

PENGARUH KERAPATAN VEGETASI PENUTUP LAHAN TERHADAP KARAKTERISTIK RESESI HIDROGRAF PADA BEBERAPA SUBDAS DI PROPINSI JAWA TENGAH DAN PROPINSI DIY

Bokiraiya Latuamury, Totok Gunawan dan Slamet Suprayogi

bokiraiyalatuamury

Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada Indonesia

INTISARI

Penelitian ini dilakukan di Propinsi Jawa Tengah dan Propinsi DIY, dilatarbelakangi oleh penurunan daya dukung lingkungan seperti rusaknya kawasan hutan dan berkurangnya luas tutupan lahan hutan, yang dapat mempengaruhi perilaku aliran air. Dengan adanya perubahan tutupan lahan akan berdampak pada berubahnya sifat-sifat hidrologi seperti koefisien aliran, debit dan karakteristik hidrograf aliran. Indikator kerusakan hutan dapat dilihat dari karakteristik hidrograf. Evaluasi respon DAS berupa hidrograf aliran akibat adanya perubahan penutup lahan menjadi sangat penting untuk dianalisis karena merupakan tolok ukur dalam setiap penentuan kebijakan terkait dengan penanganan banjir dan tanah longsor. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk (1). mengkaji karakteristik kerapatan vegetasi penutup lahan dan keterkaitannya dalam ekosistem DAS, (2). mengkaji karakteristik aliran dasar (koefisien resesi) pada beberapa sub-DAS tersebut, dan (3). menganalisis pengaruh kerapatan vegetasi penutup lahan terhadap karakteristik hidrograf aliran khususnya aliran dasar pada sub DAS yang diteliti. Metode penelitian yang digunakan adalah metode survei data sekunder pada rekaman data AWLR/SPAS untuk analisis resesi hidrograf dan koefisien resesi (Krb), dan interpretasi citra Landsat ETM+ untuk transformasi indeks vegetasi NDVI dikorelasikasikan dengan data kerapatan vegetasi untuk mempresentasikan karakteristik kerapatan vegetasi. Selanjutnya hasil transformasi indeks vegetasi NDVI kemudian diujikorelasikan dengan karakteristik resesi (koefisien resesi) untuk menganalisis pengaruh kerapatan vegetasi penutup lahan terhadap karakteristik resesi hidrograf. Hasil uji statistik NDVI dengan koefisien resesi menunjukkan terdapatnya korelasi antara nilai NDVI dan koefisien resesi pada $R^2 = 0,1427$, $F = 2.17$ tidak berpengaruh nyata pada taraf signifikan 1% sebesar 0.1646 (lampiran 1.2b). Analisis korelasi antara variabel independen (NDVI penutup lahan) dengan variabel dependen (koefisien resesi) memiliki korelasi sangat lemah sebesar 0,077. Hasil ini menunjukkan bahwa parameter kerapatan vegetasi NDVI sangat lemah untuk mengontrol keberadaan aliran-aliran rendah. Karena besarnya simpanan (*storage*) airtanah tergantung pada besarnya air yang mencapai akuifer. Setelah sumbangan air pada akuifer terhenti, maka air yang tertampung di akuifer akan mengalami pengatusan yang besarnya tergantung kondisi akuifer tersebut. Gerakan air pada akuifer disebabkan oleh gaya gravitasi, kecepatan dan jumlahnya terutama dipengaruhi oleh karakteristik batuan. Karakteristik batuan mempengaruhi pergerakan airtanah, diketahui dari daya hantar hidrolik batuan tersebut.

Kata Kunci : NDVI, Koefisien Resesi, hidrograf, penutup lahan.

ABSTRACT

This research was conducted in Central Java and DIY province, as a respond to the decrease of environment capacity such as forest destruction and widespread loss of forest land cover which affect water flow behavior. Land cover change will affect the hydrological properties such as coefficient, rate, and hydrograph characteristics of flow. The indicators of forest destruction can be seen through hydrograph characteristics. Flow hydrographic as an evaluation of river catchment responses to land cover change becomes very important to analyze because it is a benchmark in determination any policy about flood and landslide handling. Therefore, the aims of this study are: (1) to examine the characteristic of land cover vegetation density and its association in river catchment ecosystem, (2) to examine base flow characteristics (coefficient of recession) at these river catchments, and (3) to analyze the influence of land cover vegetation density on flow's hydrograph characteristic, especially base flow at river catchments. The method used in this research is secondary data survey on AWLR/SPAS data record in order to analyze hydrograph recession and coefficient of recession (Krb), and to interpret ETM Landsat image for NDVI vegetation index transformation for the characteristic of vegetation density. The results of NDVI vegetation index transformation then tested it's correlated with recession characteristics (coefficient of recession) to analyze the influence of land cover vegetation density on hydrograph recession characteristic. The results showed there is an average value of vegetation density (NDVI) for the river catchments and most of it has mediocre vegetation density level with the percentage of land cover vegetation less more than 30%. Most of base flow recession characteristic (coefficient of recession) lay on relatively high range, i.e. 0.661 to 0.980. Correlation analysis between independent variable (land cover NDVI) with dependent variable (coefficient of recession) is very weak, only 0.077. This result shows that the parameter of NDVI vegetation density can be combined with aquifer formation to control the existence of lower flow. Because the magnitude of soil water storage is depend on water volume that reach the aquifer, the arrangement of optimal hydrogeology condition along dry season (no rain season) depend on geological aquifer condition.

Keywords: NDVI, coefficient of recession, hydrograph, land cover

PENDAHULUAN

Perubahan tutupan lahan akan berdampak pada berubahnya sifat-sifat hidrologi seperti koefisien aliran, debit dan karakteristik hidrograf aliran. Indikator kerusakan hutan dapat dilihat dari karakteristik hidrograf. Evaluasi respon DAS berupa hidrograf aliran akibat adanya perubahan penutup lahan menjadi sangat penting untuk dianalisis karena merupakan tolok ukur dalam setiap penentuan kebijakan terkait dengan penanganan banjir dan tanah longsor. Karakteristik hidrograf aliran sangat dipengaruhi oleh kondisi fisik DAS. Perubahan penutup lahan akan mempengaruhi karakteristik limpasan dan infiltrasi dari suatu DAS yang selanjutnya akan mengubah sifat aliran sungai. Perubahan Penutup Lahan akan berpengaruh terhadap pola hidrologis dalam DAS secara menyeluruh. Besar

kecilnya perubahan sifat hidrologis yang terjadi sangat tergantung pada seberapa besar tingkat perubahan penutup lahan yang dilakukan. Perubahan pola aliran sungai akan menimbulkan dua kemungkinan yaitu banjir dan kekeringan

Perubahan tata guna lahan misalnya konversi lahan hutan menjadi non hutan seperti permukiman akan mempengaruhi karakteristik hidrograf aliran. Kerusakan lahan pada DAS menunjukkan debit puncak akan semakin tinggi, waktu konsentrasi pendek dan *runoff* semakin besar (Sri-Harto, 2000). Pada saat tidak hujan, maka aliran sungai mendapat kontribusi dari air tanah yang teratuskan. Aliran ini disebut sebagai *baseflow*. Baseflow berasal dari simpanan atau timbunan air (*water storage*) dalam suatu sistem DAS. Menurut Dahl, estimasi timbunan air yang teratuskan melalui saluran dapat dilakukan dengan analisis lengkung resesi baseflow, sehingga dalam hal ini, penentuan lengkung resesi aliran dasar sangat penting untuk diketahui.

