PEMANFAATAN TEKNIK PENGINDERAAN JAUH UNTUK PEMANTAUAN DAN EVALUASI PENGELOLAAN DAERAH ALIRAN SUNGAI SOLO

(The Application of Remote Sensing Technology for Monitoring and Evaluation of Solo Watershed Management)

Oleh:

Totok Gunawan

Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada

Bulaksumur, Telp. (0274) 902336, Telex: 25135 Yogyakarta

ABSTRACT

This research is an application of remote sensing technology for monitoring and evaluation of watershed management, which was conducted is Solo Watershed, Central and East Java. The research objectives were (1) to investigate the capability of photomorphic analysis of Landsat Thematic Mapper (TM) and Enhanced Themmatic Mapper (ETM+) imagery as the basis for analyses of landforms, land-use, and morphometry of the land surface, (2) to calculate the overland flow – peak discharge and erosion – sediment yield as indicators of land degradation of the area, (3) to use the indicators as set of instrument for monitoring and evaluation of watershed management. In this study, visual interpretation by means of on-screen digitization of the digital imagery was carried out in order to identify and to delineate land parameters using photomorphic approach. Based on the photomorphic analysis , several image-based parameters such as relief/ topography, physical soil characteristics, litho-stratigraphy, and vegetation cover were integrated with other thematic maps in a geographic information system (GIS) environment. Estimation of overland flow (C) based on Cook methods (1942) and calculation of peak discharge (Q_{max}) based on rational method (Q_{max}=C.I.A) were applied. Meanwhile, estimation of surface erosion was carried out using Universal Soil Loss Equation (USLE, A = R.K.L.S.CP). The sediment yield (S_y) was estimated using sediment delivery ratio (SDR) based on the following formula : S_y=[A+(25% x A)] x SDR. Both pairs of C-Q_{max} and A-S_y were utilized as the basis for monitoring and evaluation of the watershed. The combination of C-Q_{max} and A-S_y were also used as the basis for selecting location of stream gauge setting / AWLR within particular sub-catchments. It was found that the photomorphic analysis is only color/ tone, slope aspects, pattern, and texture, unit boundaries between volcanic-origin landscapes (Wilis volcanic complex) and folded-hills landforms (Kendeng ridge) can be delineated. Within the volcanic features, coarse-textured units indicating pyroclastic materials with high drainage density (western part of Lawu volcano). In terms of calculated overland flow and peak discharge of 100 sub-catchments within the Solo Watershed, it was found that there are four sub-catchments with relatively high values (>0.60 and > 1200 m^3s^{-1} for overland flow and peak discharge repectively), namely Samin (Karanganyar), Keduang (Wonogiri), Dengkeng (Klaten), and Sungkar (Ponorogo). Five sub-catchments might be categorized as having moderate peak discharge (Q_{max} ranges from 1000 – 1200 m^3s^{-1}), namely Ketonggo (Ngawi), Keyang (Ponorogo), Gandong-

Semawur (Magetan), Pepe (Boyolali), and Soko (Bojonegoro), while the remaining 91 sub-catchments are categorized as having low peak discharge. Based on the calculation of erosion and sediment yield, there was no sub-catchment that can be categorized as severe to extremely severe. Instead, there were a couple of sub-catchments with modreate category (60 – 180 ton ha^{-1}yr^{-1}), i.e. *Samin (Karanganyar), Gonggong (Magetan), Ngisip and Kedung cilik (Tuban), and Pepe (Boyolali). The other 95 sub-catchments might be categorized as gentle to good. In terms of values representing overland flow – flood and erosion-sediment yield, there are several sub-catchments require firs priority in monitoring and evaluation, and are recommended as suitable sites for stream gauge setting,* i.e. *samin (Karanganyar), Gonggong (Magetan, Ngisip and Kedungcilik (Tuban).*

Keywords: monitoring and evaluations, photomorphic, watershed, chacthment.

PENDAHULUAN

Pemantauan dan evaluasi pengelolaan DAS tidak pernah dilakukan secara tuntas dan terkesan terpisah-pisah serta tidak sinkron antara sektor satu dan sektor yang lain dalam pelaksanaannya dan bahkan hal semacam ini justru tidak mendapat prioritas. Sampai dengan saat ini parameter-parameter lahan dan indikator-indikator yang digunakan dalam pemantauan dan evaluasi pengelolaan DAS juga tidak seragam. Hal-hal semacam inilah yang perlu diseragamkan dan disosialisasikan kepada sektor-sektor terkait yang berwewenang melaksanakan pemantauan dan evaluasi kegiatan pengelolaan DAS. Banyak hal yang dapat diambil manfaatnya dari hasil kegiatan pemantauan dan evaluasi, antara lain: pertama, bagi manajer pengelolaan DAS, sebagai bahan masukan revisi perencanaan awal (*Pre-evaluation*) dan pengambilan keputusan mendadak (*Ad-hoc*), kedua, bagi implementor pengelolaan DAS, sebagai revisi di tengah pelaksanaan (*On-going*), dan ketiga, bagi pengembang wilayah (*Regional developer*), sebagai masukan dalam menyusun konsep pembangunan wilayah, yaitu Integrasi Model DAS dan Model Regional (Brooks, et al., 1990; PUSPICS, 2002).

