO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, dan Cl dengan debit air yang tercatat pada AWLR adalah linier dengan koefisien

determinan (R<sup>2</sup>) berkisar antara 0,069 sampai 0,99. Ca, Mg, dan SO<sub>4</sub> memiliki hubungan yang erat dengan debit yang ditunjukkan dengan nilai R<sup>2</sup> yang tinggi berturut-turut 0,99, 0,92, dan 0,90, diikuti oleh K, Na, dan Cl (berturut-turut R<sup>2</sup>=0,86, 0,88, 0,87).



**Gambar 5** Hubungan Konsentrasi Hidrokimia dan Debit DAS Mikro Cakardipa

Hubungan yang paling rendah ditunjukkan oleh  $\text{SiO}_2$ . Hal ini menunjukkan bahwa dinamika konsentrasi Ca, Mg, dan  $\text{SO}_4$  sangat ditentukan oleh debit pada saat hujan dibandingkan dengan  $\text{SiO}_2$ . Hal ini juga sangat mendukung hasil yang diperoleh pada penelitian ini yang menggambarkan Ca dan  $\text{SO}_4$  sebagai perunut konservatif di DAS mikro Cakardipa. Hasil penelitian Mulholland (1993) dan Inamdar dan Mitchell (2006) menunjukkan Ca dan  $\text{SO}_4$  sebagai perunut konservatif dalam analisis *end member mixing* untuk mencirikan jalur aliran air dominan di dalam DAS. Sebaliknya  $\text{SiO}_2$  tidak menjadi perunut dalam proses hidrologi di DAS mikro Cakardipa, yang dalam hal ini berbeda dengan beberapa penelitian yang menyebutkan  $\text{SiO}_2$  sebagai perunut konservatif (Subagyono 2005, Inamdar dan Mitchell 2006, McGlynn dan McDonnell 2003).

### Model Konseptual Hubungan antara Proses Limpasan dengan Pencucian Unsur Hara

Model konseptual tentang hubungan proses limpasan dengan pencucian unsur hara disusun berdasarkan beberapa hasil analisis tersebut di atas yaitu mengenai separasi hidrograf berdasarkan hidrometrik dan hidrokimia, dinamika aliran bawah permukaan, serta hubungan konsentrasi dan debit. Kuantifikasi mekanisme pencucian unsur hara pada skala DAS sangat penting dalam pengembangan model prediksi kualitas air permukaan akibat perubahan penggunaan lahan dan dampak perubahan iklim.

Pencucian unsur hara dapat terjadi antara lain karena: adanya peningkatan *water table* yang memotong lapisan tanah bagian atas dimana terdapat akumulasi unsur hara yang tinggi, adanya transpor unsur hara secara vertikal oleh aliran preferensial melalui tanah sampai ke lapisan antara tanah dan batuan dan kemudian mengalir secara lateral ke lereng bagian bawah (Creed *et al* 1996, Hill *et al* 1999, Buttle *et al* 2001), dan adanya transport unsur hara secara vertikal dan kemudian mengalir secara lateral di dalam profil tanah (Gaskin *et al* 1989). Weiler dan McDonnell (2006) menyatakan bahwa model konseptual tentang pencucian unsur hara dapat diaplikasikan pada saat kejadian hujan dalam skala waktu harian.

Pemahaman tentang pencucian unsur hara selama hujan penting, karena aliran air selama hujan berperan dalam pergerakan unsur hara seperti DOC (*dissolved organic carbon*) dan nitrogen (Hinton *et al* 1997, Bernal *et al* 2005). Meskipun telah banyak penelitian tentang pencucian unsur hara, namun penelitian tentang pemahaman mekanisme pencucian unsur hara masih lemah. Penelitian McGlynn dan McDonnell

(2003) meskipun berhasil menemukan kontribusi aliran yang berasal dari riparian dan lereng dengan perunut DOC, namun belum dapat menentukan bagaimana mekanisme terjadinya pencucian unsur hara di lereng.