Berdasarkan gambaran tersebut, maka dirasakan penting untuk melakukan penelitian di subDAS propinsi Jawa Tengah dan DIY, dengan tujuan penelitian adalah :

1. mengkaji karakteristik kerapatan vegetasi penutup lahan dan keterkaitannya dalam ekosistem DAS;
2. mengkaji karakteristik aliran dasar (koefisien resesi) pada beberapa sub-DAS tersebut.
3. menganalisis pengaruh kerapatan vegetasi penutup lahan terhadap karakteristik hidrograf aliran khususnya aliran dasar pada sub DAS yang diteliti

Sebuah Hidrograf terdiri dari tiga bagian yaitu sisi naik (*rising limb*), puncak (*crest*), dan sisi turun (*recession limb*), sedangkan bentuk dari Hidrograf ditentukan oleh tiga besaran pokok, yaitu :

1. Waktu naik (*time of rise, Tp*), yaitu waktu yang dihitung dari permulaan hujan sampai dengan waktu terjadinya debit maksimum.

Hal yang berpengaruh terhadap waktu naik adalah kecepatan aliran/limpasan langsung (*direct runoff*). Waktu naik sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran di lahan dan alur. Semakin cepat aliran baik di lahan maupun di alur sungai, maka waktu yang diperlukan untuk mencapai debit puncak akan semakin kecil, demikian pula sebaliknya.

Fungsi vegetasi hutan dalam mengatur lingkungan hidrologis adalah dengan perlindungannya terhadap tenaga kinetis air hujan, melalui tiga lapisan yakni bagian tajuk (*canopy*), batang dan seresah hutan. Dengan adanya perubahan penutupan lahan non menjadi non hutan berarti pohon-pohon yang biasanya

mampu menahan air hujan melalui dedaunan, ranting, dan batang hilang, sehingga air hujan yang jatuh akan lebih cepat sampai ke tanah.

Perubahan penutupan lahan hutan juga menyebabkan hilangnya seresah hutan, karena tidak ada lagi bagian-bagian vegetasi hutan yang terdapat di atas lahan. Tidak adanya pohon dan seresah berarti hambatan terhadap limpasan permukaan (*surface runoff*) menjadi lebih kecil dan air akan mengalir lebih cepat menuju alur sungai. Demikian halnya akar-akar pohon dapat menggemburkan tanah, dimana pada tanah yang gembur pori-pori tanah lebih besar, terdapat banyak bahan organik dan organisme tanah, yang berakibat transmisivitas tanah makin tinggi, sehingga infiltrasi akan lebih besar dan limpasan langsung makin kecil. Dengan tidak adanya ketiga hal tersebut maka waktu yang diperlukan untuk mencapai debit puncak (*peak discharge*) pada suatu alur sungai menjadi semakin pendek.

1. Debit puncak (*peak discharge*), yaitu debit maksimum yang dapat dicapai selama terjadi limpasan langsung

Besarnya limpasan langsung (*direct runoff*) dan kecepatan akumulasi debit, akan menentukan tingginya debit puncak. Apabila sebagian besar air hujan yang jatuh menjadi limpasan langsung dan sedikit sekali yang terinfiltrasi maka akumulasi debit dalam suatu sungai akan semakin besar. Tidak adanya pohon dan seresah hutan akibat perubahan tutupan hutan menjadi non hutan, maka hambatan terhadap limpasan permukaan menjadi lebih kecil dan kecepatan aliran semakin besar, sehingga semakin kecil kesempatan air terinfiltrasi dan sebagian besar air hujan yang jatuh menjadi limpasan langsung.

Vegetasi hutan dapat menjaga kesuburan tanah dan besarnya pori-pori tanah, karena adanya aktivitas mikroorganisme dan akar-akar vegetasi tersebut. Dengan tidak adanya vegetasi hutan berarti tidak ada aktivitas mikroorganisme dan akar-akar vegetasi hutan sehingga tanah akan menjadi padat. Dengan semakin padatnya tanah tersebut maka laju infiltrasi akan semakin kecil dan sebagian besar air hujan yang jatuh ke tanah akan menjadi limpasan. Besarnya limpasan langsung ini mengakibatkan terjadinya akumulasi debit pada alur sungai sehingga menyebabkan debit puncak semakin besar.

2. Waktu dasar (*base time*), yaitu waktu yang dihitung dari permulaan hujan sampai dengan berakhirnya limpasan langsung.

Tingginya kecepatan aliran/limpasan langsung (*direct runoff*) sangat menentukan panjangnya waktu dasar. Semakin tinggi kecepatan aliran/limpasan

langsung baik pada sisi naik maupun pada sisi resesi, maka waktu yang diperlukan terjadinya limpasan kangsung (waktu dasar) akan semakin pendek, demikian juga sebaliknya.

Kecepatan aliran/limpasan sangat tergantung pada kondisi permukaan lahan. Semakin kecil hambatan yang ada di permukaan lahan, maka kecepatan aliran akan semakin tinggi. Tidak adanya vegetasi hutan akibat perubahan tutupan lahan hutan menjadi lahan non hutan dapat menyebabkan hambatan di atas permukaan lahan menjadi semakin kecil, sehingga air hujan yang jatuh akan semakin cepat sampai ke tanah dan mengalir di atas permukaan tanah dengan kecepatan yang lebih tinggi. Semakin kecilnya hambatan di atas permukaan lahan, maka semakin pendek waktu yang diperlukan untuk mencapai debit puncak pada sisi naik dan semakin pendek pula waktu yang diperlukan untuk pengatusan pada sisi resesi. Dengan demikian total waktu (waktu dasar) yang diperlukan untuk terjadinya limpasan langsung akan semakin pendek..

Metode pembuatan lengkung aliran yang baik merupakan kunci dari teliti atau tidaknya pembuatan hidrograf aliran. Hidrograf aliran adalah suatu grafik yang menunjukkan sifat-sifat aliran sungai dalam suatu DAS, yang dinyatakan dalam grafik debit terhadap waktu. Hidrograf merupakan perwujudan dari pengaruh-pengaruh hidrometeorologis dan fisiografis suatu DAS (Viessman, 1989).

Pada bagian resesi, setelah titik infleksi, aliran resesi dibagi menjadi beberapa unsur, *channel storage*, *interflow* dan *groundwater storage*. Channel storage merupakan pengatusan dari surface runoff, sedangkan interflow merupakan aliran antara dan pada resesi bagian akhir, adalah resesi baseflow yang merupakan pengatusan aliran airtanah (Wilson, 1989). Apabila tidak terjadi hujan untuk jangka waktu yang panjang, maka slope dari hidrograf yang terbentuk merupakan perwujudan dari aliran airtanah yang disebut dengan baseflow. Lengkung resesi baseflow dapat digunakan untuk analisis keadaan pengatusan timbunan air dalam suatu DAS. Banyak aplikasi praktis yang mendasarkan pada sifat-sifat lengkung resesi baseflow antara lain adalah peramalan aliran rendah atau minuman, pengawasan irigasi airtanah selama periode aliran rendah, estimasi dan prakiraan suplai airtanah, analisis kemampuan dan kapasitas maksimum akuifer dan sebagainya (Singh, 1987).