Kegiatan manusia (*Sosial ekonomi*) dalam suatu wilayah DAS sangat dinamik dalam kerangka mencukupi kebutuhan perekonomian sehari-hari hingga seringkali tidak peduli mengolah maupun mengkonversi lahan-lahan marginal pada lereng-lereng terjal yang seharusnya menjadi ruang terbuka hijau. Kecepatan aktivitas penduduk demikian akan sukar dipantau tanpa menggunakan teknologi tepat guna yang mampu mengikuti perkembangan perubahan penggunaan lahan yang cukup intensif dan dinamik. Perubahan penggunaan lahan yang cukup intensif tersebut akan diikuti oleh proses kerusakan lahan terutama oleh tenaga potensial air hujan (pukulan hujan dan limpasan permukaan). Teknologi yang

mampu memantau perubahan penggunaan lahan dan kerusakan lahan dinamik adalah teknologi penginderaan jauh (*Remote sensing techniques*). Analisis fotomorfik citra Landsat dengan mendasarkan pada elemen-elemen karakteristik citra dapat digunakan untuk identifikasi elemen-elemen bentanglahan. Analisis fotomorfik paling efektif digunakan untuk analisis citra berskala kecil seperti citra Landsat. Prosedur pengolahan data yang mampu mengintegrasikan data spasial hasil penyadapan data dari citra Landsat dengan atribut lain dari berbagai sumber data dan skala dan untuk pengolahan data spasial-ekologis adalah dengan bantuan sistem informasi geografis (*Geographic information system, GIS*) (Burrough, 1986).

TUJUAN

Tujuan penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut: (1) Mengkaji kemampuan analisis fotomorfik pada citra Landsat TM (*Thematic mapper*) berdasarkan elemen-elemen karakteristik citra untuk memperoleh data bentuklahan, penggunaan lahan dan morfometri lahan; (2) Pendugaan kerusakan lahan ditinjau dari aspek biofisik lahan terutama dari besarnya limpasan permukaan-banjir dan erosi-sedimentasi berdasarkan hasil analisis fotomorfik citra Landsat TM dengan bantuan sistem informasi geografis (SIG); (3) Pemantauan dan evaluasi pengelolaan daerah aliran sungai (DAS) ditinjau dari aspek besarnya limpasan permukaan-banjir dan erosi-sedimentasi berdasarkan integrasi model satuan DAS dan satuan wilayah administrasi.

METODE PENELITIAN

Bahan atau Materi Penelitian yang Digunakan: (1) Citra Landsat TM hasil rekaman tahun 1994 dan tahun 1996 untuk memperoleh data parameter-parameter lahan melalui analisis fotomorfik pada layar monitor (*Screen digitations*); (2) Foto udara inframerah berwarna palsu (*False colour infrared*) berskala 1:10 000 hasil pemotretan tahun 1992 untuk pemanduan dan pengujian data rinci (*Detail*) pada waktu kerja lapangan (*Field work*); (3) Peta Rupa Bumi (*RBI*) berskala 1:25 000 hasil pembuatan tahun 2000 digunakan menyadap data pola airan dan peta topografi AMS berskala 1:100 000 sebagai peta dasar (*Basemap*) dalam representasi data hasil analisis fotomorfik citra Landsat TM, berdasarkan hasil pembacaan garis kontur pada peta topografi digunakan untuk pemetaan kemiringan lereng DAS; (4) Peta jenis tanah berskala 1: 250 000 tahun 1992 hasil pemetaan lapangan dan data kondisi dan sifat fisik tanah dari citra penginderaan jauh (foto udara) digunakan sebagai referensi dalam pemetaan infiltrasi tanah DAS (Goosen, 1967); (5) Data hujan selama kurang lebih 10 tahun terakhir (1991-2000) yang mencakup di seluruh DAS Solo untuk pemetaan erosivitas hujan dan perhitungan intensitas hujan; (6) Data debit banjir DAS Solo selama 10 tahun terakhir (1990-2000)

terutama tahun-tahun terakhir sebagai referensi kejadian banjir puncak yang pernah terjadi.

Alat-alat penelitian yang digunakan: (1) Perangkat keras komputer PC/AT Pentium III 1 GHz, RAM 256 Mb, HD 40 Gb dengan layer monitor berwarna resolusi tinggi, digunakan untuk mengolah dan menganalisis data; (2) Perangkat lunak ER-mapper, ILWIS, Arc/Info, dan Arc View digunakan untuk memproses dan menyajikan data; (3) Digitizer digunakan untuk mendigitasi data (*input*) spasial dan atribut dalam penyusunan basisdata; (4) Scanner digunakan untuk mengubah data manual menjadi data digital; (5) Printer digunakan untuk mencetak data dan peta; (6) GPS (*Global Position System*) digunakan untuk menentukan posisi titik sampel di lapangan guna mencocokkan antara kenampakan pada citra maupun peta; (7) Abney level digunakan untuk pengukuran kemiringan lereng di lapangan; (8) *Mini computer notebook* digunakan untuk membantu *plotting* hasil pengukuran GPS di lapangan pada citra Landsat dan peta;

Cara Penelitian

Sebagai gambaran umum posisi kegiatan pemantauan dan evaluasi dalam proses pengelolaan DAS ditunjukkan dalam kerangka umum proses pengelolaan DAS dapat diperiksa pada **Gambar Lampiran 1**. Pada Gambar Lampiran 1 terlihat bahwa kegiatan pemantauan dan evaluasi dalam pengelolaan DAS dimulai dari awal kegiatan identifikasi masalah dan penyusunan program termasuk sebab-sebab terjadinya dapat berupa faktor-faktor yang mempengaruhinya.

