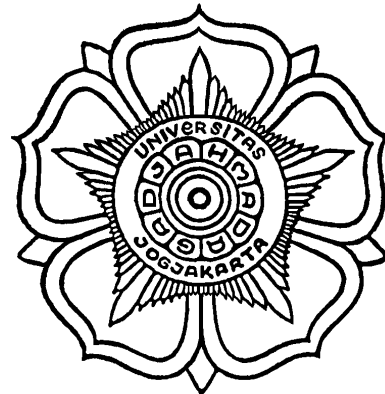


PENGGUNAAN ANALISIS CITRA DIGITAL DAN
SISTEM INFORMASI GEOGRAFI UNTUK PREDIKSI
BESARNYA EROSI DI DAS AYUNG BAGIAN HILIR
KABUPATEN BADUNG PROPINSI BALI

TESIS

Diajukan Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Guna Mencapai Derajat Magister Penginderaan Jauh

Program Studi Penginderaan Jauh
Jurusan Ilmu-Ilmu Matematika
dan Pengetahuan Alam



Diajukan oleh
I Wayan Nuarsa
7910/I-6/129/96

kepada

PROGRAM PASCA SARJANA
UNIVERSITAS GADJAH MADA
YOGYAKARTA
1998

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam tesis ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelas kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 30 Mei 1998

I Wayan Nuarsa

Tandatangan dan nama terang

HALAMAN PERSEMBAHAN

Tesis ini dipersembahkan buat kedua orang tua penulis :

I Ketut Ranim

dan

Ni Wayan Resi

serta saudara penulis yang paling banyak berkorban selama
penulis menempuh studi

Drs. I Wayan Sukarma

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kehadapan Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan rahmatNya lah tesis ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya.

Tesis dengan judul “*Penggunaan Analisis Citra Digital dan Sistem Informasi Geografi untuk Prediksi Besarnya Erosi di DAS Ayung Bagian Hilir Kabupaten Badung Propinsi Bali*” merupakan sebagian persyaratan yang harus dipenuhi untuk mencapai derajat magister Penginderaan Jauh pada Program Studi Penginderaan Jauh, Jurusan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Program Pasca Sarjana, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Keberhasilan penyusunan tesis ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Pada kesempatan ini penulis menghaturkan rasa terima kasih yang mendalam kepada Dr. Hartono, DESS dan Drs. Jamulya, M.S. dosen Fakultas Geografi dan Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada, yang telah memberikan motivasi dan bimbingan secara intensif dengan penuh kesabaran.

Ucapan terima kasih juga penulis haturkan kepada yang terhormat :

1. Prof. Dr. dr. Nyoman Sukardika, Rektor Universitas Udayana dan Prof. Dr. Ir. Nyoman Sutjipta, M.S., Dekan Fakultas Pertanian, yang telah memberikan dukungan dan ijin untuk menunaikan tugas belajar.
2. Prof. Dr. Ir. Bambang Suhendro, M.Sc., Direktur Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan dan Kebudayaan, yang telah memberikan beasiswa TMPD untuk melaksanakan tugas belajar.

3. Prof. Dr. Ichlasul Amal, Direktur Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada, dan Prof. Dr. Sutikno, Dekan/Penanggungjawab Program Pascasarjana di Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada, yang telah memberikan bantuan administrasi.
4. Dr. Totok Gunawan, M.S., Ketua Program Studi Penginderaan Jauh Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada, yang banyak memberikan arahan, bimbingan, dan strategi dalam melancarkan penyelesaian studi.
5. Prof. Dr. Sutanto, Guru besar Fakultas Geografi dan Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada, yang telah banyak memberikan inspirasi dan konsep tentang Ilmu Penginderaan Jauh baik dalam kuliah maupun dalam penulisan tesis ini.
6. Ketua PUSPICS, yang telah memberikan ijin pemakaian perangkat keras dan lunak selama proses pengolahan data.
7. Ketua Jurusan Tanah Fakultas Pertanian Universitas Udayana dan Staf, yang telah memberikan ijin menggunakan fasilitas dan alat-alat untuk analisis tanah.
8. Drs. Suharyadi, M.Sc., Drs. Projo Danoedoro, M.Sc., dan Drs. Retnadi Heru Jatmiko, dosen Fakultas Geografi dan asisten praktikum pada Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada, yang telah membantu dalam proses pengolahan data.
9. Ir. Made Mega, M.S., yang telah membantu pelaksanaan uji medan dan analisis tanah, dan Ir. Wayan Sandi Adnyana, M.S., yang telah membantu memberikan data-data yang diperlukan dalam penelitian ini.

10. Orang tua dan saudara-saudara di rumah, yang telah banyak memberikan dukungan dan motivasi dalam melaksanakan tugas belajar.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, yang telah memberikan kontribusi terhadap penyelesaian tesis ini.

Penulis menyadari bahwa tesis ini jauh dari sempurna, segala kritik dan saran yang bersifat konstruktif akan penulis terima dengan senang hati demi kesempurnaan tesis ini nantinya.

Akhirnya penulis berharap, mudah-mudahan tesis ini dapat memberikan sedikit sumbangan pengetahuan baru bagi para pembaca dan pemerhati masalah Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografi.

Yogyakarta, 30 Mei 1998

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERNYATAAN	iii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iv
PRAKATA	v
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
INTISARI	xv
ABSTRACT	xvi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	5
1.3. Keaslian Penelitian	7
1.4. Faedah yang Dapat Diharapkan	8
1.5. Tujuan Penelitian	8
1.6. Deskripsi Daerah Penelitian	10
II. TINJAUAN PUSTAKA	13
2.1. Telaah Pustaka	13
2.1.1. Karakteristik Citra Landsat TM	13
2.1.2. Restorasi dan Rektifikasi Citra	16
2.1.3. Penajaman Citra	20

2.1.4. Klasifikasi Citra	22
2.1.5. Sistem Informasi Geografi	24
2.1.6. Ketelitian Hasil Klasifikasi	26
2.1.7. Erosi dan Faktor-faktor yang Berpengaruh	30
2.1.8. Penelitian Erosi Terdahulu	32
2.2. Landasan Teori	35
2.3. Hipotesis	38
III. CARA PENELITIAN	39
3.1. Bahan Penelitian	39
3.2. Alat-alat Penelitian	40
3.3. Jalannya Penelitian	41
3.3.1. Tahap Persiapan	41
3.3.2. Analisis Data Grafis	43
3.3.3. Uji Medan	55
3.3.4. Pengolahan Data Atribut	56
3.3.5. Uji Ketelitian Analisis Digital	59
3.3.6. Evaluasi Hasil Prediksi Erosi	61
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	63
4.1. Hasil Analisis Citra Digital	63
4.2. Indeks Erosivitas Hujan	80
4.3. Erodibilitas Tanah	85
4.4. Faktor Panjang dan Kemiringan Lereng	90
4.5. Prediksi Besarnya Erosi	93
4.7. Uji Ketelitian Hasil Analisis Digital	95
4.6. Evaluasi Hasil Prediksi Erosi	104
4.8. Pembahasan Umum	105

V. KESIMPULAN DAN SARAN	110
5.1. Kesimpulan	110
5.2. Saran	111
RINGKASAN	112
DAFTAR PUSTAKA	117
LAMPIRAN	117

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1.1. Penelitian Erosi dan Konservasi Tanah yang Pernah Dilakukan	9
2.2. Julat Band Landsat TM dan Kegunaannya	15
2.3. Contoh Matrik Uji Ketelitian Interpretasi	27
3.1. Penentuan nilai LS dari kemiringan lereng	53
3.2. Klasifikasi Besarnya Erosi	54
3.3. Pengharkatan Struktur Tanah	58
3.4. Pengharkatan Permeabilitas Tanah	58
3.5. Contoh Matrik Uji Ketelitian Interpretasi	60
4.1. Nilai Statistik Citra Landsat TM Sebelum Pengolahan	63
4.2. Matrik Korelasi Antar Saluran	66
4.3. Daftar Pasangan Titik Kontrol Medan yang Digunakan	68
4.4. Nilai Statistik 15 Kelas Spektral pada 3 Saluran	74
4.5. Hubungan Antara Kelas Spektral dan Jenis Penggunaan Lahan di Daerah Penelitian	78
4.6. Nilai Faktor Tanaman dan Pengelolaan Lahan pada Setiap Penggunaan Lahan	80
4.7. Indeks Erosivitas Hujan Daerah Penelitian	82
4.8. Luasan Masing-masing Kelas Erosivitas Hujan	83
4.9. Hasil Perhitungan Erodibilitas Tanah pada Setiap SPT	87
4.10. Luasan Masing-masing Kelas Erodibilitas Tanah.	88
4.11. Luasan Masing-masing Fakot LS	90
4.12. Luasan Masing-masing Tingkat Erosi	95

4.13.	Matrik Kesalahan Hasil Interpretasi dan Klasifikasi Penggunaan Lahan	98
4.14.	Ketelitian dan Kesalahan Hasil Interpretasi Peta Penggunaan Lahan	99
4.15.	Matrik Kesalahan Peta Kemiringan Lereng	101
4.16.	Ketelitian dan Kesalahan Peta Kemiringan Lereng	101
4.17.	Matrik Kesalahan Peta Jenis Tanah	102
4.18.	Ketelitian dan Kesalahan Peta Jenis Tanah	103
4.19.	Hasil uji <i>t test group</i>	105
4.20.	Perbandingan Persentase Tingkat Erosi Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Sekarang	108

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1. Peta Lokasi Penelitian	12
4.1. Citra Landsat TM Daerah Penelitian dan Sekitarnya Sebelum Koreksi Radiometri dan Geometri	64
4.2. Citra Landsat TM Daerah Penelitian dan Sekitarnya yang Telah Mengalami Koreksi Radiometri, Geometri, dan Penajaman Kontras.....	70
4.3 Citra Komposit Warna Semu Standar (432) Daerah Penelitian dan Sekitarnya.....	73
4.4. Pola Spektral Obyek pada Ruang Spektral Saluran 3 (merah) dan Saluran 4 (inframerah dekat)	75
4.5. Peta Kelas Spektral Obyek	76
4.6. Peta Penggunaan Lahan	77
4.7. Peta Erosivitas Hujan Tahunan	84
4.8. Peta Jenis Tanah	86
4.9. Peta Kelas Erodibilitas Tanah	89
4.10. Peta Kemiringan Lereng	91
4.11. Peta Faktor Panjang dan Kemiringan Lereng	92
4.12. Peta Tingkat Erosi	94
4.13. Grafik Perbandingan Persentase Tingkat Erosi	108

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Data Stasiun Curah Hujan Daerah Penelitian dan Sekitarnya	123
2. Data Hujan Rata-rata Selama 10 Tahun (1988 – 1997) dan Hasil Perhitungan Indeks Erosivitas Hujan	124
3. Legenda Peta Tanah Semi Detil Daerah Penelitian	126
4. Sifat-sifat Tanah yang Berpengaruh terhadap Erosi pada Setiap Satuan Peta Tanah	128
5. Klasifikasi Nilai Erodibilitas Tanah	129
6. Sistem Klasifikasi Penutup Lahan/Penggunaan Lahan	130
7. Nilai Faktor C x P Beberapa Tanaman dan Pengelolaan Lahan	132
8. Hasil Prediksi Erosi di Daerah Penelitian	134
9. Hasil Prediksi Erosi dengan USLE Melalui Pengamatan Faktor Erosi di Lapangan	137

INTISARI

Besarnya erosi dan distribusinya penting untuk diketahui dalam pengelolaan DAS karena berhubungan dengan penentuan prioritas rehabilitasi dan konservasi tanah. Integrasi analisis digital dan Sistem Informasi Geografi (SIG) merupakan salah satu metode untuk menduga besarnya erosi tanah yang dapat mengurangi waktu dan biaya penelitian. Walaupun demikian, metode tersebut perlu diuji kemampuan dan ketelitiannya sebelum digunakan secara luas. Penelitian ini berkaitan dengan pendugaan besarnya erosi yang dilakukan di DAS Ayung bagian hilir Kabupaten Badung Propinsi Bali. Tujuan penelitian ini adalah : (1) untuk mengetahui kemampuan dan tingkat ketelitian analisis digital citra Landsat TM dan SIG dalam menyajikan variabel-variabel pendugaan besarnya erosi; dan (2) memprediksi serta membandingkan besarnya erosi yang diperoleh dengan metode pengukuran langsung variabel erosi di lapangan pada penelitian sebelumnya di DAS yang sama.

Perhitungan besarnya erosi menggunakan *Universal Soil Loss Equation* (USLE). Komponen erosi dari formula USLE tersebut dianalisis dalam bentuk digital menggunakan perangkat lunak ILWIS (*Integrated Land and Water Information System*) versi 1.4 yang mampu melakukan pengolahan citra digital dan analisis berbasis SIG. Indeks erosivitas hujan (R) diperoleh dari perhitungan nilai R pada setiap stasiun curah hujan yang ada di daerah penelitian dan sekitarnya, dan proses *gridding*. Erodibilitas tanah (K) dihitung dari sifat-sifat tanah pada setiap satuan peta tanah dan kemudian dikaitkan dengan data grafisnya. Faktor panjang dan kemiringan lereng (LS) diturunkan dari peta topografi melalui digitasi, rasterisasi, dan interpolasi garis kontur dan titik ketinggian. Faktor tanaman dan pengelolaan lahan (CP) bersumber dari peta penggunaan lahan yang diperoleh dari klasifikasi multispektral citra Landsat TM. Besarnya erosi dalam ton/ha/th diperoleh melalui kalkulasi keempat peta komponen erosi tersebut. Uji ketelitian dilakukan pada peta penggunaan lahan, kemiringan lereng, dan jenis tanah dengan membandingkan hasil analisis yang diperoleh dengan keadaan sebenarnya di lapangan. Perbandingan hasil prediksi erosi pada metode ini dengan pengukuran di lapangan dilakukan dengan uji statistik (*t-test*.)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa 60,15% tingkat erosi di daerah penelitian tergolong sangat ringan sampai ringan (kurang dari 29,3 ton/ha/th), 14,58% termasuk agak berat sampai sangat berat (lebih besar dari 47 ton/ha/th), dan 25,27% diklasifikasikan sebagai erosi dengan tingkat sedang (29,4 - 46,9 ton/ha/th). Tingkat ketelitian peta penggunaan lahan, kemiringan lereng, dan jenis tanah masing-masing diperoleh 83,56%, 87,67%, dan 86,30%. Ini berarti ketelitian tersebut lebih tinggi dari batas minimum tingkat ketelitian yang dapat diterima. Perbandingan hasil prediksi erosi dengan penelitian pengukuran faktor erosi secara langsung di lapangan melalui uji statistik diperoleh bahwa nilai *t hitung* adalah 1,02, lebih kecil dari *t tabel* 5%, yaitu 1,98. Dengan demikian, integrasi analisis digital citra Landsat TM dan SIG dapat digunakan untuk prediksi besarnya erosi dengan kemampuan dan ketelitian yang memadai.

ABSTRACT

Rate and distribution of erosion are important to know in management of watershed, because it is related to priority of rehabilitation and conservation of soil. Integration of digital image analysis and Geographic Information System (GIS) is one method to assess rate of soil erosion that is able to reduce the cost and time of research. Nevertheless, capability and accuracy of the method need to be examined before being used widely. The study relating to erosion assessment that was carried out in the downstream of Ayung watershed, Badung Regency, Province of Bali. The objectives of the research are : (1) to know ability and accuracy of Landsat TM digital image analysis and GIS in presenting the erosion estimation variables, and (2) to estimate and to compare the erosion assessment result with direct measurement method of erosion variables in the field, in previous research at the same watershed.

Calculation of erosion rate used Universal Soil Loss Equation (USLE). Erosion components of the USLE formula was analyzed in digital form using ILWIS (Integrated Land and Water Information System) software version 1.4 that was able to be used to digital image processing and GIS based analysis. Rainfall erosivity index (R) was obtained through computation of the R-value at each rainfall station in the study area and its surrounding, and *gridding* process. Soil erodibility (K) was calculated from soil properties at each soil map unit and then it was linked with the graphic data. Length and slope factor (LS) was derived from topographic map by way of digitizing, rasterization, and interpolation of contour lines and elevation points. Plant and land management factor (CP) were based on landuse map that was gotten from multispectral classification of Landsat TM image. Erosion rate in ton/ha/year was obtained from calculation of the fourth erosion component maps. Accuracy test was applied for landuse, slope, and soil maps by means of compare analysis result with actually condition in the field. Comparisons of soil erosion estimation resulted from the method and measurement in the field was done with statistic test (t-test).

The result shows that 60.15% of erosion rate in study area is classified as very slight to slight (less than 29.3 ton/ha/year), 14.58 % is included rather heavy to very heavy (more than 47 ton/ha/year), and 25.27% is grouped as moderate erosion level (29.4 – 46.9 ton/ha/year). The accuracy level of landuse, slope, and soil maps are 83.56%, 87.67%, and 86.30% respectively. It means that the accuracies are higher than the minimum limit of accuracy level acceptable. Comparison of soil erosion prediction result with early research through statistic test showed that *t-calculation* value is 1.02 less than *t-table* 5% value (1.98). Thus, integration of digital image analysis and GIS could be used to predict rate of erosion with acceptable capability and accuracy.

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sumberdaya hutan, mineral, lahan, dan air merupakan kebutuhan hidup manusia yang ketersediaannya semakin terbatas sehingga perlu dikelola dan dilestarikan agar dapat dimanfaatkan secara berkesinambungan. Berdasarkan data dari Departemen Tenaga Kerja RI (1995), 69,1% penduduk Indonesia hidup di daerah pedesaan dengan mata pencaharian utama bertani. Hal ini mutlak membutuhkan sumberdaya lahan untuk usaha pertaniannya. Di sisi lain, jumlah penduduk terus meningkat. Departemen Tenaga Kerja RI (1996) menyebutkan rata-rata pertambahan penduduk (1980 - 1995) mencapai 3,19 juta orang per tahun. Proses pergeseran penggunaan lahan dari lahan pertanian ke non pertanian berlangsung dengan cepat karena pesatnya pembangunan di berbagai bidang. Akibatnya pemanfaatan lahan seringkali tidak sesuai dengan fungsi penggunaan lahannya dan cenderung memaksa tanah untuk berproduksi secara maksimal tanpa memperhatikan kaidah konservasi tanah dan air. Hal ini akan mempercepat terjadinya kerusakan sumberdaya alam (Utomo, 1994; Gunawan, 1993).

Menurut Balai Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah Wilayah VI (1986), di Indonesia diperkirakan terdapat 43 juta hektar tanah yang tidak produktif diantaranya terdapat 20 juta hektar tanah dalam keadaan kritis hidrologis, sedang data dari Dirjen Reboisasi dan Rehabilitasi Lahan Departemen Kehutanan menyebutkan

bahwa terdapat 36 Daerah Aliran Sungai di Indonesia yang kritis dan perlu segera direhabilitasi melalui program reboisasi (Suryanto dan Kardono, 1994).

Salah satu penyebab kerusakan tanah yang penting adalah proses erosi. Erosi dapat menyebabkan kerusakan tanah terutama pada tempat erosi terjadi, yaitu berupa hilangnya lapisan atas tanah yang subur dan baik untuk pertumbuhan tanaman serta berkurangnya kemampuan tanah untuk menyerap dan menahan air (Arsyad, 1989). Disamping itu, erosi juga dapat menyebabkan pelumpuran dan pendangkalan waduk, saluran irigasi, dan badan air lainnya (Stewart *et al.*, 1975).

Hartono (1996) menyatakan bahwa dalam penyusunan pola Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah suatu DAS diperlukan urutan prioritas penanganan Sub DAS dan DAS. Perhitungan besarnya erosi yang terjadi pada suatu DAS dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan prioritas penanganan DAS, dimana semakin tinggi tingkat erosi yang terjadi, maka seharusnya semakin besar prioritas penanganannya.

Menurut Utomo (1994) pengukuran besarnya erosi dapat dilakukan dengan beberapa cara, diantaranya pengamatan perubahan permukaan tanah, pengukuran langsung dengan percobaan, penggunaan peta topografi dan foto udara, ataupun pendekatan melalui faktor-faktor yang berpengaruh terhadap erosi. Pengukuran erosi secara langsung di lapangan pada DAS yang besar banyak mengalami kendala diantaranya dibutuhkan waktu dan biaya yang tinggi, beberapa daerah sulit dijangkau secara terestrial, dan pengukurannya selalu tergantung dari iklim. Oleh karena itu, secara teknis dan ekonomis pemanfaatan citra penginderaan jauh merupakan salah satu alternatif yang tepat untuk prediksi besarnya erosi.

Konsep konservasi sumberdaya lahan yang diterapkan sekarang mengacu pada konsep berjenjang, yaitu konsep konservasi dari tingkat umum ke tingkat rinci (Hartono, 1996). Hal ini tentu membutuhkan data besarnya erosi secara cepat dan berkelanjutan untuk memantau kondisi DAS. Penggunaan data penginderaan jauh seperti foto udara yang telah banyak dilakukan dalam pendugaan besarnya erosi cenderung mengalami kendala terutama menyangkut masalah ketersediaan foto udara yang terbaru sesuai dengan perubahan kondisi DAS yang cepat. Penggunaan lahan merupakan salah satu komponen DAS yang paling cepat mengalami perubahan. Hal ini secara langsung akan berpengaruh terhadap hasil prediksi besarnya erosi karena penggunaan lahan merupakan salah satu variabel dalam prediksi erosi. Oleh karena itu, untuk mengatasi masalah ini diperlukan citra penginderaan jauh yang mempunyai resolusi temporal yang tinggi.

Landsat TM merupakan salah satu citra satelit yang mempunyai resolusi temporal yang tinggi, disamping resolusi spasialnya yang baik. Menurut Lillesand dan Kiefer (1994) Landsat TM dapat melakukan perekaman ulang pada daerah yang sama dalam jangka waktu 16 hari dengan resolusi spasial 30 m. Dengan demikian, pemanfaatan analisis digital citra Landsat TM yang dipadukan dengan sistem informasi geografi adalah salah satu cara untuk prediksi besarnya erosi, yang dapat menghemat waktu, biaya, dan pekerjaan lapang.

Peranan citra digital Landsat TM dalam prediksi besarnya erosi dengan menggunakan *Universal Soil Loss Equation* (USLE) adalah dalam pendugaan nilai CP (faktor tanaman dan pengelolaan lahan) melalui klasifikasi penutup lahan/ penggunaan lahan secara digital. Faktor panjang dan kemiringan lereng (LS) dari

formula USLE diperoleh dari pembuatan model elevasi digital melalui digitasi garis kontur dan titik ketinggian pada peta topografi. Nilai erodibilitas tanah (K) didapatkan dari hasil analisis tanah pada setiap jenis tanah. Peta jenis tanah yang digunakan adalah peta jenis tanah semi detail dari LREPP II. Nilai erosivitas hujan (R) diperoleh dari stasiun penakar hujan yang ada di daerah penelitian dan sekitarnya.

Sungai Ayung adalah sungai terpenting di daerah Bali khususnya daerah Denpasar karena kebutuhan air minum (sumber air PDAM) kota Denpasar dan sekitarnya bersumber dari aliran sungai tersebut. Sungai Ayung juga merupakan sumber air irigasi dan tempat rekreasi arung jeram terbesar di Pulau Bali sehingga perlu dilestarikan dan dikelola dengan baik untuk menghindari terjadinya kerusakan dan degradasi DAS.

Menurut Perda Tingkat I Bali No 6 tahun 1989 tentang Rencana Umum Tata Ruang Daerah Bali (Anonimus, 1989), bagian tengah dan hulu DAS Ayung merupakan kawasan lindung dan kawasan penyangga yang kini banyak mengalami perubahan penggunaan lahan. Berdasarkan studi pemantauan perubahan penggunaan lahan dan perencanaan teknik konservasi tanah dan air oleh Adnyana dkk. (1993) di DAS tersebut, menunjukkan bahwa selama kurun waktu 18 tahun (1972 - 1990) banyak terjadi pergeseran penggunaan lahan di bagian tengah dan hulu DAS terutama dari kebun campuran menjadi tegalan. Indeks bahaya erosi DAS tersebut adalah tinggi sampai sangat tinggi.

1.2. Perumusan Masalah

Besarnya erosi pada suatu daerah penting untuk diketahui dalam pengelolaan DAS karena berhubungan dengan penentuan prioritas rehabilitasi lahan dan konservasi tanah. USLE adalah salah satu formula untuk prediksi besarnya erosi. Formula tersebut dapat diaplikasikan dengan mengukur faktor-faktor erosi secara langsung di lapangan atau dengan memanfaatkan data penginderaan jauh. Pendugaan erosi pada daerah yang luas dengan medan yang berat membuat semakin penting peranan data penginderaan jauh, karena secara teknis dapat mengurangi pekerjaan lapang dan secara ekonomis dapat menekan biaya penelitian.

Data penginderaan jauh yang banyak digunakan sebagai sumber informasi dalam prediksi erosi adalah foto udara. Komponen erosi dari formula USLE yang paling cepat mengalami perubahan adalah faktor tanaman dan pengelolaan lahan (CP), sedang faktor erosivitas hujan (R), erodibilitas tanah (K), serta panjang dan kemiringan lereng (LS) relatif stabil. Perubahan penggunaan lahan yang cepat akibat berbagai aktivitas manusia sulit dideteksi dengan cepat dan akurat karena seringkali dihadapkan pada masalah ketersediaan foto udara yang mendukung laju pergeseran penggunaan lahan yang cepat. Oleh sebab itu, untuk mengantisipasi masalah ini diperlukan data penginderaan jauh yang mempunyai resolusi temporal yang tinggi untuk memantau dan mendeteksi perubahan penggunaan lahan dan tindakan konservasi, dalam hal ini adalah citra Landsat TM. Hal ini berhubungan dengan akurasi nilai CP yang diperoleh dalam menduga erosi yang pada akhirnya akan mempengaruhi ketepatan prediksi besarnya erosi.

Penggunaan analisis digital citra Landsat TM dalam prediksi erosi harus diuji tingkat ketelitiannya dan hasil yang diperoleh perlu dibandingkan dengan metode pengukuran faktor erosi secara langsung di lapangan untuk mengetahui kemampuan citra tersebut dalam prediksi erosi. Dengan demikian, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah berapa persen tingkat ketelitian analisis digital citra Landsat TM dan analisis berbasis SIG dalam menyajikan variabel erosi dengan menggunakan formula USLE, dan berapa persen tingkat signifikansi (α) besarnya erosi yang diperoleh bila dibandingkan dengan pengukuran faktor erosi secara langsung di lapangan.

Berdasarkan hal tersebut di atas, penulis berkeinginan melakukan penelitian besarnya erosi di Sub DAS Ayung Kabupaten Badung Propinsi Bali dengan menggunakan analisis digital citra Landsat TM dan sistem informasi geografi dengan harapan apabila metode analisis digital citra Landsat TM yang diintegrasikan dengan sistem informasi geografi dapat digunakan untuk prediksi besarnya erosi dengan tingkat ketelitian yang memadai, maka pengukuran erosi secara langsung di lapangan dapat dikurangi dengan pertimbangan kendala teknis dan ekonomis. Peranan foto udara, dalam hal ini dapat digantikan dengan citra Landsat TM, mengingat resolusi temporalnya yang tinggi yang sesuai untuk memantau perkembangan dan perubahan kondisi DAS yang cepat, disamping juga hasil analisisnya dapat digunakan sebagai data masukan dalam sistem pemetaan digital, bank basisdata geografi, dan sistem informasi geografi.

1.3. Keaslian Penelitian

Penelitian tentang prediksi besarnya erosi dengan menggunakan faktor-faktor penyebab erosi sebagai variabelnya pertama kali dikembangkan oleh Wischemeir dan Smith (1978) di Amerika Serikat. Model yang dikembangkan diberi nama *Universal Soil Loss Equation*. Karena kesederhanaanya, model ini telah digunakan secara luas oleh beberapa peneliti erosi dan konservasi tanah di berbagai tempat, diantaranya Roose (1977) di Afrika Barat, Fluwell (1977) di Afrika Selatan, Hardono (1987) di Jawa Tengah, dan Utomo (1994) di Jawa Timur. Dengan memodifikasi beberapa faktor erosi seperti perhitungan indeks erosivitas hujan dan erodibilitas tanah, USLE dapat digunakan untuk menduga besarnya erosi di Indonesia (Utomo, 1994).