Lengkung resesi aliran dasar untuk suatu daerah aliran sungai selalu sama (Subarkah, 1980). Resesinya dapat dinyatakan dalam suatu persamaan umum yang berlaku untuk semua hujan di dalam DAS. Persamaan umum ini dinyatakan dalam fungsi Q_t terhadap Q_0 dan t atau $Q_t = Q_0 (f(t))$, dimana $f(t)$ merupakan fungsi eksponen. Untuk selanjutnya aliran airtanah ini disebut dengan aliran dasar dan

kurva aliran dasar disebut dengan lengkung resesi aliran dasar atau lengkung resesi baseflow.

Hidrograf aliran pada bagian resesinya terdiri dari beberapa komponen, masing-masing komponen air tersebut berasal dari media yang berbeda sehingga sifat pelepasan airnya tidak sama. Pelepasan air yang paling cepat berasal dari *surface detention storage*, kecepatan sedang berasal dari interflow dan pelepasan air dengan kecepatan paling lambat dari *groundwater storage*. Dengan mempertimbangkan perbedaan pelepasan air tersebut, maka dimungkinkan melakukan pemisahan komponen air dari masing-masing sumber. Faktor yang membedakan kecepatan pelepasan aliran dalam suatu persamaan lengkung resesi baseflow biasanya dinyatakan dalam koefisien resesi (K). Dalam penelitian ini, yang akan dicari adalah koefisien resesi baseflow (K_{rb}).

Nilai K_{rb} ditentukan dengan menggambarkan nilai-nilai Q_0 terhadap Q_t dengan selang waktu t satu hari. Nilai Q_0 dan Q_t diambil dari sembarang kurva resesi aliran dasar pada hidrograf aliran, dimana pada penyebaran titik-titik hasil plot dari nilai Q_0 dan Q_t , kemudian dibuat regresi linier dengan fungsi :

$$Q_t = K_{rb} Q_0$$
$$K_{rb} = \frac{Q_t}{Q_0}$$

Dimana K_{rb} (koefisien resesi baseflow) merupakan gradient dari garis regresi ini.

Metode lengkung aliran yang baik untuk suatu DAS adalah metode lengkung aliran yang digunakan dengan pendekatan regresi yang harus diuji terlebih dahulu tingkat penyimpangannya, dimana garis lengkung yang terbentuk tergantung dari sebaran titik data yang ada. Sebaran titik-titik data tersebut dipengaruhi oleh bentuk penampang saluran.

Beberapa penelitian terdahulu menjelaskan bahwa dengan melakukan transformasi indeks vegetasi, maka aspek kerapatan vegetasi atau aspek-aspek yang berkaitan dengan kerapatan (indeks luas daun, konsentrasi klorofil, dan lain-lain) dapat ditonjolkan (Danoedoro, 1996). Selanjutnya Mather (1987) menjelaskan bahwa dengan melakukan rasio antara saluran inframerah dekat dengan saluran merah, mampu mengurangi efek bayangan akibat perbedaan penerimaan tenaga matahari. Hasil penelitian menjelaskan bahwa indeks vegetasi NDVI data Landsat berkorelasi cukup signifikan secara parabolik dengan kerapatan tajuk pada umur tertentu.

Secara umum dapat dikatakan bahwa kerapatan tajuk tanaman di lapangan berbanding terbalik dengan kerapatan tumbuhan bawah, artinya pada lokasi dimana ditemukan kerapatan tajuk yang cukup tinggi, maka kerapatan tumbuhan bawah bervariasi dari jarang sampai sedang. Demikian juga sebaliknya apabila ditemukan kerapatan tajuk tanaman yang jarang, maka kerapatan tumbuhan bawah cukup tinggi. Kondisi ini akan menyebabkan efek distribusi yang sempit pada nilai spektral, artinya pada tingkat kerapatan tajuk yang berbeda, maka nilai piksel dapat memberikan efek pantulan yang sama. Namun Howard (1991), menjelaskan bahwa pada kondisi kerapatan tajuk yang demikian, walaupun indeks luas daunnya sama, tetapi pantulan yang besar akan terjadi pada kedudukan tinggi tajuk yang relatif sama. Sedangkan pada kedudukan tinggi tajuk yang relatif berbeda, maka pantulannya akan berkurang, hal tersebut disebabkan oleh bayangan tajuk pertama terhadap tajuk berikutnya, sehingga akan mengurangi energi radian yang terekam oleh sensor.

Purevdorj *et al.*, (1998) menjelaskan bahwa vegetasi dengan kondisi tajuk yang rapat akan meningkatkan variasi nilai-nilai indeks luas daun, sehingga variasi pada nilai pantulan spektral pada kerapatan tajuk yang sama disebabkan oleh perbedaan pada indeks luas daunnya, dan hal tersebut akan memberikan kesalahan didalam menduga tingkat kerapatan tajuk. Dengan demikian jelas bahwa dengan melakukan transformasi NDVI, maka aspek kerapatan dapat ditonjolkan. Namun dari beberapa faktor lain yang mempengaruhi nilai spektral selain kerapatan tajuk nampaknya agak sulit untuk diidentifikasi. Jika dibuat suatu asumsi berdasarkan beberapa penelitian terdahulu, kemudian dikaitkan dengan hasil penelitian sekarang mengatakan bahwa 55-60% tingkat kerapatan tajuk tanaman dapat dijelaskan dengan nilai spektral, maka 40-45% sisanya merupakan pengaruh faktor lain. Faktor lain ini bisa berupa perbedaan kandungan klorofil, perbedaan umur daun, perbedaan kadar air dalam daun, faktor kerusakan daun, latar belakang tanah dan pengaruh bayangan terutama akibat perbedaan lereng dan aspek lereng. Dengan demikian jelas bahwa penggunaan transformasi indeks vegetasi cukup efektif untuk menduga tingkat kerapatan tajuk vegetasi.

Resesi terjadi setelah semua pengaliran yang masuk ke dalam sungai berhenti dan hidrograf aliran sungainya terjadi dari air yang ditampung dalam saluran dan aliran dasar. Resesi merupakan pengatusan airtanah, dan dimulai dari suatu titik pada hidrograf, bila limpasan kedalam sungai telah berhenti (*inflection point*). Titik belok (*inflection point*) pada resesi suatu hidrograf terjadi ketika timbunan air simpanan permukaan terantuskan.

Analogi pada sistem DAS selama resesi diterangkan bahwa lengkung resesi hidrograf dari suatu kejadian hujan semakin lama semakin menurun. Hal ini