Analisis Fotomorfik Citra Landsat TM

Analisis fotomorfik (*Photomorphic image analysis*) pertama kali dikenalkan oleh Phail (1971 *dalam* Daels dan Antrop, 1977) untuk analisis ekosistem bentang lahan regional di Chili. Konsep dasar analisis fotomorfik yang digunakan dalam mendeteksi elemen bentanglahan mendasarkan pada elemen-elemen karakteristik citra antara lain rona atau warna, pola, tekstur, bentuk dan ukuran, hasil identifikasi berupa citra fotomorfik. Kenampakan bentanglahan yang dapat dihasilkan dari analisis fotomorfik antara lain pola aliran/drainase, aspek lereng, penggunaan lahan dan vegetasi, dan bentuklahan. Klasifikasi citra hasil analisis fotomorfik didasarkan pada penggabungan elemen-elemen fotomorfik penting meliputi: (1) rona atau warna dominan; (2) beda kelas rona dan warna; (3) tekstur citra dicirikan oleh kekasaran, bentuk elemen tekstur, keseragaman bentuk dan ukuran, dan kekontrasan; (4) pola-pola dari kenampakan aliran/drainase, vegetasi, penggunaan lahan (jaringan komunikasi, permukiman), litho-stratigrafi, dan bentuklahan.

Pola menunjukkan distribusi spasial kenampakan bentanglahan dan

mencerminkan hubungan geografis antara kenampakan-kenampakan bentanglahan yang berbeda. Tekstur dikenali melalui tingkat kekasaran permukaan, homogenitas bentuk dan ukuran elemen tekstur, kontras antar elemen tekstur, sehingga memperjelas batas delineasi pada citra. Unsur pola dan tekstur dapat digabungkan dalam klasifikasi citra untuk menghasilkan tipe-tipe citra fotomorfik terutama untuk citra skala kecil.

Pendugaan Besarnya Limpasan Permukaan dan Banjir

Analisis citra fotomorfik dapat diperoleh klasifikasi tipe-tipe citra fotomorfik yang digunakan untuk identifikasi elemen-elemen bentanglahan sebagai berikut: (1) elemen bentuklahan dan aspek kelerengannya: aspek ini dapat menunjukkan kenampakan relief/topografi yang sangat menentukan besarnya bagian air hujan yang akan mengalir di permukaan (*Overland flow*) ataupun meresap ke dalam lapisan tanah (*Infiltration*); bagian hujan ini di permukaan lahan akan menjadi tenaga pengikis dan pengangkut material tanah (*Surface erosion*), kemudian akan diendapkan pada ledok-ledok permukaan (*Surface detention*) dan pada badan-badan sungai (Water bodies) menyebabkan terjadinya pendangkalan; (2) elemen pola aliran atau pola drainase: elemen pola ini pada setiap satuan pemetaan dapat menunjukkan kerapatan aliran/drainase (*Drainage density*) yang terkait dengan proses hidrologi berfungsi sebagai faktor pengatusan yang menunjukkan apakah wilayah DAS tersebut pengatusannya cepat ataupun lambat atau bahkan lama tergenang. (3) elemen penutup lahan (vegetasi dan penggunaan lahan): elemen penutup lahan yang berupa vegetasi kaitannya dengan proses hidrologi adalah besarnya prosentase luas dan kerapatan vegetasi yang berfungsi untuk menampung air hujan dan menghambat limpasan permukaan.

Dengan mendasarkan pada elemen-elemen bentanglahan DAS yang mempengaruhi besarnya limpasan permukaan tersebut, digunakan untuk melakukan pendugaan besarnya limpasan permukaan dengan menerapkan metode yang dikembangkan oleh Cook (1942) seperti yang telah dikembangkan dalam Chow (1964), Meijerink (1970,1974), Gunawan (1991), dan Newson (1997). Pengolahan data spasial dari berbagai sumber dan berbagai skala dibantu dengan menggunakan prosedur sistem informasi geografis (SIG). Satuan hidrologi yang digunakan untuk pendugaan banjir (*Peak discharge*) adalah satuan daerah aliran sungai (DAS/SubDAS) dengan menggunakan Metode Rasional sebagai berikut.

$$Qp = cf\,C\,I\,A \quad \text{.....} \quad (1)$$

Keterangan:

Qp = banjir/debit puncak (m^3/detik);

cf = koefisien metrik (0,278 jika luas DAS (km^2) dan 0,00278 (ha);

C = koefisien limpasan permukaan (%);

I = intensitas hujan (mm/jam) yang lamanya sama dengan waktu konsentrasi (Kirpich (1932 *dalam* Chow, 1964));

A = luas DAS/SubDAS (km^2 atau ha).

Pendugaan Erosi Permukaan dan Hasil Sedimen

Metode pendugaan erosi permukaan dan hasil sedimen mendasarkan pada pendekatan USLE (*Universal Soil Loss Equation*) yang dimodifikasi oleh Meijerink (1984) yang mempertimbangkan aspek-aspek erosi permukaan (*Morpho-erosion*) sesuai dengan kemampuan analisis citra fotomorfik pada citra Landsat TM dan ETM dalam identifikasi elemen-elemen bentanglahan. Satuan lahan yang digunakan sebagai satuan pendugaan erosi dan hasil sedimen menggunakan satuan pemetaan lahan dan satuan hidrologi seperti dalam pendugaan limpasan permukaan dan banjir. Pendugaan erosi dengan menggunakan pendekatan rumus kehilangan tanah (USLE) dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$A = R\,K\,L\,S\,C\,P \quad \text{.....} (4)$$

Keterangan:

A = jumlah kehilangan tanah maksimum (ton/ha/tahun);

R = faktor erosivitas hujan;

K = faktor erodibilitas tanah;

L = faktor panjang lereng;

S = faktor kemiringan lereng;

C = faktor pengelolaan tanaman;

P = faktor pengelolaan/konservasi tanah.