Pemanfaatan data penginderaan jauh untuk pendugaan tingkat erosi khususnya di Indonesia juga telah banyak dilakukan seperti oleh Yuniyanto (1984), Sudarto (1989), Sudaryono (1991), Kumajas (1992), Noorhadi (1993), Adnyana dkk. (1993), Zefri (1994), dan Syamsuhari (1996). Penelitian-penelitian prediksi besarnya erosi yang telah dilakukan sebelumnya sebagian besar menggunakan foto udara sebagai sumber data. Metode yang digunakan adalah interpretasi foto udara secara visual melalui pendekatan geomorfologi dan dianalisis secara manual, sedangkan penelitian Adnyana dkk. (1993) di daerah penelitian dilakukan melalui pengamatan variabel erosi secara langsung di lapangan. Delapan penelitian pendugaan tingkat erosi dan konservasi tanah sebelumnya disajikan pada Tabel 1.1.

Berbeda dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini menggunakan citra digital Landsat TM multispektral dan dianalisis secara digital. Peta topografi dan peta tanah yang akan digunakan dalam penelitian ini dikonversi ke dalam bentuk digital

sebelum dilakukan perhitungan komponen erosi dan tumpangsusun peta dalam lingkup sistem informasi geografi.

1.4. Faedah yang Dapat Diharapkan

Bagi pengembangan ilmu pengetahuan, penelitian ini dapat menambah pembendaharaan hasil penelitian dalam bidang ilmu penginderaan jauh dan sistem informasi geografi terutama dalam menilai kemampuan citra Landsat TM yang diintegrasikan dengan SIG dalam prediksi besarnya erosi. Bagi pembangunan bangsa dan negara, penelitian ini dapat memberikan sumbangan data tentang besarnya erosi yang terjadi di Sub DAS Ayung yang selanjutnya dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam penyusunan prioritas pola Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah DAS Ayung.

1.5. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. untuk mengetahui kemampuan dan tingkat ketelitian analisis digital citra Landsat TM dan sistem informasi geografi dalam menyajikan informasi variabel-variabel erosi, yaitu penggunaan lahan, jenis tanah, dan kemiringan lereng;
2. memprediksi dan menguji ketelitian hasil prediksi erosi dengan membandingkan besarnya erosi yang diperoleh dalam penelitian ini dengan metode pengukuran langsung variabel erosi di lapangan pada penelitian sebelumnya di DAS yang sama.

Tabel 1.1. Penelitian Erosi dan Konservasi Tanah yang Pernah Dilakukan.

No	Peneliti	Tahun	Daerah Penelitian	Tujuan Penelitian	Sumber Data	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
1	Yunianto	1984	Kudus dan Prawata, Jawa Tengah	Mempelajari peran survei geomorfologi dalam pemetaan bahaya erosi	Foto udara inframerah skala 1 : 30.000	Interpretasi foto udara dan survei geomorfologi	Peta bahaya erosi tanah
2	Sudarto	1989	Daerah tangkapan hujan waduk Karangates, Jawa Timur	Mengembangkan metode penelitian pemetaan tingkat erosi	Foto udara pankromatik hitam putih skala 1 : 10.000	Interpretasi foto udara, pendekatan geomorfologi dan USLE	Pendugaan erosi dengan USLE berbeda tidak nyata dengan pengukuran erosi di lapangan dengan plot
3	Sudaryono	1991	Daerah tangkapan hujan waduk Wonogiri bagian timur, Jawa Tengah	Mempelajari dan mengidentifikasi daerah kritis yang dapat menyebabkan pendangkalan waduk	Foto udara pankromatik hitam putih skala 1 : 10.000	Interpretasi foto udara, statistik diskriptif, regresi, dan korelasi ganda	Daerah pendukung pendangkalan waduk berupa tegalan, pekarangan, sawah dan lahan kering terutama pada kelas lereng 15-25%
4	Kumajas	1992	Daerah tangkapan hujan danau Tondano Sulawesi Utara	Untuk mengetahui karakteristik bentuklahan yang dapat dijadikan dasar penentuan bentuk konservasi tanah	Foto udara pankromatik hitam putih skala 1 : 100.000	Interpretasi foto udara, pendekatan bentuklahan dengan satuan lahan sebagai dasar evaluasi	Faktor pemilihan bentuk konservasi: kemiringan lereng, kedalaman tanah, permeabilitas, penggunaan lahan dan proses geomorfik
5	Noorhadi	1993	Sub DAS Wuryantoro, Wonogiri, Jawa Tengah	Mempelajari, membandingkan dan mengevaluasi tingkat erosi permukaan	Foto udara pankromatik hitam putih skala 1 : 50.000	Interpretasi foto udara, USLE, pembuatan plot erosi, regresi dan korelasi	Bentuk konservasi dan lereng adalah faktor paling berpengaruh terhadap erosi permukaan
6	Adnyana dkk.	1993	DAS Ayung, Bali	Prediksi erosi dan erosi yang masih dapat ditoleransikan	Pengamatan lapang dan hasil analisis laboratorium	pengukuran faktor-faktor erosi di lapangan, USLE dengan satuan unit lahan	Erosi di sebagian besar DAS Ayung melebihi erosi yang masih ditoleransikan
7	Zefri	1994	Daerah tangkapan hujan Danau Singkorak, Sumatra Barat	Menilai tingkat bahaya erosi	Foto udara pankromatik hitam putih skala 1 : 20.000	Interpretasi foto udara, pendekatan bentuk lahan, satuan evaluasi adalah satuan lahan	Tingkat bahaya erosi diperoleh 5 kelas, yaitu ringan, sedang, agak berat, berat, dan sangat berat
8	Syamsuhari	1996	Daerah pengaliran sungai Wuryantoro, Wonogiri, Jawa Tengah	Pendugaan tingkat bahaya erosi dan arahan konservasi tanah	Foto udara inframerah berwarna skala 1 : 20.000	Interpretasi foto udara, analisis tingkat bahaya erosi, dan kemampuan lahan	Peta tingkat bahaya erosi dan arahan konservasi tanah

1.6. Deskripsi Daerah Penelitian

DAS Ayung terletak di lereng bagian Selatan pegunungan Pulau Bali, antara 115° 11'30" sampai 115°19'5" Bujur Timur dan 8°13'20" sampai 8°46'15" Lintang Selatan. Panjang sungai utama sekitar 62,50 km, sedangkan daerah penelitian yang terletak di bagian hilir, panjang sungainya \pm 34,54 km. Luas daerah tangkapan (*catchmen area*) DAS Ayung sebesar 31.000 ha, dan daerah penelitian sekitar 8.000 ha. DAS Ayung melintasi 5 kabupaten dan 1 kotamadya, yaitu Kabupaten Buleleng, Bangli, Tabanan, Gianyar, Badung, dan Kotamadya Denpasar. Gambaran lokasi penelitian disajikan pada Gambar 1.1.

Berdasarkan klasifikasi iklim Schmidt dan Ferguson, sebagian besar DAS Ayung tergolong iklim A, dengan bulan basah 7 – 9 bulan, bulan kering 2 – 3 bulan, dan bulan lembab sekitar 2 bulan. Curah hujan rata-rata tahunan daerah penelitian berkisar dari 1423 mm sampai 3196 mm dengan distribusi 61 sampai 169 kali dalam satu tahun. Selengkapnya data jumlah curah hujan, curah hujan maksimum, dan jumlah hari hujan pada delapan stasiun hujan yang ada di daerah penelitian dan sekitarnya disajikan pada Lampiran 2.

Menurut peta geologi Pulau Bali skala 1 : 250.000 tahun 1971, formasi batuan DAS Ayung bagian hulu sampai hilir didominasi oleh tufa dan endapan lahar Buyan-Bratan dan Batur dengan bahan induk abu dan tufa volkan intermedier, berasal dari Gunungapi Beratan dan Gunungapi Batur, sedangkan di dekat muara sungai batumannya berupa aluvium dengan bahan induk endapan sungai dan endapan laut (Adnyana dkk., 1993). Satuan geomorfologi DAS Ayung bagian hulu adalah kerucut volkan dengan bentuk wilayah bergelombang sampai bergunung. Di bagian tengah

merupakan lereng tengah gunungapi dengan bentuk wilayah bergelombang sampai berbukit, sedangkan di bagian hilir tergolong kipas volkan dengan bentuk wilayah datar sampai berombak, dan di dekat muara DAS termasuk beting gisik dengan bentuk wilayah berombak.

Berdasarkan Peta Tanah Tinjau Pulau Bali (Dai dan Rosman, 1970), DAS Ayung terdiri dari 6 (enam) macam tanah, yaitu Regosol Kelabu, Regosol Berhumus, Andosol Coklat Kelabu, Regosol Coklat Kekuningan, Latosol Coklat Kekuningan, dan Regosol Coklat, sedangkan menurut klasifikasi tanah *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 1990), jenis tanah DAS Ayung terdiri dari 5 (empat) ordo, yaitu Entisols, Inseptisols, Alfisols, Andisols, dan Mollisols. Secara rinci klasifikasi tanah berdasarkan *Soil Taxonomy* sampai pada tingkat famili dapat dilihat pada Lampiran 3.

Penggunaan lahan DAS Ayung menurut Peta Penggunaan Lahan Kabupaten Badung (1989) terdiri dari sawah, tegalan, perkebunan, kebun campuran, hutan, dan permukiman.

Gambar 1.1. Peta Lokasi Penelitian

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Telaah Pustaka

2.1.1. Karakteristik Citra Landsat TM

Landsat (Land satellite) adalah salah satu citra satelit sumberdaya bumi milik Amerika Serikat pertama kali diluncurkan tanggal 23 Juli 1972. Pada peluncuran yang pertama satelit ini diberi nama ERTS-1 (*Earth Resource Technology Satellite-1*). Nama ERTS diganti dengan Landsat mulai peluncuran yang kedua (Curan, 1985).

Sampai pada peluncurannya yang ke 5 (Landsat 5), sistem Landsat dikelompokkan dalam 2 generasi, yaitu generasi 1 (Landsat 1, 2, dan 3) dan generasi 2 (Landsat 4 dan 5). Perbedaan wahana dan orbit Landsat generasi 1 dan 2 disajikan pada Tabel 2.1.

Menurut Lillesand dan Kiefer (1994), sensor TM pada Landsat 4 dan 5 merupakan sensor tingkat tinggi (*highly advanced sensor*) sehingga dapat meningkatkan resolusi spektral, radiometri, dan spasial citra dibandingkan dengan MSS. Peningkatan resolusi spektral pada TM dilakukan dengan penambahan jumlah saluran dari 4 pada MSS menjadi 7 pada TM, masing-masing untuk saluran biru, inframerah tengah, dan inframerah termal. Disamping itu, berdasarkan pengalaman penggunaan MSS dan hasil penelitian dengan radiometer secara intensif di lapangan, julat dan lokasi saluran pada TM telah dipilih sedemikian rupa sehingga dapat meningkatkan kemampuan untuk membedakan nilai spektral objek utama di per-

Tabel 2.1. Wahana dan Orbit Landsat Generasi 1 dan 2

Parameter	Generasi 1	Generasi 2
Ketinggian	918 km	705 km
Jumlah orbit per hari	14	14,5
Jumlah orbit (<i>path</i>)	251	233
Tampalan samping citra di ekuator	14 %	7.6%
Melintas ekuator pada waktu setempat	9:42 AM	9:45 AM
Tahun operasional	1972 – 1984	1982 – nanti
Penyimpanan data <i>on-board</i>	Ya	Tidak
Penyiam multispektral	Ya	Ya
<i>Return beam vidicon</i>	Ya (Landsat 3)	Tidak
<i>Thematic mapper</i>	Tidak	Ya

Sumber : Sabin (1987); Lillesand dan Kiefer (1994)

mukaan bumi. Julat saluran TM dan masing-masing kegunaanya secara lengkap disajikan pada Tabel 2.2.

Berlainan halnya dengan MSS dimana arah penyiamannya hanya satu arah (barat-timur), TM dapat melakukan penyiaman dengan dua arah yaitu barat-timur dan timur-barat dengan sudut pandang sesaat (IFOV) sebesar $15,4^\circ (\pm 7,7^\circ)$ dari nadir). Perbedaan yang lain antara TM dan MSS adalah jumlah detektor yang digunakan untuk penginderaan. MSS menggunakan 6 detektor untuk setiap salurannya (total 24 detektor), sedangkan TM memakai 16 detektor pada setiap saluran non-termal, dan 4 detektor untuk saluran termal sehingga total detektor untuk seluruh saluran pada Landsat TM adalah 100 detektor (Lillesand dan Kiefer, 1994).

Tabel 2.2. Julat Band Landsat TM dan Kegunaannya

Band	Panjang Gelombang (μm)	Lokasi	Kegunaan Utama
1	0,45 – 0,52	Biru	Penetrasi tubuh air, pemetaan daerah pantai, membedakan tanah dan vegetasi, pemetaan jenis hutan, dan identifikasi bentang budaya.
2	0,52 – 0,60	Hijau	Mengukur puncak pantulan hijau vegetasi untuk membedakan vegetasi dan penaksiran <i>vigor</i> , serta identifikasi bentang budaya.
3	0,63 – 0,69	Merah	Daerah serapan klorofil, membantu membedakan species vegetasi, serta baik untuk identifikasi bentang budaya.
4	0,76 – 0,90	Inframerah dekat	Menentukan jenis vegetasi, <i>vigor</i> , dan kandungan biomassa, membatasi daerah berair, dan membedakan kelembaban tanah.
5	1,55 – 1,75	Inframerah tengah	Menilai kelembaban vegetasi dan kelembaban tanah, membedakan salju dan awan.
6	10,4 – 12,5	Inframerah termal	Analisis tekanan vegetasi, membedakan kelembaban tanah, aplikasi pemetaan termal.
7	2,08 – 2,35	Inframerah tengah	Membedakan jenis batuan dan mineral, dan peka terhadap kelembaban vegetasi.

Sumber : Lillesand dan Kiefer (1994)

Konversi data analog ke digital pada TM menggunakan sistem pengkodean 8 bit sehingga dihasilkan 256 julat tingkat keabuan objek, relatif lebih baik dari MSS dengan 64 tingkat keabuan (6 bit). Hal ini dapat meningkatkan kepekaan sensor terhadap pantulan sinyal objek di bumi. Resolusi medan TM adalah 30 m, kecuali

band 6 (inframerah termal) resolusi spasialnya 120 m. Dengan resolusi spasial 30 m, Landsat TM mempunyai kemampuan pengenalan objek jauh lebih baik dibandingkan dengan MSS dengan resolusi 79 m (Sabin , 1987).

2.1.2. Restorasi dan Rektifikasi Citra

Restorasi dan rektifikasi citra diterapkan untuk memperbaiki kualitas citra dan menghilangkan kesalahan dan distorsi yang terjadi saat perekaman citra. Koreksi geometri dan radiometri merupakan dua proses yang penting dalam restorasi dan rektifikasi citra.

2.1.2.1. Koreksi Geometri

Pada dasarnya koreksi geometri dilakukan untuk menghilangkan kesalahan geometri baik yang bersifat sistematis maupun yang tidak sistematis. Kesalahan sistematis adalah kesalahan yang telah diperhitungkan sebelumnya, seperti kesalahan yang disebabkan oleh sudut pandang sensor, kecepatan wahana, rotasi bumi, distorsi penyiam, variasi kecepatan cermin, dan kemiringan garis penyiam. Di lain pihak kesalahan non-sistematis merupakan kesalahan yang tidak diperhitungkan sebelumnya, misalnya kedudukan, kecepatan, dan ketinggian wahana (Jensen, 1986).

Kesalahan sistematis dapat diketahui dengan baik dan mudah diperbaiki melalui penerapan formula yang diturunkan dari pemodelan matematis pada sumber kesalahan, sedangkan kesalahan non-sistematik dikoreksi dengan analisis titik kontrol medan (*ground control point*), yaitu dengan membentuk fungsi transformasi yang

menyatakan hubungan matematis antara titik-titik pada citra dengan titik yang sama di lapangan atau peta dengan menggunakan sistem koordinat tertentu. Fungsi transformasi tersebut adalah sebagai berikut :

$$x = f_1 (X,Y) \quad (2.1)$$

$$y = f_2 (X,Y) \quad (2.2)$$

dimana (x,y) = koordinat citra yang belum terkoreksi (kolom, baris)

(X,Y) = koordinat sebenarnya (peta)

f_1, f_2 = fungsi transformasi

Menurut Anonimus (1993), secara umum ada 3 macam fungsi polinomial untuk transformasi, yaitu polinomial ordo satu (affine), ordo dua, dan ordo tiga. Masing-masing fungsi polinomial tersebut berbeda, baik dalam hal aplikasi, jumlah minimum titik kontrol medan yang dibutuhkan untuk membangun fungsi matematis, maupun bentuk persamaannya. Semakin berat topografi medan semakin tinggi ordo yang dibutuhkan. Fungsi polinomial ordo satu memerlukan 3 minimum titik kontrol, sedang ordo dua dan tiga masing-masing 6 dan 10. Contoh bentuk persamaan fungsi polinomial ordo dua adalah :

$$U = a_1x^2 + a_2xy + a_3y^2 + a_4y + a_5x + a_6 \quad (2.3)$$

$$V = b_1x^2 + b_2xy + b_3y^2 + b_4y + b_5x + b_6 \quad (2.4)$$

dimana U dan V = koordinat citra

x dan y = koordinat peta

a dan b = parameter transformasi

Perubahan posisi piksel yang terjadi akibat proses transformasi, harus diikuti dengan penempatan kembali nilai piksel tersebut melalui interpolasi nilai spektral.

Proses ini disebut dengan *resampling*. Menurut Lillesand dan Keifer (1994) ada tiga macam algoritma pada proses *resampling*, yaitu *nearest neighbour*, *bi-linear*, dan *cubic convolution*. Masing-masing algoritma memberikan efek yang berbeda pada kenampakan citra. Algoritma *nearest neighbour* diterapkan dengan mengambil kembali nilai piksel yang terdekat yang telah tergeser ke posisi baru, sedang algoritma *bi-linear*, dan *cubic convolution* memperhitungkan beberapa piksel yang berdekatan dalam proses interpolasi, yang kemudian nilainya dirata-ratakan secara proporsional sesuai dengan jaraknya terhadap posisi baru. Algoritma *bi-linear* mempertimbangkan 4 piksel yang terdekat, sedang *cubic convolution* membutuhkan 16 piksel. Bentuk formula yang digunakan dikemukakan oleh Jensen (1986) sebagai berikut :

$$BV_{bi} = \frac{\sum_{k=1}^n (Z_k / D^2_k)}{\sum_{k=1}^n (1 / D^2_k)} \quad (2.5)$$

dimana BV_{bi} = piksel baru hasil interpolasi

Z_k = nilai piksel di sekitar titik penempatan pusat piksel baru

D_k^2 = kuadrat jarak dari titik tersebut

n = jumlah titik terdekat

Masing-masing algoritma *resampling* di atas mempunyai kekurangan dan kelebihan. Algoritma *bi-linear* dan *cubic convolution* tidak tepat diterapkan pada citra asli yang akan digunakan sebagai masukan dalam klasifikasi otomatis, karena nilai piksel tidak lagi mencerminkan pantulan obyek yang sebenarnya. Citra yang dihasilkan mempunyai kenampakan diperhalus. Kedua metode tersebut lebih sesuai

untuk *resampling* nilai pada citra model digital. Algoritma *nearest neighbour* cocok diterapkan pada citra saluran asli dan juga hasil klasifikasi (penutup lahan), namun dengan resiko kenampakan linear yang terpatah-patah.

2.1.2.2. Koreksi Radiometri

Koreksi radiometri diperlukan untuk meningkatkan kualitas visual citra dan memperbaiki nilai-nilai piksel yang tidak sesuai dengan nilai pantulan yang sebenarnya. Peningkatan kualitas visual citra dilakukan dengan pengisian kembali baris yang kosong karena *drop-out* atau karena kesalahan awal pelarikan (*scanning start*). Bagian baris yang nilainya tidak sesuai dengan nilai yang seharusnya dikoreksi dengan merata-ratakan nilai piksel satu baris di atasnya dan di bawahnya (Guindon, 1984 *dalam* Jensen, 1998), sedangkan koreksi radiometri yang ditujukan untuk memperbaiki nilai setiap piksel agar sesuai dengan nilai pantulan obyek yang sebenarnya biasanya mempertimbangkan faktor gangguan atmosfer sebagai sumber kesalahan utama. Pada koreksi ini, diasumsikan bahwa nilai piksel terendah pada suatu kerangka liputan (*scene*) adalah nol, sesuai dengan *bit-coding* sensor. Apabila nilai terendah piksel pada kerangka liputan tersebut bukan nol, maka nilai penambah (*offset*) tersebut diasumsikan berasal dari hamburan atmosfer. Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk koreksi radiometrik diantaranya: penyesuaian histogram, penyesuaian regresi, dan metode kalibrasi bayangan (Gastellu, 1988).

Metode penyesuaian histogram merupakan metode yang paling sederhana, yaitu hanya memperhatikan histogram setiap saluran secara independen. Dari

histogram yang dibuat dapat diketahui nilai piksel terendah saluran tersebut. Asumsi yang digunakan adalah obyek yang memberikan respon spektral paling lemah atau tidak memberikan respon sama sekali, seharusnya berilai nol. Bila nilai yang terendah tidak menunjukkan nol, maka besarnya nilai tersebut merupakan pengaruh atmosfer yang disebut sebagai *offset*. Selanjutnya seluruh nilai piksel pada saluran tersebut dikurangi dengan nilai *offset* tersebut.

Berlainan halnya dengan metode penyesuaian histogram, metode penyesuaian regresi menggunakan beberapa saluran sekaligus. Metode ini dapat diterapkan bila saluran rujukan (saluran yang relatif bebas gangguan) menyajikan nilai 0 untuk obyek tertentu misalnya saluran TM7 untuk air jernih, dalam, dan tenang. Selanjutnya setiap saluran dipasangkan dengan saluran rujukan tersebut untuk membentuk diagram pencar nilai-nilai piksel yang diamati. Dari diagram pencar tersebut kemudian dibuat persamaan regresi untuk menentukan nilai *offset*-nya. Dilain pihak metode kalibrasi bayangan (*shadow calibration method*) mempertimbangkan imbalanced energi elektromagnetik yang masuk ke atmosfer bumi dan kenampakan obyek di permukaan bumi yang tertutup bayangan. Dengan menganalisis irradiansi dari wilayah yang tak tertutup bayangan dan wilayah yang tertutup bayangan dapat dihasilkan nilai radiansi umbalan atmosfer (Gastellu, 1988).

2.1.3. Penajaman Citra

Menurut Lillesand dan Kiefer (1994) tujuan utama penajaman citra adalah untuk meningkatkan kemampuan interpretasi citra secara visual dengan

mempertinggi perbedaan kenampakan obyek. Penajaman kontras, pemfilteran, dan manipulasi multi-citra merupakan beberapa contoh penajaman citra yang penting.

2.1.3.1. Penajaman Kontras

Penajaman kontras dilakukan dengan mentransformasi seluruh nilai kecerahan. Hasilnya berupa citra dengan nilai maksimum baru yang lebih tinggi dari nilai maksimum awal, dan nilai minimum baru pada umumnya lebih rendah dari nilai awal. Secara visual, hasil ini berupa citra baru yang variasi hitam putihnya lebih menonjol. Sabin (1987) mengelompokkan penajaman kontras menjadi perentangan kontras linear dan perentangan kontras non-linear.

2.1.3.2. Pemfilteran

Menurut Swain dan Davis (1978) pemfilteran merupakan suatu cara untuk ekstraksi bagian data tertentu dari suatu himpunan data, dengan menghilangkan bagian-bagian data yang tidak diinginkan. Pada dasarnya ada dua jenis filter, yaitu filter *high pass* dan filter *low pass*. Filter *Low pass* digunakan untuk memperhalus kenampakan citra, sedangkan filter *high pass* untuk menonjolkan perbedaan antar objek atau perbedaan nilai, kondisi ataupun sifat antar-obyek yang diwakili oleh nilai piskel.

2.1.3.3. Manipulasi Multi Citra

Penajaman citra dengan teknik manipulasi multi citra menggunakan beberapa citra sekaligus dalam suatu proses. Menurut Lillesan dan Keifer (1994) Penisbahan saluran, indeks vegetasi, dan analisis komponen utama merupakan beberapa proses manipulasi multi-citra. Penisbahan saluran digunakan untuk menghasilkan efek tertentu dalam kaitannya dengan penonjolan aspek spektral vegetasi, pengurangan efek bayangan, dan penonjolan litologi. Indeks vegetasi merupakan suatu algoritma yang diterapkan terhadap citra untuk menonjolkan aspek kerapatan vegetasi ataupun aspek kerapatan lain yang berkaitan dengan vegetasi seperti biomassa, indeks luas daun, ataupun konsentrasi klorofil. Analisis komponen utama merupakan cara pandang geometri atau distribusi piksel pada ruang spektral, disertai dengan perubahan kedudukan sumbu-sumbu spektral melalui pemutaran dan penggunaan parameter statistik lain untuk menghasilkan citra baru dengan distribusi nilai piksel yang lebih jelas dalam menyajikan obyek (Crist dan Cicone, 1984 *dalam* Danoedoro, 1996)

2.1.4. Klasifikasi Citra

Analisis dan Klasifikasi data analog berbeda dengan data digital. Menurut Sutanto (1996) pengenalan obyek pada analisis analog seperti pada foto udara menggunakan ciri spektral, ciri spasial, dan ciri temporal, sedangkan pada analisis digital kita mengandalkan nilai spektral yang terekam pada pita magnetik. Asumsi yang digunakan dalam klasifikasi ini adalah tiap obyek dapat dibedakan dengan yang

lainnya berdasarkan nilai spektralnya, karena berdasarkan penelitian, tiap obyek memberikan pola spektral yang spesifik.

Danoedoro (1996) menyatakan bahwa pada klasifikasi multispektral dibutuhkan informasi citra tiap saluran. Semakin banyak informasi statistik yang dibutuhkan, semakin sulit algoritmanya, dan semakin lama proses eksekusi klasifikasinya. Dalam beberapa hal, algoritma yang lebih rumit akan memberikan hasil yang lebih teliti.

Secara umum klasifikasi multispektral dapat dibagi menjadi dua, yaitu klasifikasi terselia (*supervised classification*) dan klasifikasi tak terselia (*unsupervised classification*). Perbedaan sistem klasifikasi tersebut terletak pada penggunaan daerah contoh (*training area*). Pada klasifikasi terselia memakai daerah contoh sebagai acuan dalam klasifikasi, dan sebaliknya pada klasifikasi tak terselia tidak menggunakan daerah contoh (Sutanto, 1996). Pada klasifikasi terselia, kriteria sampel yang baik dicerminkan dari homogenitas nilai piksel, kecilnya simpangan baku, serta bentuk histogram dan pengelompokan gugus pada ruang spektral.

Menurut Lillesand dan Kiefer (1994) ada beberapa algoritma dalam klasifikasi terselia diantaranya jarak minimum ke pengkelas rata-rata (*minimum distance to mean classifier*), pengkelas paralelepiped (*parallelepiped classifier*), dan pengkelas kemiripan maksimum normal (*maximum likelihood classifier*). Pada klasifikasi tak terselia terdapat tiga algoritma diantaranya jarak minimum ke pusat gugus, penggugusan statistik, dan algoritma campuran..

Algoritma kemiripan maksimum merupakan metode klasifikasi yang secara statistik paling baik dan mapan. Piksel diklaskan sebagai obyek tertentu berdasarkan

bentuk, ukuran, orientasi sampel pada ruang spektral. Nilai statistik yang diperhitungkan dalam algoritma ini adalah rerata, simpangan baku, variansi, dan kovarian tiap sampel. Nilai rerata menentukan posisi elipsoida sampel pada ruang spektral, sedangkan simpangan baku, varian dan kovariannya mempengaruhi ukuran, bentuk, dan orientasi elipsoida (Shrestha, 1991 *dalam* Danoedoro, 1996).