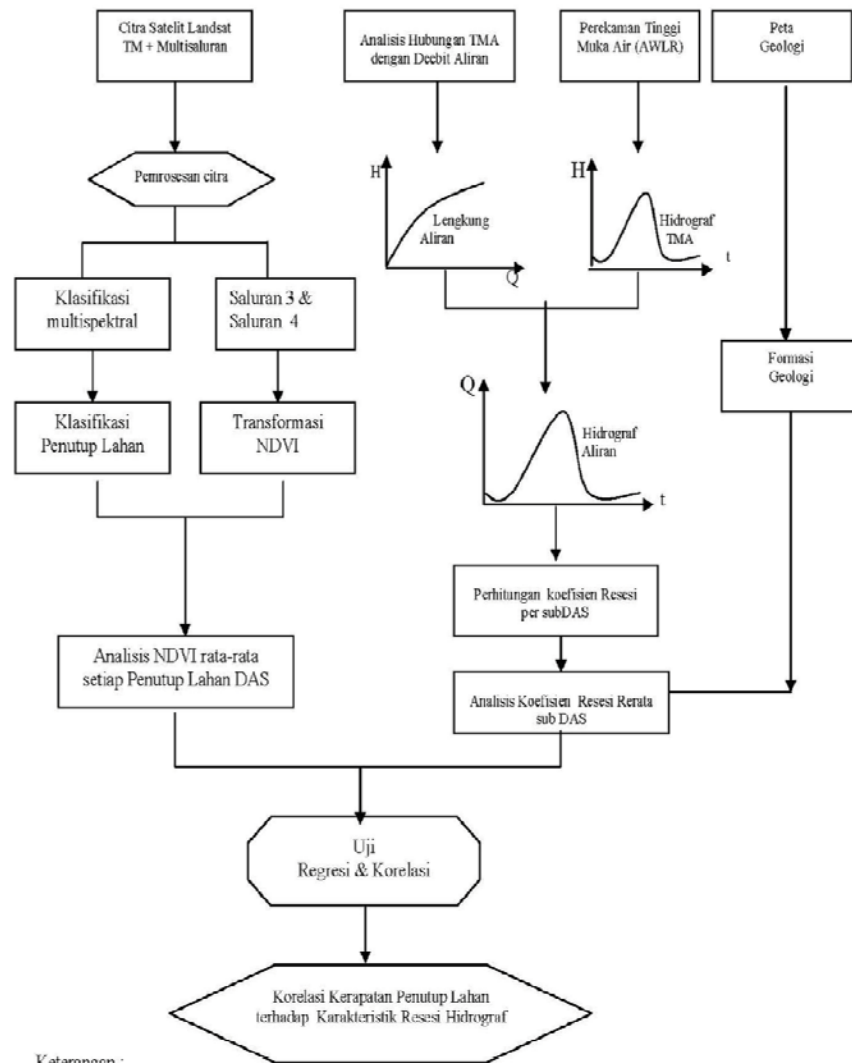
menunjukkan bahwa aliran dasar sebagai salah satu komponen aliran sungai mengalami pengatusan. Lengkung resesi hidrograf untuk suatu DAS, umumnya memiliki karakter yang sama sehingga dapat dinyatakan oleh suatu persamaan umum yang berlaku untuk setiap kejadian hujan yang terjadi di suatu daerah tersebut. Bentuk lengkung resesi ini merupakan suatu fungsi eksponensial dan jika digambarkan pada kertas semilogaritmik akan diperoleh garis lurus.

Lengkung resesi merupakan suatu kurva spesifik untuk suatu DAS tertentu, sehingga secara ideal hanya ada satu lengkung resesi yang seharusnya berlaku untuk berbagai hidrograf. Bentuk lengkung resesi secara umum pada suatu DAS merupakan lengkung resesi utama (*master depletion curve*). Lengkung resesi utama ini dapat digambarkan dengan cara mengambil resesi dari berbagai hidrograf.

Evaluasi respon DAS berupa hidrograf aliran akibat adanya perubahan penutupan lahan menjadi sangat penting untuk dianalisis karena merupakan tolok ukur dalam setiap penentuan kebijakan terkait dengan penanganan banjir dan tanah longsor. Informasi tentang penutup lahan penting untuk digunakan dalam berbagai kegiatan perencanaan dan pengelolaan yang berhubungan dengan permukaan bumi. Penyusunan kelas lebih didasarkan pada penutupan lahan (*landcover*) daripada penggunaan lahan (*landuse*). Penutup lahan dapat berupa hutan, perairan, lahan pertanian, dan non pertanian, ataupun permukiman yang menutupi tanah dalam luasan tertentu, yang terbagi dalam sistem klasifikasi lahan.

METODE PENELITIAN

Daerah yang digunakan pada penelitian ini meliputi 15 sub-DAS yang tersebar di propinsi Jawa Tengah dan Propinsi DIY. Pemilihan lokasi penelitian ini didasarkan atas ketersediaan Stasiun Pengamatan Aliran Sungai (SPAS) dan AWLR (*Automatic Water Level Recorder*). Deskripsi lengkap sub-sub DAS yang diteliti tersebut lihat Tabel 1.



Gambar 1. Kerangka Pemikiran

Tabel 1 Deskripsi Sub DAS berdasarkan Lokasi SPAS

No.	Nama Sub DAS	Nama SPAS	Lokasi SPAS
1.	Alang	Kedungpadas	Kedungpadas - Wonogiri
2.	Padas	Katelan	Katelan - Sragen
3.	Tapan	Sepanjang	Sepanjang - Karanganyar
4.	Wuryantoro	Sendang	Sendang - Wonogiri
5.	Keduang	Ngadipiro	Ngadipiro Wonogiri
6.	Progo Hilir	Banjarharjo	Banjarharjo -Kulonprogo
7.	Gumelar	Gumelar	Gunungsari - Kebumen
8.	Tinggal(Progohulu)	Gandon	Gandon-Temanggung
9.	Medono(Trancap)	Trancap	Trancap- Wonosobo
10.	Merawu/Sampang	Sampang	Sampang-Banjarnegara
11.	Karangmojo,Oyo	Karangmojo	Karangmojo - Gunungkidul
12.	Luk Ulo Hulu	Gunungsari	Gunungsari-Kebumen
13.	Sawangan(Gebang)	Sawangan	Sawangan-Purworejo
14.	Kamal,Merawu	Kamal	Kamal -Kulonprogo
15.	Elo Blongkeng	Pucungsari	Pucungsari-Magelang

Bahan dan alat yang dibutuhkan dalam penelitian ini yaitu citra Landsat ETM⁺, Peta Topografi, Peta Geologi, Data SPAS dan AWLR, software ArcGIS, ENVI, EXCEL dan perangkat komputer. Adapun kegunaan dari bahan dan alat yang dibutuhkan terkait dengan penelitian ini dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2 Bahan & Alat yang Digunakan dalam Penelitian

No.	Nama Bahan/Alat	Kegunaan
1.	Citra Landsat ETM+	Untuk membuat Peta Kerapatan Vegetasi Penutup Lahan (Analisis Transformasi Indeks vegetasi)
2.	Peta Topografi Skala 1 : 50.000	Sebagai peta dasar membuat peta lereng, jaringan sungai
3.	Peta Geologi	Untuk menyadap Informasi geologi dan batuan (Selanjutnya untuk analisis Akuifer batuan untuk perkiraan kemampuan resesi aliran dasar sub DAS)
4.	Data SPAS	Untuk pengukuran & pencatatan data debit aliran sungai
5.	Data AWLR	Untuk pengumpulan data Tinggi Muka Air
6.	Software ArcGIS/ENVI/EXCEL	Penyajian dan Analisis Data Spasial
7.	Seperangkat Komputer	Analisis & Penulisan Hasil Penelitian

Data Kerapatan vegetasi Penutup Lahan (NDVI). Proses pengerjaannya dengan menggunakan fasilitas menu *BandMath* pada ENVI 4,0, yaitu dengan menuliskan persamaan matematisnya, dimana selisih pengurangan antara saluran inframerah dekat terhadap saluran merah dibagi oleh hasil penjumlahan dari

keduanya. Hasil dari pengolahan dengan proses tersebut adalah citra NDVI yang berupa data raster. Untuk proses analisa lebih lanjut, maka citra raster yang diperoleh harus diubah dalam bentuk vektor, sehingga dilakukan *AutoVectorize* agar nilai atribut yang nantinya digunakan dalam analisis merupakan nilai NDVI asli.