Penelitian ini menunjukkan terdapat hubungan yang erat antara aliran air di lereng bagian atas dengan perilaku unsur hara di lereng bagian bawah tempat pencucian unsur hara terjadi dengan intensif terutama pada saat kejadian hujan. Zona aliran lambat merupakan zona air mengalir secara lambat sehingga terjadi akumulasi unsur hara. Menurut Subagyono (2002), Tanaka dan Ono (1998) perubahan arah aliran air lahan di lereng dipengaruhi oleh ketebalan (kedalaman) tanah dan keadaan lereng. Pada penelitian ini lereng bagian bawah memiliki ketebalan tanah dan kedalaman batuan yang jauh lebih kecil dibandingkan lereng atas. Perbedaan kedalaman tanah dan batuan serta posisi titik pengamatan yang sangat berbeda ketinggiannya terdapat pada titik L4 dan L5, L5 dengan L6 serta L5 dan L6 dengan alur sungai. Akumulasi unsur hara pada umumnya meningkat di titik L5 dibandingkan dengan L4.

Model konseptual hubungan antara proses limpasan dengan ketersediaan air secara spasial diilustrasikan dengan proses limpasan di zona aliran cepat dan lambat, sedangkan secara temporal direpresentasikan melalui kejadian hujan, yakni proses limpasan yang terjadi pada awal, puncak, dan akhir kejadian hujan. Pada penelitian ini dengan menggunakan perunut  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{SO}_4^{2-}$  diperoleh sumber limpasan yang berasal dari air tanah, air lahan, dan air hujan, dengan model konseptual yang dapat dikemukakan sebagai berikut:

- 1) Pada awal kejadian hujan, aliran air bawah permukaan pada zona tidak jenuh (*unsaturated zone*) dan zona jenuh (*saturated zone*) umumnya vertikal. Ockenden *et al* (2011) menyatakan bahwa air bergerak melalui berbagai jalur aliran di dalam DAS, seperti jalur aliran cepat yaitu aliran permukaan dan aliran bawah permukaan yang dangkal, atau melalui jalur aliran yang lebih lambat seperti aliran bawah permukaan melalui strata yang lebih dalam melalui batuan.
- 2) Pada saat hidrograf meningkat, aliran vertikal mencapai kedalaman yang lebih besar di lereng bagian atas (zona aliran lambat), dan peran air tanah meningkat. Pada saat kurva hidrograf menurun kontribusi air tanah dan air lahan meningkat dari sebelumnya dibandingkan pada saat puncak hujan.
- 3) Di wilayah antara lereng bagian bawah dengan alur sungai pada umumnya terdapat beberapa jalur aliran air (vertikal dan lateral) sehingga

terjadi pencucian hara yang intensif dan cukup tinggi. Vulava *et al* (2008) menyebutkan bahwa pada saat hujan, terjadi pencucian (*flushing*) oleh air tanah dangkal ke sungai, dalam hal ini kemungkinan air tanah dalam tidak berhubungan dengan sungai.

- 4) Di wilayah antara lereng bagian bawah dengan alur sungai (zona aliran lambat) menunjukkan respons aliran yang lambat dibandingkan wilayah lainnya karena keadaan aliran di zona ini paling kecil.

Pada Gambar 6 disajikan model konseptual hubungan antara proses limpasan dengan pencucian hara berikut ini: di wilayah (1) terjadi infiltrasi yang cepat dan perkolasi, serta perubahan arah aliran, di wilayah (2) aliran mulai bervariasi antara vertikal dan lateral serta terjadi pencucian hara secara intensif, respons aliran di wilayah (3) agak lambat sehingga terdapat akumulasi unsur hara yang cukup tinggi, aliran air di wilayah (4) dapat memicu pencucian unsur hara ke lapisan tanah yang lebih dalam.