Lillisand dan Keifer (1994) menyatakan bahwa kepadatan probabilitas digunakan pada pengkelas kemiripan maksimum untuk mengklasifikasikan suatu piksel tak dikenal dengan menghitung nilai probabilitas piksel tersebut pada tiap kategori. Dalam hal ini komputer akan menghitung probabilitas nilai piksel yang terdapat pada agihan kelas tertentu, kemudian menghitung kemungkinannya termasuk kelas yang lain. Setelah mengevaluasi probabilitas pada tiap kategori, piksel akan dikelompokkan pada kelas yang paling mungkin atau dikelompokkan sebagai “tak dikenal” bila nilai probabilitas berada di bawah ambang batas yang ditetapkan.

2.1.5. Sistem Informasi Geografi

Sistem Informasi Geografi (SIG) adalah sistem berbasis komputer yang digunakan untuk memasukkan, menyimpan, mengelola, menganalisis dan mengaktifkan kembali data yang mempunyai referensi keruangan untuk berbagai tujuan yang berkaitan dengan pemetaan dan perencanaan (Burrough, 1986; Aronoff, 1989).

Weir (1990) mengemukakan pada dasarnya pemasukan data ke dalam SIG dapat dilakukan melalui 3 cara, yaitu penyiaman, digitasi, dan tabulasi. Penyiaman adalah proses pengubahan data grafis kontinyu menjadi data grafis diskret yang

terdiri atas sel-sel penyusun gambar (piksel). Digitasi merupakan perubahan data grafis analog menjadi data grafis digital dalam struktur vektor. Sedangkan tabulasi adalah pemasukan data non-grafis atau atribut ke dalam SIG.

Manajemen data meliputi semua operasi penyimpanan, pengaktifan, penyimpanan kembali, dan pencetakan data yang diperoleh dari masukan data. Efisiensi suatu manajemen data ditentukan oleh efisiensi sistem untuk melakukan operasi-operasi tersebut. SIG adalah *Sistem Management Basis Data Spatial* yang mampu memadukan informasi dalam bentuk tabel dengan informasi spasial berupa peta dengan tingkat otomasi yang tinggi. Dengan demikian, tugas SIG tidak dapat digantikan oleh paket-paket sistem manajemen data yang lain (Danoedoro, 1996).

Manipulasi dan analisis data meliputi proses penyuntingan (editing) data untuk pemutakhiran data, interpolasi spasial, tumpang susun peta, dan pembuatan model serta analisis data. Tumpang susun peta, secara garis besar dikelompokkan menjadi 3 bagian, yaitu map crossing, tumpang susun dengan bantuan matrik atau tabel dua dimensi, dan kalkulasi peta (Aronoff, 1989; Valenzuela, 1990a)

Menurut Valenzuela (1990b) keluaran utama dari SIG adalah informasi spasial baru. Informasi ini dapat berupa peta, grafik, tabel, gambar, dan data yang tersimpan dalam peralatan magnetik. Kualitas *output* yang dihasilkan tergantung dari peralatan *output* yang digunakan.

Salah satu aplikasi SIG terutama dalam kalkulasi peta (*map calculation*) adalah estimasi besarnya erosi melalui faktor-faktor penyebab erosi. Valenzuela (1988) menggunakan paket ILWIS untuk prediksi erosi potensial dan bahaya erosi melalui

analisis data, modeling, dan manipulasi kartografi. Hasilnya adalah peta bahaya erosi (*erosion hazard*) dengan berbagai tingkatan mulai dari rendah sampai sangat tinggi.

2.1.6. Ketelitian Hasil Klasifikasi

Menurut Campbell (1987) klasifikasi secara digital merupakan suatu interaksi yang kompleks antara struktur keruangan bentanglahan, resolusi spasial, algoritma pra-pengolahan, dan prosedur klasifikasi. Oleh karena itu, tingkat ketelitian hasil interpretasi dan klasifikasi penting untuk diketahui sebelum data tersebut dianalisis lebih lanjut untuk tujuan tertentu (Sutanto, 1994).

Short (1982) menyatakan bahwa evaluasi ketelitian hasil klasifikasi data Landsat dapat dilakukan dengan 4 cara, yaitu uji medan pada beberapa titik sampel, evaluasi kesesuaian hasil klasifikasi dengan peta atau foto udara, analisis statistik, dan pembuatan matrik kesalahan. Metode uji medan pada beberapa titik sampel dilakukan dengan mengamati obyek yang sebenarnya secara langsung ke lapangan, selanjutnya dapat diputuskan benar salahnya hasil klasifikasi yang telah dilakukan. Cara yang kedua dilakukan dengan melakukan tumpang susun antara peta hasil klasifikasi dengan foto udara atau peta, kemudian tingkat kesesuaiannya dapat dihitung. Metode analisis statistik mendasarkan pada nilai-nilai numerik yang didapatkan dari hasil pengukuran, pengambilan sampel, dan pengolahan. Parameter statistik yang biasa digunakan adalah variansi, koefesien korelasi, standard deviasi, regeresi linear atau berganda, akar kuadrat tengah, dan uji X^2 .

Menurut Lillesand dan Keifer (1994), penggunaan matrik kesalahan (*error matrix*) merupakan salah satu cara yang paling umum digunakan untuk menyajikan ketelitian hasil klasifikasi. Matrik kesalahan tersebut membandingkan antara data yang sebenarnya dengan data yang dihasilkan dari hasil klasifikasi otomatis untuk setiap kategori. Contoh matrik kesalahan disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Contoh Matrik Uji Ketelitian Interpretasi

		Data acuan			
		X	Y	Z	Jumlah
Data hasil klasifikasi	X	a	b	c	m
	Y	d	e	f	n
	Z	g	h	i	o
	Jumlah	p	q	r	t

Sumber : Lillesand dan Kiefer (1994); Short (1982) dengan modifikasi

Dari matrik tersebut dapat dihitung kesalahan omisi, kesalahan komisi, ketelitian setiap kategori, dan ketelitian keseluruhan. Kesalahan omisi tiap kategori dihitung dengan membagi data acuan yang tidak terklasifikasi dengan benar dengan seluruh data acuan dari kategori tersebut, pada Tabel 2.3 kesalahan omisi kategori X dihitung sebagai berikut :

$$\text{Kesalahan omisi X} = (d+g) / p \times 100\% \quad (2.6)$$

Kesalahan komisi dikalkulasi dengan menjumlahkan data hasil klasifikasi yang tidak terklasifikasikan dengan benar, kemudian dibagi dengan seluruh data acuan dari kategori tersebut. Contoh kesalahan komisi kategori X adalah :

$$\text{Kesalahan komisi } X = (b+c) / p \times 100\% \quad (2.7.)$$

Lillesand dan Kiefer (1994) membagi ketelitian setiap kategori menjadi 2 macam, yaitu ketelitian penghasil (*producer's accuracies*) dan ketelitian pengguna (*user's accuracies*). Ketelitian penghasil dihitung dengan membagi data hasil klasifikasi yang benar pada suatu kategori dengan seluruh data acuan pada kategori tersebut, sedangkan ketelitian pengguna dikalkulasi dengan membagi data hasil klasifikasi yang benar pada suatu kategori dengan seluruh data hasil klasifikasi pada kategori tersebut. Ketelitian penghasil menggambarkan homogenitas dan ketepatan julat daerah contoh, sedang ketelitian pengguna mencerminkan ketepatan antara data hasil klasifikasi dengan data acuan. Masing-masing ketelitian tersebut dapat ditulis sebagai berikut :

$$\text{Ketelitian penghasil } X = a / p \times 100\% \quad (2.8)$$

$$\text{Ketelitian pengguna } X = a / m \times 100\% \quad (2.9)$$

Akhirnya, ketelitian keseluruhan dihitung dengan membagi seluruh data yang terklasifikasi dengan benar pada semua kategori dengan seluruh data yang diuji. Mengacu pada Tabel 2.1, ketelitian keseluruhan diformulasikan sebagai berikut :

$$\text{Ketelitian keseluruhan} = (a+e+i) / t \times 100\% \quad (2.10)$$

Para pakar penginderaan jauh menentukan nilai berbeda-beda terhadap ketelitian interpretasi dan klasifikasi yang dapat diterima. Anderson *et al* (1976) menyatakan 85% untuk klasifikasi penggunaan lahan dengan citra Landsat MSS,

sedang Daels dan Antrop (1981) *dalam* Gunawan (1995) menyebutkan 80% untuk tema klasifikasi yang sama. Di lain pihak Justice (1976 *dalam* Townshend, 1971) menggunakan tingkatan dalam penentuan nilai ketelitian, dimana untuk tingkatan baik, sedang, dan buruk masing-masing bernilai lebih besar dari 85%, 70 sampai 85%, dan lebih kecil dari 70%. Mengingat kondisi penggunaan lahan di Indonesia yang berbeda dengan negara Barat yang digunakan sebagai acuan, maka batas minimum tingkat ketelitian yang dapat diterima yang digunakan dalam penelitian ini adalah 80%.

Beberapa hasil penelitian yang telah dilakukan mendapatkan tingkat ketelitian hasil interpretasi dan klasifikasi yang berbeda-beda. Thompson dan Henderson (1984) memperoleh 60% tingkat ketelitian klasifikasi penutup lahan Landsat TM pada musim tanam jagung dan kedelai. Anuta *et al* (1984) mendapatkan ketelitian lebih besar dari 75% untuk beberapa penutup lahan. Melalui penggabungan klasifikasi tak terselia dan beberapa teknik interpretasi citra untuk analisis penutup dan penggunaan lahan dengan menggunakan citra SPOT pankromatik, Jadcowski dan Ehlers (1989 *dalam* Bocco dan Valenzuela, 1990) menghasilkan tingkat ketelitian 93%. Sementara Hartono (1994) melalui klasifikasi lahan mangrove mendapatkan ketelitian rerata berkisar dari 78,4% sampai 94%, berbeda pada setiap jumlah kelas yang dihasilkan. Dungus (1997) memperoleh tingkat ketelitian klasifikasi penggunaan lahan sebesar 90%, sedangkan Sulistyono (1997) menghasilkan tingkat ketelitian klasifikasi penggunaan lahan setelah koreksi geometri sebesar 88,73%, 83,69%, dan 82,67% masing-masing untuk metode transformasi *nearest neighbour*, *cubic convolution*, dan *bilinear interpolation*.

2.1.7. Erosi dan Faktor-faktor yang Berpengaruh

Arsyad (1989) menyatakan bahwa erosi merupakan suatu peristiwa pindahnya atau terangkutnya tanah atau bagian-bagian tanah dari suatu tempat ke tempat lain oleh media alami. Pada peristiwa erosi, tanah atau bagian-bagian tanah dari suatu tempat terkikis dan terangkut yang kemudian diendapkan pada suatu tempat lain. Di daerah tropis yang lembab seperti Indonesia dengan rata-rata curah hujan melebihi 1.500 mm per tahun, maka air merupakan penyebab utama terjadinya erosi (Sarief, 1986), sedangkan erosi oleh angin tidaklah berarti (Juswadi, 1985). Menurut Eppink (1985), ada 5 faktor yang mempengaruhi erosi, yaitu iklim, tanah, topografi, vegetasi, dan pengelolaan tanah yang dilakukan oleh manusia.

Di daerah beriklim basah, faktor iklim yang paling besar pengaruhnya terhadap erosi adalah hujan. Besarnya curah hujan, intensitas, dan distribusinya menentukan kekuatan dispersi hujan terhadap tanah, jumlah aliran permukaan, dan kekuatan erosi (Arsyad, 1989). Menurut Kartasapoetra (1989), jumlah air hujan yang besar karena turunnya berlangsung lama sehingga intensitasnya kecil kurang berperan terhadap erosi. Demikian pula intensitas hujan yang tinggi akan tetapi berlangsung dalam waktu yang singkat, kurang berperan terhadap terjadinya erosi. Akan tetapi bila jumlah dan intensitasnya tinggi akan mengakibatkan erosi yang besar (Baver, 1959).

Berbagai jenis tanah mempunyai kepekaan terhadap erosi berbeda-beda. Kepekaan erosi tanah atau mudah tidaknya tanah tererosi disebut erodibilitas (Murty, 1985). Menurut Utomo (1994) nilai erodibilitas suatu tanah ditentukan oleh ketahanan tanah terhadap daya rusak dari luar dan kemampuan tanah menyerap air (infiltrasi dan perkolasi). Ketahanan tanah menentukan mudah tidaknya massa tanah

dihancurkan, sedangkan infiltrasi dan perkolasi mempengaruhi volume limpasan permukaan yang mengikis dan mengangkut hancuran massa tanah. Kemudahan massa tanah untuk dihancurkan ditentukan oleh tekstur tanah, kemantapan agregat, dan kandungan bahan organik serta bahan semen yang lain. Kemampuan menyerap serta meneruskan air dipengaruhi oleh kapasitas infiltrasi, permeabilitas tanah, tekstur tanah, dan kemantapan agregat serta ruang pori tanah.

Kemiringan dan panjang lereng adalah dua unsur topografi yang paling berpengaruh terhadap aliran permukaan dan erosi (Arsyad, 1989). Unsur lain yang berpengaruh adalah konfigurasi, keseragaman, dan arah lereng. Menurut Baver (1959) dan Schwab *et al.* (1966) kemiringan lereng lebih berpengaruh terhadap besarnya erosi dibandingkan dengan panjang lerengnya.

Pengaruh vegetasi terhadap aliran permukaan dan erosi meliputi (a) intersepsi hujan oleh tajuk tanaman, (b) mengurangi kecepatan aliran permukaan dan kekuatan perusak air, (c) pengaruh akar dan kegiatan mikrobia tanah yang berhubungan dengan kegiatan pertumbuhan vegetasi dan pengaruhnya terhadap stabilitas struktur dan porositas tanah, dan (d) transpirasi yang mengakibatkan kandungan air tanah berkurang (Arsyad, 1989). Dilain pihak, efektivitas tanaman dalam mengurangi laju erosi ditentukan oleh jenis, jumlah, penyebaran, dan tinggi tanaman (Stalling, 1959).

Pembuatan teras, penanaman secara berjalur, penanaman atau pengolahan tanah menurut kontur, perlindungan tanah dengan mulsa adalah kegiatan manusia yang dapat menurunkan erosi. Dilain pihak, penanaman searah lereng, perladangan dan penggunaan lahan tanpa memperhatikan kaedah konservasi tanah dan air akan meningkatkan bahaya erosi (Baver, 1959).

2.1.8. Penelitian Erosi Terdahulu

Penelitian yang bertujuan untuk mempelajari peranan survei geomorfologi, pemetaan bahaya erosi, dan cara pengawetan tanah dengan menggunakan foto udara inframerah skala 1 : 30.000 dilakukan oleh Yuniarto (1984) di daerah Kudus dan Prawata, Jawa Tengah. Satuan pemetaan yang digunakan adalah bentuk lahan sebagai satuan geomorfologi. Klasifikasi bentuklahan diperoleh melalui interpretasi foto udara dan cek lapangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bahaya erosi dan kecocokan lahan dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan cara-cara pengawetan tanah.

Sudarto (1989) melakukan penelitian di sub DAS Lesti hulu dan Genteng, daerah tangkapan waduk Karangates, Malang dengan menggunakan foto udara pankromatik hitam putih skala 1 : 10.000 untuk menilai tingkat erosi. Foto udara digunakan untuk mendapatkan berbagai informasi yang diperlukan untuk pendugaan erosi seperti tanah/batuan, vegetasi/penggunaan lahan, lereng, bentuklahan, dan wujud-wujud erosi. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa pendugaan erosi dengan USLE berbeda tidak nyata dengan hasil pengukuran erosi di lapangan dengan menggunakan plot erosi.

Penelitian tentang faktor-faktor fisik utama yang berpengaruh terhadap erosi dan pengangkutan material sedimen telah dilakukan oleh Sudaryanto (1991) di daerah tangkapan hujan waduk Wonogiri sebelah timur dengan menggunakan foto udara pankromatik hitam putih skala 1 : 10.000. Variabel-variabel penelitian seperti bentuk penggunaan lahan, kelas kemiringan lereng, dan tanah menurut kelompok tekstur diperoleh dari hasil interpretasi foto udara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa

penggunaan lahan dan kemiringan lereng secara bersama-sama merupakan kelompok yang paling berpengaruh terhadap intensitas erosi dan pengangkutan material sedimen ke dalam waduk Wonogiri.

Kumajas (1992) mengadakan penelitian morfokonservasi di daerah tangkapan hujan Danau Tondano, Sulawesi Utara dengan interpretasi foto udara pankromatik hitam putih skala 1 : 100.000 dan cek lapangan. Penelitian tersebut menggunakan pendekatan bentuklahan dengan pemetaan satuan lahan sebagai satuan evaluasi. Penciri bentuklahan yang digunakan dalam interpretasi foto udara adalah relief, material, dan proses geomorfik. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa faktor lingkungan fisik yang berpengaruh langsung terhadap pemilihan bentuk konservasi adalah kemiringan lereng, kedalaman tanah, permeabilitas tanah, penggunaan lahan, dan proses geomorfik.

Dengan tujuan menduga, membandingkan, dan mengevaluasi tingkat erosi permukaan, Noorhadi (1993) mengadakan penelitian di sub DAS Wuryantoro Kabupaten Wonogiri dengan menggunakan foto udara pankromatik hitam putih skala 1 : 50.000 untuk mendapatkan data bentuklahan, penggunaan lahan, dan satuan medan. Tingkat erosi permukaan diprediksi dengan USLE. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa untuk mencegah tingkat erosi permukaan yang terjadi agar sama atau lebih kecil dari erosi yang masih dapat dibiarkan dilakukan dengan mengubah nilai CP.

Melalui pengamatan faktor-faktor penyebab erosi secara langsung di lapangan Adnyana dkk. (1993) melakukan penelitian di DAS Ayung dengan menggunakan metode USLE. Unit lahan yang dipakai sebagai dasar dalam prediksi erosi dan

perencanaan penggunaan lahan didapatkan dari hasil kompilasi peta penutup lahan, peta jenis tanah, peta iso-eroden, dan peta kelas kemiringan lereng. Hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut adalah tingkat erosi yang terjadi di DAS Ayung berkisar dari sangat ringan sampai sangat berat, tetapi sebagian besar melampaui erosi yang masih dapat ditoleransikan dengan tingkat bahaya erosi tinggi sampai sangat tinggi. Selengkapnya hasil prediksi erosi tersebut disajikan pada Lampiran 9.

Penelitian tingkat bahaya erosi dengan menggunakan foto udara pankromatik hitam putih skala 1 : 20.000 di daerah tangkapan air Danau Singkarak Sumatra Barat juga telah dilakukan oleh Zefri (1994). Kenampakan tanda atau gejala terhadap faktor-faktor penyebab erosi seperti lereng, tanah, bentuk penggunaan lahan, tutupan vegetasi, dan konservasi tanah diperoleh dari interpretasi foto udara. Penelitian tersebut menggunakan pendekatan bentuklahan sebagai satuan evaluasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor erosi yang besar peranannya adalah penggunaan lahan (tutupan vegetasi dan konservasi tanah).

Syamsuhari (1996) memanfaatkan foto udara inframerah berwarna skala 1 : 20.000 untuk penyusunan arahan konservasi tanah berdasarkan penilaian tingkat bahaya erosi dan kemampuan lahan. Faktor-faktor penyebab erosi dari USLE, yaitu LS dan CP diinterpretasi dari foto udara, K didapatkan melalui pengambilan sampel di lapangan, dan R dihitung dari data hujan yang ada di daerah penelitian. Tingkat bahaya erosi dinilai dari perbandingan antara erosi permukaan (A) dengan erosi yang masih dapat diperbolehkan (T). Pada daerah dimana $A > T$ dilakukan perubahan nilai faktor CP agar $A \leq T$. Tingkat bahaya erosi di DPS Wuryantoro dapat diklasifikasikan menjadi 4 kelas, yaitu ringan, sedang, berat, dan sangat berat.

2.2. Landasan Teori

Salah satu cara estimasi besarnya kehilangan tanah adalah dengan menggunakan faktor-faktor penyebab erosi. Wischemeir dan Smith (1978) mengemukakan formula USLE untuk prediksi erosi, dengan formula $A = R \times K \times LS \times CP$. A adalah besarnya kehilangan tanah (ton/ha/th), R adalah indeks erosivitas hujan, K adalah erodibilitas tanah, LS adalah faktor panjang dan kemiringan lereng, dan CP adalah faktor tanaman dan pengelolaan lahan. Komponen erosi tersebut dapat diukur di lapangan atau dianalisis dari data penginderaan jauh.

Dari keempat komponen formula USLE tersebut, 3 diantaranya relatif stabil dalam artian perubahannya terjadi dalam jangka waktu yang lama, sedangkan satu komponen yang lainnya tingkat perubahannya relatif cepat. Faktor tanaman dan pengelolaan lahan (CP) merupakan faktor erosi yang mengalami perubahan cepat sehingga dalam estimasi nilai tersebut perlu menggunakan data penginderaan jauh yang memiliki resolusi temporal yang tinggi. Landsat TM merupakan salah satu citra penginderaan jauh yang mempunyai kemampuan perekaman ulang tinggi, yaitu 16 hari sekali. Oleh karena itu, pendugaan faktor CP pada persamaan USLE sangat relevan menggunakan citra digital Landsat TM melalui klasifikasi multispektral. Hasil dari klasifikasi multispektral tersebut adalah peta penutup/penggunaan lahan yang dapat menginformasikan nilai CP.

Nilai digital citra Landsat mencerminkan pantulan objek di permukaan bumi sehingga informasi yang terkandung di dalamnya lebih banyak menggambarkan penutup lahan. Skala yang kecil dan interpretasi secara monoskopis pada citra Landsat merupakan kekurangan yang dimiliki data penginderaan jauh berwahana

satelit tersebut, sehingga mengalami kendala dalam interpretasi jenis tanah dan kemiringan lereng untuk keperluan pendugaan nilai K dan LS. Dengan demikian, analisis digital citra Landsat TM perlu diintegrasikan dengan sistem informasi geografi dalam prediksi erosi.

Mengingat faktor K dan LS mempunyai tingkat perubahan yang lambat, maka pendugaan nilai-nilai tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan sumber data lain yang mempunyai tingkat akurasi yang lebih tinggi. Nilai K ditentukan oleh sifat-sifat tanah, yaitu tekstur tanah, struktur tanah, permeabilitas tanah, dan kandungan bahan organik tanah. Dalam hal ini, peta tanah dapat digunakan sebagai basis dalam penentuan nilai K dengan asumsi bahwa tanah yang sejenis akan mempunyai sifat-sifat tanah yang sama, selanjutnya sifat tanah yang sama akan menghasilkan nilai K yang sama pula.

Faktor panjang dan kemiringan lereng (LS) dapat diturunkan dari peta kemiringan lereng, sedang peta kemiringan lereng dapat dihasilkan dari digitasi, konversi, dan interpolasi garis kontur dan titik ketinggian pada peta topografi. Garis kontur merupakan garis yang menggambarkan tempat-tempat yang mempunyai ketinggian/elevasi sama. Selisih 2 elevasi garis kontur menghasilkan beda tinggi antara 2 titik. Dua titik yang mempunyai perbedaan tinggi tersebut, dapat pula dihitung jarak horisontalnya pada skala peta tertentu. Selanjutnya lereng dalam satuan persen dapat dikalkulasi dengan membagi beda tinggi (jarak vertikal) antara dua titik dengan jarak horisontalnya, sedangkan arkus tangen (arc tg) dari pembagian jarak vertikal dengan jarak horisontalnya menghasilkan lereng dalam satuan derajat.

Faktor erosi yang lain, yaitu indeks erosivitas hujan (R) dapat diperoleh dari perhitungan data hujan pada seluruh stasiun penakar hujan yang ada di daerah penelitian dan sekitarnya. Penentuan nilai R untuk setiap titik di daerah penelitian dapat dilakukan dengan metode *gridding*, yaitu setiap titik pada daerah penelitian nilainya ditentukan oleh nilai erosivitas hujan pada stasiun hujan yang ada sekitarnya secara proporsional dengan jaraknya.

Penggunaan citra Landsat TM yang beresolusi spasial dan temporal tinggi, melalui klasifikasi multispektral memungkinkan dihasilkannya peta penggunaan lahan digital yang sesuai dengan kondisi sebenarnya di lapangan. Peta topografi dan jenis tanah yang cukup rinci, melalui analisis berbasis sistem informasi geografi diharapkan dapat menghasilkan peta lereng dan jenis tanah digital dengan tingkat akurasi yang memadai. Tingkat ketelitian peta-peta komponen erosi tersebut dapat diketahui melalui uji ketelitian, yaitu dengan membandingkan hasil analisis yang diperoleh dengan keadaan yang sebenarnya di lapangan, yang kemudian dibuatkan matrik kesalahannya. Pada penelitian ini, diharapkan ketelitian peta penggunaan lahan, jenis tanah, dan kemiringan lereng melebihi batas minimum tingkat kesalahan yang ditetapkan, yaitu 80%.

Perhitungan besarnya erosi (ton/ha/th) dilakukan dengan mengalikan faktor erosi, yaitu R, K, LS, dan CP pada setiap piksel yang bersesuaian. Penggunaan piksel sebagai satuan terkecil dalam prediksi erosi dengan luasan yang sempit $\pm 900 \text{ m}^2$ memungkinkan dihasilkan tingkat ketelitian yang tinggi. Tingkat erosi yang diperoleh dapat dibandingkan dengan hasil pengukuran faktor erosi secara terestrial yang telah dilakukan sebelumnya pada daerah yang sama, dan diharapkan melalui hasil uji

statistik hasil prediksi erosi pada penelitian ini tidak menunjukkan perbedaan yang nyata pada tingkat signifikansi 5% dengan pendugaan erosi melalui pengukuran faktor erosi secara langsung di lapangan.

2.3. Hipotesis

Hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini adalah :

1. Penggunaan analisis digital citra Landsat TM dan analisis berbasis SIG untuk estimasi variabel erosi, yaitu penggunaan lahan, jenis tanah, dan kemiringan lereng mampu menghasilkan tingkat ketelitian lebih besar dari 80%.
2. Hasil prediksi besarnya erosi dengan metode analisis digital dan sistem informasi geografi tidak berbeda nyata dengan metode pengukuran variabel erosi secara langsung di lapangan melalui uji statistik (*t-test*) pada tingkat signifikansi (α) sama dengan 5%.

III. CARA PENELITIAN

3.1. Bahan Penelitian

Bahan atau materi yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Citra digital Landsat Thematic Mapper (TM) DAS Ayung dan sekitarnya, terdiri dari 4 saluran yaitu saluran 2, 3, 4, dan saluran 5 yang direkam pada tanggal 24 April 1994 dengan *path/row* 116/066. Citra tersebut disimpan dengan format *Band sequential* (BSQ) dengan kapasitas penyimpanan data pada *Computer Compatible Tape* (CCT) 6250 BPI, dan telah dikoreksi sampai pada level 5 (*systematic georeference scene*).
2. Peta topografi skala 1 : 50.000 daerah Gianyar, Denpasar, dan Payangan lembar 6017 I, 6017 II, dan 6017 IV dibuat oleh US Army Map Service tahun 1964 dengan sistem proyeksi *Universal Transverse Mercator* (UTM).
3. Peta tanah semi detil skala 1 : 50.000 daerah Denpasar dan Klungkung lembar 1707-33 dan 1707-34 dibuat oleh Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor tahun 1994.
4. Data curah hujan 8 stasiun hujan di daerah penelitian dan sekitarnya selama 10 tahun terakhir (1988 – 1997) (Lampiran 2)
5. Data hasil penelitian estimasi erosi lapangan dengan metode USLE oleh Adnyana dkk. (1993) (Lampiran 9)

3.2. Alat-alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini dikelompokkan menjadi 2 bagian, yaitu alat yang dipakai di laboratorium pada analisis digital dan alat yang digunakan pada saat uji medan.

Pada analisis digital di laboratorium, peralatan yang digunakan adalah :

1. Komputer IBM PC-AT 486 DX4, RAM 16 MB, HardDisk 640 MB, Keyboard 104 keys.
2. Satu monitor monokrom dengan *display adapter card Colour Graphic Adapter (CGA)*, dan satu monitor berwarna beresolusi tinggi dengan *display adapter card Super Video Graphic Array (SVGA)*.
3. Meja *digitizer* ukuran A3 dengan ketelitian 0,001 inchi, dan printer berwarna HP designjet yang dapat mencetak sampai ukuran A0.
4. Perangkat lunak ILWIS (*Integrated Land and Water Information System*) versi 1.4, ditambah *software* Microsoft Excel 97 dan SPSS versi 6.0 untuk mengolah data atribut dan pengujian statistik.