Klasifikasi besarnya kehilangan tanah (erosi) dan kategorinya dapat diperiksa pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Klasifikasi erosi dan Kategorinya

No	Besar Kehilangan Tanah (Ton/ha/th) Kategori/Kelas
1.	< 15 Sangat Ringan
2.	15 – 60 Ringan
3.	60 – 180 Sedang
4.	180 – 480 Berat
5.	> 480 Sangat Berat

Sumber: Departemen Kehutanan (1998).

Metode pendugaan hasil sedimen (*Sediment yield*, Sy) DAS/SubDAS melalui analisis citra fotomorfik dan data sekunder dapat dijelaskan sebagai berikut (Meijerink, 1984).

(1) Estimasi besarnya erosi permukaan (*Surface erosion*) (A) dengan Metode USLE;

(2) Asumsi besarnya erosi lembah dan tebing (*Valley dan bank erosion*) melalui pendekatan bahwa besarnya rata-rata erosi lembah dan tebing dalam suatu DAS/SubDAS sebesar 25% dari besarnya erosi permukaan (A) atau dapat dirumuskan sebagai berikut: Erosi Lembah dan Tebing= (25% x A);

(3) Besarnya erosi total (*Gross Erosion*,G) suatu sungai dalam DAS/Sub DAS dapat dirumuskan sebagai berikut: G = [A + (25% x A)];

(4) Selama proses selektivitas erosi banyak material tertinggal pada ledok-ledok permukaan dan badan-badan air dalam DAS/SubDAS maka perlu dihitung besarnya rasio pelepasan sedimen (SDR) yang besarnya tergantung pada luas DAS/SubDAS yang dapat dihitung dengan rumus: $SDR = 36\ A^{-0,20}$, dimana (A) adalah luas DAS/SubDAS (km^2).

(5) Besarnya hasil sedimen (Sy) dapat diestimasi dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Sy = [A + (25\% \times A)] \times SDR \quad \text{..... (11)}$$

Pemantauan dan Evaluasi Pengelolaan DAS

Parameter-parameter karakteristik DAS/SubDAS yang dapat digunakan sebagai indikator ataupun instrumen penilaian kinerja DAS/SubDAS antara lain: koefisien limpasan permukaan, indeks banjir/debit maksimum, debit minimum, dan debit rata-rata, indeks erosi permukaan, fluktuasi hasil sedimen, kondisi penutupan lahan/vegetasi penutup, dan indeks sosial ekonomi serta kependu-dukan. Dalam penelitian ini parameter-parameter yang digunakan dalam pemantauan dan evaluasi pengelolaan DAS meliputi koefisien limpasan permukaan dan indeks erosi permukaan sebagai komponen masukan (*input*), sedang debit dan hasil sedimen sebagai komponen keluaran (*output*).

Dengan demikian beberapa indikator yang digunakan dalam pemantauan dan evaluasi pengelolaan DAS meliputi (Gunawan, 2003):

(1) koefisien limpasan permukaan (C) yang besarnya antara 0 (nol) hingga 1 (satu), dimana secara garis besar dapat dikategorikan: < 0,50 termasuk kategori baik, sedang > 0,5 termasuk kategori jelek;

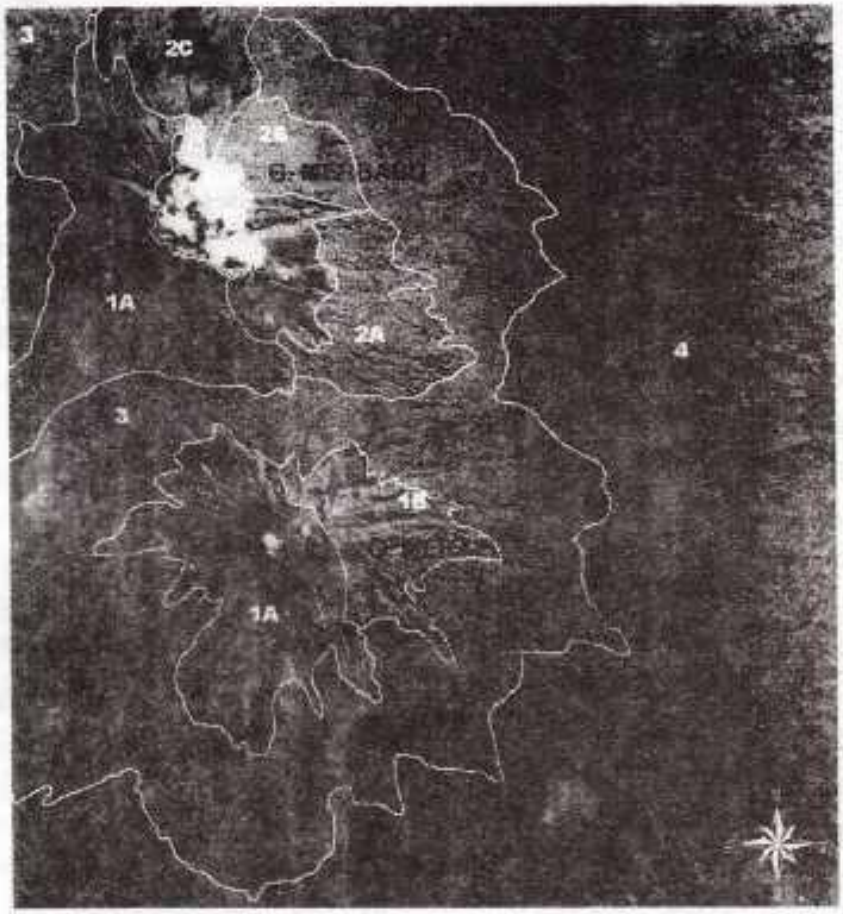
(2) indeks erosi permukaan (A) kategori yang digunakan dapat diperiksa pada Tabel 2, <60 ton/ha/th termasuk kategori ringan, sedang >180 ton/ha/th termasuk berat; Dalam laporan penulisan ini untuk penentuan lokasi AWLR hanya didasarkan pada indikator limpasan permukaan-banjir dan indikator erosi-sedimentasi.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Citra Fotomorfik Gunungapi Merapi-Merbabu

