

**KAJIAN PERUBAHAN
LAND USE
TERHADAP RESPON
HIDROLOGI**



universitas
MALIKUSSALEH

Dr. Ir. Halim Akbar, M.Si

**KAJIANPERUBAHAN
LAND USE
TERHADAP RESPON HIDROLOGI**

UNIMAL PRESS

Judul: **KAJIANPERUBAHAN LAND USE TERHADAP RESPON HIDROLOGI**
viii + 134 hal., 15 cm x 23 cm

Cetakan Pertama: Juni, 2016
Hak Cipta © dilindungi Undang-undang. *All Rights Reserved*

Penulis:
Dr. Ir. Halim Akbar, M.Si

Perancang Sampul:
Penata Letak: Eriyanto
Pracetak dan Produksi: **Unimal Press**

Penerbit:

UNIMAL PRESS

Unimal Press
Jl. Sulawesi No.1-2
Kampus Bukit Indah Lhokseumawe 24351
PO.Box. 141. Telp. 0645-41373. Fax. 0645-44450
Laman: www.unimal.ac.id/unimalpress.
Email: unimalpress@gmail.com



ISBN: **978-602-1373-60-6**

Dilarang keras memfotocopy atau memperbanyak sebahagian atau seluruh buku ini tanpa seizin tertulis dari Penerbit

Kata Pengantar

Daftar isi

Kata Pengantar	v
Daftar isi.....	vii
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Permasalahan.....	4
BAB II. SUMBERDAYA HUTAN.....	7
a. Penggundulan hutan.....	9
c. Alih fungsi hutan menjadi lahan perkebunan.....	10
d. Alih fungsi hutan menjadi daerah bangunan	10
2.1. Daerah Aliran Sungai (DAS).....	13
2.2. Dampak Alih Guna Lahan Hutan.....	16
BAB III. EROSI, ALIRAN PERMUKAAN DAN SEDIMENTASI	19
3.1. Erosi.....	19
3.2. Air Limpasan	29
3.3. Debit Air.....	31
3.4. Sedimentasi.....	43
BAB IV. PERUBAHAN LAND USE TERHADAP RESPON HIDROLOGI.....	55
4.1. Dampak alih guna lahan hutan terhadap erosi tanah dan limpasan permukaan (run off).....	56
4.1.1. Erosi dan Aliran Permukaan pada Lahan Pertanian Berbasis Tanaman Kopi.....	56
4.1.2. Erosi pada Berbagai Penggunaan Lahan Di DAS Citarum.....	61
4.1.3. Alih Guna Lahan Hutan Menjadi Lahan Pertanian : Sistem Kopi <i>Monokultur</i>	65
4.1.4. Erosi dan Limpasan Permukaan pada Lahan Tumpangsari Kopi dan Sengon	72
4.2. Dampak Alih Guna Lahan Hutan terhadap Debit Air	81
4.2.1. Pengaruh Perubahan Penggunaan Lahan Terhadap Debit dan Banjir Di Bagian Hilir DAS Kaligarang	81
4.2.2. Pengaruh Perubahan Tata Guna Lahan Terhadap Debit dan Banjir Di Daerah Aliran Sungai Banjaran.....	87

4.2.3.	Analisis Debit Sungai Akibat Alih Guna Lahan dan Aplikasi Model GenRiver pada DAS Way Besai, Sumberjaya.....	93
4.2.4.	Perubahan Penggunaan Lahan dan Pengaruhnya Terhadap Hidrologi Daerah Aliran Sungai.....	102
4.3.	Dampak alih guna lahan hutan terhadap sedimentasi	112
4.3.1.	Dampak Gangguan Tutupan Lahan Terhadap Sedimentasi pada Waduk Di DAS Wain, Balikpapan.....	112
4.3.2.	Aplikasi SIG dan Penginderaan Jauh Untuk Model Hidrologi ANSWERS dalam memprediksi Erosi dan Sedimentasi - Studi Kasus : DTA Cipopokol Sub DAS Cisadane Hulu Kabupaten Bogor).....	115
4.3.3.	Pengaruh Perubahan Tutupan Lahan Terhadap Sedimen dan Produksi Air Daerah Aliran Sungai.....	122
	DAFTAR PUSTAKA	127