#### **Aplikasi Model Konseptual untuk Pengelolaan DAS**

Model konseptual dapat disusun berdasarkan beberapa pemahaman tentang proses-proses hidrologi di dalam DAS. Pada umumnya konsentrasi unsur hara di dalam aliran menurun pada saat debit tinggi. Pada daerah berlereng di dalam suatu DAS, pencucian (*flushing*) unsur hara yang intensif dan cukup tinggi dapat terjadi di wilayah perpotongan antara lereng bagian bawah dengan wilayah di dekat alur sungai. Hal ini terjadi karena di wilayah ini pada umumnya terdapat beberapa jalur aliran air secara vertikal dan lateral.

Konsentrasi kation utama seperti Ca, Na, K, dan Mg, juga Si biasanya menurun pada saat debit meningkat, sedangkan konsentrasi hidrogen pada saat yang sama meningkat. Cl dan SO<sub>4</sub> tidak memperlihatkan hubungan yang pasti dengan debit (Anderson *et al* 1997). Namun pada penelitian ini hubungan Cl dan SO<sub>4</sub> dengan debit menunjukkan R<sup>2</sup> yang tinggi berturut-turut 0,87 dan 0,90, dalam hal ini konsentrasi kedua unsur tersebut menurun pada saat debit meningkat. Beberapa penelitian lain menunjukkan bahwa selama kejadian hujan terdapat peningkatan unsur nitrogen organik terlarut (DON) dan karbon organik terlarut (DOC) (Creed *et al* 1996, Boyer *et al* 1997, McHale *et al* 2002, McGlynn and McDonnell 2003, Vanderbilt *et al* 2003).

Informasi keragaman unsur hara secara spasial dan temporal yang juga diperoleh dalam penelitian ini sangat penting dalam kaitannya

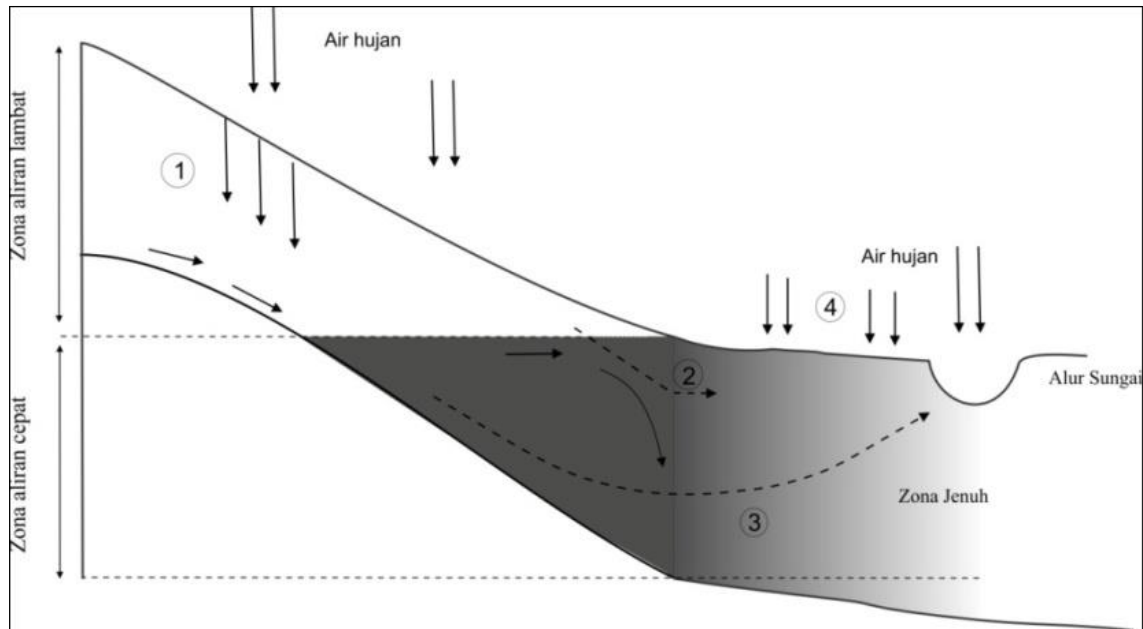
dengan pengelolaan DAS di areal berlereng. Wilayah Indonesia didominasi areal berlereng, namun upaya pengelolaan lahan dan konservasi tanah yang berkelanjutan masih belum dilakukan dengan optimal karena terbatasnya informasi tentang dinamika perilaku transpor unsur hara. Rekomendasi dalam bidang konservasi tanah dan air berbasis lereng saat ini terbatas pada upaya untuk mengurangi aliran permukaan dan erosi, padahal aplikasi pengelolaan lahan melalui upaya konservasi tanah dan air dapat dilakukan untuk mengurangi pencucian unsur hara.