Hasil analisis fotomorfik citra Landsat TM Gunungapi Merapi-Merbabu yang ditinjau dari elemen rona/tone atau warna pada lereng bagian timur tampak dominan lebih cerah dan sangat kontras dibanding dengan lereng bagian

barat (simbol 1a, 1b, dan 2). Khususnya pada lereng bagian timur Gunung Merbabu di daerah Boyolali juga ditunjukkan oleh elemen rona/tone atau warna yang kontras antara lereng timur bagian utara ditunjukkan dengan simbol 2b (Sidareja Njlarem-Losari Ampel) dengan lereng timur bagian selatan ditunjukkan dengan simbol 2a (Ngagrong-Selowangan-Selo), seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Citra Fotomorfik pada Citra Landsat TM 452 Gunungapi Merapi-Merbabu Jawa Tengah-DIY, Dokumen Rekaman Tahun 1994.

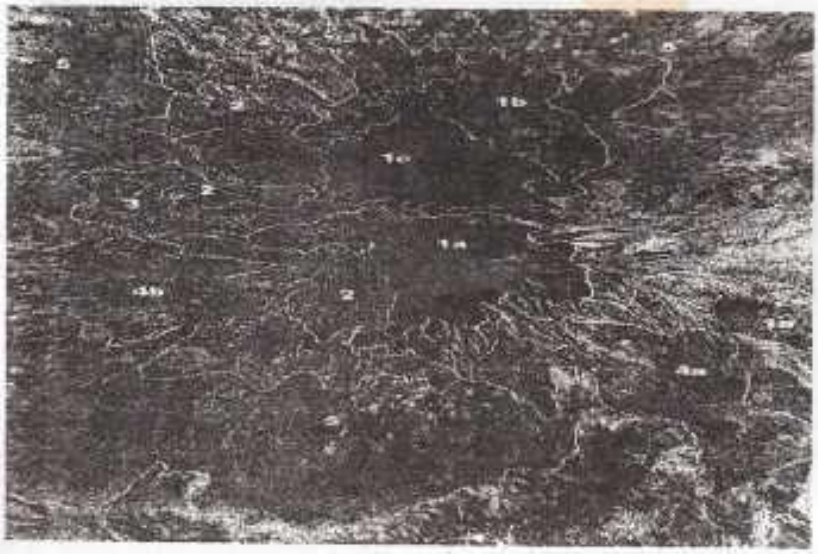
Keterangan:

1a = kerucut dan lereng atas gunungapi terkikis kuat;
1b = lereng atas gunungapi bergelombang kasar terkikis sedang;
2 = lereng tengah gunungapi terkikis sedang;
3 = lereng bawah gunungapi terkikis rendah;
4 = kaki lereng gunungapi terkikis rendah.

Hasil kunjungan lapangan menunjukkan adanya kontras antara lain karena, lereng timur bagian utara tersebut didominasi oleh tanah regosol dengan tanaman utama jagung, tembakau dan kacang-kacangan yang ditanam secara tumpang gilirdengan kondisi permukaan agak terbuka, sedang lereng timur bagian selatan didominasi oleh tanaman sayur-sayuran, seperti loncang, kobis, tomat dan kacang-kacangan yang ditanam secara terus-menerus sehingga lahan selalu tertutup oleh tanaman.

Citra Fotomorfik Gunung Lawu

Hasil analisis fotomorfik pada citra Landsat TM Gunung Lawu melalui elemen rona/tone atau warna tidak menunjukkan dominan yang cukup kontras, namun apabila ditinjau dari elemen pola dan tekstur serta kondisi litho-stratigrafi menunjukkan perbedaan yang kontras, seperti ditunjukkan pada **Gambar 2**. Pada Gambar 2 terlihat pada puncak/kerucut gunung bagian selatan dengan simbol (1a) (Gunung Lawu Tua) menunjukkan pola dan tekstur yang lebih kasar serta mempunyai heterogenitas tinggi dibanding dengan puncak/kerucut gunung bagian utara dengan simbol (1b) (Gunung Lawu Muda).



Gambar 2. Citra Fotomorfik pada Citra Landsat TM 432 Gunung Lawu, Dokumen Rekaman Tahun 1996.

Keterangan:

1a = kerucut dan lereng atas gunungapi terkikis kuat;

1b = kerucut dan lereng atas gunungapi terkikis sedang;

2 = lereng tengah gunungapi terkikis kuat;

3 = lereng tengah gunungapi terkikis sedang;

4 = lereng bawah gunungapi terkikis sedang;

5 = lereng bawah gunungapi terkikis rendah.

6 = perbukitan lipatan terkikis kuat

Khususnya pada lereng atas Gunung Lawu Tua di bagian timur, selatan dan bagian barat ditinjau dari elemen rona atau warna, elemen pola dan tekstur serta keseragaman kekasaran permukaan yang ditunjukkan oleh pola aliran cukup menunjukkan perbedaan yang kontras (simbol 2). Hasil kunjungan lapangan menunjukkan bahwa di lereng bagian timur yaitu di daerah Magetan elemen rona/warna cerah (simbol 4a) didominasi oleh tanaman pertanian lahan kering (tegalan), sedang di bagian barat yaitu di daerah Sukoharjo elemen pola dan tekstur kasar (simbol 4b) didominasi oleh tanaman pertanian lahan basah (padi sawah). Elemen-elemen relief bergelombang kasar dan bentuk pola radial membentuk tekstur kasar berbatasan dengan relief berombak (simbol 2 dan 3) dapat didelineasi dengan tegas menunjukkan satuan bentuklahan lereng atas dan tengah Gunung Lawu.