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara agraris yang sedang merintis arah pembangunan nasionalnya menuju era industrialisasi, untuk itu peranan sumberdaya air sangatlah menentukan. Sejalan dengan pertumbuhan penduduk Indonesia yang terus meningkat, maka peranan sumberdaya air tersebut akan dirasakan semakin besar dalam kehidupan sehari-hari. Di lain pihak keberadaan berbagai sumberdaya alam termasuk air yang dapat memenuhi kebutuhan penduduk dan kegiatan pembangunan di berbagai sektor semakin mengkhawatirkan. Hal ini disebabkan oleh berbagai faktor seperti pencemaran, penggundulan hutan, kegiatan pertanian yang mengabaikan kelestarian ekosistem, dan berubahnya fungsi daerah-daerah penyimpanan (kantong) air. Lebih jauh lagi, beberapa kegiatan yang dilakukan berdampak pada meningkatnya erosi. Proses erosi ini tidak hanya menurunkan produktifitas lahan pada wilayah *onsite* tetapi juga meningkatkan sedimen pada wilayah *offsite*.

Sudah menjadi anggapan umum bahwa hutan sangatlah diperlukan bagi pengaturan aliran air sungai dan mengurangi kecepatan aliran permukaan. FAO (2003) mengatakan bahwa hutan adalah pengguna air yang sangat besar. Sejumlah besar air hujan (35%) biasanya terhalang oleh kanopi pada hutan tropis dan menguap kembali ke dalam atmosfer tanpa memberikan sumbangan apa-apa terhadap cadangan air tanah. Sebagian besar lainnya yang menyerap ke dalam tanah digunakan oleh pepohonan itu sendiri. Ini tentunya mematahkan teori bahwa penanaman kembali hutan akan meningkatkan aliran air di musim kemarau (Hamilton dan Pearce 1987). Satu hal yang pasti adalah bahwa mengganti tutupan lahan hutan dengan pemanfaatan lain hampir selalu meningkatkan kecepatan aliran dan jumlah aliran sungai. Kecepatan aliran dan pola aliran sungai perlahan-lahan akan kembali kepada kondisi awalnya bila suatu wilayah dibiarkan kembali menjadi hutan. Namun demikian, mengalihgunakan hutan menjadi padang rumput atau dengan kerapatan vegetasi $>2 \text{ m}^3/\text{ha}$ biasanya secara permanen akan meningkatkan kecepatan aliran air secara total.

Hutan juga selalu dikaitkan dengan fungsi positif terhadap tata air dalam ekosistem DAS (Noordwijk *et al.*, 2003). Fungsi hutan dalam ekosistem DAS perlu dipandang dari tiga aspek berbeda, yaitu pohon, tanah dan landscape. Vegetasi hutan berfungsi mengintersepsi air hujan, namun laju transpirasi yang tinggi mengakibatkan penggunaan air yang lebih tinggi dibandingkan dengan jenis vegetasi non-irigasi lainnya. Tanah hutan memiliki lapisan serasah yang tebal, kandungan bahan organik tanah, dan jumlah makroporositas yang cukup tinggi sehingga laju infiltrasi air lebih tinggi dibandingkan dengan lahan pertanian (Hairiah *et al.*, 2004). Dari sisi landscape, hutan tidak peka terhadap erosi karena memiliki *filter* berupa serasah pada lapisan tanahnya. Hutan dengan karakteristik tersebut di atas sering disebut mampu meredam tingginya debit sungai pada saat musim hujan dan menjaga kestabilan aliran air pada musim kemarau. Namun prasyarat penting untuk memiliki sifat tersebut adalah jika tanah hutan cukup dalam ($\pm 3\text{m}$). Dalam kondisi ini hutan akan mampu berpengaruh secara efektif terhadap berbagai aspek tata air (Agus *et al.*, 2002).