Pada pengambilan data di lapangan, digunakan alat sebagai berikut:

1. Bor tanah untuk pengambilan sampel tanah untuk dianalisis di laboratorium.
2. Ring sampel dipakai untuk mencari sampel tanah yang utuh untuk menentukan permeabilitas tanah.
3. Abney level untuk mengukur kemiringan lereng.
4. Kompas dan altimeter sebagai penunjuk arah dan penentuan ketinggian tempat.

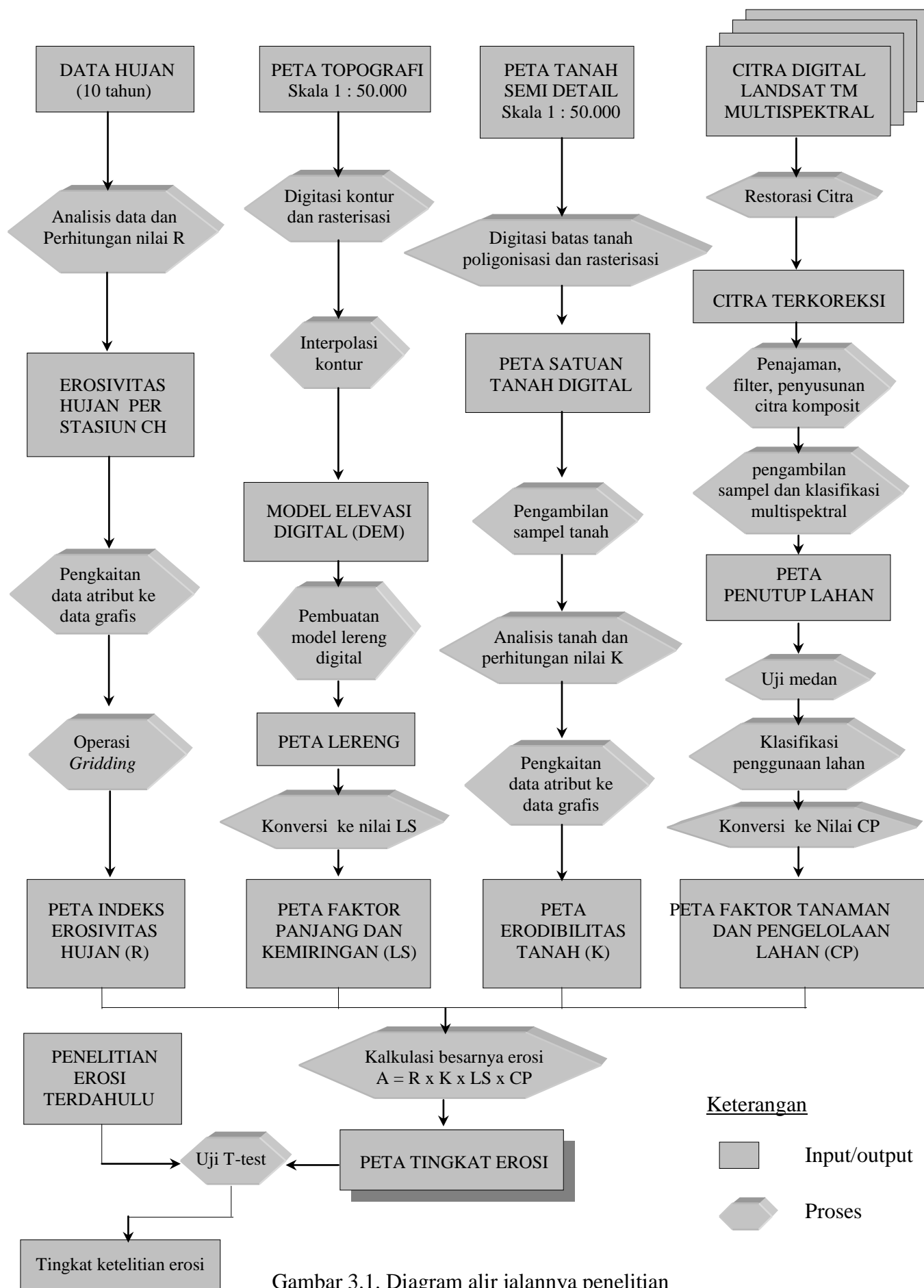
5. Pisau, tas plastik, dan spidol masing-masing untuk memotong tanah, tempat sampel tanah, dan pengkodean sampel tanah.
6. Kamera untuk pengambilan gambar bentuk penggunaan lahan, kemiringan lereng, dan bentuklahan di lapangan, serta dokumentasi hasil pengolahan citra digital.

3.3. Jalannya Penelitian

Jalannya penelitian dapat dikelompokkan menjadi 5 tahap, yaitu tahap persiapan, analisis data grafis, uji medan, pengolahan data atribut, uji ketelitian interpretasi, dan evaluasi hasil prediksi erosi. Secara skematis diagram alir jalannya penelitian disajikan pada Gambar 3.1. Masing-masing tahapan tersebut diuraikan sebagai berikut.

3.3.1. Tahap Persiapan

Pada tahap persiapan dikumpulkan berbagai literatur dan bahan-bahan yang diperlukan dalam penelitian ini. Literatur yang dihimpun menyangkut bahan atau buku bacaan dan hasil-hasil penelitian yang terkait dengan topik penelitian. Bahan-bahan yang dikumpulkan meliputi citra digital Landsat TM, peta topografi, peta tanah semi detil, dan data hasil penelitian estimasi erosi terdahulu pada daerah yang sama. Di samping itu dilakukan pula orientasi medan untuk mengetahui gambaran daerah penelitian secara umum.



3.3.2. Analisis Data Grafis

Analisis data grafis dilaksanakan 2 (dua) tahap, yaitu sebelum uji medan dan setelah pengolahan data atribut. Pekerjaan yang dilakukan pada analisis data grafis meliputi pengolahan citra digital (*digital image processing*) dan analisis berbasis sistem informasi geografi (SIG). Serangkaian proses yang dilakukan pada pengolahan citra digital pada dasarnya ditujukan untuk membuat peta penggunaan lahan digital yang selanjutnya dipakai sebagai masukan ke dalam SIG untuk penentuan nilai CP dalam prediksi erosi, sedangkan analisis yang berbasis SIG digunakan untuk membuat peta erosivitas hujan, peta erodibilitas tanah, peta faktor panjang dan kemiringan lereng, dan kalkulasi besarnya erosi dari komponen peta tersebut. Kedua macam analisis data grafis tersebut dapat dilakukan dengan paket program ILWIS versi 1.4. Secara rinci masing-masing analisis data grafis tersebut akan diuraikan secara terpisah.

3.3.2.1. Pengolahan Citra Digital

Tiga proses utama yang dilakukan pada pengolahan citra digital, yaitu (a) prapengolahan citra; (b) penajaman kontras, pemfilteran, dan penyusunan citra komposit; dan (c) klasifikasi multispektral.

a. Prapengolahan Citra

Proses prapengolahan citra dalam penelitian ini meliputi pemilihan lokasi dan saluran, koreksi radiometri, dan koreksi geometri citra. Pemilihan lokasi dimaksud-

kan untuk membatasi jumlah piksel yang diolah. Perintah ILWIS yang digunakan adalah COPYMAP. Dengan pertimbangan ketelitian hasil, pada proses pengolahan citra dipilih daerah penelitian dan sekitarnya dengan acuan peta topografi, kemudian pembatasan (*cropping*) seluas daerah penelitian dilakukan setelah klasifikasi multispektral.

Dari tujuh saluran yang dimiliki Landat TM, dipilih 4 saluran untuk diolah, yaitu saluran 2 (hijau), saluran 3 (merah), saluran 4 (inframerah dekat), dan saluran 5 (inframerah tengah 1). Saluran 1 (biru) tidak digunakan atas pertimbangan kepekaannya yang tinggi terhadap pengaruh atmosfer sebagai konsekuensi dari panjang gelombang yang kecil (Mather, 1987). Saluran 7 (inframerah tengah 2) juga tidak dipakai karena saluran ini mempunyai korelasi yang tinggi terhadap saluran 5 (inframerah tengah 1) (Frank, 1988), sehingga saluran 7 dapat diwakili oleh saluran 5, sedangkan saluran 6 (inframerah termal) tidak dimanfaatkan karena resolusi spasialnya yang sangat berbeda dengan saluran yang lainnya. Saluran 6 resolusi spasialnya 120 m, sedang saluran yang lainnya 30 m.

Koreksi radiometrik pada dasarnya dilakukan untuk menghilangkan pengaruh atmosfer karena perjalanan energi matahari ke obyek dan dari obyek ke sensor melalui atmosfer. Menurut Mather (1987), salah satu cara yang dapat digunakan untuk menghilangkan pengaruh atmosfer tersebut adalah metode penyesuaian histogram (*histogram adjustment*). Metode ini mendasarkan pada asumsi bahwa obyek yang memberikan respon spektral paling lemah atau tidak memberikan respon sama sekali seharusnya bernilai 0 (nol). Apabila nilai terendah dari setiap saluran lebih besar dari 0, maka nilai tersebut merupakan bias (*offset*), dan besarnya nilai bias

menunjukkan pengaruh atmosfer. Oleh karena itu, seluruh nilai piksel pada setiap saluran perlu dikurangi dengan nilai biasnya. Fasilitas MCALC (*map calculation*) pada paket ILWIS dapat dipakai untuk koreksi radiometrik menggunakan metode penyesuaian histogram dengan formula :

$$M_{calc} : C_t := C_b - o \quad (3.1)$$

dimana C_t adalah citra terkoreksi, C_b adalah citra yang belum dikoreksi radiometri dan o adalah *offset*, yaitu nilai yang menunjukkan besarnya pengaruh atmosfer.

Koreksi geometri ditujukan untuk menghilangkan kesalahan-kesalahan yang terdapat pada citra baik kesalahan sistematis maupun kesalahan non sistematis. Sebagian kesalahan yang ada seperti kesalahan yang diakibatkan karena gerakan cermin pelarik, kecepatan lintasan satelit, dan arah serta kecepatan rotasi bumi telah dikoreksi oleh stasiun penerimanya, sedangkan pada penelitian ini koreksi geometrik dilakukan untuk menempatkan posisi obyek di permukaan bumi sesuai dengan letak yang sebenarnya dengan menggunakan titik kontrol medan (*ground control point*).

Ada dua proses utama yang dilakukan pada koreksi geometrik ini, yaitu proses transformasi dan resampling. Pada proses transformasi, digunakan peta topografi skala 1 : 50.000 dengan sistem proyeksi UTM sebagai rujukan. Pasangan obyek yang mudah diamati di peta dan dapat diidentifikasi di citra dipilih untuk membangun fungsi matematis yang menyatakan hubungan antara posisi sembarang titik pada citra dengan titik atau obyek yang sama pada peta. Model transformasi yang digunakan adalah metode transformasi orde dua (*second order transformation*), mengingat kondisi topografi daerah penelitian tidaklah datar dan juga tidak terlalu berat. Model matematis transformasi polinomial tersebut adalah sebagai berikut :

$$U = a_1x^2 + a_2xy + a_3y^2 + a_4y + a_5x + a_6 \quad (3.2)$$

$$V = b_1x^2 + b_2xy + b_3y^2 + b_4y + b_5x + b_6 \quad (3.3)$$

dimana U dan V adalah koordinat citra, x dan y adalah koordinat peta, serta a dan b adalah parameter transformasi. Untuk melakukan proses transformasi polinomial ordo dua ini diperlukan minimal 6 pasang titik kontrol medan dengan ketelitian (*root mean squares*) yang dipersyaratkan oleh *National Map Accuracy Standard* (NMAS) lebih kecil atau sama dengan 1,7 piksel (Colvocoresses, 1986). Perintah pada ILWIS yang digunakan untuk transformasi ini adalah ADDCOORD.

Setelah proses transformasi, dilanjutkan dengan *resampling*, yaitu penempatan kembali nilai piksel ke posisinya sebagai akibat adanya pergeseran posisi piksel akibat proses transformasi. Pada penelitian ini digunakan metode *nearest neighbour* karena dengan metode ini, nilai piksel ditempatkan pada posisi baru yang terdekat dan tidak ada proses interpolasi nilai piksel sehingga nilai piksel tetap mencerminkan pantulan obyek di permukaan bumi. Metode ini sangat tepat diterapkan pada citra saluran asli untuk tujuan klasifikasi multispektral otomatis (Jensen, 1986).

b. Penajaman Kontras, Pemfilteran, dan Penyusunan Citra Komposit

Penajaman kontras merupakan pekerjaan untuk memperoleh suatu citra baru dari citra yang telah ada dengan mengubah nilai radiometrik setiap piksel. Hal ini penting untuk mempertinggi tingkat kekontrasan citra sehingga memudahkan interpretasi baik secara visual maupun digital. Pada prinsipnya penajaman kontras dilakukan dengan memperlebar julat nilai spektral dengan membuang nilai spektral

yang jumlahnya sedikit tetapi menempati julat yang lebar. Untuk melihat batas atas dan batas bawah nilai spektral yang sebaiknya dibuang pada proses penajaman digunakan perintah HISTGRAM, sedang untuk perentangan kontras untuk seluruh nilai piksel pada suatu citra digunakan perintah STRETCH.

Pemfilteran dimaksudkan untuk menonjolkan kenampakan tertentu. Teknik pemfilteran pada penelitian ini digunakan untuk memperjelas kenampakan jalan, sungai, dan pola spasial obyek yang lain. Hal ini digunakan untuk memudahkan penentuan titik kontrol medan pada koreksi geometri citra. Perintah FILTRMAP pada paket ILWIS dipakai untuk melakukan proses pemilteran tersebut.

Penyusuna citra komposit bertujuan untuk memperoleh gambaran visual citra yang lebih baik seperti halnya melihat foto udara berwarna sehingga mempermudah pengamatan obyek, pemilihan sampel untuk klasifikasi multispektral, dan memperbaiki aspek estetika citra. Berdasarkan atas pertimbangan kemudahan pengamatan dan pembedaan obyek, pada penelitian ini dibuat citra komposit 432, yaitu band 4 (infrmerah dekat) diberi warna dasar merah, band 3 (merah) diberi warna dasar hijau, dan band 2 (hijau) dengan warna dasar biru. Dalam hal ini perintah yang digunakan adalah COLORCMP.

c. Klasifikasi Multispektral

Klasifikasi multispektral merupakan tahapan terakhir dalam pengolahan citra digital setelah proses restorasi citra, penajaman kontras, dan penyusunan citra komposit warna semu. Citra komposit yang telah disusun dan sudah mempunyai koordinat selanjutnya digunakan sebagai masukan dalam klasifikasi multispektral. Tahapan kerja dalam proses klasifikasi multispektral diuraikan sebagai berikut :

1. Sebelum proses klasifikasi dilaksanakan, terlebih dahulu diperlukan sampel (*training area*) sebagai basis ekstrapolasi, karena klasifikasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah klasifikasi terselia (*supervised classification*). Jumlah sampel yang dipilih harus mewakili semua kenampakan yang ada, dan setiap sampel yang digunakan sebagai satu kelas haruslah homogen. Penilaian simpangan baku, bentuk histogram, dan pengelompokan gugus pada ruang spektral (*feature space*) dapat digunakan untuk menilai tingkat homogenitas sampel. Perintah ILWIS yang digunakan pada proses ini adalah SMPL.
2. Bila semua kenampakan telah terwakili oleh jumlah sampel yang diambil, perlu dilakukan pembacaan nilai statistik untuk tiap-tiap sampel untuk membuat suatu keputusan apakah suatu sampel harus digabungkan dengan sampel kelas yang lain, dihilangkan, atau diulang kembali pengambilannya agar kesalahan dalam klasifikasi dapat dihindarkan.
3. Dengan perintah CLASS selanjutnya dilakukan pengelompokan semua nilai piksel ke dalam kelas-kelas yang telah ditentukan. Algoritma yang digunakan dalam proses klasifikasi adalah algoritma kemiripan maksimum (*maximum*

likelihood algorithm). Informasi statistik yang dibutuhkan pada algoritma ini adalah nilai rerata, simpangan baku, variansi, dan kovariansi setiap sampel untuk menentukan bentuk, ukuran, dan orientasi sampel pada setiap kelas (Shrestha, 1991).

4. Citra yang telah terklasifikasikan, perlu difilter kembali dengan menggunakan filter mayoritas untuk menghilangkan piksel-piksel terasing di tengah piksel-piksel homogen dan sekaligus memperbaiki kenampakan hasil klasifikasi sehingga menyerupai peta (*map like*). Perintah yang digunakan adalah **FILTRMAP**.

Peta kelas spektral (penutup lahan) yang telah terbentuk perlu dilakukan uji medan untuk mengetahui penutup dan penggunaan lahan yang sebenarnya. Penentuan kelas penggunaan lahan didasarkan atas sistem klasifikasi penutup lahan/penggunaan lahan yang dikemukakan oleh Malingreau (1981) (Lampiran 6). Setiap jenis penggunaan lahan yang didapat kemudian ditentukan nilai faktor tanaman dan pengelolaan lahannya (CP) seperti pada Lampiran 7, selanjutnya nilai tersebut dikaitkan dengan data grafisnya. Perintah MCALC atau TABCALC dapat digunakan untuk proses ini. Hasil akhir dari pengolahan citra digital ini adalah citra digital, dimana nilai digitalnya merupakan nilai CP. Citra ini telah siap digunakan sebagai masukan ke dalam SIG untuk prediksi besarnya erosi.

3.3.2.2. Analisis Berbasis Sistem Informasi Geografi

Proses-proses yang dikelompokkan ke dalam analisis berbasis sistem informasi geografi dalam penelitian ini adalah pembuatan peta erosivitas hujan, peta erodibilitas tanah, peta faktor panjang dan kemiringan lereng, dan kalkulasi besarnya erosi. Masing-masing prosedur pembuatan peta komponen erosi digital tersebut diuraikan sebagai berikut.

a. Peta Erosivitas Hujan

Untuk pembuatan peta erosivitas hujan digital dilakukan langkah-langkah sebagai berikut.

1. Pertama harus dilakukan perhitungan nilai erosivitas hujan pada setiap stasiun hujan yang ada di daerah penelitian dan sekitarnya (Subbab 3.3.4.1).
2. Nilai erosivitas hujan pada setiap stasiun hujan yang telah diketahui koordinatnya (Lampiran 1), kemudian dibuatkan tabel basisdata atribut dengan perintah TABCALC. Kolom (*field*) pada tabel tersebut harus berisikan X!, Y!, dan N masing-masing untuk koordinat X, koordinat Y, dan nilai erosivitas hujan.
3. Langkah selanjutnya adalah operasi *gridding*, yaitu pembuatan peta raster dari titik-titik stasiun hujan dengan perintah GRIDDING. Metode grid yang digunakan adalah *Moving Average*, dimana pada metode ini setiap piksel akan diisi nilai erosivitas hujan sesuai dengan proporsinya dari jarak stasiun hujan di sekitarnya. Hasil akhir dari proses ini adalah peta digital yang nilai pikselnya menggambarkan nilai erosivitas hujan.

b. Peta Erodibilitas Tanah

Peta erodibilitas tanah dibuat berdasarkan peta tanah semi detil yang dibuat oleh Puslitanak (1994) pada proyek LREP II. Tahapan pembuatan peta erodibilitas tanah dapat diuraikan sebagai berikut.

1. Peta tanah semi detil skala 1 : 50.000 yang telah dibagi dalam 13 Satuan Peta Tanah (SPT) untuk seluruh daerah penelitian didigitasi dengan perintah DIGITIZE. Hasil digitasi tersebut akan menghasilkan data grafis berformat vektor.
2. Untuk menyamakan format data dengan peta digital yang lain, format vektor yang diperoleh dari hasil digitasi dalam bentuk poligon, dikonversi ke format raster menggunakan perintah POLRAS. Nilai piksel pada peta digital yang dihasilkan belum menunjukkan nilai erodibilitas tanah, melainkan hanya merupakan nomor SPT.
3. Nilai atribut erodibilitas tanah yang diperoleh dari hasil uji medan, analisis laboratorium, dan perhitungan (Subbab 3.3.4.2) selanjutnya dibuatkan tabel basisdata atribut yang berisikan kolom (informasi) nomor SPT dan nilai erodibilitas tanahnya, memakai perintah TABCALC.
4. Tabel basisdata atribut yang telah dibuat kemudian dikaitkan (*link*) dengan data grafis yang sudah dikerjakan sebelumnya dengan perintah MCALC, formulanya adalah:

$$\text{Mcalc : Map_ero} := \text{Ero_data.nilai (Map_spt)} \quad (3.4)$$

dimana Map_ero adalah peta erodibilitas tanah digital, Ero_data adalah *file* tabel basisdata yang berisikan informasi nomor SPT dan nilai erodibilitas tanah, *nilai* adalah nama kolom (*field*) yang berisikan informasi nilai erodibilitas tanah, dan Map_spt adalah citra yang nilai digitalnya adalah nomor SPT .

c. Peta Faktor Panjang dan Kemiringan Lereng

Urutan kerja pembuatan peta faktor panjang dan kemiringan lereng dapat diuraikan sebagai berikut.

1. Digitasi semua garis kontur dan titik ketinggian dari peta topografi skala 1 : 50.000 menjadi data digital dalam format vektor. Perintah yang digunakan adalah DIGITIZE.
2. Format data vektor yang berbentuk segmen kemudian dikonversi ke dalam format raster dengan perintah SEGRAS.
3. Untuk memperoleh model elevasi digitasi (DEM), yaitu citra digital yang nilai pikselnya menunjukkan ketinggian tempat, maka dilakukan interpolasi peta kontur dan titik ketinggian dalam format raster, dengan memakai perintah INTERPOL.
4. Model elevasi digital yang dihasilkan selanjutnya difilter ke arah sumbu X dengan filter spasial DFDX dan ke arah sumbu Y menggunakan filter spasial DFDY. Perintah yang di pakai adalah FILTRMAP. Hasil dari proses tersebut adalah citra digital yang nilai pikselnya berupa perbedaan elevasi antara dua piksel ke arah sumbu X dan Y.

5. Dengan menggunakan perintah MCALC, kemudian dilakukan perhitungan kemiringan lereng dengan formula :

$$\text{Mcalc : Map_ler} := 100 * ((\text{Map_dx} * \text{Map_dx}) + (\text{Map_dy} * \text{Map_dy})) / 30 \quad (3.5)$$

dimana Map_ler adalah peta kemiringan lereng digital dalam persen, Map_dx adalah peta beda tinggi ke arah sumbu x, Map_dy adalah peta beda tinggi ke arah sumbu y, dan 30 adalah ukuran piksel.

6. Peta panjang dan kemiringan lereng digital diperoleh dari hasil konversi peta kemiringan lereng digital. Penilaian faktor panjang dan kemiringan lereng (LS) dari nilai kemiringan lereng disajikan pada Tabel 3.1. Perintah yang digunakan adalah MCALC dengan formula :

$$\text{Mcalc : Map_ls} := \text{if}(\text{Map_ler} \leq 5, 0.25, \text{if}(\text{Map_ler} \leq 15, 1.20, \text{if}(\text{Map_ler} \leq 35, 4.25, \text{if}(\text{Map_ler} \leq 50, 9.50, 12.00)))) \quad (3.6)$$

dimana Map_ls adalah peta panjang dan kemiringan lereng dan Map_ler adalah peta kemiringan lereng.

Tabel 3.1. Penentuan Nilai LS dari Kemiringan Lereng

Kemiringan lereng (%)	Nilai LS
0 – 5	0,25
5 – 15	1,20
15 – 35	4,25
35 – 50	9,50
> 50	12,00

Sumber : Dirjen Reboisasi dan Rehabilitasi Lahan (1986)

d. Kalkulasi Besarnya Erosi

Kalkulasi besarnya erosi dilakukan bila semua peta digital komponen erosi telah selesai diproses. Perintah yang digunakan adalah MCALC dengan formula :

$$Mcalc : map_A := map_R * map_K * map_LS * map_CP \quad (3.7)$$

dimana Map_A adalah peta besarnya erosi (ton/ha/th), map_R adalah peta indeks erosiabilitas hujan, map_K adalah peta erodibilitas tanah, map_LS adalah peta faktor panjang dan kemiringan dan map_CP adalah faktor tanaman dan pengelolaan lahan.

Bila masing-masing nilai erosi pada setiap piksel telah dikalkulasi, kemudian dilanjutkan dengan klasifikasi tingkat erosi berdasarkan Tabel 3.2. dengan formula :

$$Mcalc : Map_klas := \text{if}(map_A \leq 14.4, 1, \text{if}(map_A \leq 29.3, 2, \text{if}(map_A \leq 46.9, 3, \text{if}(map_A \leq 63, 4, \text{if}(map_A \leq 80.6, 5, 6)))))) \quad (3.8)$$

dimana Map_klas adalah peta tingkat erosi, map_A adalah besarnya erosi, dan nilai 1, 2, 3, 4, 5, dan 6 merupakan tingkat erosi, masing-masing untuk sangat ringan, ringan, sedang, agak berat, berat, dan sangat berat.

Tabel 3.2. Klasifikasi Besarnya Erosi

Besarnya erosi (ton/ha/th)	Klasifikasi Erosi
0 - 14,4	Sangat ringan
14,5 - 29,3	Ringan
29,4 - 46,9	Sedang
47,0 - 63,0	Agak berat
63,1 - 80,6	Berat
> 80,6	Sangat berat

Sumber : Greenland dan Lai (1975 dalam Sudardjo, 1980)

3.3.3. Uji Medan

Uji medan pada dasarnya dilakukan untuk mencocokkan kebenaran hasil interpretasi dan klasifikasi, pengukuran beberapa parameter yang tidak dapat diamati dalam interpretasi, dan pengambilan sampel. Rincian pekerjaan yang dilaksanakan pada uji medan diuraikan sebagai berikut.

1. Mencocokkan kelas spektral hasil klasifikasi multispektral dengan obyek yang sebenarnya di lapangan. Hasil uji medan ini akan memberikan informasi tentang jenis penutup lahan dan penggunaan lahan pada setiap kelas spektral, serta memberikan pertimbangan untuk penggabungan beberapa kelas spektral yang jenis penggunaannya sama.
2. Pengambilan sampel tanah pada setiap satuan peta tanah untuk dianalisis di laboratorium tentang sifat-sifat tanah yang berpengaruh terhadap nilai erodibilitas tanah.
3. Mengukur kemiringan lereng, mengidentifikasi jenis tanah, dan menentukan macam penggunaan lahan pada setiap unit lahan untuk keperluan uji ketelitian. Unit lahan tersebut dibentuk dari tumpang susun peta penggunaan lahan, peta jenis tanah, dan peta kemiringan lereng.
4. Pengumpulan data hujan untuk perhitungan indeks erosivitas hujan. Data hujan yang dikumpulkan adalah curah hujan bulanan, jumlah hari hujan tiap bulan, dan curah hujan maksimum dalam bulan tersebut. Dalam penelitian ini digunakan data hujan pada 8 (delapan) stasiun hujan yang ada di daerah penelitian dan sekitarnya selama 10 tahun (1988 –1997) (Lampiran 2).

Pengambilan sampel dalam uji medan didasarkan atas pertimbangan : jumlah sampel yang diambil dapat mewakili (representatif) terhadap populasi, luasannya tidak kurang dari 4 ha (200 m x 200 m), serta lokasinya pasti dan mudah dijangkau.

3.3.4. Pengolahan Data Atribut

Dari 4 (empat) peta digital yang diperlukan dalam prediksi erosi, yaitu peta indeks erosivitas hujan (R), peta erodibilitas tanah (K), peta faktor panjang dan kemiringan lereng (LS), dan peta faktor tanaman dan pengelolaan lahan (CP), dua diantaranya yaitu peta LS dan CP, nilai atributnya telah dapat dikaitkan secara langsung pada saat analisis data grafis melalui tabel-tabel konversi yang telah tersedia sehingga tidak memerlukan pengolahan data atribut secara khusus. Di lain pihak, peta R dan K nilai atributnya harus diolah terlebih dahulu sebelum dikaitkan dengan data grafisnya. Masing-masing pengolahan data atribut untuk indeks erosivitas hujan dan erodibilitas tanah diuraikan sebagai berikut :

3.3.4.1. Perhitungan Indeks Erosivitas Hujan

Kemampuan hujan untuk mengerosi tanah atau erosivitas hujan dihitung pada setiap stasiun curah hujan yang dalam penelitian ini digunakan 8 stasiun curah hujan, yaitu stasiun Ngurah Rai, Sumerta, Kapal, Gianyar, Abiansemal, Buruan, Baturiti, dan Pelaga, selama 10 tahun (Lampiran 2). Perhitungan indeks erosivitas hujan menggunakan persamaan Bols (1978), yaitu :

$$R_m = 6,119 (Rain_m)^{1,21} \times (Days_m)^{-0,47} \times (max P_m)^{0,53} \quad (3.9)$$

dimana R_m adalah indeks erosivitas hujan bulanan, $Rain_m$ adalah curah hujan bulanan dalam cm, $days_m$ adalah jumlah hari hujan dalam satu bulan, dan $max P_m$ adalah curah hujan maksimum dalam bulan tersebut dalam cm.