Klasifikasi dilakukan melalui menu *proses classification ISOCLASS unsupervised classification* melalui menu *edit_edit classregion color and name* dimasukkan kelas penutup lahannya. Kelas NDVI disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3 Klasifikasi hasil transformasi NDVI

Kelas	Nilai NDVI	Tingkat Kerapatan Vegetasi
1	(-0,8093) –(-0,4349)	Tanpa atau sedikit vegetasi
2	(-0,4349) –(-0,1654)	Vegetasi Jarang
3	(-0,1654) – 0,1090	Vegetasi Sedang
4	0,1090 – 0,3835	Vegetasi Rapat
5	0,3835 – 0,6579	Vegetasi Sangat Rapat

Sumber : Klasifikasi NDVI hasil proses Citra Landsat 7 ETM⁺

Nilai NDVI setiap DAS diambil nilai rata-rata sebagai nilai NDVI tunggal yang akan dikorelasikan dengan koefisien resesi untuk menganalisis hubungan antara kedua parameter tersebut.

Hidrograf aliran pada bagian resesinya terdiri dari beberapa komponen, masing-masing komponen air tersebut berasal dari media yang berbeda sehingga sifat pelepasan airnya tidak sama. Pelepasan air yang paling cepat berasal dari *surface detention storage*, kecepatan sedang berasal dari interflow dan pelepasan air dengan kecepatan paling lambat dari *groundwater storage*. Dengan mempertimbangkan perbedaan pelepasan air tersebut, maka dimungkinkan melakukan pemisahan komponen air dari masing-masing sumber.

Faktor yang membedakan kecepatan pelepasan aliran dalam suatu persamaan lengkung resesi baseflow bisanya dinyatakan dalam koefisien resesi (K). Dalam penelitian ini, yang akan dicari adalah koefisien resesi baseflow (K_{rb}). Nilai K_{rb} ditentukan dengan menggambarkan nilai-nilai Q_0 terhadap Q_t dengan selang waktu t satu hari. Nilai Q_0 dan Q_t diambil dari sembarang kurva resesi aliran dasar pada hidrograf aliran, dimana pada penyebaran titik-titik hasil plot dari nilai Q_0 dan Q_t , kemudian dibuat regresi linier dengan fungsi :

$$Q_t = K_{rb} Q_0 \quad (3.7)$$

$$K_{rb} = \frac{Q_t}{Q_0} \quad (3.8)$$

dimana : Q_t = debit sesudah waktu t

Q_0 = debit permulaan

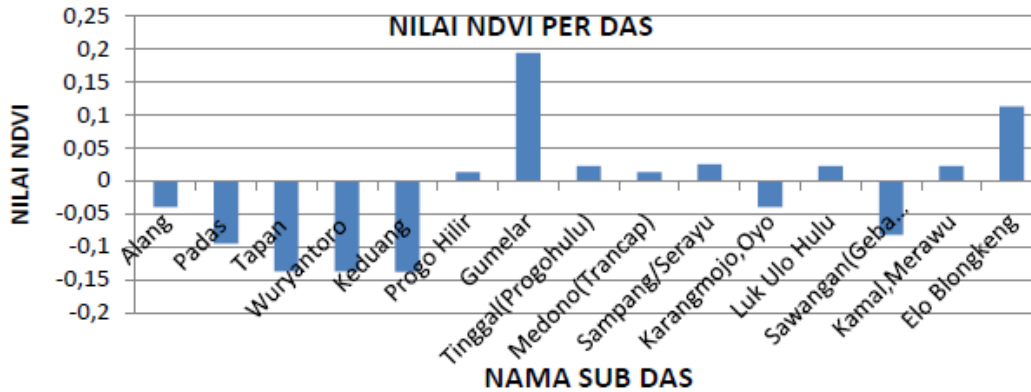
K_{rb} = koefisien resesi dari lengkung resesi hidrograf aliran

Metode lengkung aliran yang baik untuk suatu DAS adalah metode lengkung aliran yang digunakan dengan pendekatan regresi yang harus diuji terlebih dahulu tingkat penyimpangannya, dimana garis lengkung yang terbentuk tergantung dari sebaran titik data yang ada. Sebaran titik-titik data tersebut dipengaruhi oleh bentuk penampang saluran.

Analisis regresi digunakan untuk menunjukkan hubungan antara variabel terikat y dan satu variabel bebas x. Hasil transformasi indeks vegetasi berupa kerapatan vegetasi penutup lahan (nilai NDVI) dipasangkan dengan koefisien resesi. kerapatan vegetasi penutup lahan dianggap sebagai variabel bebas, sedangkan nilai koefisien resesi sebagai variabel terikat. Dengan demikian, setiap sub DAS sampel akan memiliki satu nilai y dan satu nilai x. Pasangan nilai tersebut apabila diplot pada sistem koordinat cartesius akan menunjukkan sebaran dengan pola tertentu. Pola tersebut akan sangat penting dalam penentuan jenis persamaan regresi yang akan dibuat, apakah linier atau cenderung membentuk kurva..

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, indeks vegetasi yang dipergunakan adalah NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) yaitu indeks vegetasi yang menggunakan kombinasi antara selisih dan nisbah, dimana indeks vegetasi ini diharapkan mempunyai julat (*range*) yang pasti yaitu antara -1 (sebagai nilai minimum) sampai dengan +1 (sebagai nilai maksimum) dimana selisih antara pantulan inframerah dekat dan merah dinormalisasi. Nilai NDVI pada penelitian ini diperoleh dari transformasi matematis dengan masukan saluran merah dan saluran inframerah dekat, yang diproses dengan perangkat lunak ENVI 4,0. Dari hasil yang diperoleh dapat dilihat bahwa tidak terdapat pola lurus antara nilai NDVI terhadap jenis penutup lahan, meskipun terdapat dominasi besarnya luasan jenis penutup lahan tertentu pada suatu rentang kelas nilai NDVI. Hasil perhitungan transformasi indeks vegetasi diperoleh nilai NDVI masing-masing Sub DAS disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Batang Nilai NDVI per subDAS

Gambar 2 menunjukkan bahwa NDVI subDAS yang berada pada daerah negatif adalah menunjukkan kerapatan vegetasi kurang meliputi subDAS Alang, Padas, Tapan, Wuryantoro Keduang, Karangmojo, dan Sawangan. Sedangkan nilai NDVI subDAS yang berada pada daerah positif menunjukkan kerapatan vegetasi sedang meliputi subDAS Progo hilir, gumelar, Medono, Sampang, Luk Ulo hulu, Kamal dan Elo-Blongkeng. Persebaran nilai NDVI berdasarkan kelas klasifikasi menunjukkan bahwa sebagian besar subDAS berada pada kelas klasifikasi kerapatan vegetasi sedang. NDVI subDAS secara keseluruhan merupakan wilayah-wilayah konservasi dari BPDAS Serayu Opak Progo (BPDAS SOP) dan Balai Penelitian Kehutanan Surakarta Departemen Kehutanan. Dengan demikian kondisi kerapatan vegetasi penutup lahan di wilayah-wilayah tersebut memiliki kerapatan vegetasi termasuk kategori sedang yang mana masih terkait dengan program-program kerja konservasi hutan Departemen Kehutanan.