Perubahan penggunaan lahan dari berpenutup vegetasi (*vegetated land*) menjadi berpenutup non vegetasi (*non vegetated land*) pada daerah aliran sungai (DAS) belakangan ini cenderung meningkat intensitasnya menurut ruang dan waktu, hal ini sebagai konsekuensi logis dari aktifitas pembangunan dan tingginya laju pertumbuhan penduduk. Tingginya peningkatan intensitas

perubahan alih fungsi lahan tersebut berdampak negatif terhadap kondisi hidrologis DAS, yaitu meningkatnya debit puncak, fluktuasi debit antar musim, koefisien aliran permukaan, serta banjir dan kekeringan.

Akhir-akhir ini telah dikembangkan sekumpulan kriteria fungsi DAS yang difokuskan pada dampak alih guna lahan terhadap fungsi DAS pada kondisi lokal spesifik (iklim dan kondisi alamnya).

Persepsi publik dan kebijakan umum tentang perlindungan DAS menginginkan adanya suatu kondisi (hutan) di daerah hulu dan mengasosiasikan setiap kejadian banjir dengan hilangnya tutupan hutan di perbukitan dan pegunungan.

Luas lahan hutan yang harus dipertahankan dalam suatu kesatuan Daerah Aliran Sungai (DAS) agar dapat menjamin kelestarian sumber air, hasil-hasil kayu dan bukan kayu, serta fungsi lainnya telah menjadi sumber perdebatan. Masalah ini cukup kompleks mengingat berbagai kepentingan atas tataguna lahan di DAS antar berbagai sektor serta untuk memenuhi kebutuhan masyarakat. Fungsi ekologis hutan sangat penting terutama untuk menjaga erosi serta mengatur tata air khususnya di sungai-sungai.

Hutan umumnya dikaitkan dengan fungsi positif tata air dalam suatu ekosistem DAS dan semua alih guna lahan dianggap akan berdampak negatif terhadap kuantitas dan kualitas air bagi masyarakat di daerah hilir.

Hasil studi di Himalaya mengindikasikan bahwa peningkatan kapasitas penyerapan lahan hutan dibandingkan dengan lahan non hutan tidak cukup untuk mempengaruhi episode banjir besar di hilir. Tetapi, faktor utama yang mempengaruhi besarnya banjir dalam suatu episode hujan besar adalah (i) geomorfologi suatu wilayah dan (ii) hujan yang turun sebelumnya .

Di Indonesia perdebatan kebijakan dan publik nampaknya belum banyak berubah sejak De Haan (1936) yang menulis isu perlindungan hutan (terlalu banyak penekanan pada perbedaan antara hutan dan non hutan). Orang sering kali beranggapan bahwa asalkan persentase tertentu dari lahan ditutupi hutan lindung, pelaku pertanian di luar areal ini dapat melakukan apa saja yang mereka inginkan. Perbedaan perilaku hidrologi antara suatu hutan pegunungan dan kebun karet, tentunya lebih kecil dari pada perbedaan perilaku antara kebun karet dengan lahan pertanian tanaman semusim.

Debat memanas juga terjadi karena pernyataan teori Heringa (1939) yang mengatakan "hutan bersifat seperti busa (*sponge*)", ia mengisap air dari tanah di musim hujan, melepaskannya sedikit-demi sedikit di musim kemarau ketika terjadi kekurangan air.

Selanjutnya Roessel (1939) mengkritik penggunaan argumen hidrologi untuk menjustifikasi penghutanan kembali. Dia mengemukakan teori infiltrasi yang menekankan bahwa perkolasi air melalui lapisan bawah tanah (*sub soil*) menghasilkan mata air, bukan hutan yang menghasilkan air.

Coster (1938) yang bekerja pada Lembaga Penelitian Hutan di Bogor mengemukakan data kuantitatif dan memberikan suatu sintesis bahwa tumbuhan menentukan pengisian kembali busa tersebut, tetapi sebagian besar air berada pada lapisan bawah tanah, bukan semata-mata di dalam hutan.

Menurunnya tutupan hutan akan menyebabkan berkurangnya pasokan air selama musim kemarau. Oleh karena itu, suatu keseimbangan sangat diperlukan antara kondisi hutan dan output dari lahan pertanian. Sebagai konsekuensinya, maka harus ditentukan suatu persentase hutan minimum untuk setiap daerah tangkapan air.