Hasil perhitungan dengan persamaan Bols (1978) di atas akan menghasilkan indeks erosivitas hujan bulanan. Indeks erosivitas hujan tahunan yang diperlukan dalam perhitungan erosi, dilakukan dengan menjumlahkan indeks erosivitas hujan bulanan.

3.3.4.2. Perhitungan Erodibilitas Tanah

Nilai erodibilitas tanah dihitung pada setiap Satuan Peta Tanah (SPT), yang mana di daerah penelitian terdapat 13 SPT (Lampiran 3). Parameter atau sifat-sifat tanah yang dianalisis meliputi tekstur tanah (persentase pasir halus, debu, dan lempung), kandungan bahan organik tanah (%), permeabilitas tanah, dan struktur tanah. Tekstur tanah dianalisis dengan metode pipet, bahan organik tanah ditetapkan dengan metode Walkley dan Black, dan permeabilitas tanah diukur dengan metode De Boodt berdasarkan hukum Darcy, sedangkan struktur tanah ditetapkan di lapangan.

Dalam perhitungan nilai erodibilitas tanah, kandungan bahan organik, pasir halus, debu, dan lempung dinyatakan dalam persen, sedangkan struktur dan permeabilitas tanah, nilainya diharkatkan. Pengharkatan struktur dan permeabilitas tanah disajikan pada Tabel 3.3 dan Tabel 3.4.

Tabel 3.3. Pengharkatan Struktur Tanah

Struktur Tanah	Ukuran	Harkat
Granuler sangat halus	< 1 mm	1
Granuler halus	1 – 2 mm	2
Granuler sedang – kasar	2 – 10 mm	3
Masif, kubus, lempeng	–	4

Sumber : Arsyad (1989)

Tabel 3.4. Pengharkatan Permeabilitas Tanah

Permeabilitas tanah (cm/jam)	Kreteria	Harkat
< 0,125	Sangat lambat	6
0,125 - 0,50	Lambat	5
0,50 - 2,00	Agak lambat	4
2,00 - 6,25	Sedang	3
6,25 - 12,50	Agak cepat	2
> 12,50	Cepat	1

Sumber : Utomo (1994)

Apabila semua sifat-sifat tanah yang menentukan nilai erodibilitas tanah telah dianalisis dan diperoleh nilainya, dilanjutkan dengan perhitungan nilai erodibilitas pada masing-masing SPT dengan menggunakan persamaan Wischemeir dan Smith (1978), sebagai berikut :

$$100 K = 1,292 [2,1 M^{1,14} (10^{-4}) (12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3)] \quad (3.10)$$

dimana K adalah nilai erodibilitas tanah, M adalah ukuran partikel tanah (%debu + %pasir halus) x (100 - %lempung), a adalah kandungan bahan organik tanah (%), b adalah harkat struktur tanah, dan c adalah harkat permeabilitas tanah.

3.3.5. Uji Ketelitian Analisis Digital

Uji ketelitian bertujuan untuk mengetahui tingkat ketelitian dan kebenaran hasil pengolahan citra digital dan analisis berbasis SIG yang telah dilakukan dengan cara membandingkan hasil analisis tersebut terhadap obyek yang sebenarnya di lapangan. Variabel faktor erosi yang diuji di lapangan adalah kemiringan lereng, jenis tanah, dan penggunaan lahan.

Jumlah dan lokasi sampel ditetapkan dengan *purposive sampling* berdasarkan satuan lahan yang dibuat dari hasil tumpang susun peta kemiringan lereng, peta jenis tanah, dan peta penggunaan lahan. Dalam metode ini, jumlah dan luasan masing-masing satuan lahan merupakan dua faktor yang menentukan jumlah dan lokasi sampel yang akan diambil.

Berdasarkan hasil uji lapang tersebut dapat diketahui jumlah sampel yang benar dan yang salah, kemudian disusun matrik kesalahan (*error matrix*) seperti pada Tabel 3.5. Dari tabel tersebut dapat diketahui ketelitian individu yang meliputi ketelitian pengguna (*user's accuracy*) dan ketelitian penghasil (*producer's accuracy*), ketelitian keseluruhan hasil interpretasi (*overall accuracy*), kesalahan omisi (*omission errors*), dan kesalahan komisi (*commission errors*).

Tabel 3.5. Contoh Matrik Uji Ketelitian Interpretasi

		Data hasil uji medan						Jumlah
		A	B	C	D	E	F	
Data hasil klasifikasi	A	480	0	5	0	0	0	485
	B	0	52	0	20	0	0	72
	C	0	0	313	40	0	0	353
	D	0	16	0	126	0	0	142
	E	0	0	0	38	342	79	459
	F	0	0	38	24	60	359	481
	Jumlah	480	68	356	248	402	438	1992

Sumber : Lillesand dan Kiefer (1994) dan Short (1982) dengan modifikasi

Ketelitian penghasil

$$A = 480/480 \times 100\% = 100\%$$

$$B = 052/068 \times 100\% = 76\%$$

$$C = 313/356 \times 100\% = 88\%$$

$$D = 126/248 \times 100\% = 51\%$$

$$E = 342/402 \times 100\% = 85\%$$

$$F = 359/438 \times 100\% = 82\%$$

Ketelitian pemakai

$$A = 480/485 \times 100\% = 99\%$$

$$B = 052/072 \times 100\% = 72\%$$

$$C = 313/353 \times 100\% = 87\%$$

$$D = 126/142 \times 100\% = 89\%$$

$$E = 342/459 \times 100\% = 74\%$$

$$F = 359/481 \times 100\% = 75\%$$

$$\text{Ketelitian keseluruhan kategori} = (480 + 52 + 313 + 126 + 342 + 359) / 1992 = 84\%$$

Kesalahan omisi

$$A = 0/480 \times 100\% = 0\%$$

$$B = 016/068 \times 100\% = 24\%$$

$$C = 043/356 \times 100\% = 12\%$$

$$D = 122/248 \times 100\% = 49\%$$

$$E = 060/402 \times 100\% = 15\%$$

$$F = 079/438 \times 100\% = 18\%$$

Kesalahan komisi

$$A = 005/480 \times 100\% = 1\%$$

$$B = 020/068 \times 100\% = 29\%$$

$$C = 040/356 \times 100\% = 11\%$$

$$D = 016/248 \times 100\% = 6\%$$

$$E = 117/402 \times 100\% = 29\%$$

$$F = 122/438 \times 100\% = 28\%$$

Untuk meningkatkan akurasi kalkulasi besarnya erosi dengan GIS dan menambah kepercayaan pengguna data, diharapkan ketelitian keseluruhan dari variabel kemiringan lereng, jenis tanah, dan penggunaan lahan tidak kurang dari 80%.

3.3.6. Evaluasi Hasil Prediksi Erosi

Untuk mengetahui perbandingan hasil prediksi besarnya erosi pada penelitian ini, dengan metode pengukuran faktor erosi secara langsung di lapangan oleh Adnyana dkk. (1993) pada daerah yang sama, digunakan analisis statistik (*t-test group*) dengan urutan kerja sebagai berikut :

1. Masing-masing hasil penelitian besarnya erosi dalam ton/ha/th, diklasifikasi berdasarkan tingkat erosi menurut Greenland dan Lai (1975 dalam Sudardjo, 1980).
2. Jumlah kelas pada masing-masing metode penelitian digunakan sebagai sampel (*n*) untuk mewakili populasi.
3. Perhitungan nilai *t*-hitung berdasarkan formula yang dikemukakan oleh Sudjana (1992) sebagai berikut :

$$t_{hitung} = \frac{\overline{X}_1 - \overline{X}_2}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (3.11)$$

$$s = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) s_1^2 + (n_2 - 1) s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (3.12)$$

dalam hal ini \bar{X} , S , dan n masing-masing adalah nilai rata-rata, simpangan baku dan jumlah sampel, sedang angka 1 dan 2 di belakang simbol tersebut menyatakan metode yang digunakan pada penelitian ini dan metode pengukuran faktor erosi secara langsung di lapangan.

4. Nilai t-hitung kemudian dibandingkan dengan nilai t-tabel pada tingkat signifikansi (α) sama dengan 5%.
5. Hasil prediksi besarnya erosi pada penelitian ini dikatakan berbeda tidak nyata dengan metode pengukuran faktor erosi secara langsung di lapangan, apabila nilai t-hitung lebih kecil dari nilai t-tabel.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Analisis Citra Digital

Penelitian ini menggunakan 4 saluran citra Landsat TM, yaitu saluran 2 (0,52 – 0,60 μm), saluran 3 (0,63 – 0,69 μm), saluran 4 (0,76 – 0,90 μm), dan saluran 5 (1,55 – 1,75 μm). Nilai statistik keempat saluran tersebut dan matrik korelasi antar saluran disajikan pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2, sedangkan kenampakan visual citra tersebut sebelum dilakukan pengolahan dapat dilihat pada Gambar 4.1. Nilai statistik citra menunjukkan karakteristik nilai piksel citra tersebut, sedangkan matrik korelasi antar saluran menggambarkan keeratan hubungan antar saluran, dimana semakin kecil nilai korelasi tersebut berarti citra tersebut semakin baik digunakan untuk mengenali dan membedakan obyek secara bersama-sama karena informasi yang disajikan bersifat saling melengkapi.

Tabel 4.1. Nilai Statistik Citra Landsat TM Sebelum Pengolahan

No	Saluran	Minimum	Maksimum	Rerata	Std.	Median	Modus
1	2	15	194	29,37	6,89	28	25
2	3	11	255	34,32	14,14	30	25
3	4	0	217	74,33	23,45	78	84
4	5	0	255	66,15	25,95	64	64

Sumber : Hasil pengamatan pada program ILWIS, 1997

Gambar 4.1. Citra Landsat TM Daerah Penelitian dan Sekitarnya Sebelum Koreksi Radiometrik dan Geometrik

Gambar 4.1. Lanjutan

Tabel 4.2. Matrik Korelasi Antar Saluran

	Saluran 2	Saluran 3	Saluran 4	Saluran 5
Saluran 2	1,00	0,95	0,22	0,77
Saluran 3	0,95	1,00	0,08	0,78
Saluran 4	0,22	0,08	1,00	0,51
Saluran 5	0,77	0,78	0,51	1,00

Sumber : Hasil pengamatan pada Program ILWIS, 1997

Dari Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa kenampakan visual citra saluran 2 pada skala keabuan (*gray scale*) paling gelap kemudian diikuti oleh saluran 3 dan saluran 5, sedang saluran 4 mempunyai tingkat kecerahan paling tinggi. Hal ini disebabkan karena tingkat kecerahan obyek berhubungan langsung dengan nilai spektral citra tersebut, dimana semakin tinggi nilai spektralnya, maka citra tersebut nampak semakin terang. Tabel 4.1 menunjukkan bahwa citra saluran 2 mempunyai nilai spektral rerata paling rendah, sebaliknya saluran 4 paling tinggi. Nilai pantulan vegetasi dan tanah yang mendominasi liputan citra nilainya jauh lebih tinggi pada saluran inframerah dekat (saluran 4 dan 5) dibandingkan dengan saluran hijau dan merah (saluran 2 dan 3) (Belward, 1991).

Kemampuan membedakan obyek citra saluran 2 dan 3 lebih rendah dibandingkan dengan saluran 4 dan 5. Obyek vegetasi, tanah, ataupun air sulit dibedakan dengan jelas pada saluran 2 dan 3, sedang pada saluran 4 dan 5 obyek tersebut relatif lebih baik dikenali. Rendahnya kemampuan citra saluran 2 dan 3 membedakan obyek dibandingkan dengan saluran 4 dan 5 disebabkan karena pada saluran 2 dan 3 (saluran hijau dan merah) perbedaan pantulan obyek vegetasi, tanah,

dan air jauh lebih rendah dibandingkan dengan saluran 4 dan 5 (Swain dan Davis, 1978).

Untuk meningkatkan kualitas citra, agar lebih mudah dalam ekstraksi informasi penutup lahan dilakukan koreksi radiometri, koreksi geometri, penajaman kontras, dan penyusunan citra komposit. Penggunaan metode penyesuaian histogram pada koreksi radiometri diterapkan dengan mengurangi nilai seluruh citra pada setiap saluran dengan nilai minimumnya (Persamaan 3.1). Dengan demikian, citra saluran 2 dan saluran 3 saja yang berpengaruh terhadap kenampakan visual dan nilai digital dengan operasi ini, sedang citra saluran 4 dan 5 tidak mengalami perubahan karena nilai minimumnya sudah menunjukkan nol. Menurut Lillesand dan Kiefer (1994) hamburan *Rayleigh* yang merupakan penyebab utama adanya kabut tipis pada citra pengaruhnya semakin kuat pada panjang gelombang yang lebih pendek (saluran 2 dan 3). Oleh karena itu, citra saluran 4 dan 5 relatif bebas dari gangguan atmosfer tersebut.

Koreksi geometri yang dilakukan pada penelitian ini bertujuan untuk menghilangkan kesalahan non sistematik yang terdapat pada citra dan sekaligus menambahkan koordinat citra sesuai dengan letak yang sebenarnya di lapangan. Jumlah titik kontrol medan (*ground control points*) yang digunakan pada penelitian ini adalah 10 pasang, lebih banyak dari syarat minimum yang diperlukan untuk proses transformasi orde dua, yaitu 6 pasang. Selengkapnya pasangan titik kontrol tersebut beserta tingkat ketelitian yang dihasilkan disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Daftar Pasangan Titik Kontrol Medan yang Digunakan

NO	Koordinat Citra		Koordinat Peta		Delta Baris	Delta Kolom
	Baris	Kolom	mT	mU		
1	778	536	318190	9044934	-0,173157	0,219116
2	913	471	316320	9040866	0,260071	-0,284821
3	890	397	316305	9040854	-0,135986	0,219727
4	654	532	318011	9048688	0,155151	-0,148010
5	179	261	309590	9063038	-0,063583	0,127411
6	548	206	308135	9051884	0,150085	-0,167465
7	503	226	308705	9053237	-0,128937	0,135773
8	493	226	308709	9053548	0,152649	-0,173920
9	769	287	310689	9045190	-0,273193	-0,104706
10	862	182	307563	9042381	0,056946	0,176865
Ketelitian (<i>Root Mean Squares</i>) = 0,42 piksel						

Sumber : Peta topografi, citra Landsat TM, dan hasil pengolahan

Berdasarkan batas toleransi tingkat ketelitian yang masih dapat diterima yang ditetapkan oleh *National Map Accuracy Standard* (NMAS) yaitu 1,7 piksel (51 m), *root means square* yang dihasilkan pada penelitian ini yaitu 0,42 (12,6 m) masih dapat diterima karena nilainya lebih kecil dari batas maksimal yang ditentukan.

Setelah dilakukan proses transformasi dengan menggunakan titik kontrol medan tersebut di atas, kemudian dilanjutkan dengan proses *resampling*. Mengingat citra hasil koreksi radiometri dan geometri ini akan digunakan untuk proses klasifikasi multispektral, maka metode *resampling* yang paling tepat adalah *nearest neighbour* karena pada metode ini tidak dilakukan interpolasi nilai piksel melainkan

hanya menempatkan kembali nilai tersebut pada posisi terdekat sehingga nilai piksel tetap mencerminkan pantulan obyek (Lilesand dan Kiefer, 1994).

Metode penajaman citra yang digunakan pada penelitian ini adalah perentangan kontras, dimana pada metode ini piksel yang jumlahnya sedikit, tetapi menempati julat spektral yang lebar dihilangkan, kemudian piksel yang lainnya nilainya direntangkan untuk menempati seluruh julat yang ada (256). Proses ini menghasilkan citra dengan tingkat kekontrasan yang lebih tinggi. Citra hasil koreksi radiometri, geometri, dan penajaman citra disajikan pada Gambar 4.2.

Hasil perbandingan citra yang belum dilakukan pengolahan (koreksi radiometri, geometri, dan penajaman citra) pada Gambar 4.1 dengan citra yang telah diolah (Gambar 4.2) menunjukkan bahwa pemrosesan citra dapat meningkatkan kualitas citra baik dari aspek radiometri maupun geometri citra. Perbaikan aspek radiometri citra dapat dilihat dari meningkatnya kemampuan pengenalan dan pembedaan obyek, sedangkan peningkatan aspek geometrik ditunjukkan dari ketepatan posisi obyek baik secara relatif dengan obyek yang ada disekitarnya maupun secara absolut dengan koordinat yang sebenarnya di lapangan. Walaupun demikian, untuk memperoleh kenampakan obyek yang maksimum secara visual pada citra dan memudahkan pengambilan daerah contoh (*training area*) untuk tujuan klasifikasi multispektral, maka pembuatan citra komposit warna sangatlah penting. Hal ini disebabkan karena citra komposit warna semu dapat menyajikan variasi warna obyek yang sangat tinggi dan beragam dibandingkan dengan citra tunggal yang hanya ditampilkan dengan tingkat keabuan (*gray scale*) sehingga obyek lebih mudah dibedakan dan diidentifikasi. Disamping itu, secara psikis kebiasaan kita

Gambar 4.2. Citra Landsat TM Daerah Penelitian dan Sekitarnya yang Telah Mengalami Koreksi Radiometri, Geometri, dan Penajaman Kontras

Gambar 4.2. Lanjutan

menggunakan foto udara inframerah berwarna sangat berpengaruh terhadap kemudahan pengenalan obyek pada citra komposit, karena mempunyai kemampuan yang hampir sama. Pada penelitian ini, pembuatan citra composit warna semu standar (432) mampu memberikan kenampakan citra yang ekspresif dibandingkan dengan citra komposit yang lain (Gambar 4.3).

Berdasarkan hasil klasifikasi multispektral dengan menggunakan algoritma *maximum likelihood* didapatkan 25 kelas spektral yang berhubungan dengan penutupan lahan. Selanjutnya berdasarkan pengamatan histogram, nilai statistik, dan sebaran nilai spektral obyek pada ruang spektral (*feature space*) dilakukan penyederhanaan kelas spektral menjadi 15 kelas spektral. Nilai statistik (rerata dan standar deviasi) masing-masing kelas dapat dilihat pada Tabel 4.4, sedangkan pola spektral obyek pada ruang spektral dan peta kelas spektral obyek disajikan pada Gambar 4.4 dan 4.5.

Hasil uji medan menunjukkan bahwa dari 15 kelas spektral yang diperoleh melalui klasifikasi multispektral, didapatkan 6 macam kelas penggunaan lahan berdasarkan klasifikasi penutupan lahan dan penggunaan lahan yang dikemukakan oleh Malingeau (1981) (Lampiran 6), masing-masing sawah irigasi, tegalan, kebun campuran kerapatan tinggi, kebun campuran kerapatan rendah sampai sedang, kebun kelapa, dan permukiman/pekarangan (Gambar 4.6). Hubungan antara kelas spektral dengan penggunaan lahan beserta masing-masing luasannya disajikan pada Tabel 4.5.

Gambar 4.3 Citra komposit warna semu standar (432)

Tabel 4.4. Nilai Statistik 15 Kelas Spektral pada 3 Saluran

No	Kelas Spektral	Saluran 2		Saluran 3		Saluran 4	
		Rerata	Std.	Rerata	Std.	Rerata	Std.
1	Vegetasi sangat rapat 1	12,30	2,18	14,90	2,84	106,81	6,49
2	Vegetasi rapat 1	11,90	2,00	16,52	2,74	88,55	5,45
3	Obyek berair	14,61	0,97	27,32	1,99	30,73	4,01
4	Vegetasi berair	14,24	1,40	26,07	3,42	48,05	4,96
5	Vegetasi rapat 2	18,17	1,10	28,88	2,71	87,14	4,88
6	Vegetasi rapat 3	23,77	1,52	40,47	3,56	87,73	5,46
7	Tanah kering bervegetasi	32,37	4,26	68,70	6,72	82,72	6,18
8	Tanah lembab 1	23,02	0,90	43,12	2,07	65,29	4,50
9	Tanah lembab 2	25,20	1,59	50,61	2,73	63,02	6,50
10	Vegetasi sangat rapat 2	19,30	1,40	27,62	2,56	108,80	6,96
11	Tanah lembab bervegetasi	19,13	1,26	39,22	2,47	54,40	2,82
12	Vegetasi sangat rapat 3	24,49	1,46	38,36	3,00	102,79	3,97
13	Awan	63,04	19,13	101,89	32,13	124,13	13,88
14	Vegetasi jarang	10,84	1,97	17,20	3,49	67,74	4,95
15	Bayangan	4,50	0,68	7,17	1,04	17,88	2,32

Sumber : Pengamatan nilai statistik pada klasifikasi multispektral

Gambar 4.4. Pola Spektral Obyek pada Ruang Spektral Saluran 3 (merah) dan Saluran 4 (inframerah dekat).

Gambar 4.5. Peta Kelas Spektral Obyek

Gambar 4.6. Peta Penggunaan Lahan

Tabel 4.5. Hubungan Antara Kelas Spektral dan Jenis Penggunaan Lahan di Daerah Penelitian

Kelas Spektral	Penggunaan Lahan	Jumlah Piksel	Luas (ha)	%
Vegetasi sangat rapat 3, vegetasi sangat rapat 2, vegetasi rapat 2, vegetasi berair, tanah lembab bervegetasi, obyek berair, tanah lembab 1, tanah lembab 2, dan awan/bayangan.	Sawah irigasi	42178	3845,78	47,65
Tanah kering bervegetasi	Tegalan	1716	156,46	1,94
Vegetasi sangat rapat 1	KC. kerapatan tinggi	8943	815,42	10,10
Vegetasi rapat 1	KC. kerapatan sedang-rendah	26190	2388,00	29,59
Vegetasi rapat 3	Kebun kelapa	3575	325,97	4,04
Vegetasi jarang	Permukiman/pekarangan	5917	539,51	6,68
Total		88519	8071,14	100,00

Sumber : Klasifikasi multispektral dan uji medan

Fenomena menarik yang dijumpai pada saat uji medan adalah beberapa kelas spektral yang mempunyai perbedaan nilai spektral yang besar dicerminkan dari jauhnya jarak kelas-kelas spektral tersebut pada ruang spektral, menunjukkan penggunaan lahan yang sama. Penggunaan lahan sawah irigasi terbentuk dari 10 macam kelas spektral termasuk awan dan bayangan, sedang kelas penggunaan lahan yang lain dibentuk dari satu macam kelas spektral (Tabel 4.5). Hal ini disebabkan karena sawah irigasi mempunyai keragaman penutup lahan yang lebih besar dibandingkan dengan penggunaan lahan yang lain baik dari segi jenis maupun umur tanaman penutup lahan. Berdasarkan hasil wawancara dengan beberapa petani

penggarap sawah tersebut, diperoleh informasi bahwa secara garis besar terdapat dua jenis tanaman yang ditanam pada sawah irigasi tersebut, yaitu padi irigasi dan palawija.

Perbedaan jenis penutup lahan akan memberikan interaksi yang berbeda terhadap gelombang elektromagnetik yang sampai pada obyek tersebut, baik dalam hal serapan, transmisi maupun pantulan, yang pada akhirnya akan berpengaruh terhadap kekuatan sinyal yang ditangkap oleh sensor yang disimpan sebagai nilai digital. Tanaman padi pada berbagai stadia pertumbuhan dan perkembangannya memberikan nilai spektral yang berbeda-beda. Pada saat pengolahan tanah dan masa awal penanaman, obyek air mendominasi liputan lahan sehingga kelas spektral obyek tersebut diwakili oleh obyek berair dan vegetasi berair. Seiring dengan bertambahnya umur tanaman, kenampakan obyek air mulai ditutupi oleh vegetasi. Dengan demikian, vegetasi dengan berbagai tingkat kerapatan mewakili klas spektral tanaman tersebut, sedangkan saat panen kontribusi nilai spektral yang lebih besar diberikan oleh tanah lembab.

Untuk mendapatkan nilai faktor tanaman dan pengelolaan lahan (CP) sebagai salah satu variabel dalam prediksi erosi, penggunaan lahan yang dihasilkan dari klasifikasi multispektal dan uji medan selanjutnya dicocokkan dengan tabel konversi antara penggunaan tanah dengan nilai CP (Lampiran 7). Nilai CP pada setiap penggunaan lahan di daerah penelitian disajikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Nilai Faktor Tanaman dan Pengelolaan Lahan pada Setiap Penggunaan Lahan

No	Penggunaan Lahan	Nilai CP
1	Sawah irigasi	0,225
2	Tegalan	0,500
3	KC. kerapatan tinggi	0,010
4	KC. kerapatan rendah – sedang	0,035
5	Kebun kelapa	0,070
6	Permukiman/pekarangan	0,200

Sumber : Klasifikasi multispektal, uji medan, dan Lampiran 7.

Keterangan :

KC. = Kebun campuran

Nilai CP untuk sawah irigasi dihitung dari nilai rata-rata antara padi irigasi dan palawija, sedangkan nilai CP kebun campuran kerapatan sedang – rendah merupakan rata-rata dari kebun campuran kerapatan sedang dan kerapatan rendah.

4.2. Indeks Erosivitas Hujan

Indeks Erosivitas hujan (R) dihitung berdasarkan data hujan, yaitu curah hujan bulanan, curah hujan maksimum, dan jumlah hari hujan dalam bulan tersebut pada setiap stasiun hujan yang ada di daerah penelitian dan sekitarnya. Nama dan lokasi stasiun hujan yang digunakan dalam perhitungan indeks erosivitas hujan disajikan pada Lampiran 1.

Berdasarkan hasil perhitungan dengan persamaan Bols (1978) (Persamaan 3.9), didapatkan bahwa rata-rata indeks erosivitas hujan bulanan tertinggi terjadi pada

bulan Januari dan yang terendah bulan September. Indeks erosivitas hujan tahunan daerah penelitian yang merupakan penjumlahan dari indeks erosivitas hujan bulanan berkisar dari 1131,75 sampai 3468,96 ton/ha/cm hujan. Nilai R terendah didapatkan pada stasiun hujan Kapal, sedang yang tertinggi dijumpai pada stasiun Baturiti (Tabel 4.7). Selengkapnya hasil perhitungan nilai R tersebut disajikan pada Lampiran 2. Nilai R yang tinggi disebabkan oleh tingginya curah hujan rata-rata tahunan dan besarnya intensitas hujan yang dicerminkan dari tingginya curah hujan maksimum pada stasiun tersebut. Curah hujan rata-rata tahunan pada stasiun Baturiti yang nilai R-nya paling tinggi adalah 3196,70 mm per tahun dengan curah hujan maksimum rata-rata bulanan 99,20 mm, tertinggi diantara seluruh stasiun hujan yang digunakan pada penelitian ini. Sebaliknya pada stasiun hujan Kapal dimana nilai R-nya paling rendah disebabkan oleh curah hujan rata-rata tahunan dan curah hujan maksimum rata-rata bulanan paling rendah, yaitu 1423,10 mm dan 64,90 mm (Lampiran 2).