Besarnya nilai NDVI dipengaruhi oleh kerapatan dan besarnya luasan yang tertutup oleh kanopi. Semakin rapat dan lebat, maka nilai NDVI akan semakin mendekati nilai 1. Kisaran nilai NDVI di daerah penelitian memperlihatkan bahwa tidak terdapat tutupan vegetasi yang menutupi permukaan secara keseluruhan, sehingga respon spektral vegetasi masih terpengaruh oleh respon spektral obyek yang melatarbelakanginya.

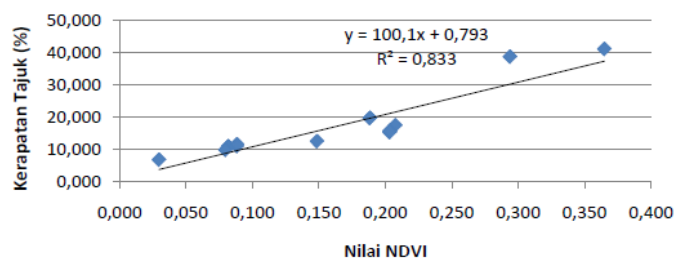
Untuk memperoleh nilai NDVI yang mempresentasikan kerapatan vegetasi subDAS, maka nilai transformasi NDVI untuk penutup lahan yang bervegetasi (meliputi hutan primer, hutan sekunder dan ladang) dirata-ratakan untuk memiliki nilai NDVI yang kemudian diuji statistik dengan liputan vegetasi untuk menggambarkan karakteristik kerapatan vegetasi penutup lahan di setiap subDAS penelitian. Liputan vegetasi yang diperoleh merupakan hasil uji statistik dari data

sekunder pengukuran kerapatan tajuk dari beberapa penelitian, selanjutnya dilakukan uji korelasi antara nilai NDVI subDAS penelitian dengan persentase kerapatan tajuk yang dianggap merepresentasikan hubungan determinasi antara kerapatan tajuk dengan nilai NDVI.

Hasil uji statistik antara nilai NDVI subDAS penelitian dengan persentase kerapatan tajuk menunjukkan bahwa kerapatan vegetasi sampel bervariasi antara 6,835 – 41,147%. Sampel pada kelas I mewakili kerapatan sekitar 6,835-11,021% yang merupakan ladang, hanya terdapat beberapa tegakan efektif yang terpencar, dan sebagian besar berupa semak belukar. Sampel kelas II memiliki kerapatan 11,631 – 15,795% yang merupakan ladang dan hutan sekunder dengan disekitarnya ada permukiman penduduk kerapatan sedang. Sampel kelas III memiliki kerapatan 17,467–41,147% yang merupakan hutan sekunder dan hutan primer dengan kondisi kerapatan tegakan yang tidak seragam.

Kerapatan tajuk yang terukur akan diperhitungkan untuk mengetahui kerapatan vegetasi daerah penelitian. Oleh karena itu, dilakukan uji korelasi untuk mengetahui apakah kerapatan tajuk sampel sudah rapat mewakili keadaan populasi, melalui parameter statistik berupa koefisien determinasi $R^2 = 0,8338$ dengan koefisien variasi 23.42918 dan uji F 65.59 lebih kecil dari taraf kepercayaan 0,001 berpengaruh sangat nyata dengan kesalahan baku (*standard error*) disajikan (lampiran 1.2). Dengan demikian kesimpulan yang diambil berdasarkan perhitungan menggunakan data dari sampel ini dapat dianggap berlaku bagi populasi vegetasi di daerah penelitian.

Hasil transformasi NDVI menunjukkan terdapatnya korelasi antara nilai NDVI dan kerapatan vegetasi. dengan hubungan antara kedua variabel menghasilkan bentuk persamaan matematis. Dalam hal ini nilai kerapatan vegetasi dianggap sebagai variabel x, sedangkan nilai NDVI yang besarnya tergantung dari nilai kerapatan vegetasi, dianggap sebagai variabel y. Pasangan nilai sampel menghasilkan distribusi titik-titik yang membentuk pola linier yang disajikan dalam gambar 3



Gambar 3 Hubungan NDVI dengan Kerapatan Tajuk

Kerapatan vegetasi dan NDVI memiliki hubungan yang searah, dengan kata lain pada nilai kerapatan vegetasi yang semakin tinggi akan diperoleh nilai NDVI yang semakin tinggi pula dan sebaliknya, bila kerapatan vegetasi rendah akan diperoleh nilai NDVI yang rendah. Hal ini dapat diamati dengan jelas dari distribusi sampel-sampel pada *scatter plot*. Selain itu, diketahui pula bahwa hubungan antara keduanya kuat, yang dilihat dari nilai koefisien korelasi yang mendekati 1. Walaupun hubungan antara kerapatan vegetasi dengan NDVI yang diteliti pada penelitian ini tergolong kuat, hal tersebut belum dapat dijadikan bukti bahwa hanya kerapatan vegetasi semata-mata yang berpengaruh kuat terhadap nilai NDVI

Hasil Persamaan liku kalibrasi dan koefisien determinasi (R^2) dari subDAS yang diteliti disajikan dalam tabel 4.

Tabel 4 Persamaan Lengkung Aliran dan Koefisien Determinasi Hidrograf

No.	Nama sub DAS	Luas (ha)	Persamaan Liku Kalibrasi	R^2
1	Alang	4555.473	$Q= 19,49(H-0,0226)^{0,78}$	0.889
2	Padas	3335.510	$Q= 4,57(H-0,263)^{0,6}$	0.789
3	Tapan	300.702	$Q= 0,963(H-0,01)^{1,31}$	0.816
4	Wuryantoro	1777.827	$Q= 0,375(H-0,3)^{0,0,32}$	0.562
5	Keduang	42104.739	$Q= 7,85(H-0,275)^{0,382}$	0.804
6	Progo Hilir	350.650	$Q= 0,91(H-0,0275)^{0,23}$	0.824
7	Gumelar	1221.204	$Q= 0,57(H+0,205)^{0,84}$	0.842
8	Tinggal(Progohulu)	4237.690	$Q= 0,93(H+1,66)^{0,86}$	0.901
9	Medono(Trancap)	873.371	$Q= 1,11(H-0,168)^{0,63}$	0.820
10	Sampang/Serayu	781.706	$Q= 1,64(H-0,39)^{0,1}$	0.612
11	Karangmojo,Oyo	530.596	$Q= 0,96(H+1,66)^{0,93}$	0.612
12	Luk Ulo Hulu	214.656	$Q= 10,82(H-0,066)^{2,15}$	0.755
13	Sawangan(Gebang)	1517.873	$Q= 2,08(H-0,049)^{0,24}$	0.871
14	Kamal,Merawu	179.005	$Q= 2,80(H-0,56)^{0,33}$	0.795
15	Elo Blongkeng	151.900	$Q= 0,88(H-0,003)^{0,077}$	0.871

Sumber : Analisis Data Sekunder BPK Surakarta & BPDAS SOP Yogyakarta, 2006

Persamaan liku kalibrasi dalam tabel 4 menunjukkan bahwa subDAS yang memiliki koefisien determinasi (R^2) diatas 0,760 secara berturut-turut terdapat pada subDAS Progo Hulu (0,901), Alang (0,889), Sawangan dan Elo-Blongkeng (0,871), Gumelar (0,842), Progo Hilir (0,824), Medono (0,820), Kamal (0,795), Padas (0,789). Sedangkan R^2 dibawah 0,760 terdapat di subDAS Wuryantoro (0,562), Sampang dan Karangmojo (0,612), Luk ulo hulu (0,755). Koefisien determinasi subsub DAS penelitian secara keseluruhan menunjukkan hubungan yang relatif kuat, yakni berkisar antara 0.60 s/d 0.90 yang berarti bahwa variasi debit (Q) dapat

dijelaskan dengan tinggi muka air (H) sebesar 60 % s/d 90. Sehingga persamaan regresi (Q) atas (H) dapat dipakai untuk menduga Q atas dasar (H).