1.2. Permasalahan

Salah satu fungsi utama dari hutan adalah sebagai penyerap dan pengatur tata air. Dengan meningkatnya laju kerusakan hutan, terutama kawasan hutan yang berada didalam ekosistem DAS menyebabkan kemampuan DAS untuk menyerap air menjadi sangat berkurang. Hal ini menyebabkan seringnya terjadi banjir di musim penghujan dan kekeringan di musim kemarau. Bahkan kekeringan yang berkepanjangan bisa menyebabkan penyimpangan iklim.

Menurut data Statistik Lingkungan Hidup Indonesia (2001), menunjukkan dalam selang waktu 1994–1999 pengurangan penggunaan lahan untuk hutan di Indonesia mencapai 6 juta km², dimana pengurangan penggunaan lahan terbesar untuk hutan terjadi di pulau Sumatera yaitu sekitar 3 juta km², diikuti Sulawesi sebesar 1,2 juta km², Kalimantan sebesar 886 ribu km², dan Maluku-Papua sebesar 679 ribu km². Sementara itu penambahan lahan untuk kegiatan non-pertanian (perumahan, industri, dan lain-lain) justru meningkat di mana penambahan terbesar terjadi di pulau Sumatera dan Jawa masing-masing sebesar 270 ribu km² dan 222 ribu km².

Selanjutnya menurut Nurlambang (2008 *dalam* Marwah, 2008) dikatakan bahwa laju kerusakan lahan di Indonesia berkaitan dengan : 1) diberlakukannya undang-undang otonomi daerah dan dampak krisis ekonomi yang belum pulih serta kondisi status sosial ekonomi di daerah yang bersangkutan, 2) adanya kecenderungan masyarakat yang kembali bertumpu pada sektor primer dengan tingkat pemanfaatan yang lebih intensif, dan 3) perubahan pola status sosial ekonomi untuk memperoleh pendapatan daerah yang lebih besar, sehingga terjadi eksploitasi terhadap sumberdaya lahan yang berlebihan.

Melihat permasalahan di atas, maka kondisi DAS di berbagai daerah cenderung memburuk dan tatanan keseimbangannya dari tahun ke tahun semakin memprihatinkan, dan bila pengelolaan yang tidak sesuai tersebut tidak dibenahi, maka peningkatan luas lahan kritis akan terus bertambah.

Informasi arah kecenderungan perubahan penggunaan lahan serta keterkaitannya dengan perubahan karakteristik hidrologis DAS akan membantu para pengambil kebijakan dalam merumuskan strategi dan perencanaan pengelolaan DAS yang tepat, sehingga resiko yang mungkin terjadi dapat diminimalkan.

Agar analisis perubahan karakteristik hidrologis suatu DAS dapat memberikan informasi yang tepat dan akurat, untuk itu diperlukan data dengan kualitas yang baik yang didapatkan dari hasil pengukuran menggunakan instrumentasi yang memadai serta merepresentasikan kondisi DAS yang aktual.



BAB II

SUMBERDAYA HUTAN

Hutan merupakan salah satu elemen penting dalam suatu DAS, karena berbagai fungsi dan hubungannya dengan faktor-faktor lingkungan lainnya. Oleh karena itu kerusakan hutan secara langsung akan memberikan pengaruh terhadap kondisi DAS.

Salah satu fungsi utama dari hutan adalah sebagai penyerap dan pengatur tata air. Dengan meningkatnya laju kerusakan hutan, terutama kawasan hutan yang berada di ekosistem DAS menyebabkan kemampuan DAS untuk menyerap air menjadi sangat berkurang. Hal ini menyebabkan seringnya terjadi banjir di musim penghujan dan kekeringan di musim kemarau.

Kondisi hutan, dilihat dari penutupan lahan/vegetasi, mengalami perubahan yang cepat dan dinamis. Banyak faktor yang mengakibatkan perubahan tersebut antara lain penambahan penduduk dan pembangunan diluar sektor kehutanan yang sangat pesat memberikan pengaruh besar terhadap meningkatnya kebutuhan akan lahan dan produk-produk dari hutan. Kondisi demikian diperparah dengan adanya perambahan hutan dan terjadinya kebakaran hutan yang mengakibatkan semakin luasnya kerusakan hutan.