Besarnya curah hujan, intensitas, dan distribusinya menentukan kekuatan dispersi hujan terhadap tanah, jumlah aliran permukaan, dan kerusakan erosi (Arsyad, 1989). Jumlah dan intensitas hujan yang tinggi memiliki energi kinetik yang besar sehingga kemampuannya untuk memecah agregat-agregat tanah menjadi lebih tinggi. Pecahnya agregat-agregat tanah menjadi partikel-partikel tanah akan menyumbat pori-pori tanah sehingga kapasitas infiltrasi dan permeabilitas tanah menurun. Berkurangnya kemampuan tanah untuk meresapkan air ke bawah mengakibatkan jumlah aliran permukaan menjadi meningkat dan jumlah tanah yang terangkut

Tabel 4.7. Indeks Erosivitas Hujan Daerah Penelitian

No	Stasiun Hujan	B u l a n												Total
		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des	
1	Ngurah Rai	440,84	203,20	203,81	72,33	74,01	43,36	97,65	39,81	26,15	33,89	162,80	242,72	1640,57
2	Sumerta	520,78	421,06	132,66	174,09	10,98	7,46	16,48	6,16	11,40	46,74	168,63	285,92	1802,36
3	Kapal	326,50	214,00	64,87	55,05	46,40	39,90	16,40	6,44	32,09	48,06	129,20	152,66	1131,57
4	Gianyar	297,13	265,11	129,34	103,44	86,42	27,91	57,74	56,63	46,50	46,35	90,87	184,45	1391,89
5	Abiansemal	263,97	278,16	211,23	131,64	58,78	44,30	71,97	70,05	23,79	159,09	217,79	277,25	1808,02
6	Buruan	229,05	250,41	193,60	114,37	68,96	28,48	41,68	68,51	19,91	245,51	271,41	216,76	1748,65
7	Baturiti	627,83	478,46	494,80	317,99	136,22	51,31	43,68	103,34	62,83	272,65	370,38	509,47	3468,96
8	Pelaga	522,27	294,76	239,65	176,15	63,02	48,40	18,95	30,30	14,80	92,33	234,31	299,71	2034,65

Sumber : Data hujan pada 8 stasiun curah hujan dan perhitungan dengan persamaan 3.9

menjadi lebih banyak. Itu sebabnya jumlah dan intensitas hujan yang tinggi mengakibatkan erosi yang besar (Baver, 1959).

Nilai indeks erosivitas yang didapat dari hasil perhitungan dengan rumus Bols (1978) adalah nilai R untuk masing-masing stasiun curah hujan. Oleh karena itu, untuk menentukan nilai R pada setiap piksel di daerah penelitian dilakukan interpolasi dengan metode *moving average*. Peta hasil interpolasi tersebut disajikan pada Gambar 4.7, dan luasan masing-masing kelas dapat dilihat pada Tabel 4.8. Selanjutnya peta tersebut dapat digunakan sebagai masukan dalam perhitungan erosi.

Tabel 4.8. Luasan Masing-masing Kelas Erosivitas Hujan

No	Erosivitas	Jumlah Piksel	Luas (ha)	%
1	1400 – 1600	19080	1739,71	21,55
2	1600 – 1800	27404	2498,69	30,96
3	1800 – 2000	13073	1191,99	14,77
4	2000 – 2200	7156	652,48	8,08
5	2200 – 2400	6760	616,38	7,64
6	2400 – 2600	5465	498,30	6,17
7	2600 – 2800	4094	373,29	4,62
8	2800 – 3000	3231	294,60	3,65
9	3000 – 3200	2256	205,70	2,55
Total		88519	8071,14	100,00

Sumber : Hasil perhitungan data hujan dengan persamaan 3.9 dan interpolasi

Gambar 4.7. Peta Erosivitas Hujan Tahunan

4.3. Erodibilitas Tanah

Erodibilitas tanah dihitung pada setiap satuan peta tanah (SPT) dari peta tanah semi detil (Puslitannak, 1994). Jumlah SPT yang terdapat di daerah penelitian adalah 13 (Lampiran 3). Peta hasil digitasi dan konversi ke format raster disajikan pada Gambar 4.8. Kode legenda peta jenis tanah mengacu pada Lampiran 3. Hasil analisis sifat-sifat tanah (tekstur tanah, struktur tanah, kandungan bahan organik tanah, dan permeabilitas tanah) pada setiap SPT dapat dilihat pada Lampiran 4, sedangkan hasil perhitungan indeks erodibilitas tanah (K) dengan persamaan Wischemeir dan Smith (1978) (Persamaan 3.10) disajikan pada Tabel 4.9.

Hasil pengkaitan data atribut erodibilitas tanah dengan data grafis peta jenis tanah menunjukkan bahwa terdapat empat kelas erodibilitas tanah di daerah penelitian, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, dan agak tinggi berdasarkan klasifikasi nilai erodibilitas tanah menurut Dangler dan El-Swaify (1976) (lampiran 5). Luasan masing-masing kelas indeks erodibilitas tanah tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.10, sedangkan sebarannya di daerah penelitian disajikan pada Gambar 4.9.

Indeks erodibilitas tanah pada suatu tempat merupakan interaksi dari komponen tekstur, struktur, kandungan bahan organik, dan permeabilitas tanah. Nilai erodibilitas agak tinggi pada daerah penelitian dijumpai pada SPT yang mempunyai kandungan pasir halus dan debu yang tinggi, sedangkan kandungan bahan organiknya rendah. Sementara SPT yang permeabilitasnya cepat serta kandungan bahan organik dan lempung yang tinggi cenderung mempunyai nilai K yang rendah.

Gambar 4.8. Peta Jenis Tanah

Tabel 4.9. Hasil Perhitungan Erodibilitas Tanah pada Setiap SPT

SPT	Pasir Halus (%)	Debu (%)	Lempung (%)	Bahan Organik (%)	Permeabilitas (cm/jam)	Kelas Permeabilitas	Struktur Tanah	Kelas Struktur	Erodibilitas Tanah
1	43,24	33,91	6,52	4,95	25,92	1	Granuler sedang	3	0,21
2	4,45	89,84	5,06	3,36	2,85	3	Granuler halus	2	0,36
3	33,04	34,23	22,38	4,03	1,71	4	Kubus	4	0,29
4	25,38	48,81	23,05	4,77	1,14	4	Masif	4	0,30
5	16,65	36,77	38,08	4,80	32,76	1	Granuler sedang	3	0,07
6	29,87	44,39	19,58	2,55	3,42	3	Kubus	4	0,33
7	39,03	49,28	3,27	1,77	6,84	2	Granuler sedang	3	0,41
8	30,90	36,98	19,81	6,81	25,82	1	Granuler kasar	3	0,10
9	32,84	11,15	45,99	4,13	0,86	4	Masif	4	0,19
10	31,91	38,04	22,48	4,12	2,56	3	Kubus	4	0,27
11	34,76	37,36	16,71	3,13	20,51	1	Granuler kasar	3	0,21
12	22,84	6,29	57,63	3,27	1,85	4	Kubus	4	0,15
13	15,75	25,40	49,82	5,51	4,56	3	Granuler kasar	3	0,09

Sumber : Analisis tanah dan perhitungan dengan persamaan 3.10

Tabel 4.10. Luasan Masing-masing Kelas Erodibilitas Tanah.

Erodibilitas	Kelas	Jumlah piksel	Luas (%)	%
< 0,10	Sangat rendah	19716	1797,70	22,27
0,11 - 0,20	Rendah	4468	407,39	5,05
0,21 - 0,32	Sedang	18259	1664,85	20,63
0,33 - 0,43	Agak tinggi	46076	4201,20	52,05
Total		88519	8071,14	100,00

Sumber : Hasil analisis tanah dan perhitungan.

Menurut Bouyoucus (1935) indeks erodibilitas suatu tanah berbanding langsung dengan kandungan pasir halus dan debunya. Hal ini disebabkan karena pasir halus dan debu sangat mudah diangkut oleh aliran permukaan. Berlainan halnya dengan lempung dan bahan organik, pasir halus dan debu tidak dapat berfungsi sebagai pemantap agregat (*cementing agent*) sehingga kurang tahan terhadap pukulan dan daya urai air hujan serta peka terhadap daya angkut aliran permukaan (Arsyad, 1989). Dilain pihak permeabilitas yang cepat dapat mengurangi jumlah aliran permukaan yang dapat mengikis dan mengangkut tanah karena sebagian besar curah hujan yang jatuh pada daerah tersebut mengalami infiltrasi (Bennet, 1939). Bahan organik dalam berbagai bentuk dapat mengurangi besarnya erosi. Bahan organik yang belum melapuk sempurna di permukaan tanah dapat berfungsi sebagai mulsa yang dapat menahan daya pukul air hujan, sekaligus menghambat kecepatan aliran permukaan, mengurangi daya kisis dan kapasitas pengangkutan aliran permukaan (Lal, 1977), sedang yang sudah melapuk dapat memantapkan agregat tanah dan memacu aktivitas mikrobia tanah sehingga porositas tanah meningkat (Baver 1959).

Gambar 4.9. Peta Kelas Erodibilitas Tanah

4.4. Faktor Panjang dan Kemiringan Lereng

Faktor panjang dan kemiringan lereng (LS) didapatkan dari hasil konversi peta kemiringan lereng (Dirjen Reboisasi dan Rehabilitasi Lahan, 1986), sedang peta kemiringan lereng diperoleh dari hasil digitasi, konversi, dan interpolasi garis kontur dan titik ketinggian. Model elevasi digital (DEM) yang merupakan hasil antara dalam pembuatan peta kemiringan lereng, nilai digitalnya mencerminkan ketinggian tempat. Peta lereng hasil turunan dari DEM disajikan pada Gambar 4.10.

Hasil konversi peta kemiringan lereng menjadi peta faktor panjang dan kemiringan lereng dapat dilihat pada Gambar 4.11, dan luasan masing-masing faktor LS tersebut disajikan pada Tabel 4.11. Dari gambar 4.10 dan 4.11 dapat diperoleh informasi bahwa sebagian besar daerah penelitian termasuk datar sampai landai. Lereng yang terjal hanya dijumpai pada tepi-tepi sungai. Kemiringan lereng yang rendah akan memberikan kontribusi yang kecil terhadap nilai LS, dan nilai LS yang kecil menyebabkan erosi yang ringan.

Tabel 4.11. Luasan Masing-masing Fakot LS

Kemiringan Lereng (%)	Faktor LS	Jumlah Piksel	Luas (ha)	%
0 – 5	0,25	75642	6897,02	85,45
5 – 15	1,20	8256	752,78	9,33
15 – 35	4,25	3465	315,94	3,91
35 – 50	9,50	685	62,46	0,77
> 50	12,00	471	42,95	0,53
Total		88519	8071,14	100,00

Sumber : Dirjen Reboisasi dan Rehabilitasi Lahan (1986) dan peta kemiringan lereng

Gambar 4.10. Peta Kemiringan Lereng

Gambar 4.11. Peta Faktor Panjang dan Kemiringan Lereng

Dalam hubungannya dengan besarnya kehilangan tanah, kemiringan lereng berpengaruh terhadap kecepatan dan volume limpasan permukaan. Kemiringan lereng yang kecil akan memberikan kesempatan yang lebih banyak pada air hujan untuk meresap ke dalam tanah mengalami infiltrasi sehingga volume limpasan permukaan menjadi berkurang. Disamping itu, rendahnya persentase kemiringan lereng juga dapat mengurangi kecepatan aliran permukaan sehingga kemampuannya mengikis dan mengangkut tanah menjadi kecil.

4.5. Prediksi Besarnya Erosi

Aplikasi persamaan Wischemeir dan Smith (1978) dalam prediksi erosi dilakukan dengan mengalikan peta indeks erosivitas hujan, peta erodibilitas tanah, peta faktor panjang dan kemiringan lereng, dan peta faktor tanaman dan pengelolaan lahan. Besarnya erosi dalam ton/ha/th dihitung per piksel dengan luasan $\pm 900 \text{ m}^2$ (30 m x 30 m). Gambar 4.12 menyajikan sebaran tingkat erosi berdasarkan klasifikasi Greenland dan Lai (1975 *dalam* Sudardjo, 1980), sedangkan masing-masing luasan tingkat erosi tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Berdasarkan Gambar 4.12 dan Tabel 4.12 dapat dipetik informasi bahwa sebagian besar (60,15%) tingkat erosi di daerah penelitian tergolong sangat ringan sampai ringan (kurang dari 29,3 ton/ha/th), 14,58% termasuk agak berat sampai sangat berat (lebih besar dari 47 ton/ha/th), dan sisanya 25,27% dikasifikasikan sebagai erosi dengan tingkat sedang. Erosi sangat ringan sampai ringan umumnya terdapat pada daerah dengan kemiringan lereng kurang dari 8%, sedangkan erosi

Gambar 4.12. Peta Tingkat Erosi

berat sampai sangat berat sebagian besar dijumpai pada kemiringan lereng lebih besar dari 25% (Gambar 4.10). Disamping faktor lereng, penggunaan lahan sawah irigasi yang mendominasi daerah penelitian juga memberikan andil terhadap rendahnya tingkat erosi yang terjadi di daerah penelitian. Sawah irigasi dengan pematang sawah yang permanen dapat memperlambat dan mengatur kecepatan dan volume limpasan permukaan sehingga kemampuannya untuk mengikis dan menangkut tanah menjadi kecil.

Tabel 4.12. Luasan Masing-masing Tingkat Erosi

Besarnya Erosi	Tingkat Erosi	Jumlah Piksel	Luas (ha)	%
0 - 14,4	Sangat ringan	42364	3862,74	47,86
14,5 - 29,3	Ringan	10878	991,85	12,29
29,4 - 46,9	Sedang	22373	2039,96	25,27
47,0 - 63,0	Agak berat	4775	435,38	5,39
63,1 - 80,6	Berat	2061	187,92	2,33
>80,6	Sangat Berat	6068	553,28	6,86
Total		88519	8071,14	100,00

Sumber : Kalkulasi peta R, K, LS, dan CP

4.6. Uji Ketelitian Hasil Analisis Digital

Pada dasarnya uji ketelitian dimaksudkan untuk mengetahui tingkat kebenaran hasil analisis digital. Hal ini penting untuk menilai layak tidaknya data tersebut bila digunakan sebagai masukan dalam SIG, disamping itu juga dapat memberikan kepercayaan terhadap pengguna data tersebut. Data yang kurang akurat, walaupun diolah dengan prosedur yang benar tetap akan memberikan keluaran yang tidak memuaskan, sesuai dengan konsep *garbage in garbage out*.

Berdasarkan beberapa literatur dan hasil penelitian yang telah dilakukan, uji ketelitian sebagian besar diaplikasikan untuk interpretasi dan klasifikasi penutupan lahan atau penggunaan lahan yang berasal dari analisis data penginderaan jauh, dalam hal ini pengolahan citra digital. Padahal, sumber data (*input*) dalam sistem informasi geografi bukan hanya bersumber dari data penginderaan jauh, melainkan juga dapat berasal dari peta dasar dan peta tematik yang sudah ada, ataupun dari data statistik. Peta dan data atribut tersebut perlu juga dievaluasi tingkat ketelitiannya sebelum dimasukkan dan diolah dalam SIG, karena proses transformasi dari peta atau data sumber, yang biasanya dari bentuk analog ke bentuk digital memungkinkan terjadinya banyak kesalahan yang dapat berasal dari berbagai sumber, misalnya sumber data (peta atau data yang dijadikan rujukan), perangkat keras dan lunak yang digunakan untuk mengolah data, ataupun kesalahan yang berasal dari unsur manusia yang melakukan proses pengolahan tersebut.

Bertitik tolak dari fenomena tersebut, dalam penelitian ini uji ketelitian tidak hanya dilakukan pada hasil interpretasi dan klasifikasi penggunaan lahan saja, tetapi juga diterapkan pada peta kemiringan lereng dan peta jenis tanah yang bukan merupakan produk interpretasi dan klasifikasi citra digital, melainkan hasil analisis berbasis SIG dari peta yang sudah ada.

Data rujukan yang digunakan sebagai kunci untuk mengetahui benar tidaknya hasil analisis digital adalah data lapangan hasil uji medan yang pengambilan sampelnya dilakukan secara *purposive sampling* dengan jumlah sampel sebanyak 73.

Konsep uji ketelitian yang diterapkan pada penelitian ini bersumber dari Lillesand dan Kiefer (1994) dan Short (1982). Kategori hasil klasifikasi dibuat dalam baris dan kategori hasil uji medan disajikan dalam kolom. Setelah matrik kesalahan

dibuat dari data hasil klasifikasi dan uji medan, parameter uji ketelitian yang dapat diamati adalah ketelitian masing-masing kategori yang meliputi ketelitian penghasil (*producer's accuracy*) dan ketelitian pengguna (*user's accuracy*), kesalahan omisi (*omission errors*), kesalahan komisi (*commission errors*), dan ketelitian keseluruhan (*overall accuracy*). Selengkapnya matrik kesalahan dan tingkat ketelitian hasil interpretasi dan klasifikasi penggunaan lahan disajikan pada Tabel 4.13 dan 4.14.

Ketelitian penghasil pada klasifikasi penggunaan lahan menggambarkan homogenitas dan ketepatan julat daerah contoh (*training area*) yang diambil untuk mewakili kategori kelas tertentu. Bila julat daerah contoh terlalu sempit, dalam artian seluruh nilai spektral yang mewakili suatu kategori kelas tersebut tidak diambil, maka akan menimbulkan adanya kesalahan omisi yang berarti sejumlah piksel yang semestinya termasuk kelas tersebut tidak terjangkau oleh kisaran nilai spektral yang dipakai sebagai daerah contoh. Sebaliknya, jika julat daerah contoh terlalu melebar menyebabkan timbulnya kesalahan komisi yang menandakan beberapa piksel yang semestinya tidak termasuk kategori kelas tersebut, akhirnya dikelasnya sebagai kategori tersebut. Dalam penelitian ini, ketelitian penghasil terendah ditunjukkan oleh kelas kebun campuran kerapatan tinggi (69,23%), sedangkan ketelitian penghasil tertinggi disumbangkan oleh kelas permukiman/pekarangan (90,00%). Kesalahan omisi terbesar terjadi pada kelas tegalan (37,50%) yang berarti beberapa piksel yang semestinya nilai spektralnya menunjukkan kelas tegalan tidak digunakan sebagai daerah contoh, sedang kelas permukiman/pekarangan tidak menunjukkan kesalahan dalam pengambilan daerah contoh yang dicerminkan oleh kesalahan omisi sebesar 0%.

Tabel 4.13. Matrik Kesalahan Hasil Interpretasi dan Klasifikasi Penggunaan Lahan

		Hasil Uji Medan						Total
		Sawah	Tegalan	KC. kerapatan Tinggi	KC. kerapatan rendah – sedang	Kebun kelapa	Pemukiman/ Pekarangan	
Hasil Klasifikasi	Sawah	17	1	2	1	0	0	21
	Tegalan	0	5	0	0	0	1	6
	KC. kerapatan tinggi	1	0	10	1	0	0	12
	KC. kerapatan rendah – sedang	1	1	1	14	0	0	17
	Kebun kelapa	0	0	0	1	6	0	7
	Permukiman/kampung	0	1	0	0	0	9	10
Total		19	8	13	17	6	10	73

Sumber : Hasil interpretasi dan klasifikasi citra landsat TM, uji medan, Lillesand dan Kiefer (1994)

Tabel 4.14. Ketelitian dan Kesalahan Hasil Interpretasi Peta Penggunaan Lahan

Jenis Penggunaan Lahan	Ketelitian (%)		Kesalahan (%)	
	Penghasil	Pengguna	Omisi	Komisi
Sawah	89,47	80,95	10,53	21,05
Tegalan	71,43	83,33	37,50	12,50
KC. kerapatan tinggi	69,23	81,82	23,08	15,38
KC. kerapatan rendah – sedang	82,35	77,78	17,65	17,65
Kebun kelapa	85,71	85,71	0,00	16,67
Permukiman/pekarangan	90,00	90,00	10,00	10,00
Ketelitian keseluruhan			83,56	

Sumber : Tabel 4.13, Lillesand dan Kiefer (1994), dan Short (1982)

Kesalahan komisi tertinggi ditunjukkan oleh kelas sawah irigasi (21,05%) yang berarti pengambilan daerah contoh untuk kelas sawah terlalu melebar sehingga sejumlah piksel yang semestinya bukan kelas sawah diambil sebagai kelas sawah, sedangkan kelas permukiman/pekarangan, daerah contoh yang dimabil tidak terlalu melebar yang dicerminkan dari nilai kesalahan komisi terkecil (10,00%) (Tabel 4.14).

Berlainan halnya dengan ketelitian penghasil, ketelitian pengguna menggambarkan ketepatan antara daerah contoh yang diberi kategori kelas tertentu dengan kelas yang sebenarnya di lapangan. Dalam penelitian ini, ketelitian pengguna berkisar dari 77,78% sampai 90,00%. Kelas permukiman/pekarangan mempunyai ketelitian pengguna tertinggi (90,00%). Ini berarti dari 10 contoh kelas permukiman/pekarangan hasil klasifikasi, setelah dicocokkan di lapangan, ternyata 9 sampel memang benar permukiman/pekarangan, sedang 1 contoh bukan termasuk permukiman/pekarangan, melainkan tegalan (Tabel 4.13 dan Tabel 4.14).

Ketelitian keseluruhan klasifikasi penggunaan lahan didapatkan 83,56%. Kondisi penggunaan lahan khususnya luas pemilikan dan macam penggunaan lahan di Indonesia sangat berbeda dengan di negara barat. Para penggarap lahan (sawah) di Indonesia sebagian besar memiliki luasan yang sempit (0,2 ha) (Mantra, 1991), dan dimanfaatkan untuk berbagai macam usahatani. Hal ini akan berpengaruh terhadap tingkat ketelitian interpretasi dan klasifikasi penggunaan lahan. Berbagai macam penggunaan lahan dengan luasan yang sempit (kurang dari 900 m²) akan menghasilkan piksel campuran (*mixel*) yang mana nilai pikselnya merupakan gabungan dari beberapa macam penutup lahan seluas 900 m². Kondisi seperti ini akan mengurangi ketepatan interpretasi dan klasifikasi penggunaan lahan. Oleh karena itu, penetapan batas ketelitian klasifikasi penggunaan lahan yang dapat diterima sebesar 80% seperti yang dikemukakan oleh Daels dan Antrop (1981) dalam Gunawan (1995) lebih tepat diterapkan pada kondisi lahan di Indonesia. Dengan demikian, ketelitian klasifikasi penggunaan lahan pada penelitian ini bisa diterima, dan dapat digunakan sebagai masukan dalam SIG.

Berbeda dengan peta penggunaan lahan yang diperoleh dari hasil interpretasi dan klasifikasi citra digital, peta lereng dan peta tanah dihasilkan dari digitasi, konversi, dan interpolasi peta analog yang sudah ada. Dengan demikian, parameter uji ketelitian yang dianalisis sedikit berbeda. Ketelitian penghasil dan pengguna tidak dapat diterapkan pada peta lereng dan peta tanah karena tidak berkaitan dengan daerah contoh seperti pada klasifikasi multispektral. Parameter uji ketelitian pada peta lereng dan peta tanah yang dibahas adalah ketelitian individu, kesalahan omisi kesalahan komisi, dan ketelitian keseluruhan.

Tabel 4.15, 4.16, 4.17, dan 4.18 secara berturut-turut menyajikan matrik kesalahan dan parameter uji ketelitian peta lereng dan peta tanah.

Tabel 4.15. Matrik Kesalahan Peta Kemiringan Lereng

		Hasil Uji medan						Total
		0 - 3%	3 - 8%	8 - 15%	15 - 25%	25 - 40%	40 - 60%	
Hasil Klasifikasi	0 – 3%	25	2	0	0	0	0	27
	3 – 8%	1	17	1	0	0	0	19
	8 – 15%	0	1	7	1	0	0	9
	15 - 25%	0	0	0	6	1	0	7
	25 - 40%	0	0	0	1	5	0	6
	40 - 60%	0	0	0	0	1	4	5
Total		26	20	8	8	7	4	73

Sumber : Digitasi, interpolasi garis kontur dan titik ketinggian, uji medan, Lillesand dan Kiefer (1994), dan Short (1982)

Tabel 4.16. Ketelitian dan Kesalahan Peta Kemiringan Lereng

Kemiringan Lereng (%)	Ketelitian Individu	Kesalahan (%)	
		Omisi	Komisi
0 – 3	92.59	3.85	7.69
3 – 8	89.47	15.00	10.00
8 – 15	77.78	12.50	25.00
15 – 25	85.71	25.00	12.50
25 – 40	83.33	28.57	14.29
40 – 60	80.00	0.00	33.33
Ketelitian keseluruhan		87.67	

Sumber : Tabel 4.15, Lillesand dan Kiefer (1994), dan Short (1982)

Tabel 4.17. Matrik Kesalahan Peta Jenis Tanah

		Hasil Uji medan													Total
		A1	A2	K1	K2	K3	A3	A4	K4	A5	K5	K6	A6	A7	
Hasil Klasifikasi	A1	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
	A2	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
	K1	1	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
	K2	0	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
	K3	0	0	0	0	4	0	1	0	0	0	0	0	0	5
	A3	0	0	0	0	1	7	0	0	0	0	0	0	0	8
	A4	0	0	0	0	0	1	6	0	0	0	0	0	0	7
	K4	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	1	9
	A5	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3
	K5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0	0	6
	K6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	5
	A6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3
	A7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	4	5
Total	8	4	5	5	5	8	7	9	4	6	4	3	5	73	

Sumber : Digitasi, konversi Peta Jenis Tanah Semi Detil, uji medan, Lillesand dan Kiefer (1994), dan Short (1982)

Tabel 4.18. Ketelitian dan Kesalahan Peta Jenis Tanah

Jenis Tanah	Ketelitian Individu	Kesalahan (%)	
		Omisi	Komisi
Asosiasi 1	87,50	12,50	12,50
Asosiasi 2	100,00	25,00	0,00
Kompleks 1	80,00	20,00	20,00
Kompleks 2	83,33	0,00	20,00
Kompleks 3	80,00	20,00	20,00
Asosiasi 3	87,50	12,50	12,50
Asosiasi 4	85,71	14,29	14,29
Kompleks 4	88,89	11,11	11,11
Asosiasi 5	100,00	25,00	0,00
Kompleks 5	83,33	16,67	16,67
Kompleks 6	80,00	0,00	25,00
Asosiasi 6	100,00	0,00	0,00
Asosiasi 7	80,00	25,00	25,00
Ketelitian keseluruhan		86,30	

Sumber : Tabel 4.17, Lillesand dan Kiefer (1994), dan Short (1982)

Untuk peta lereng, ketelitian inividu tertinggi (92,59%) terdapat pada lereng 0 – 3% dan yang terendah (77,78%) dijumpai pada kemiringan lereng 8 – 15%, sedangkan untuk peta tanah, asosiasi 2, asosiasi 5, dan asosiasi 7 berdasarkan uji medan menunjukkan ketepatan tertinggi, yaitu 100% dan terendah (80%) terdapat pada kompleks 1, kompleks 3, dan asosiasi 7. Secara keseluruhan, ketelitian analisis digital peta lereng adalah 87,67% dan peta tanah 86,30%. Dengan menggunakan batas toleransi 80% sebagai batas terendah uji ketelitian yang masih dapat diterima, maka kedua peta tersebut dapat diterima sebagai masukan dalam SIG.

4.7. Evaluasi Hasil Prediksi Erosi

Penggunaan analisis digital citra dan SIG untuk prediksi besarnya erosi dalam pelaksanaannya lebih banyak melakukan pekerjaan laboratorium dibandingkan dengan kegiatan pengamatan dan pengukuran secara terestrial. Oleh karena itu, prediksi erosi dengan metode ini perlu dievaluasi hasilnya dengan penelitian lapangan yang lebih banyak melakukan pengambilan sampel, pengamatan, dan pengukuran pada obyek yang dikaji. Dengan demikian, dapat diketahui kemampuan analisis citra digital dan SIG dalam prediksi besarnya erosi.

Untuk membandingkan hasil prediksi erosi yang diperoleh pada penelitian ini dengan penelitian terdahulu pada daerah yang sama tetapi dengan metode yang berbeda, yaitu pengukuran langsung faktor-faktor penyebab erosi di lapangan oleh Adnyana dkk. (1993) dilakukan evaluasi hasil prediksi erosi dengan menggunakan uji statistik (uji *t-test group*). Hasil prediksi erosi yang dilakukan oleh Adnyana dkk. (1993) disajikan pada Lampiran 9, sedangkan unit-unit tingkat erosi pada penelitian ini dapat dilihat pada Lampiran 8.

Berdasarkan hasil uji statistik diperoleh bahwa hasil prediksi erosi pada penelitian ini menunjukkan perbedaan yang tidak nyata (*non significant*) pada taraf uji *t* 5% dengan penelitian terdahulu melalui pengukuran faktor erosi secara langsung di lapangan. Ringkasan hasil uji *t test group* tersebut disajikan pada Tabel 4.19.

Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa nilai *t hitung* adalah 1,02, lebih kecil dari *t tabel* 5%, yaitu 1,98. Ini berarti pada selang kepercayaan (*confident level*) 95% kedua metode prediksi erosi tersebut memberikan hasil yang sama. Nilai *t signifikansi* memberikan angka yang lebih detail tentang tingkat signifikansi yang didapatkan,

yaitu 0,31. Angka tersebut menunjukkan bahwa kedua metode prediksi erosi yang diuji baru menunjukkan perbedaan pada taraf (α) sama dengan 31%. Semakin besar nilai *t* *signifikansi* berarti semakin kecil perbedaan kedua populasi yang diuji dalam hal ini tingkat erosi yang dihasilkan dari dua macam metode prediksi erosi hampir tidak ada bedanya.

Tabel 4.19. Hasil uji *t test group*

NO	Parameter Statistik	Penelitian Terdahulu	Penelitian Sekarang
1	Jumlah sampel (satuan erosi)	34	89
2	Nilai tengah	3,24	2,89
3	Variansi	4,97	2,03
4	Standar deviasi	1,43	2,23
5	Derajat bebas	121	
6	t-hitung	1,02	
7	t-tabel (5%)	1,98	
8	t-signifikansi	0,31	

Sumber : Hasil prediksi erosi, Adnyana dkk (1994), dan perhitungan statistik

4.8. Pembahasan Umum

Prediksi erosi dengan memanfaatkan analisis citra digital dan sistem informasi geografi, menggunakan satuan piksel sebagai unit terkecil dalam menghitung faktor-faktor erosi dan mengkalkulasi besarnya kehilangan tanah. Penggunaan piksel sebagai satuan terkecil dalam prediksi erosi dengan luasan $\pm 900 \text{ m}^2$ dapat

meningkatkan ketelitian hasil pendugaan erosi karena dapat mengurangi tingkat generalisasi. Hal ini dapat dilihat dari banyak dan beragamnya satuan erosi yang terbentuk dari hasil perkalian peta erosivitas hujan, peta erodibilitas tanah, peta faktor panjang dan kemiringan lereng, dan peta faktor tanaman dan pengelolaan lahan Gambar (4.12). Keragaman tingkat erosi yang diperoleh dalam luasan yang sempit dan jumlah yang banyak sesuai dengan kondisi sebenarnya di lapangan dimana jumlah kehilangan tanah pada setiap segmen permukaan tanah bervariasi tergantung dari interaksi faktor-faktor penyebab erosi.

Ketelitian klasifikasi penggunaan lahan, kemiringan lereng, dan jenis tanah pada penelitian ini masing-masing diperoleh 83,56%, 87,67%, dan 86,30%. Tingkat ketelitian yang didapat masih berada di atas batas minimum tingkat ketelitian yang dapat diterima yang dipersyaratkan oleh Daels dan Antrop (1981) dalam Gunawan (1995). Dengan demikian, hipotesis pertama pada penelitian ini yang mengharapkan tingkat ketelitian variabel prediksi erosi lebih besar dari 80% dapat diterima.

Bila ditinjau dari besarnya nilai ketelitian pada tiga tema peta digital yang diuji, terlihat bahwa tingkat ketelitian peta kemiringan lereng dan jenis tanah yang diperoleh melalui hasil analisis berbasis SIG dari peta dasar dan peta tematik yang telah ada, mampu memberikan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan peta penggunaan lahan hasil pengolahan citra digital Landsat TM. Hal ini disebabkan karena kedua sumber peta tersebut mempunyai skala yang relatif besar, yaitu 1 : 50.000. Disamping itu, peta topografi yang merupakan sumber informasi garis kontur dan titik ketinggian dalam pembuatan peta kemiringan lereng, dibuat secara terestrial melalui survei lapang yang intensif dan detil, sehingga mampu menghasilkan peta

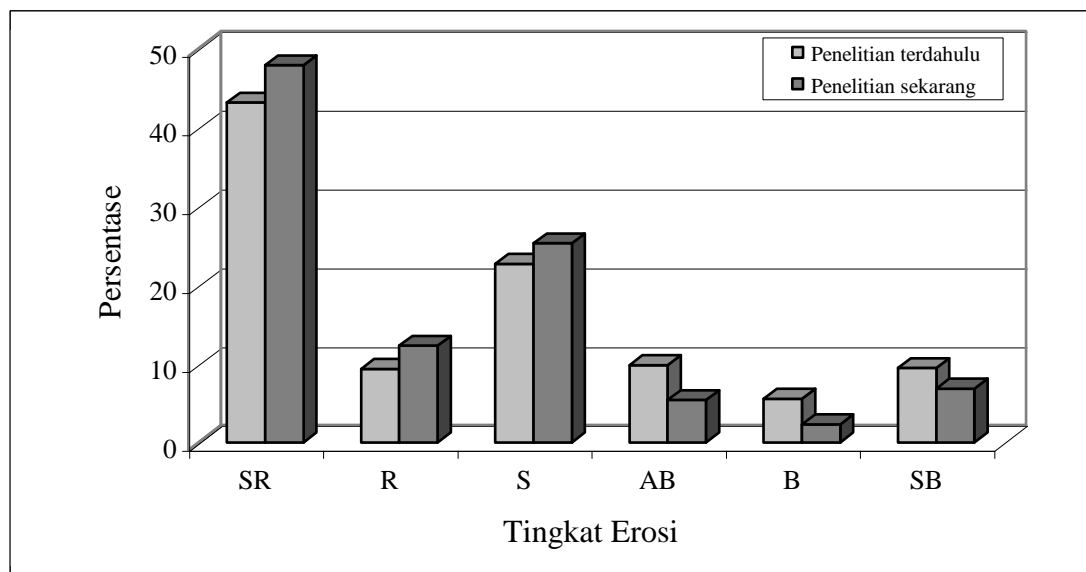
yang mempunyai tingkat akurasi yang tinggi. Sementara peta tanah, dihasilkan melalui perpaduan antara pemanfaatan citra penginderaan jauh (foto udara) skala besar dengan pengamatan lapang dan deskripsi profil tanah secara rinci. Di lain pihak, pembuatan peta penggunaan lahan dilakukan melalui klasifikasi multispektral citra Landsat TM. Model klasifikasi yang hanya bertumpu pada nilai spektral dengan skala citra yang kecil dan pengamatan secara monoskopis ternyata menghasilkan tingkat ketelitian 83,56% lebih kecil dari peta kemiringan lereng dan jenis tanah. Walaupun demikian, resolusi temporal yang tinggi dari citra Landsat TM sangat membantu memberikan informasi terkini.

Berdasarkan hasil uji statistik (*t-test group*) yang dilakukan didapatkan bahwa nilai *t-hitung* lebih kecil dari *t-tabel* 5%. Ini berarti, hipotesis yang kedua dalam penelitian ini dapat diterima. Bila ditinjau dari tingkat erosi yang diperoleh, nampak bahwa penggunaan analisis digital citra Landsat TM yang diintegrasikan dengan SIG dalam prediksi erosi cenderung memberikan tingkat erosi yang lebih rendah dibandingkan dengan pengamatan variabel erosi secara langsung di lapangan (Tabel 4.20 dan Gambar 4.13). Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mencari faktor koreksi antara dua metode prediksi erosi tersebut.

Tabel 4.20. Perbandingan Persentase Tingkat Erosi Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Sekarang

	Persentase Tingkat Erosi					
	Sangat ringan	Ringan	Sedang	Agak berat	Berat	Sangat berat
Penelitian terdahulu	43,13	9,34	22,67	9,84	5,57	9,45
Penelitian sekarang	47,86	12,29	25,27	5,39	2,33	6,86

Sumber : Tabel 4.12 dan Adnyana dkk. (1993)



Gambar 4.13. Grafik Perbandingan Persentase Tingkat Erosi

Dengan dipenuhinya tingkat ketelitian variabel penyebab erosi pada formula USLE dan hasil prediksi erosi yang diperoleh menunjukkan perbedaan yang tidak nyata dengan penelitian terdahulu melalui pengukuran faktor-faktor erosi secara langsung di lapangan, maka penggunaan analisis digital citra Landsat TM dan SIG untuk prediksi besarnya erosi dapat diterapkan. Perekaman ulang (resolusi temporal)

citra Landsat TM yang pendek dan resolusi spasial citra yang semakin membaik di masa mendatang sangat mendukung dan memberikan harapan yang lebih besar terhadap kemampuan citra Landsat yang diintegrasikan dengan SIG dalam prediksi besarnya erosi. Aplikasi ini akan lebih berarti lagi jika daerah yang dikaji mencakup kawasan yang luas dengan medan yang berat dan sulit dijangkau secara terestrial karena dapat mengurangi waktu dan biaya penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat dipetik beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Tingkat ketelitian variabel erosi penggunaan lahan, kemiringan lereng, dan jenis tanah masing-masing diperoleh 83,56 %, 87,67%, dan 86,30% lebih besar dari batas minimum tingkat ketelitian yang dapat diterima.
2. Sebagian besar (60,15%) tingkat erosi di daerah penelitian tergolong sangat ringan sampai ringan (kurang dari 29,3 ton/ha/th), 14,58% termasuk agak berat sampai sangat berat (lebih besar dari 47 ton/ha/th), dan sisanya 25,27% diklasifikasikan sebagai erosi dengan tingkat sedang (29,4 – 46,9 ton/ha/th).
3. Hasil prediksi besarnya erosi menggunakan analisis digital citra Landsat TM dan sistem informasi geografi menunjukkan perbedaan yang tidak nyata pada tingkat signifikansi (α) 5% dengan penelitian pendugaan erosi melalui pengamatan variabel erosi secara terestrial di lapangan. Secara umum hasil prediksi erosi pada penelitian ini memberikan hasil yang lebih rendah dibandingkan dengan penelitian pengukuran variabel erosi secara langsung di lapangan. Dengan demikian, penggunaan analisis digital citra dan sistem informasi geografi dapat digunakan untuk prediksi besarnya erosi dengan tingkat ketelitian yang dapat diterima.

5.2. Saran

1. Para peneliti erosi dan konsevasi tanah dapat memanfaatkan teknologi penginderaan jauh dalam hal ini analisis citra digital yang diintegrasikan dengan SIG untuk prediksi besarnya erosi, karena metode ini dapat menekan biaya dan waktu penelitian dengan tingkat ketelitian yang masih dapat diterima.
2. Perlu dilakukan penelitian multi tingkat misalnya pemanfaatan foto udara skala besar yang dipadukan dengan analisis citra digital dan SIG untuk membandingkan tingkat ketelitian yang diperoleh, serta mencari faktor koreksi antara hasil prediksi erosi melalui pemanfaatan data penginderaan jauh dengan pengamatan faktor erosi di lapangan.

RINGKASAN

Data tentang besarnya erosi dan distribusinya merupakan informasi yang penting dalam penentuan prioritas rehabilitasi lahan dan konservasi tanah suatu DAS. Salah satu metode prediksi besarnya erosi adalah dengan menggunakan variabel penyebab erosi. *Universal Soil Loss Equation* (USLE) merupakan formula prediksi erosi yang paling populer dewasa ini. Dalam penerapannya, komponen erosi dari USLE tersebut dapat diperoleh dari survei lapangan secara teristreal, ataupun melalui ekstraksi data penginderaan jauh. Penelitian pemanfaatan data penginderaan jauh untuk pendugaan erosi akhir-akhir ini telah banyak dilakukan, karena metode ini secara teknis dan ekonomis menguntungkan terlebih lagi bila diaplikasikan pada daerah yang luas dengan medan yang berat. Namun demikian, penelitian erosi dengan pemanfaatan data penginderaan jauh baru sebatas pada penggunaan foto udara melalui interpretasi dan analisis data secara manual.

Penggunaan foto udara dalam prediksi erosi seringkali dihadapkan pada masalah ketersediaan foto udara terbaru sesuai dengan perkembangan DAS yang cepat sebagai akibat berbagai aktivitas manusia. Oleh karena itu, diperlukan data penginderaan jauh yang mempunyai kemampuan tinggi dalam merekam ulang daerah yang sama. Landsat TM merupakan salah satu citra satelit sumberdaya alam yang mempunyai resolusi spasial dan temporal yang tinggi. Akan tetapi kesulitan dalam perolehan beberapa informasi variabel erosi dari Landsat menyebabkan perlunya dilakukan integrasi antara analisis digital citra Landsat dengan Sistem Informasi Geografi (SIG), dimana variabel erosi yang mempunyai tingkat perubahan yang

lambat dapat diperoleh dari sumber peta lain yang mempunyai tingkat akurasi yang lebih tinggi.

Kemampuan integrasi analisis citra digital dan SIG dalam prediksi erosi dapat dinilai dari tingkat ketelitian variabel erosi yang diperoleh dari hasil analisis tersebut, dan hasil prediksi besarnya erosi yang dihasilkan mampu menunjukkan perbedaan yang tidak nyata melalui uji statistik, dengan penelitian pendugaan erosi terdahulu melalui pengamatan variabel erosi secara langsung di lapangan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan dan tingkat ketelitian analisis digital citra Landsat TM dan SIG dalam menyajikan informasi variabel-variabel untuk prediksi besarnya erosi, dan memprediksi serta membandingkan besarnya erosi yang diperoleh dalam penelitian ini dengan metode pengukuran langsung variabel erosi di lapangan pada penelitian sebelumnya di DAS yang sama.

Penelitian ini dilakukan di DAS Ayung bagian hilir Kabupaten Badung Propinsi Bali. Prediksi besarnya erosi dengan menggunakan USLE membutuhkan 4 macam peta variabel erosi digital, yaitu indeks erosivitas hujan (R), erodibilitas tanah (K), faktor panjang dan kemiringan lereng (LS), dan faktor tanaman dan pengelolaan lahan (CP). Semua data komponen erosi dan besarnya erosi diolah secara digital dengan menggunakan perangkat lunak ILWIS (*Integrated Land and Water Information System*) versi 1.4 berbasis raster yang mampu melakukan pengolahan citra digital dan analisis berbasis SIG.

Indeks Erosivitas Hujan (R) dihitung dengan persamaan Bols (1978) pada setiap stasiun hujan di daerah penelitian dan sekitarnya. Selanjutnya, dilakukan proses *gridding* dengan metode *moving average* untuk menentukan nilai R pada

setiap titik di daerah penelitian. Nilai erodibilitas tanah (K) dihitung pada setiap Satuan Peta Tanah (SPT) dari peta tanah semi detil. Sifat-sifat tanah yang dianalisis untuk perhitungan nilai K adalah tekstur, struktur, bahan organik, dan permeabilitas tanah. Peta tanah yang telah dihitung nilai K-nya kemudian didigitasi dan dikonversi ke format raster untuk menghasilkan peta erodibilitas tanah digital.

Faktor panjang dan kemiringan lereng (LS) dihasilkan dari tabel konversi peta kemiringan lereng ke nilai LS yang dibuat oleh Dirjen Reboisasi dan Rehabilitasi Lahan (1996), sedangkan peta kemiringan lereng diperoleh dari hasil digitasi, konversi, dan interpolasi garis kontur dan titik ketinggian peta topografi skala 1 : 50.000. Nilai faktor tanaman dan pengelolaan lahan (CP) didasarkan atas peta penggunaan lahan yang diperoleh dari klasifikasi multispektral citra Landsat TM. Klasifikasi penggunaan lahan mengacu pada sistem klasifikasi penutup dan penggunaan lahan yang disusun oleh Malingreau (1991), sedangkan penentuan nilai CP dari peta penggunaan lahan berpedoman pada tabel konversi nilai CP.

Kalkulasi besarnya erosi dalam ton/ha/th dilakukan dengan mengalikan peta komponen erosi digital, yaitu R, K, LS, CP pada setiap piksel yang bersesuaian. Ketelitian hasil analisis digital diperoleh dengan membandingkan hasil analisis yang dilakukan dengan keadaan yang sebenarnya di lapangan. Komponen erosi yang uji tingkat ketelitiannya adalah peta penggunaan lahan, kemiringan lereng, dan jenis tanah. Batas minimum tingkat ketelitian yang masih dapat diterima mengacu pada Daels dan Antrop (1981) *dalam* Gunawan (1995), yaitu 80%. Evaluasi hasil prediksi erosi dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi erosi pada penelitian ini dengan hasil penelitian sebelumnya melalui pengamatan variabel erosi secara

langsung di lapangan pada daerah yang sama dengan uji statistik (*t-test*) pada tingkat signifikansi (α) 5%.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa indeks erosivitas hujan tahunan daerah penelitian berkisar dari 1131,75 sampai 3468,96 ton/ha/cm hujan. Hasil *gridding* dengan metode *moving average* menunjukkan bahwa sebagian besar (30,96%) indeks erosivitas hujan tahunan daerah penelitian berada pada kisaran 1600–1800, dan hanya 2,55 % termasuk dalam julat 3000–3200.

Melalui pengkaitan nilai erodibilitas tanah yang dihitung pada setiap SPT dengan data grafis peta jenis tanah didapatkan bahwa terdapat empat kelas erodibilitas tanah di daerah penelitian, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, dan agak tinggi. Kelas erodibilitas agak tinggi (0,33 – 0,43) mendominasi daerah penelitian, yaitu sebesar 52,05%, sedangkan erodibilitas tanah dengan kisaran 0,11 – 0,20 yang tergolong rendah luasannya paling kecil (5,05%).

Peta lereng yang dihasilkan dari digitasi, konversi dan interpolasi garis kontur dan titik ketinggian menunjukkan bahwa 85,45% daerah yang diteliti kemiringan lerengnya lebih kecil atau sama dengan 5% dengan nilai LS 0,25, dan 5,21% mempunyai kemiringan lereng lebih besar dari 15% dengan nilai LS 12.

Hasil pengolahan citra digital Landsat TM dan uji medan menunjukkan bahwa terdapat 6 macam penggunaan lahan di daerah penelitian, yaitu sawah irigasi, tegalan, kecun campuran kerapatan tinggi, kebun campuran kerapatan rendah – sedang, kebun kelapa, dan permukiman/pekarangan. Sawah menempati luasan tertinggi (47,65%), dan tegalan terkecil (1,94%).

Berdasarkan hasil kalkulasi keempat peta komponen erosi digital tersebut didapatkan bahwa sebagian besar (60,15%) tingkat erosi di daerah penelitian tergolong sangat ringan sampai ringan (kurang dari 29,3 ton/ha/th), 14,58% termasuk agak berat sampai sangat berat (lebih besar dari 47 ton/ha/th), dan sisanya 25,27% diklasifikasikan sebagai erosi dengan tingkat sedang (29,4 – 46,9 ton/ha/th).

Ketelitian keseluruhan peta penggunaan lahan, kemiringan lereng, dan jenis tanah masing-masing diperoleh 83,56%, 87,67%, dan 86,30%. Ketiga peta komponen erosi tersebut mempunyai tingkat ketelitian yang masih dapat diterima berdasarkan batas minimum tingkat ketelitian yang dikemukakan oleh Daels dan Antrop (1981) dalam Gunawan (1995). Ketelitian peta kemiringan lereng dan jenis tanah hasil analisis berbasis SIG dari peta yang telah ada lebih tinggi dibandingkan dengan peta penggunaan lahan hasil pengolahan citra digital.

Berdasarkan hasil uji statistik diperoleh bahwa nilai *t hitung* adalah 1,02, lebih kecil dari *t tabel* 5%, yaitu 1,98. Ini berarti pada selang kepercayaan (*confident level*) 95% kedua metode prediksi erosi tersebut memberikan hasil yang sama. Namun secara umum hasil prediksi erosi pada penelitian ini memberikan hasil yang lebih rendah dibandingkan dengan penelitian pengukuran variabel erosi secara langsung di lapangan.

Dengan dipenuhinya tingkat ketelitian variabel penyebab erosi pada formula USLE dan hasil prediksi erosi yang diperoleh menunjukkan perbedaan yang tidak nyata dengan penelitian terdahulu melalui pengukuran faktor-faktor erosi secara langsung di lapangan, maka penggunaan analisis digital citra Landsat TM dan sistem informasi geografi untuk prediksi besarnya erosi dapat diterapkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adnyana, I W. Sandi, Indayati L., I W. Rusna, I W. Diara, dan M. Sri S. 1993. *Studi Pemantauan Perubahan Penggunaan Lahan dan Perencanaan Teknik Konservasi Tanah dan Air di Daerah Aliran Sungai Ayung, Bali*. Laporan Penelitian Hibah Bersaing I/1 Perguruan Tinggi Tahun Anggaran 1992/1993.
- Anderson, J.R., E.E. Hardy, J.T. Roach, dan R.E. Witmer. 1976. *A Land Use dan Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data*. United States Government Printing Office, Washington.
- Anonimus. 1989. *Perda Tingkat I Bali No. 6 Tahun 1989 tentang Rencana Umum Tata Ruang Daerah Bali*. Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Tk. I Bali.
- Anonimus. 1993. *ILWIS 1.4 User's Manual*. First Edition. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science, The Netherlands.
- Anuta, P.E., L.A. Bartolucci, M.E. Dean, D.F. Lozano, E. Malaret, C.D. McGillem, J.A. Valdes, dan C.R. Valenzuela. 1994. Landsat-4 MSS and Thematic Mapper Data Quality and Information Content Analysis. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 22 (3) : 222-236.
- Aronoff, Stan. 1989. *Geographic Information System. A Management Perspective*. Ottawa. WDL Publication.
- Arsyad, Sitanala. 1989. *Konservasi Tanah dan Air*. Penerbit IPB Bogor.
- Balai Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah Wilayah VI. 1986. *Pola Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Daerah Aliran Sungai Brantas*. Balai Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah, Malang.
- Baver, L.D. 1959. *Soil Physics*. Third Edition. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Bennet. 1939. *Element of Soil Conservation*. Mc.Graw Hill, Yew York.
- Bocco G. dan C.R. Valenzuela. 1990. Integration of GIS and Remote Sensing in Land use and Erosion Study in *Remote Sensing and Geographical Information System for Resource Management in Developing Countries*. Alan S. Belward and Carlos R. Valenzuela (eds). Kluwer Academic Publishers.

- Bols, P.L. 1978. *The Iso-erodent Map of Java and Madura*. Soil Research Institute Bogor Indonesia.
- Bouyoucus, G.J. 1935. The Clay Ratio as a Criterion of Susceptibility of Soil to Erosion. *Journal of America Society Agronomy*. 27 : 378-41
- Burrough, Peter A. 1986. *Principles of Geographical Information System for Land Resources Assesment*. Clarendon Press, Oxford.
- Campbell, J.B. 1987. *Introduction to Remote Sensing*. Guilford Press, New York.
- Colvocoresses, A.P. 1986. Image Mapping with the Thematic Mapper. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol 52 no. 9.
- Curran, Paul J. 1985. *Principles of Remote Sensing*. London, Longman.
- Dangler, E.W. dan El-Swaify, S.A. 1976. Erosion of Selected Hawaii Soil by Simulated Rainfall. *Soil Science Society Amer. Proc.* 40 : 769 – 773.
- Danoedoro, Projo. 1996. *Pengolahan Citra Digital. Teori dan Aplikasi dalam Bidang Penginderaan Jauh*. Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Departemen Tenaga Kerja Republik Indonesia. 1995. *Perencanaan Tenaga Kerja Nasional (PTKN)*. Departemen Tenaga Kerja Republik Indonesia, Jakarta.
- Departemen Tenaga Kerja Republik Indonesia. 1996. *Situasi Tenaga Kerja dan Kesempatan Kerja di Indonesia 1995*. Departemen Tenaga Kerja Republik Indonesia, Jakarta.
- Dirjen Reboisasi dan Rehabilitasi Lahan. 1986. *Petunjuk Pelaksanaan Penyusunan Rencana Teknik Lapangan Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah*. Departemen Kehutanan. Direktorat Jendral Reboisasi dan Rehabilitasi Lahan.
- Dungus, Ferdy. 1997. Bentuk Penggunaan Lahan Pertanian Berdasarkan Analisis Digital Citra SPOT Multispektral, Kasus di Lereng Selatan Gunung Merapai Yogyakarta. *Tesis*. Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta (Tidak dipublikasikan).
- Eppink, L.A.A.J. 1985. *Soil Conservation and Erosion Control*. Agriculture University Wageningen. Department of Land and Water Use.

- Frank, T.D. 1988. Mapping Dominant Vegetation Communities in the Colorado Rocky Mountain Front Range with Landsat TM and Digital Terrain Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol 54 no. 12.
- Gastellu-Etchegorry, J.P. 1988. *Remote Sensing with SPOT*. An Assesment of SPOT Capability in Indonesia. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Gunawan, Totok. 1993. *Penginderaan Jauh Terapan untuk Studi Pedesaan*. Program Studi Penginderaan Jauh. Progran Pasca Sarjana UGM, Yogyakarta.
- Gunawan I., 1995. Penerapan Teknologi SIG untuk Perencanaan Pembangunan yang Terkoordinasi. *Makalah Seminar Nasional Sistem Informasi Kebumian*. Fakultas Teknik Universitas gadjah Mada, Yogyakarta.
- Hammer, W.I. 1978. *Soil Conservation Consultant Report*. Soil Research Institute Bogor. Indonesia
- Hartono. 1994. The Use of SPOT Image for Mangrove Inventory in Cimanuk Delta, West Java, Indonesia. *The Indonesian Journal of Geography*. Vol 126 no. 68 pp 11-26.
- Hartono. 1996. *Penginderaan Jauh dan SIG untuk Vegetasi*. Kerjasama PUSPICS, Fakultas Geografi UGM dengan Badan Koordinasi Survei dan Pemetaan Tanah Nasional.
- Jensen, John R. 1986. *Introductory Digital Image Processing - a Remote Sensing Perspective*. London:Prentice Hall.
- Juswadi, Juri. 1985. *Pendugaan Besarnya Potensi Erosi dan Usaha untuk Mengurangi Erosi yang Terjadi Menurut Metode USLE pada Andosol Coklat*, Ciomas Bogor. Jurusan Tanah, Fakultas Pertanian IPB, Bogor.
- Kartasapoetra, A.G. 1989. *Kerusakan Tanah Pertanian dan Usaha untuk Merehabilitasinya*. Bina Aksara, Jakarta.
- Kumajas, M. 1992. Kajian Morfokonservasi Daerah Tangkapan Hujan Danau Tondano. *Tesis*. Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta (Tidak dipublikasikan).
- Lal, R. 1977. Analysis of Factor Affecting Rainfall Erosivity and Soil Erodibility in *Soil Conservation and Management in the Humid Tropics*. Grenland D.J. and Lal, R. (eds). John Wiley & Sons, New York.

- Lillesand, Thomas M. dan R. W. Kiefer. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Third Edition. John Wiley and Sons, New York.
- Malingreau, J. P. 1981. A Land Cover/Land Use Classification for Indonesia. *The Indonesia Journal of Geography*. Vol 11 No. 41 June.
- Mantra, Ida Bagus. 1991. Population and Environment in Indonesia. *The Indonesian Journal of Geography*. Vol 12 no. 61.
- Mather, P.M. 1987. *Computer Processing of Remotely Sensed Image, An Introduction*. John Wiley & Sons, New York.
- Murty, V.V.N. 1985. *Land and Water Management Engineering*. Kalyani Publisher. New Delhi - Ludhiana.
- Noorhadi. 1993. Kajian Erosi Permukaan di Sub DAS Wuryantoro Kabupaten Wonogiri. *Tesis*. Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta (Tidak dipublikasikan).
- Roose, E.J. 1977. Application of the Universal Soil Loss Equation of Wischemier and Smith in West Africa in *Soil Conservation and Management in the Humid Tropics*. Ed. D. J. Greenland and R. Lal. John Wiley and Sons, Chicester. 177-87.
- Sabin, Floyd F. 1986. *Remote Sensing Principles and Interpretation*. Second Edition. W.H. Freeman and Company. New York.
- Sarief, Saiffudin. 1986. *Konservasi Tanah dan Air*. Cetakan kedua. Penerbit Pustaka Buana, Bandung.
- Schwab, O.G., K.F. Richard, W.E. Talcott and K. Kenneth Barnes. 1966. *Soil and Water Conservation Engineering*. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- Short. 1982. *The Landsat Tutorial Workbook, Basic of Satellite Remote Sensing*. NASA Reference Publication 1078, Washington DC.
- Soelistyari, H.T. 1996. Tinjauan dan Analisa Penelitian Konservasi Tanah pada Lahan Pertanian di Indonesia. *Tesis*. Universitas Pembangunan Nasional Veteran, Surabaya. (Tidak dipublikasikan).