Beberapa upaya konservasi tanah yang telah dilakukan selama ini seperti membangun saluran drainase di lereng, pembuatan rorak, dan penanaman tanaman tahunan dapat mengurangi kecepatan aliran air pada saat hujan. Menurut Subagyono (2007) *alley cropping* dapat mengurangi aliran *preferensial* dan pencucian unsur hara. Dinamika aliran bawah permukaan dan data hidrokimia yang merupakan bagian dari penelitian ini merupakan hal penting yang harus dipertimbangkan dalam rangka perencanaan konservasi di daerah berlereng. Di sisi lain, aplikasi pemupukan biasanya dilakukan berbasis keseimbangan hara (*nutrient balance*) yang statis, sementara perilaku unsur hara yang dinamik karena aliran air belum dipertimbangkan. Untuk menghindari penurunan unsur hara, fenomena dinamika unsur hara harus diperhitungkan dalam aplikasi pemupukan.

Kriteria aspek tata air dalam SK Menteri Kehutanan No 52/Kpts-II/2001 dan Lampiran Peraturan Dirjen Rehabilitasi Lahan dan Perhutanan Sosial (RLPS) No. P.04/V-SET/2009 tanggal 05 Maret 2009 menyebutkan ada empat indikator dalam menilai kinerja suatu DAS yaitu debit air sungai, laju sedimentasi, kandungan bahan pencemar (polutan) dan koefisien limpasan. Informasi kandungan kimia di dalam sumber aliran yang diperoleh pada penelitian ini dan didukung oleh penelitian sejenis secara temporal (*time series*) dalam jangka panjang dapat dipergunakan untuk menilai kinerja ('kesehatan') DAS dari sisi kandungan bahan pencemar jika konsentrasinya sudah melebihi ambang batas yang dapat ditoleransi.

#### **KESIMPULAN**

Model konseptual hubungan proses limpasan dengan pencucian hara dalam DAS hanya mencakup proses di dalam DAS yang memengaruhi kimia aliran atau yang memberi pertanda kimia dalam aliran.



**Gambar 6** Model konseptual hubungan antara proses limpasan dengan ketersediaan air secara spasial dan pencucian unsur hara

Keragaman hidrokimia secara spasial sangat dipengaruhi oleh dinamika perilaku aliran bawah permukaan yang melalui lereng atas, lereng bawah dan sungai. Aliran air vertikal di lereng bagian bawah menyebabkan terjadinya akumulasi unsur hara.

Besaran dan arah aliran bawah permukaan dapat mengakibatkan perubahan konsentrasi kimia air secara spasial dan temporal.

Model konseptual hubungan proses limpasan dengan pencucian hara dalam DAS bermanfaat dalam menyusun perencanaan pengelolaan pertanian di daerah berlereng seperti konservasi tanah dan air serta dinamika unsur hara dalam pemupukan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anderson SP, WE Dietrich, R Torres, DR Montgomery, dan K Loague. 1997. Concentration-discharge relationships in runoff from a steep, unchanneled catchment. *Water Resources Research*, 33(1): 211–225.
- 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.
- Bernal S, Butturini A, Sabater F. 2005. Seasonal variations of dissolved nitrogen and DOC:DON ratios in an intermittent Mediterranean stream. *Biogeochemistry* 75(2): 351–372.