Menurut Haeruman (1989), kerusakan hutan diperkirakan seluas 900 ribu hektar setiap tahunnya yang disebabkan oleh kegiatan perluasan perkebunan (500 ribu ha/tahun), kegiatan proyek-proyek pembangunan (250 ribu ha/tahun), kegiatan logging (80 ribu ha/tahun) dan kebakaran (70 ribu ha/tahun).

Data selama 12 tahun (1985-1997) angka degradasi dan deforestasi untuk pulau Sumatera, Kalimantan dan Sulawesi adalah 1,6 juta ha/tahun sebagai akibat penebangan liar, pencurian kayu, perambahan hutan, kebakaran hutan, lahan dan kebun serta sistem pengelolaan hutan yang kurang tepat. Deforestasi dan degradasi hutan diperparah dengan terjadinya kebakaran hutan pada tahun 1997 di Pulau Sumatera dan Kalimantan, dengan kebakaran terbesar terjadi di Kalimantan Timur hingga mencapai \pm 3,2 juta ha (Badan Planologi Kehutanan dan Perkebunan, 1998). Dari hasil perhitungan untuk pulau Sumatera, Kalimantan dan Sulawesi, diperkirakan laju deforestasi menjelang tahun 2000 telah melebihi angka 2,5 juta ha/tahun. Forest Watch Indonesia (2001) lebih lanjut mengemukakan bahwa laju kehilangan hutan terus meningkat, dimana pada tahun 1980-an laju kehilangan hutan di Indonesia rata-rata sekitar 1 juta ha/tahun dan pada tahun 1990-an meningkat menjadi sekitar 1,7 juta ha/tahun, sedangkan pada periode tahun 1997-2000 kerusakan hutan semakin meningkat menjadi 3,8 juta ha/tahun (Badan Planologi Departemen Kehutanan RI, 2003). Meskipun angka-angka tersebut masih diperdebatkan kebenarannya, tetapi kecenderungan tersebut perlu diwaspadai mengingat kebutuhan kayu terus meningkat dan kebakaran hutan menjadi rutin terjadi. Gambaran umum kondisi kerusakan hutan menunjukkan bahwa dari 105 juta ha kawasan hutan di Indonesia, 57,7 juta ha (55%) diantaranya mengalami kerusakan.

Data dari FAO dilaporkan bahwa dari 44 negara di dunia yang secara kolektif memiliki sekitar 90% hutan dunia, Indonesia merupakan pemegang rekor tercepat dalam penghancuran hutan, dilanjutkan dengan negara Zimbabwe 1,7 % per tahun (rata-rata 313.000 ha/tahun) dari luas 17.540.000 ha hutan yang tersisa, dan disusul Myanmar di urutan ketiga dengan laju pengrusakan hutan 1,4 % per tahun (rata-rata 466.000 ha/tahun) dari total luas hutan 32.222.000 ha pada tahun 2005 (Anonymos, 2007).

Selanjutnya Dirjen RLPS (2007), menyebutkan saat ini di Indonesia luas lahan kritis/ terdegradasi dikawasan budidaya di luar kawasan hutan seluas 41 juta ha yang terdiri dari potensial kritis seluas 14 juta ha, agak kritis seluas 16 juta ha, kritis seluas 9 juta ha dan sangat kritis seluas 2 juta ha.