Citra Fotomorfik Gunung Gamping Kendeng

Hasil analisis fotomorfik pada citra Landsat TM Gunung Gamping Kendeng di daerah Ngawi ditinjau dari elemen rona atau warna menunjukkan warna putih cerah dan setempat-setempat dijumpai kluster merah kecoklatan (simbol 1) yang berupa tanaman jati yang mulai menggugurkan daunnya. Ditinjau dari elemen pola secara keseluruhan membentuk pola memanjang diikuti oleh pola aliran yang lurus sejajar struktur litho-stratigrafi (simbol 1), seperti ditunjukkan pada **Gambar 3**. Pada Gambar 3 terlihat pola sungai Bengawan Solo mengalir membentuk meandering mengikuti tingkat kekerasan batuan dan membentuk pola tidak teratur menembus struktur batuan gamping di daerah Ngawi.

Citra Fotomorfik Dataran Aluvial Daerah Genangan Banjir Bojonegoro

Hasil analisis fotomorfik di daerah dataran aluvial yang sering mengalami genangan banjir dicirikan oleh rona atau warna yang gelap karena obyek air dan lahan basah yang bersifat menyerap radiasi matahari (*Absorption*). Ciri lain di daerah yang mempunyai lahan selalu tergenang atau selalu basah karena berada pada topografi rendah atau bahkan berupa basin pada citra fotomorfik tidak menunjukkan batas petak sawah yang jelas terkesan membentuk kluster-kluster dengan tekstur yang halus hingga sangat halus ditunjukkan dengan simbol (2), seperti ditunjukkan pada **Gambar 4**.

Pada Gambar 4 terlihat pada citra fotomorfik tidak menunjukkan dengan jelas adanya pola drainase kecuali sungai-sungai besar seperti sungai Soka dan sungai Besuki, sedang- sungai-sungai kecil lainya bahkan jalan raya yang lurus ditandai oleh adanya vegetasi yang mengikuti alur aliran sungai ataupun sepanjang jalan karena tampak kontras, baik dari reliefnya yang lebih tinggi, rona atau warna mempunyai kelas berbeda maupun pola tanam yang berbeda

(simbol 3). Dataran banjir/genangan dan tanggul sungai tidak begitu jelas dapat dibatasi setempat-setempat ditunjukkan oleh rona/tone atau warna yang seragam dan kadang-kadang ditumbuhi tanaman pada danau *oxbow* (simbol 1).

Gambar 3. Citra Fotomorfik pada Citra Landsat TM 432 Perbukitan Gamping Kendeng, Dokumen Rekaman Tahun 1996.

Keterangan:

1 = perbukitan gamping tersolusi kuat;
2 = lereng perbukitan gamping terkikis kuat;
3 = lereng kaki perbukitan gamping terkikis sedang;
4 = dataran aluvial antar bukit gamping;
5 = dataran banjir/genangan luapan sungai;
6 = tanggul sungai.

Limpasan Permukaan dan Debit Puncak (Banjir)

Berdasarkan klasifikasi SubDAS kecil (Gunawan, 1991) seluruh DAS Solo dapat dibagi ke dalam 100 DAS kecil. Pendugaan besarnya limpasan permukaan didasarkan pada komponen karakteristik DAS. Hasil pendugaan

Gambar 4. Citra Fotomorfik pada Citra Landsat TM 432 di Dataran Aluvial Daerah Genangan Banjir Wilayah Bojonegoro Jawa Timur, Dokumen Rekaman Tahun 1996.

Keterangan:

1 = dataran banjir/genangan dan tanggul sungai;
2 = dataran aluvial/genangan banjir;
3 = tanggul dan lembah sungai;
4 = lereng kaki perbukitan gampingterkikis sedang;
5 = dataran tinggi gamping tersolusi sedang;
6 = perbukitan gamping tersolusi kuat.

besarnya limpasan permukaan pada setiap SubDAS dapat ditunjukkan pada Tabel Lampiran 1.

Hasil pemetaan limpasan permukaan diklasifikasikan menjadi 5 (lima) kriteria, yaitu: sangat baik (< 0,50), baik (0,50-0,60), sedang (0,60-0,70), jelek (0,70-0,80), dan sangat jelek (>80%), sedang teknik representasi data tidak didasarkan pada satuan SubDAS, namun divisualisasikan ke dalam masing-masing satuan lahan, seperti ditunjukkan pada Peta Limpasan Permukaan DAS Solo (Gambar Lampiran 2). Berdasarkan kriteria tersebut diatas besarnya koefisien limpasan permukaan dari 100 SubDAS yang tertera pada Tabel Lampiran 1 terlihat bahwa sebagian besar (>80%) termasuk kategori baik hingga sangat baik dan sisanya (<20%) termasuk kategori sedang. Hal ini menunjukkan bahwa besarnya koefisien limpasan permukaan apabila dinyatakan dalam satuan SubDAS kurang menunjukkan nilai yang sebenarnya karena didasarkan pada pembobotan rata-rata.