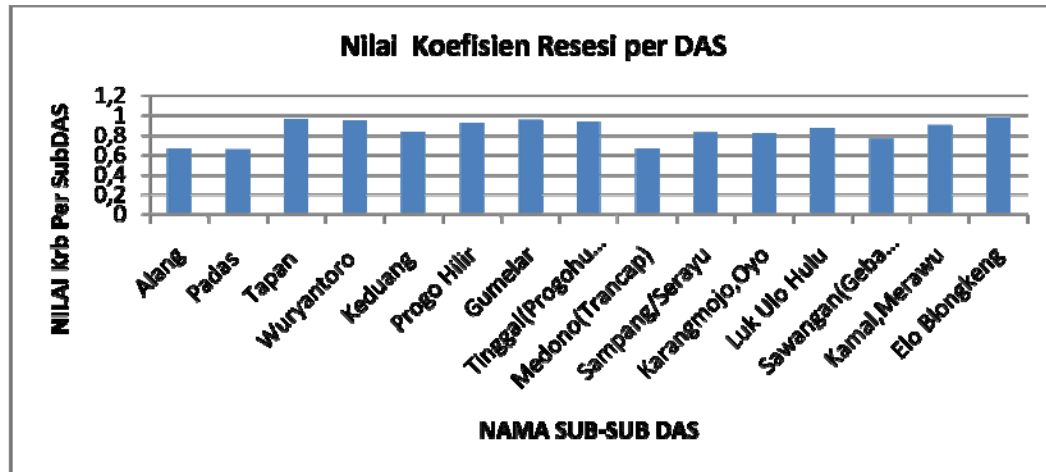
Data yang digunakan ada tiga pengamatan pada masing-masing subDAS. Data tersebut dikonversi menjadi data hubungan debit terhadap waktu atau hidrograf dengan menggunakan persamaan lengkung terbaik pada masing-masing DAS. Kemudian hidrograf tersebut dilakukan pemisahan hidrograf untuk menentukan lengkung resesi aliran dasar. Dari pemisahan tersebut diperoleh titik belok (*inflexion point*), yang merupakan awal dari lengkung resesi aliran dasar. Pemisahan untuk menentukan titik awal lengkung resesi pada masing-masing DAS.

Penentuan nilai Q_0 pada setiap hidrograf, merupakan besar debit pada saat awal lengkung resesi aliran dasar. Nilai Q_0 ini akan diterapkan pada persamaan lengkung resesi aliran dasar dengan metode Barnes untuk menghitung koefisien resesi aliran dasar. Hidrograf aliran yang akan diambil pada kejadian dimana minimal 24 jam atau 1 hari sesudah penurunan hidrograf tidak ada hujan lagi. Pembuatan lengkung resesi aliran dasar menggunakan metode Barnes, yaitu $Q_t = Q_0 K_{rb}^t$, dimana Q_t : debit sesudah waktu t, Q_0 : debit permulaan, dan K_{rb} : koefisien resesi aliran dasar.

Untuk menghitung koefisien resesi, dilakukan dengan mengambil nilai Q_t setelah 1 jam. Nilai K_{rb} ditentukan dengan menggambarkan nilai-nilai Q_0 terhadap Q_t dengan selang waktu t, satu hari. Nilai-nilai Q_0 dan Q_t diambil dari sembarang kurva resesi aliran dasar pada hidrograf aliran, dimana pada penyebaran titik-titik hasil plot dari nilai Q_0 dan Q_t , kemudian dibuat regresi linier dengan fungsi $Q_t = K_{rb} Q_0$ dan $K_{rb} = Q_t / Q_0$.

Hasil perhitungan koefisien resesi menggambarkan K_{rb} sangat landai secara berturut-turut terdapat pada subDAS Elo-Blongkeng (0,980), Tapan (0,960), Gumelar (0,955), Wuryantoro (0,953), Progo Hilir (0,929), Progo Hulu (0,944), Kamal (0,908), Luk ulo (0,872), Keduang (0,841), Sampang (0,832), Karangmojo (0,821), Sawangan (0,768), Alang (0,669), Medono (0,664) dan Padas (0,661).

Hasil dari penelitian ini berupa hidrograf aliran dasar hasil pengukuran dan hidrograf aliran dasar hasil perhitungan dengan metode Barnes menunjukkan bahwa keseluruhan subDAS memiliki nilai koefisien resesi yang tinggi sebagaimana disajikan dalam diagram batang pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Batang Nilai Koefisien Resesi (Krb)per SubDAS

Berdasarkan sifat-sifat fungsi resesi aliran dasar yang dihitung dengan menggunakan metode Barnes menyatakan bahwa nilai koefisien resesi yang semakin besar atau semakin mendekati satu, maka lengkung resesi aliran dasar yang dihasilkan akan semakin landai dan sebaliknya semakin kecil nilai koefisien resesi, maka lengkung resesi aliran dasar yang dihasilkan menjadi semakin curam.

Analisis korelasi digunakan untuk menentukan kuatnya hubungan antara variabel-variabel yang diuji. Dalam penelitian ini, hubungan antara variabel kerapatan vegetasi penutup lahan (nilai NDVI) terhadap karakteristik resesi hidrograf (koefisien resesi hidrograf). Kedua variabel tersebut diperbandingkan sejauhmana korelasi dari pasangan variabel tersebut. Hubungan tersebut akan diukur dengan menggunakan koefisien determinasi (r^2), kemudian digambarkan dalam sistem koordinat kartesius dan ditentukan persamaan regresinya.

Hubungan antara variabel independen (nilai NDVI) dengan variabel dependen (koefisien resesi) disajikan dalam tabel 5.

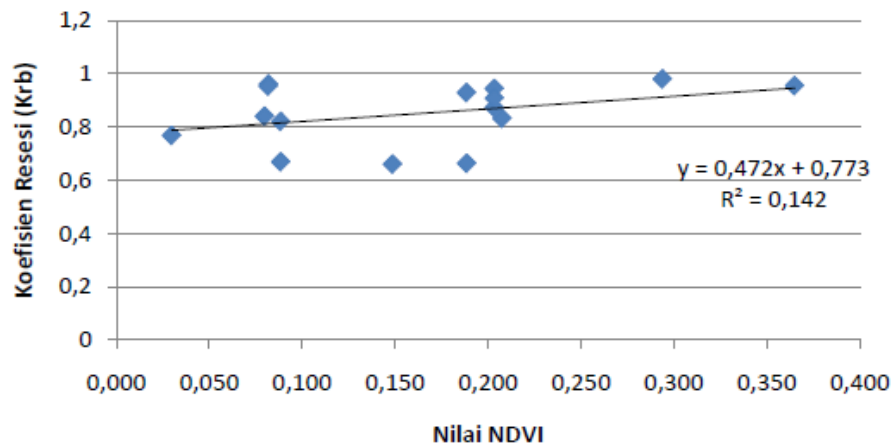
Tabel 5 Uji Korelasi NDVI Penutup Lahan dengan Koefisien Resesi di Sub-sub DAS yang Diteliti