- Buttle JM, Lister SW, Hill AR. 2001. Controls on runoff components on a forested slope and implications for N transport. *Hydrological Processes* 15(6): 1065–1070

- Burns DA, McDonnell JJ, Hooper RP, Peters NE, Freer J, Kendall C, Beven KJ. 2001. Quantifying Contributions to Storm Runoff Through End-Member Mixing Analysis and Hydrologic Measurements at the Panola Mountain Research Watershed (Georgia, USA). *Hydrological Processes* 15(10): 1903–1924.

- Boyer EW, Hornberger GM, Bencala KE, McKnight DM. 1997. Response characteristics of DOC flushing in an Alpine catchment. *Hydrological Processes* 11(12): 1635–1647.

- Buttle J. M. 1994. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. *Prog. Phys. Geogr.*, 18, 16–41.

- Creed IF, Band LE, Foster NW, Morrison IK, Nicolson JA, Semkin RS, Jeffries DS. 1996. Regulation of nitrate-N release from temperate forests: a test of the N flushing hypothesis. *Water Resources Research* 32(11): 3337–3354.

- Evans C, and Davies TD 1998. Causes of concentration/discharge hysteresis and its potential as a tool for analysis of episode hydrochemistry. *Water Resour. Res.* 3: 129–137.

- Evans C, Davies TD, and Murdoch PS 1999. Component flow processes at four streams in the Catskill Mountains, New York, analysed using episodic concentration/discharge relationships. *Hydrol.Process. 13: 563-575.*
- Frey K E, DI Siegel, and LC Smith 2007. *Geochemistry of west Siberian streams and their potential response to permafrost degradation. Water Resour. Res., 43. W03406.*
- Freer J., McDonnell J.J., Beven K.J., Peters N.E., Burns D.A., Hooper R.P. and Aulenbach B. 2002. The role of bedrock topography on subsurface storm flow. *Water Resources Research. 38(12): 1269. doi:10. 1029/ 2001 WR 000872.*
- Gaskin JW, Dowd JW, Nutter WL, Swank WT, 1989. Vertical and lateral components of soil nutrient flux in a hillslope. *Journal of Environmental Quality 18(4): 403-410.*
- Hill AR, Kemp WA, Buttle JM, Goodyear D. 1999. Nitrogen chemistry of subsurface storm runoff on forested Canadian Shield hillslopes. *Water Resources Research 35(3): 811-821.*
- Hinton MJ, Schiff SL, English MC. 1997. The significance of storms for the concentration and export of dissolved organic carbon from two Precambrian Shield catchments. *Biogeochemistry 36(1): 67-88.*
- 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.*
- Inamdar SP dan M J Mitchell 2007. Contributions of Riparian and Hillslope Waters to Storm Runoff Across Multiple Catchments and Storm Events in a Glaciated Forested Watershed. *Journal of Hydrology 341 (1-2): 116-130.*
- Inamdar SP, MJ Mitchell 2006. Hydrologic and topographic controls on storm-event exports of dissolved organic carbon (DOC) and nitrate across catchment scales. *Water Resources Research 42. W03421.*
- Joerin C, KJ Beven, I Iorgulescu, AMusy 2002. Uncertainty in hydrograph separation based on geochemical mixing models. *Journal of Hydrology: 255:90-106.*
- Jenkins A, Ferrier RC, Harriman R, Ogunkoya O 1994. A case study in catchment hydrochemistry: conflicting evidence from hydrological and chemical observations. *Hydrological Processes 8: 335-349.*
- McDonnell J.J. 1990. A rationale for old water discharge through macropores in a steep, humid catchment. *Water Resources Research. 26(11): 2821-2832.*
- McGlynn B.L. and McDonnell J.J. 2003. Quantifying the relative contributions of riparian and hillslope zones to catchment runoff. *Water Resources Research. 39(11). doi:10. 1029/2003WR002091.*
- McHale MR, JJ McDonnell, MJ Mitchell, Cirno CP 2002. A field-based study of soil water and groundwater nitrate release in an Adirondack forested watershed. *Water Resources Research. 38(4):1031.*
- Mulholland PJ 1993. Hydrometric and stream chemistry evidence of three storm flowpaths in Walker Branch Watershed. *J. Hydrol. 151(2-4): 291-316.*
- Ockenden MC, dan NA Chappell. 2011. Identification of the dominant runoff pathways from data-based mechanistic modelling of nested catchments in temperate UK. *Journal of Hydrology (2011):71-79*
- Subagyono K, Tadashi T 2007. The role of subsurface flow dynamic on spatial and temporal variation of water chemistry in a headwater catchment. *Indonesian Journal of Agricultural Science 8(1): 17-30.*
- 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.*
- Subagyono K, Tanaka T, Y Hamada 2002. The importance of near surface riparian on storm runoff generation and stream chemistry in Kawakami forested headwater catchment (in English)  
筑波大学陸域環境研究センター報告 No.3 75~88
- Sidle RC, Tsuboyama Y, Noguchi S, Hosoda I, Fujieda H and Shimizu T 2000. Stormflow generation in steep forested headwaters: a linked hydrogeomorphic paradigm. *Hydrological Processes 14(3): 369-385.*