Berbeda dengan apabila ditinjau dari sebaran spasial nilai besarnya koefisien limpasan permukaan yang didasarkan pada satuan pemetaan lahan pada peta Limpasan Permukaan DAS Solo (**Gambar Lampiran 2**) terlihat lereng tengah bagian timur gunung Lawu di daerah Magetan dan lereng tengah bagian barat gunung Wilis di daerah Ponoeogo menunjukkan nilai limpasan permukaan kategori buruk. Kondisi limpasan permukaan buruk seperti ini juga dijumpai pada satuan lahan lereng tengah bagian barat gunung Lawu di daerah Sukoharjo dan Karanganyar, lereng tengah perbukitan Kendeng di daerah Bojonegoro dan Tuban.

Besarnya debit puncak yang dihitung berdasarkan Rumus Rasional (Q= CIA) dan besarnya debit jenis/ spesifik yang dipertimbangkan berdasarkan luas SubDAS dapat diperiksa pada **Tabel Lampiran 1** Secara garis besar dapat dijelaskan bahwa debit puncak (banjir) yang termasuk kategori besar dijumpai pada SubDAS Keduang (Wonogiri) sebesar 1492,50 m^3/detik dan Sub DAS Samin (Karanganyar) sebesar 1422,98 m^3/detik serta SubDAS Dengkeng (Klaten) sebesar 1349, 09 m^3/ detik. Hal ini sesuai dengan besarnya debit jenis dari ketiga SubDAS berturut-turut besarnya adalah 3,5 m^3/detik/km^2, 3,75 m^3/detik/km^2 dan 3,27 m^3/detik/km^2.

Apabila dikaitkan dengan kondisi biofisik masing-masing SubDAS dapat dibandingkan secara spasial/ keruangan bahwa di SubDAS Keduang dan Samin yang didominasi oleh tekstur lempung dengan penutup lahan kurang dari 60 % kurang mampu menyimpan air karena kapasitas infiltrasinya rendah. Berbeda dengan kondisi biofisik di SubDAS Dengkeng yang didominasi oleh tekstur tanah pasir berlempung dengan kondisi penutup lahan lebih baik

mampu menyimpan air karena kapasitas infiltrasinya lebih tinggi.

Erosi dan Hasil Sedimen

Hasil perhitungan kehilangan tanah (erosi) dengan metode USLE untuk 100 SubDAS di DAS Solo dapat diperiksa pada **Tabel Lampiran 2**. Hasil pemetaan besarnya tanah yang hilang (erosi) disajikan dalam bentuk Peta Erosi DAS Solo (**Gambar Lampiran 3**), kategori atau kelas erosi dibagi menjadi 5 (lima) kriteria (Tabel 1). Pada Gambar Lampiran 3 terlihat bahwa besarnya kehilangan tanah (erosi) yang termasuk kategori berat hingga sangat berat (> 180 ton/ha/tahun) antara lain lereng barat gunung Wilis dan lereng timur gunung Lawu (Kabupaten Ponorogo), lereng timur gunung Lawu (Kabupaten Magetan), lereng barat gunung Lawu (Kabupaten Sukoharjo dan Karanganyar), lereng selatan bukit Kendeng (kabupaten Tuban).

Pada Tabel Lampiran 2 terlihat bahwa ternyata besarnya tanah hilang (erosi) apabila ditinjau dari satuan SubDAS, maka SubDAS Ngisip dan SubDAS Kedungcilik (kabupaten Tuban) masing-masing sebesar 125,67 ton/ha/tahun dan 105,47 ton/ha/tahun termasuk kategori sedang (60-180 ton/ha/tahun). Lereng barat gunung Lawu SubDAS Samin (Kabupaten Karanganyar) adalah sebesar 125,55 ton/ha/tahun, lereng timur gunung Lawu SubDAS Gonggong (Kabupaten Magetan) sebesar 118,39 ton/ha/tahun, dan lereng barat gunung Wilis SubDAS Lengkir (Kabupaten Ponorogo) adalah sebesar 50,95 ton/ha/tahun termasuk kategori sedang.

Besarnya hasil sedimen yang dihitung berdasarkan besarnya tanah hilang (erosi permukaan) dengan mempertimbangkan erosi lembah dan tebing serta besarnya rasio pelepasan sedimen (SDR) dapat diperiksa pada **Tabel Lampiran 2**. Pada Tabel Lampiran 2 terlihat besarnya hasil sedimen di SubDAS Ngisip (Tuban) sebesar 129,95 ton dan SubDAS Kedungcilik (Tuban) sebesar 108,96 ton, sedang SubDAS Samin (Karanganyar) sebesar 129,00 ton, SubDAS Gonggong (Magetan) sebesar 122,15 ton, SubDAS Sungkur (Ponorogo) sebesar 55,23 ton, dan SubDAS Lengkir (Ponorogo) sebesar 52, 69 ton.

Apabila dilihat dari hasil perhitungan besarnya hasil sedimen tersebut menunjukkan nilai yang tidak konsisten antar wilayah, sebagai contoh, pada lereng yang sama yaitu lereng timur gunung Lawu SubDAS Gonggong (Magetan) yang mempunyai luas 183,83 km^2 dan SubDAS Sungkur (Ponorogo) yang mempunyai luas 344,00 km2 besarnya hasil sedimen tidak sama dan bahkan jauh berbeda. Banyak hal yang mempengaruhi besarnya hasil sedimen suatu DAS, antara lain semakin besar luas DAS semakin kecil nilai pelepasan sedimen

(SDR), sehingga besarnya hasil sedimen kecil, demikian pula banyaknya lapisan batuan yang tersingkap dan lahan terbuka serta curah hujan yang tidak begitu tinggi (<1750 mm/tahun). Berbeda dengan kondisi SubDAS Samin (Karanganyar) lereng barat gunung Lawu mempunyai curah hujan tinggi (> 2000 mm/tahun) dengan tekstur tanah dominan lempung dan peka terhadap erosi, bahkan yang terjadi di SubDAS Ngisip dan SubDAS Kedungcilik yang mempunyai tekstur lempung berpasir sangat peka terhadap erosi.