No.	Nama DAS	(NDVI) Kerapatan Vegetasi	Koefisien Resesi Krb
1	Alang	0.088	0.669
2	Padas	0.149	0.661
3	Tapan	0.082	0.960
4	Wuryantoro	0.082	0.953
5	Keduang	0.080	0.841
6	Progo Hilir	0.188	0.929
7	Gumelar	0.365	0.955
8	Tinggal(Progohulu)	0.203	0.944
9	Medono(Trancap)	0.188	0.664
10	Sampang/Serayu	0.208	0.832
11	Karangmojo,Oyo	0.088	0.821
12	Luk Ulo Hulu	0.203	0.873
13	Sawangan(Gebang)	0.030	0.768
14	Kamal,Merawu	0.203	0.908
15	Elo Blongkeng	0.294	0.980

Sumber : Hasil Analisis Data sekunder BPK Surakarta & BPDAS SOP Yogyakarta, 2006.

Tabel 5 menunjukkan nilai NDVI subDAS penelitian berkisar antara (0,030 s/d 0,365) dengan persentase kerapatan vegetasi antara (6,835 s/d 41,147%), dikorelasikan dengan koefisien resesi (Krb) yang berkisar antara 0,661 s/d 0,980, dimana hampir semua subDAS penelitian memiliki kondisi cukup landai sampai sangat landai. Hal ini terkait dengan formasi geologi yang dimiliki memiliki kemampuan menampung, menyimpan dan meloloskan air yang cukup memadai.

Dalam penelitian tahap ini nilai NDVI dianggap sebagai variabel x, sedangkan koefisien resesi yang besarnya tergantung dari nilai NDVI, dianggap sebagai variabel y. Hubungan antara kedua variabel menghasilkan bentuk persamaan matematis dan distribusi titik-titik yang membentuk pola yang linier yang disajikan dalam gambar 5.



Gambar 5. Hubungan NDVI dengan Koefisien Resesi

Hasil uji statistik NDVI dengan koefisien resesi menunjukkan terdapatnya korelasi antara nilai NDVI dan koefisien resesi pada $R^2 = 0,1427$, $F = 2.17$ tidak berpengaruh nyata pada taraf signifikan 1% sebesar 0.1646 (lampiran 1.2b). Analisis korelasi antara variabel independen (NDVI penutup lahan) dengan variabel dependen (koefisien resesi) memiliki korelasi sangat lemah sebesar 0,077. Hasil ini menunjukkan bahwa parameter kerapatan vegetasi NDVI sangat lemah untuk mengontrol keberadaan aliran-aliran rendah. Karena besarnya simpanan (*storage*) airtanah tergantung pada besarnya air yang mencapai akuifer. Setelah sumbangan air pada akuifer terhenti, maka air yang tertampung di akuifer akan mengalami pengatusan yang besarnya tergantung kondisi akuifer tersebut. Gerakan air pada akuifer disebabkan oleh gaya gravitasi, kecepatan dan jumlahnya terutama dipengaruhi oleh karakteristik batuan. Karakteristik batuan mempengaruhi pergerakan airtanah, diketahui dari daya hantar hidrolis batuan tersebut.

Walaupun hubungan keeratannya relatif lemah namun secara substansial hubungan keeratannya tersebut masih memberikan kontribusi dalam interaksi proses-proses aliran dalam sistem hidrologi suatu DAS dalam kurun waktu yang lama. Sebagai salah satu komponen dalam sistem hidrologi, penutup lahan vegetasi masih tetap akan mempengaruhi hasil aliran keluar yang relatif berpengaruh dan perlu diperhitungkan dalam pengelolaan suatu DAS.

KESIMPULAN

1. Transformasi indeks vegetasi NDVI sebagian besar subDAS penelitian memiliki nilai NDVI berkisar antara (-0,1654)– 0,1090. Selanjutnya uji statistik hubungan NDVI sebagai representasi kerapatan vegetasi penutup lahan menghasilkan hubungan yang searah, artinya semakin tinggi nilai NDVI, maka kerapatan vegetasi penutup lahan semakin rapat, sebaliknya semakin rendah NDVI, maka kerapatan vegetasi semakin jarang, dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,8338$, koefisien variasi 23.42918 dan uji F 65.59 lebih kecil dari taraf kepercayaan 0,001 berpengaruh sangat nyata.
2. Persentase penutup lahan bervegetasi rata-rata berkisar antara 5.95% - 33.31%, dengan penutup lahan bervegetasi 30% meliputi subDAS Progo Hilir Gumelar, Progo Hulu, Medono, Luk Ulo Hulu, Sawangan dan Elo-Blongkeng. Sedangkan persentase penutup lahan vegetasi berkisar kurang dari 30% meliputi subDAS Tapan, Padas, Wuryantoro, Keduang, Karangmojo, Sampang, Kamal dan Alang memiliki.
3. Karakteristik resesi aliran dasar (koefisien resesi) sebagian besar berada pada kisaran yang relatif tinggi yakni berkisar antara 0,661 s/d 0,980. Nilai koefisien resesi menunjukkan bahwa formasi akuifer batuan subDAS penelitian sebagian besar memiliki kemampuan menampung, menyimpan dan meloloskan air dengan lengkung resesi yang sangat landai.
4. Hasil uji statistik NDVI dengan koefisien resesi menunjukkan terdapatnya hubungan korelasi (r) yang lemah sebesar 0,077 dengan $R^2 = 0,1427$, uji keberartian $F = 2.17$ tidak berpengaruh nyata pada taraf signifikan 1% sebesar 0.1646. Hasil ini menunjukkan bahwa parameter kerapatan vegetasi NDVI sangat lemah untuk mengontrol keberadaan aliran-aliran rendah karena besarnya simpanan (*storage*) airtanah pada kondisi resesi tergantung pada besarnya air yang mencapai akuifer. Setelah sumbangan air pada akuifer terhenti, maka air yang tertampung di akuifer akan mengalami pengatusan yang besarnya tergantung kondisi akuifer tersebut

DAFTAR PUSTAKA

- Asdak,C. 1995. *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*, Gadjah Mada University Press. Cetakan Pertama, Yogyakarta
- Danoedoro,P. 2004. *Informasi Penggunaan Lahan Multidimensional : Menuju Sistem Klasifikasi Penggunaan Lahan Multiguna untuk Perencanaan Wilayah dan Pemodelan Lingkungan*. Sains Informasi Geografis : Dari perolehan dan Analisis Citra Hingga Pemetaan dan Pemodelan Spasial, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta

- De Vries, J.J. 1975. *Groundwater Hidroulics*. Communication of Earth Sciences. Free Reformed University. Amsterdam
- Scultz, E.F. 1974. *Problem in Applied Hydrology*. Water Resources Publication Foat Collins. Cororado, USA.
- Sri Harto, 1993. *Analisis Hidrologi*. Gramedia. Jakarta
- Todd, D.K. 1970. *Groundwater Hydrology*. John Wiley & sons.
- Walton, W.C. 1970. *Groundwater Resources Evaluation*. Tokyo : McGraw-Hill Kogakusha