- Soulsby C, Chen M, Helliwell RC, Ferrier RC, Jenkins A 1998. Hydrogeochemistry of groundwater in an upland Scottish catchment. *Hydrological Processes* 12: 1111–1118.
- Tanaka T dan Ono T. 1998. Contribution of soil water and its flow path to stormflow Generation in a forested headwater catchment in Central Japan. In Kovar K, Tappeiner U, Peters NE, Craig RG (eds.). *Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwater*. IAHS Publ. No 248:181-188
- Tani M. 1997. Runoff generation processes estimated from hydrological observations on a steep forested hillslope with a thin soil layer. *Journal of Hydrology* 200: 84–109.
- Uchida T, Kosugi KI and Mizuyama T. 2002. Effects of pipe flow and bedrock groundwater on runoff generation in a steep headwater catchment in Ashiu, central Japan. *Water Resources Research* 38(7). doi:10.1029/2001WR000261.
- Van Verseveld WJ, JJ McDonnell, dan K Lajtha 2008. Mechanistic assessment of nutrient flushing at the catchment scale. *Journal of Hydrology* 58: 268– 287.
- Vanderbilt KL, Lajtha K, Swanson FJ. 2003. Biogeochemistry of unpolluted forested watersheds in the Oregon Cascades: temporal patterns of precipitation and stream nitrogen fluxes. *Biogeochemistry* 62 (1): 87–117.
- Vulava VM, CG Garrett, CL Ginn, TJ Callahan. 2008. Application of geochemical end-member mixing analysis to delineate water sources in a lowland watershed. *Proceedings of the 2008 South Carolina Water Resources Conference*. Charleston Area Event Center.
- Weiler M, McDonnell JJ. 2006. Testing nutrient flushing hypotheses at the hillslope scale: a virtual experiment approach. *Journal of Hydrology* 319 (1–4): 339– 356.
- Wheater HS, Kleissen F, Beck MB, Tuck S, Jenkins A, Harriman R 1990. Modelling short-term flow and chemical response in the Allt a' Mharcaidh catchments. In *Surface Water Acidification Programme*, Mason BJ (ed.). Cambridge University Press: 47–54.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Badan Litbang Kementerian Pertanian melalui KKP3T, dan Balitklimat atas dukungan dana selama penelitian berlangsung. Penghargaan yang tinggi kami sampaikan juga kepada Dr. Ir. Budi Kartiwa CESA dan Ir Sawiyo, MSi atas dukungannya dalam pengamatan lapang dan analisis data.