Pengrusakan lingkungan di Indonesia terus berlanjut dan menunjukkan dampaknya pada Daerah Aliran Sungai (DAS). Menurut Kementerian Negara Lingkungan Hidup, puluhan daerah aliran sungai (DAS) masuk kategori kritis. Gambaran kerusakan DAS di Indonesia tercermin dari banyaknya jumlah DAS prioritas. Pada tahun 1984 terdapat 22 DAS super prioritas (Surat keputusan bersama tiga menteri, Menteri Dalam Negeri, Menteri Kehutanan, dan Menteri Pekerjaan Umum No: 19 Tahun 1984 - No: 059/Kpts-II/1984 - No: 124/Kpts/ 1984 tanggal 4 April 1984, diacu *dalam* Arsyad 2000). Tahun 1999 terdapat 62 DAS Prioritas I, 232 DAS Prioritas II dan 178 DAS Prioritas III (Ditjen RRL, 1999). Selanjutnya tahun 2004 jumlah DAS prioritas I meningkat menjadi 65 DAS (Ditjen Sumberdaya Air, 2004). Hal ini menandakan bahwa beberapa parameter daerah aliran sungai itu sudah di bawah standar. Beberapa parameter tersebut di antaranya tutupan lahan di sekitar DAS, sedimentasi, kualitas, kuantitas, dan kontinuitas air sepanjang tahunnya. Hal inilah yang mengakibatkan setiap tahunnya jumlah DAS kritis terus bertambah.

Luas lahan hutan yang harus dipertahankan dalam suatu kesatuan Daerah Aliran Sungai (DAS) agar dapat menjamin kelestarian sumber air terus menjadi sumber perdebatan. Masalah ini cukup kompleks mengingat berbagai kepentingan atas tataguna lahan di DAS antar berbagai sektor serta untuk memenuhi kebutuhan masyarakat. Fungsi ekologis hutan sangat penting terutama untuk menjaga erosi serta mengatur tata air khususnya di sungai-sungai.

Beberapa bentuk kerusakan hutan dan pengaruhnya pada aliran sungai, khususnya kualitas air, diantaranya :

a. Penggundulan hutan

Fungsi utama hutan dalam kaitannya dengan hidrologi adalah sebagai penahan tanah yang mempunyai kelerengan tinggi, sehingga air hujan yang jatuh di daerah tersebut tertahan dan meresap ke dalam tanah untuk selanjutnya akan menjadi air tanah. Air tanah di daerah hulu merupakan cadangan air bagi sumber air sungai. Oleh karena itu hutan yang terjaga dengan baik akan memberikan manfaat berupa ketersediaan sumber-sumber air pada musim kemarau. Sebaliknya hutan yang gundul akan menjadi malapetaka bagi penduduk di hulu maupun di hilir. Pada musim hujan, air hujan yang jatuh di atas lahan yang gundul akan menggerus tanah yang kemiringannya tinggi. Sebagian besar air hujan akan menjadi aliran permukaan dan sedikit sekali yang terinfiltrasi. Akibatnya adalah

terjadi tanah longsor dan atau banjir bandang yang membawa kandungan lumpur yang akhirnya akan terjadi sedimentasi di daerah hilir. Pada musim kemarau cadangan air tanah tidak mencukupi, sehingga kemungkinan besar akan terjadi kekurangan air pada daerah hilir.

b. Alih fungsi hutan menjadi lahan pertanian

Risiko penebangan hutan untuk dijadikan lahan pertanian sama besarnya dengan penggundulan hutan. Penurunan kualitas air sungai dapat terjadi akibat erosi. Selain akan meningkatnya kandungan zat padat tersuspensi (*suspended solid*) dalam air sungai sebagai akibat dari sedimentasi, juga akan diikuti oleh meningkatnya kesuburan air dengan meningkatnya kandungan hara dalam air sungai. Kebanyakan kawasan hutan yang diubah menjadi lahan pertanian mempunyai kemiringan di atas 25%, sehingga bila tidak memperhatikan faktor konservasi tanah, seperti pengaturan pola tanam, pembuatan teras dan lain-lain, maka akan berakibat masuknya pupuk dan pestisida kedalam air sungai karena terbawa oleh air limpasan (*run off*).

c. Alih fungsi hutan menjadi lahan perkebunan

Penebangan hutan untuk dijadikan lahan perkebunan belum dapat dikatakan aman. Tanaman perkebunan mempunyai sifat yang berbeda dengan tanaman hutan. Kekuatan tanaman perkebunan dalam menahan air hujan tidak sebesar kekuatan tanaman hutan yang biasanya telah berumur puluhan tahun dengan akar yang menghujam jauh ke dalam tanah. Oleh karena itu risiko tanah longsor maupun banjir lumpur masih menjadi ancaman pada daerah ini. Pengaruh pada kualitas air sungai hampir sama dengan pembukaan lahan pertanian.