Pemantauan dan Evaluasi Pengelolaan DAS

Berdasarkan pertimbangan besarnya limpasan permukaan (C) yang disajian pada peta limpasan permukaan DAS Solo (**Gambar Lampiran 2**) dan besarnya erosi (A) yang disajikan pada peta erosi DAS Solo (**Gambar Lampiran 3**) terlihat bahwa lereng timur gunung Lawu SubDAS Gonggong (Magetan) dan SubDAS Sungkur (Ponorogo) serta lereng barat gunung Wilis SubDAS Lengkir (Ponorogo) dan SubDAS Batil (Madiun) perlu mendapat perhatian serius. Lereng barat gunung Lawu SubDAS Samin (Karanganyar) dan SubDAS Walikan (Sukoharjo) serta SubDAS Ngisip dan SubDAS Kedungcilik (Tuban) perlu mendapat perhatian berikutnya.

Sebagai alat pemantau dan evaluasi lain disamping menggunakan kedua indikator tersebut diatas, yang secara kuantitatif telah diakui keandalannya adalah dengan menggunakan alat pencatat tinggi muka air sungai otomatik (*Automatic Water level recorder, AWLR*). Besarnya limpasan permukaan (C) dan besarnya erosi (A) dapat diusulkan sebagai dasar pertimbangan pemilihan lokasi pemasangan alat AWLR, sedang secara tepat lokasi ditempatkannya bangunan papan duga air (*Staff gauge*) tersebut perlu dikaji lagi sesuai dengan persyaratan hidrologis setempat.

Berdasarkan kriteria tersebut maka yang mendapat prioritas pertama pemasangan alat AWLR meliputi SubDAS Ngisip dan SubDAS Kedungcilik (Tuban) , SubDAS Samin (Karanganyar), SubDAS Gonggong (Magetan), SubDAS Sungkur dan SubDAS Tadahwoh serta SubDAS Lengkir (Ponorogo), SubDAS Walikan (Sukoharjo, SubDAS Batil (Madiun) dan SubDAS Soko (Bojonegoro). SubDAS yang mendapat prioritas berikutnya adalah yang berada di lereng timur gunung Merapi-Merbabu (SubDAS Dengkeng dan SubDAS Cemoro), SubDAS Kedungaren (Sragen), SubDAS Gondang (Lamongan), dan lereng selatan SubDAS Gresik), yang secara spasial dapat diperiksa pada peta rencana lokasi SPAS (Stasiun Pengamat Aliran Sungai) DAS Solo (**Gambar Lampiran 5**).

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Kesimpulan

(1) Analisis fotomorfik yang didasarkan pada dominasi rona/warna, elemen-elemen pola dan elemen-elemen tekstur dapat menghasilkan tipe-tipe citra fotomorfik yang mudah digunakan untuk identifikasi dan delineasi elemen-elemen bentanglahan, seperti bentuklahan, bentuk penutupan lahan/penggunaan lahan, serta kondisi litho-stratigrafi dan morfo-erosi.

(2) Analisis fotomorfik kondisi kompleks gunung Merapi-Merbabu dapat didelineasi batas antara bentuklahan lereng atas batuan piroklastik tekstur dominan pasir di lereng timur laut (Ampel) dan bentuklahan lereng atas batuan aliran lava tekstur pasir berlempung di lereng tenggara (Selo), serta batas delineasi antara perbukitan gamping yang membentuk pola memanjang dan kompleks gunungapi (volkanik) yang membentuk pola membulat dengan pola jejaring yang sentrifugal, seperti yang terjadi di daerah Ngawi antara Komplek gunung Wilis dan perbukitan Kendeng.

(3) Suatu fenomena yang cukup unik di DAS Solo bahwa limpasan permukaan yang tinggi justru terjadi pada bentuklahan lereng tengah, seperti yang terjadi di lereng barat gunung Lawu SubDAS Samin (Karanganyar) dan SubDAS Walikan (Sukoharjo), lereng timur gunung Lawu SubDAS Gonggong (Magetan) dan SubDAS Sungkur (Ponorogo), lereng barat gunung Wilis SubDAS Lengkir (Ponorogo) dan SubDAS Batil (Madiun), lereng selatan gunung Awar-awar SubDAS Ngisip dan SubDAS Kedungcilik (Tuban).

(4) Fenomena yang lain adalah kejadian erosi berat hingga sangat berat di DAS Solo terutama terjadi pada bentuklahan lereng atas, seperti yang terjadi pada lereng atas gunung Wilis Ponorogo (SubDAS Keyang dan SubDAS Lengkir), lereng atas gunung Lawu Magetan dan Ponorogo (SubDAS Gonggong dan SubDAS Sungkur), lereng atas gunung Lawu Karanganyar dan Sukoharjo (SubDAS Samin dan SubDAS Walikan), dan lereng atas gunung Awar-awar Tuban (SubDAS Ngisip dan SubDAS Kedungcilik).

(5) Fenomena unik kejadian limpasan permukaan (C) dan kejadian erosi (A) di DAS Solo digunakan sebagai indikator pemantauan dan evaluasi pengelolaan DAS dan sekaligus sebagai dasar pertimbangan dalam penentuan lokasi pemasangan SPAS/AWLR pada SubDAS-SubDAS lereng barat gunung Wilis (Ponorogo-Madiun), lereng barat dan timur gunung Lawu (Magetan, Ponorogo, Karanganyar, Suko-