- Soil Survey Staff. 1990. *Key to Soil Taxonomy*. Fourth Edition. SMSS. Technical Monograph no. 6 Blacksburg, Virginia.
- Stalling, J.H. 1959. *Soil Conservation*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New York.
- Stewart, B.A., D.A. Woolhiser, W.H. Wischmeier, J.H. Caro and M.H. Frere. 1975. *Control of Water Pollution from Cropland*. Agriculture Research Service U.S. Department of Agriculture.
- Sudardjo. 1980. *Pengelolaan DAS*. Yayasan Pembina Fakultas Kehutanan Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Sudarto. 1989. Penggunaan Foto Udara untuk Penilaian tingkat Erosi di Sub DAS Lesti Hulu dan Genteng DTA Waduk Karangates Malang, Jawa Timur. *Tesis*. Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta (Tidak dipublikasikan).
- Sudaryono, L. 1991. Pengenalan Daerah-daerah Erosi Pendukung Pendangkalan Waduk Wonogiri dari DTA Bagian Timur. *Tesis*. Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta (Tidak dipublikasikan).
- Sudjana. 1992. *Metoda Statistika*. Edisi ke-5. Penerbit Tarsito, Bandung.
- Sulistyo, Bambang. 1997. Evaluasi Ketelitian Hasil Klasifikasi Penggunaan Lahan dari Data Landsat TM Setelah Koreksi Geometris. *Tesis*. Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta (Tidak dipublikasikan).
- Suryanto, Hari dan Priyadi Kardono. 1994. Pengkajian Nilai Indeks Erosi (Inderosi) untuk Pemantauan Program Rebiosasi Pelita IV di Sub DAS Ketahu Hulu Bengkulu. *Jurnal Ilmiah Geomatika*. Vol II No. 1.
- Sutanto 1994. *Penginderaan Jauh Jilid II*. Cetakan kedua. Gadjah Mada University Press.
- Sutanto. 1996. *Penginderaan Jauh Dasar*. Disiapkan untuk Kuliah Matrikulasi Program S2 Geografi, Ilmu Lingkungan, dan Penginderaan Jauh. Program Pasca Sarjana UGM, Yogyakarta.
- Swain, P.H. and S.M. Davis (eds). 1978. *Remote Sensing : The Quantitative Approach*. McGraw-Hill. New York.

- Syamsuhari. 1996. Pemanfaatan Foto Udara Inframerah Berwarna untuk Penyusunan Arah Konservasi Tanah Berdasarkan Penilaian Tingkat Bahaya Erosi dan Kemampuan Lahan. Studi Kasus di Daerah Pengairan Sungai Wuryantoro Kabupaten Daerah Tingkat II Wonogiri. *Tesis*. Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta (Tidak dipublikasikan).
- Thompson, D.R. dan K.E. Henderson. 1984. Evaluation of Thematic Mapper for Detecting Soil Properties Under Grass Vegetation. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 22 (3) : 319-322.
- Townshen, J.R.G. 1981. *Terrain Analysis and Remote Sensing*. George Allen & Unwin, London.
- Utomo, Wani Hadi. 1994. *Erosi dan Konservasi Tanah*. Penerbit IKIP Malang.
- Valenzuela 1988. ILWIS Overview. *ITC Journal*. 1988-1
- Valenzuela 1990a Basic Principles of Geographic Information Systems. in *Remote Sensing and Geographical Information System for Resource Management in Developing Countries*. Alan S. Belward and Carlos R. Valenzuela (eds). Kluwer Academic Publishers.
- Valenzuela 1990b Data Analisis and Modelling. in *Remote Sensing and Geographical Information System for Resource Management in Developing Countries*. Alan S. Belward and Carlos R. Valenzuela (eds). Kluwer Academic Publishers.
- Weir, M.J. 1990. Data Input and Output. in *Remote Sensing and Geographical Information System for Resource Management in Developing Countries*. Alan S. Belward and Carlos R. Valenzuela (eds). Kluwer Academic Publishers.
- Wischmeir, W.H. dan Smith 1978. *Predicting rainfall Erosion Losses*. Aguide to Conservation Planning. USDA Agric, Handb No. 573.
- Yunianto, T. 1984. Erosion Hazard Study of the Kudus and Prawata Area Cental Java, Indonesia. *Thesis*. ITC, Enschede the Netherlands.
- Zefri. 1994. Penggunaan Foto Udara untuk Menilai Tingkat Bahaya Erosi di Daerah Tangkapan Air Danau Singkarak Sumatra Barat. *Tesis*. Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta (Tidak dipublikasikan).

Lampiran 1. Data Stasiun Curah Hujan Daerah Penelitian dan Sekitarnya

No	Nama Stasiun	Kecamatan, Kabupaten	Koordinat UTM		Ketinggian Tempat (m)
			mT	mU	
1	Ngurah Rai	Kuta, Badung	298375	9032400	5
2	Sumerta	Denpasar Timur, Denpasar	305825	9043075	40
3	Kapal	Mengwi, Badung	299250	9050225	250
4	Gianyar	Gianyar, Gianyar	315375	9055525	120
5	Abiansemal	Abiansemal, Badung	303625	9057950	191
6	Buruan	Penebel, Tabanan	294925	9064075	400
7	Baturiti	Baturiti, Tabanan	302000	9072925	888
8	Pelaga	Petang, Badung	306300	9083600	788

Sumber : Badan Meteorologi dan Geofisika unit Tuban, Bali

Lampiran 2. Data Hujan Rata-rata Selama 10 Tahun (1988 – 1997) dan Hasil Perhitungan Indeks Erosivitas Hujan.

No	Stasiun Hujan	Parameter Hujan	B u l a n												Total
			Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des	
1	Ngurah Rai	Total curah hujan (cm)	41,59	24,57	22,15	9,83	9,37	6,46	10,00	4,46	3,78	5,27	17,30	26,38	181,16
		CH maksimum (cm)	9,05	5,74	5,90	3,86	4,03	2,99	4,54	2,72	2,26	2,20	5,41	6,44	9,05
		Jumlah hari hujan (kali)	19,70	15,80	12,40	8,60	7,60	6,50	5,70	2,70	3,50	4,60	9,60	14,80	111,50
		Indeks erosivitas hujan	440,84	203,20	203,81	72,33	74,01	43,36	97,65	39,81	26,15	33,89	162,80	242,72	1640,57
2	Sumerta	Total curah hujan (cm)	34,93	32,76	13,43	12,28	1,80	1,08	2,49	1,30	1,69	5,46	14,73	23,75	145,70
		CH maksimum (cm)	11,13	8,96	4,56	6,53	1,38	0,81	1,83	0,74	1,09	2,83	6,31	7,79	11,13
		Jumlah hari hujan (kali)	11,13	11,63	6,38	4,25	1,88	0,63	2,50	1,38	1,13	3,38	7,00	9,88	61,17
		Indeks erosivitas hujan	520,78	421,06	132,66	174,09	10,98	7,46	16,48	6,16	11,40	46,74	168,63	285,92	1802,36
3	Kapal	Total curah hujan (cm)	34,54	25,98	8,05	6,76	7,07	6,28	3,38	1,40	5,21	7,25	15,61	20,78	142,31
		CH maksimum (cm)	6,49	4,91	3,39	2,81	2,23	1,89	1,18	0,86	1,76	2,25	4,30	4,07	6,49
		Jumlah hari hujan (kali)	15,90	13,70	5,60	4,10	5,10	4,30	3,40	1,80	3,90	5,10	9,30	12,80	85,00
		Indeks erosivitas hujan	326,50	214,00	64,87	55,05	46,40	39,90	16,40	6,44	32,09	48,06	129,20	152,66	1131,57
4	Gianyar	Total curah hujan (cm)	32,06	26,95	15,16	11,87	8,64	5,12	8,66	6,62	5,37	6,04	13,63	19,64	159,76
		CH maksimum (cm)	6,26	7,07	5,00	4,52	4,64	1,94	3,23	3,11	3,08	2,74	3,36	5,69	7,07
		Jumlah hari hujan (kali)	15,40	14,40	10,20	7,80	5,20	5,60	8,20	4,10	3,60	4,30	10,50	10,80	100,10
		Indeks erosivitas hujan	297,13	265,11	129,34	103,44	86,42	27,91	57,74	56,63	46,50	46,35	90,87	184,45	1391,89
5	Abiansemal	Total curah hujan (cm)	29,48	32,36	22,57	14,63	7,80	6,53	9,15	8,50	4,36	14,43	21,43	27,71	198,95
		CH maksimum (cm)	6,93	6,03	6,52	5,46	3,64	2,83	4,13	3,57	1,84	5,09	6,66	7,22	7,22
		Jumlah hari hujan (kali)	17,90	17,40	13,50	9,90	6,90	6,00	7,80	5,80	4,90	5,90	11,00	14,40	121,40
		Indeks erosivitas hujan	263,97	278,16	211,23	131,64	58,78	44,30	71,97	70,05	23,79	159,09	217,79	277,25	1808,02

Lampiran 2. Lanjutan

No	Stasiun Hujan	Parameter Hujan	B u l a n												Total
			Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des	
6	Buruan	Total curah hujan (cm)	28,28	28,79	23,58	16,16	9,63	5,48	6,82	8,19	4,45	20,27	26,67	26,39	204,71
		CH maksimum (cm)	6,29	6,26	5,69	3,84	3,62	1,78	2,85	4,01	1,59	7,19	6,96	6,00	7,19
		Jumlah hari hujan (kali)	19,50	16,80	15,60	11,60	8,40	5,80	7,70	6,30	6,40	8,30	13,10	17,40	136,90
		Indeks erosivitas hujan	229,05	250,41	193,60	114,37	68,96	28,48	41,68	68,51	19,91	245,51	271,41	216,76	1748,65
7	Baturiti	Total curah hujan (cm)	56,17	43,67	40,93	30,35	14,55	7,71	7,39	11,82	7,77	22,29	33,34	43,68	319,67
		CH maksimum (cm)	8,96	9,15	9,92	7,41	4,99	3,04	2,77	4,71	4,59	8,10	7,72	9,28	9,92
		Jumlah hari hujan (kali)	19,90	19,00	16,40	14,00	8,20	7,30	8,30	8,10	7,70	9,70	13,50	16,90	149,00
		Indeks erosivitas hujan	627,83	478,46	494,80	317,99	136,22	51,31	43,68	103,34	62,83	272,65	370,38	509,47	3468,96
8	Pelaga	Total curah hujan (cm)	53,65	37,56	30,21	22,74	9,32	7,80	4,17	5,53	3,25	12,81	30,53	37,42	254,99
		CH maksimum (cm)	7,87	5,44	5,38	4,52	2,80	2,49	1,35	1,93	1,20	3,48	4,83	5,14	7,87
		Jumlah hari hujan (kali)	22,60	20,10	17,60	13,40	7,00	6,80	5,00	5,70	3,90	9,00	16,80	18,30	146,2
		Indeks erosivitas hujan	522,27	294,76	239,65	176,15	63,02	48,40	18,95	30,30	14,80	92,33	234,31	299,71	2034,65

Sumber : Badan Meteorologi dan Geofisika unit Tuban, Bali dan Bols (1978)

Lampiran 3. Legenda Peta Tanah Semi Detil Daerah Penelitian

No SPT	Kode	Famili Tanah	Kemiringan Lereng (%)	Bentuk Wilayah	Bentuklahan	Bahan Induk
1	Asosiasi 1	Asosiasi Typic Tropoquepts, berlempung-halus, campuran, tidak masam, isohipertermik Typic Tropoquepts, berlempung-kasar, campuran, tidak masam, isohipertermik Aeric Tropoquepts, berlempung-halus, campuran, tidak masam, isohipertermik	3 – 8	Berombak	Lereng bawah kecut volkan tidak tertoreh	Tufa abuvulkanik
2	Asosiasi 2	Asosiasi Typic Tropoquepts, halus, campuran, tidak masam, isohipertermik Typic Tropoquepts, berlempung halus, campuran, tidak masam, isohipertermik	3 – 8	Berombak	Lereng bawah kecut volkan tidak tertoreh	Tufa abuvulkanik
3	Kompleks 1	Kompleks Typic Tropoquepts, halus, campuran, tidak masam, isohipertermik Aeric Epiaqualfs, halus, campuran, isohipertermik Typic Tropoquepts, berlempung-halus, campuran, tidak masam, isohipertermik	8 – 15	Bergelombang	Lereng bawah kecut volkan tidak tertoreh	Tufa abuvulkanik
4	Kompleks 2	Kompleks Typic Tropoquepts, halus, campuran, tidak masam, isohipertermik Aeric Tropoquepts, berlempung-halus, campuran, tidak masam, isohipertermik	0 – 3	Datar	Lereng bawah kecut volkan tidak tertoreh	Tufa abuvulkanik
5	Kompleks 3	Kompleks Typic Duraquands, berabuvulkanik, isohipertermik, dangkal Aeric Tropoquepts, berlempung-halus, campuran, tidak masam, isohipertermik	15 – 25	Berbukit	Perbukitan volkan sangat tertoreh	Breksi lava basaltik tertutup tuf
6	Asosiasi 3	Asosiasi Typic Vitraquands, berabuvulkanik, di atas berbatuapung, isohipertermik Vitric Hapludands, skeletal berabuvulkanik, isohipertermik	40 – 60	Sangat curam	Lereng atas kerucut volkan sangat tertoreh sekali	Tufa abuvulkanik
7	Asosiasi 4	Asosiasi Typic Epiaquands, berabuvulkanik, isohipertermik Aeric Tropoquepts, berlempung-halus, campuran, tidak masam, isohipertermik	3 – 8	Berombak	Lereng bawah kecut volkan tidak tertoreh	Tufa abuvulkanik
8	Kompleks 4	Kompleks Typic Argiudolls,halus, campuran, isohipertermik Typic Hapludolls,halus, campuran, isohipertermik	3 – 8	Berombak	Lereng bawah kecut volkan tidak tertoreh	Tufa abuvulkanik

Lampiran 3. Lanjutan

No SPT	Kode	Famili Tanah	Kemiringan Lereng (%)	Bentuk Wilayah	Bentuklahan	Bahan Induk
9	Asosiasi 5	Asosiasi Aeric Epiaqualfs, halus, campuran, isohipertermik Typic Tropoquetps, halus, campuran, tidak masam, isohipertermik	3 – 8	Berombak	Lereng bawah kecut volkan agak tertoreh	Tufa abuvulkanik
10	Kompleks 5	Kompleks Aeric Epiaqualfs, halus, campuran, isohipertermik Aeric Tropoquetps, berlempung-halus, campuran, tidak masam, isohipertermik	3 – 8	Berombak	Lereng bawah kecut volkan tidak tertoreh	Tufa abuvulkanik
11	Kompleks 6	Kompleks Aeric Epiaqualfs, halus, campuran, isohipertermik Aeric Tropoquetps, berlempung-halus, campuran, tidak masam, isohipertermik	8 – 15	Bergelombang	Ngarai volkan	Tufa abuvulkanik
12	Asosiasi 6	Asosiasi Typic Hapludolls, berlempung-halus, campuran, isohipertermik Typic Flagioquetps,halus, campuran, isohipertermik	15 – 25	Berbukit	Lereng bawah kecut volkan tidak tertoreh	Tufa abuvulkanik
13	Asosiasi 7	Asosiasi Typic Hapludolls, berlempung-halus, campuran, isohipertermik Typic Argiudolls,halus, campuran, isohipertermik	3 – 8	Berombak	Lereng bawah kecut volkan tidak tertoreh	Tufa abuvulkanik

Sumber : (Puslitannak, 1994)

Lampiran 4. Sifat-sifat Tanah yang Berpengaruh terhadap Erosi pada Setiap Satuan Peta Tanah

Nomor SPT	Pasir Kasar (%)	Pasir Halus (%)	Debu (%)	Lempung (%)	Kelas Tekstur Tanah	Bahan Organik		Permeabilitas Tanah	
						(%)	Ket.	(cm/jam)	Ket.
1	16,33	43,24	33,91	6,52	Geluh pasiran	4,95	Sedang	25,92	Sangat Cepat
2	0,67	4,45	89,84	5,06	Debu	3,36	Rendah	2,85	Sedang
3	10,35	33,04	34,23	22,38	Geluh	4,03	Sedang	1,71	Agak Lambat
4	2,77	25,38	48,81	23,05	Geluh	4,77	Sedang	1,14	Agak Lambat
5	8,51	16,65	36,77	38,08	Geluh lempungan	4,8	Sedang	32,76	Sangat Cepat
6	6,16	29,87	44,39	19,58	Geluh	2,55	Rendah	3,42	Sedang
7	8,43	39,03	49,28	3,27	Geluh pasiran	1,77	Rendah	6,84	Agak Cepat
8	12,31	30,90	36,98	19,81	Geluh	6,81	Tinggi	25,82	Sangat Cepat
9	10,03	32,84	11,15	45,99	Lempung	4,13	Sedang	0,86	Agak Lambat
10	7,58	31,91	38,04	22,48	Geluh	4,12	Sedang	2,56	Sedang
11	11,17	34,76	37,36	16,71	Geluh	3,13	Rendah	20,51	Cepat
12	13,25	22,84	6,29	57,63	Lempung	3,27	Rendah	1,85	Agak Lambat
13	9,03	15,75	25,40	49,82	Lempung	5,51	Tinggi	4,56	Sedang

Sumber : Hasil Analisis Tanah di Laborarium Tanah Fakultas Pertanian Universitas Udayana.

Lampiran 5. Klasifikasi Nilai Erodibilitas Tanah

No	Nilai Erodibilitas Tanah (K)	Kreteria
1	$< 0,10$	Sangat rendah
2	0,11 – 0,20	Rendah
3	0,21 – 0,32	Sedang
4	0,33 – 0,43	Agak tinggi
5	0,44 – 0,55	Tinggi
6	$> 0,55$	Sangat tinggi

Sumber : Dangler dan El-Swaify (1976)

Lampiran 6. Sistem Klasifikasi Penutup Lahan/Penggunaan Lahan

I.	Daerah bervegetasi
	<p>1.1. Daerah pertanian</p> <p> 1.1.1. Sawah</p> <p> 1.1.1.1. Sawah irigasi</p> <p> 1.1.1.2. Sawah tadah hujan</p> <p> 1.1.2. Tegalan</p> <p> 1.1.2.1. Tegalan</p> <p> 1.1.2.2. Kebun sayur</p> <p> 1.1.2.3. Kebun campuran</p> <p>1.2. Daerah non pertanian</p> <p> 1.2.1. Hutan primer</p> <p> 1.2.2. Hutan sekunder</p> <p> 1.2.3. Hutan tanaman</p> <p> 1.2.4. Belukar/semak</p> <p> 1.2.5. Rumput</p>
II.	Daerah tak bervegetasi
	<p>2.1. Lahan terbuka</p> <p>2.2. Batuan tersingkap</p>

Lampiran 6. Lanjutan

III.	Pemukiman dan bangunan
	<ul style="list-style-type: none"> 3.1. Kota 3.2. Kampung 3.3. Daerah industri 3.4. Lapangan terbang 3.5. Tempat rekreasi 3.6. Jaringan transpormasi <ul style="list-style-type: none"> 3.6.1. Jalan aspal 3.6.2. Jalan batu/tanah 3.6.3. Jaringan kereta api
IV.	Air
	<ul style="list-style-type: none"> 4.1. Tubuh air <ul style="list-style-type: none"> 4.1.1. Danau 4.1.2. Kolam 4.1.3. Rawa 4.2. Aliran air <ul style="list-style-type: none"> 4.2.1. Sungai 4.2.2. Saluran irigasi

Sumber : Malingreau (1981)

Lampiran 7. Nilai Faktor C x P Beberapa Tanaman dan Pengelolaan Lahan

No	Jenis Tanaman dan Pengelolaan Tanah	Nilai C x P
1	Lahan tanpa tanaman	1
2	Hutan :	
	a. Tak terganggu	0,001
	b. Tanpa tanaman bawah	0,030
	c. Tanpa tanaman bawah dan seresah	0,500
2	Semak :	
	a. Tak terganggu	0,010
	b. Sebagian berumput	0,100
3	Kebun :	
	a. Kebun campuran kerapatan tinggi	0,010
	b. Kebun campuran kerapatan sedang	0,020
	c. Kebun campuran kerapatan rendah	0,050
	d. Kebun tunggal	0,070
	e. Pekarangan	0,200
5	Perkebunan	
	a. Penutup tanah sempurna	0,100
	b. Ditumbuhi alang-alang	0,020
	c. Pembakaran alang-alang setahun sekali	0,060
	d. Jenis serai (<i>Citronella grass</i>)	0,650
	e. Savana dan padang rumput	0,010
	f. Rumput <i>Brochiora</i>	0,002

Lampiran 7. Lanjutan

No	Jenis Tanaman dan Pengelolaan Tanah	Nilai C x P
6	Tanaman Pertanian	
	a. Umbian akar	0,630
	b. Bebijian	0,510
	c. Kekacangan	0,360
	d. Tembakau	0,580
	e. Kapas, tembakau	0,500
	f. Campuran	0,430
	g. Padi irigasi	0,020
7	Perladangan :	
	a. 1 (satu) tahun tanam, 1 (satu) tahun bera	0,280
	b. 1 (satu) tahun tanam, 2 (satu) tahun bera	0,190
	c. Tegalan	0,500
8	Pertanian dengan pencagaran tanah :	
	a. Teras bangku + tanaman	0,400
	b. Teras guludan + tanaman	0,150

Sumber : Modifikasi data Wischmeier dan Arnoldus oleh Utomo (1994), Soelistyari (1986), dan Pusat Penelitian Tanah (1973 – 1983 *dalam* Arsyad, 1989)

Lampiran 8. Hasil Prediksi Erosi di Daerah Penelitian

Satuan Erosi	Kisaran Besarnya Erosi (ton/ha/th)	Klasifikasi Erosi	Harkat
1	14,5 - 29,3	R	2
2	29,4 - 46,9	S	3
3	14,5 - 29,3	R	2
4	29,4 - 46,9	S	3
5	14,5 - 29,3	R	2
6	14,5 - 29,3	R	2
7	29,4 - 46,9	S	3
8	< 14,4	SR	1
9	29,4 - 46,9	S	3
10	29,4 - 46,9	S	3
11	> 80,6	SB	6
12	< 14,4	SR	1
13	29,4 - 46,9	S	3
14	29,4 - 46,9	S	3
15	> 80,6	SB	6
16	< 14,4	SR	1
17	14,5 - 29,3	R	2
18	29,4 - 46,9	S	3
19	29,4 - 46,9	S	3
20	> 80,6	SB	6
21	29,4 - 46,9	S	3
22	29,4 - 46,9	S	3
23	< 14,4	SR	1
24	29,4 - 46,9	S	3
25	29,4 - 46,9	S	3
26	47,0 - 63,0	AB	4
27	47,0 - 63,0	AB	4
28	14,5 - 29,3	R	2
29	< 14,4	SR	1
30	47,0 - 63,0	AB	4
31	47,0 - 63,0	AB	4

Lampiran 8. Lanjutan

Satuan Erosi	Kisaran Besarnya Erosi (ton/ha/th)	Klasifikasi Erosi	Harkat
32	< 14,4	SR	1
33	14,5 - 29,3	R	2
34	29,4 - 46,9	S	3
35	47,0 - 63,0	AB	4
36	47,0 - 63,0	AB	4
37	14,5 - 29,3	R	2
38	< 14,4	SR	1
39	14,5 - 29,3	R	2
40	29,4 - 46,9	S	3
41	14,5 - 29,3	R	2
42	14,5 - 29,3	R	2
43	29,4 - 46,9	S	3
44	47,0 - 63,0	AB	4
45	29,4 - 46,9	S	3
46	29,4 - 46,9	S	3
47	47,0 - 63,0	AB	4
48	14,5 - 29,3	R	2
49	< 14,4	SR	1
50	> 80,6	SB	6
51	< 14,4	SR	1
52	29,4 - 46,9	S	3
53	47,0 - 63,0	AB	4
54	47,0 - 63,0	AB	4
55	> 80,6	SB	6
56	< 14,4	SR	1
57	29,4 - 46,9	S	3
58	29,4 - 46,9	S	3
59	47,0 - 63,0	AB	4
60	< 14,4	SR	1
61	63,1 - 80,6	B	5
62	< 14,4	SR	1

Lampiran 8. Lanjutan

Satuan Erosi	Kisaran Besarnya Erosi (ton/ha/th)	Klasifikasi Erosi	Harkat
63	29,4 - 46,9	S	3
64	14,5 - 29,3	R	2
65	47,0 - 63,0	AB	4
66	14,5 - 29,3	R	2
67	29,4 - 46,9	S	3
68	< 14,4	SR	1
69	47,0 - 63,0	AB	4
70	14,5 - 29,3	R	2
71	14,5 - 29,3	R	2
72	29,4 - 46,9	S	3
73	29,4 - 46,9	S	3
74	> 80,6	SB	6
75	47,0 - 63,0	AB	4
76	< 14,4	SR	1
77	< 14,4	SR	1
78	29,4 - 46,9	S	3
79	< 14,4	SR	1
80	< 14,4	SR	1
81	14,5 - 29,3	R	2
82	63,1 - 80,6	B	5
83	> 80,6	SB	6
84	29,4 - 46,9	S	3
85	14,5 - 29,3	R	2
86	29,4 - 46,9	S	3
87	29,4 - 46,9	S	3
88	29,4 - 46,9	S	3
89	> 80,6	SB	6

Sumber : Hasil kalkulasi peta R, K, LS, dan CP

Lampiran 9. Hasil Prediksi Erosi dengan USLE Melalui Pengamatan Faktor Erosi di Lapangan

Satuan Erosi	Erosivitas Hujan	Erodibilitas Tanah	Faktor LS	Faktor CP	Erosi (ton/ha/ta)	Klasifikasi Erosi	Harkat
1	1402	0,29	0,41	0,0004	0,07	SR	1
2	1402	0,41	0,40	0,3500	80,47	B	5
3	1402	0,40	0,68	0,1050	40,04	S	3
4	1402	0,33	1,12	0,0168	8,73	SR	1
5	1402	0,41	0,40	0,3500	80,47	B	5
6	1402	0,44	1,25	0,0004	0,31	SR	1
7	1402	0,62	0,35	0,1200	36,51	S	3
8	1402	0,44	1,22	0,0014	1,05	SR	1
9	2017	0,29	0,41	0,0004	0,10	SR	1
10	2017	0,41	0,40	0,3500	115,78	SB	6
11	2017	0,48	0,75	0,1200	87,13	SB	6
12	2017	0,33	1,12	0,1500	111,82	SB	6
13	2017	0,12	0,66	0,0004	0,06	SR	1
14	2017	0,33	1,12	0,0168	12,55	SR	1
15	2017	0,33	0,06	0,3500	13,98	SR	1
16	2369	0,41	0,40	0,0004	0,16	SR	1
17	2369	0,54	1,45	0,0004	0,74	SR	1
18	2369	0,33	1,12	0,0632	55,29	AB	4
19	2369	0,28	0,82	0,3500	190,37	SB	6
20	2369	0,31	1,66	0,3500	426,68	SB	6
21	2369	0,31	1,66	0,1050	128,00	SB	6
22	2369	0,44	1,25	0,0004	0,52	SR	1
23	2369	0,41	2,00	0,0004	0,78	SR	1
24	2369	0,23	0,87	0,0015	0,71	SR	1
25	2369	0,41	11,33	0,0004	4,40	SR	1

Lampiran 9. Lanjutan

Satuan Erosi	Erosivitas Hujan	Erodibilitas Tanah	Faktor LS	Faktor CP	Erosi (ton/ha/ta)	Klasifikasi Erosi	Harkat
26	2369	0,29	1,32	0,0630	57,13	AB	4
27	2369	0,24	13,94	0,0450	356,66	SB	6
28	2369	0,31	7,60	0,1200	669,76	SB	6
29	2369	0,25	18,27	0,0056	60,59	AB	4
30	2926	0,30	2,20	0,0015	2,90	SR	1
31	2926	0,27	4,60	0,1050	381,58	SB	6
32	2926	0,27	6,50	0,1050	539,19	SB	6
33	2926	0,42	8,19	0,0015	15,10	R	2
34	2926	0,25	0,98	0,1050	75,12	B	5

Sumber : Adnyana dkk. (1993)