d. Alih fungsi hutan menjadi daerah bangunan

Pendirian bangunan di daerah tangkapan air, misalnya permukiman, industri, hotel dan lain-lain, akan menurunkan kemampuan air menginfiltrasi ke dalam air tanah. Akibatnya adalah limpasan air permukaan menjadi besar dan menyebabkan banjir di daerah hilir. Kasus ini telah terjadi di Bogor (hulu) dan Jakarta (hilir). Risiko pengalihan hutan menjadi daerah bangunan lebih besar dari

pada penggundulan hutan karena infiltrasi lebih kecil dan beban massa lebih besar, sehingga kemungkinan longsor lebih besar. Pengaruh pada kualitas air sama dengan penggundulan hutan.

Kawasan hulu mempunyai peran yang sangat penting, disamping sebagai tempat penyedia air untuk dialirkan ke daerah hilirnya bagi kepentingan pertanian, industri dan pemukiman, juga berperan sebagai pemelihara keseimbangan ekologis untuk sistem penunjang kehidupan. Dalam terminologi ekonomi, daerah hulu merupakan faktor produksi dominan yang sering mengalami konflik kepentingan penggunaan lahan untuk kegiatan pertanian, pariwisata, pertambangan, pemukiman dan lain-lain. Kemampuan pemanfaatan lahan hulu sangat terbatas, sehingga kesalahan dalam pemanfaatan akan berdampak negatif pada daerah hilir. Konservasi daerah hulu perlu mencakup aspek-aspek yang berhubungan dengan produksi air dan konservasi itu sendiri (Supriadi, 2000).

Secara ekologis, hal tersebut berkaitan dengan ekosistem tangkapan air yang merupakan rangkaian proses alami suatu siklus hidrologi yang memproduksi air permukaan dalam bentuk mata air, aliran air dan sungai.

Menurut Sugandhy (1999), jika dihubungkan dengan penataan ruang wilayah, maka alokasi ruang dalam rangka menjaga dan memenuhi keberadaan air, kawasan resapan air, kawasan pengamanan sumber air permukaan, kawasan pengamanan mata air, maka minimal 30 % dari luas wilayah harus diupayakan adanya tutupan tegakan pohon yang dapat berupa hutan lindung, hutan produksi atau tanaman keras, hutan wisata, dan lain-lain. Ini juga ditegaskan dalam Undang - Undang RI No 41 tahun 1999 dimana 30% dari total luas DAS harus berupa kawasan hutan.

Hasil penelitian Deutsch and Busby (2000) menunjukkan bahwa total *suspended solid* (TSS) dapat meningkat secara tiba-tiba apabila suatu sub daerah aliran sungai mengalami penurunan penutupan hutan dibawah 30% dan apabila terjadi pembukaan lahan pertanian lebih dari 50%.

Laporan dari Lingkungan Hidup Indonesia (2002) yang dikeluarkan Kementrian Lingkungan Hidup menyatakan bahwa penggunaan lahan di daerah tangkapan air (*catchment area*) sangat mempengaruhi ketersediaan air. Hutan, danau, rawa dan situ merupakan tempat yang mempunyai fungsi untuk menahan dan menyerap air hujan sehingga cadangan air relatif akan stabil dari waktu ke waktu.

Tutupan lahan oleh pohon, baik berupa hutan alami, atau regenerasi alami tanaman di hutan, pohon yang dibudidayakan, pohon sebagai tanaman pagar, atau pohon monokultur (misalnya hutan tanaman industri) dapat mempengaruhi aliran air dalam berbagai tahap, yaitu :

- **Intersepsi.**

Selama kejadian hujan, tajuk pohon dapat mengintersepsi dan menyimpan sejumlah air hujan dalam bentuk lapisan tipis air (*water film*) pada permukaan daun dan batang yang selanjutnya akan mengalami evaporasi sebelum jatuh ke tanah. Banyaknya air yang dapat diintersepsi dan dievaporasi tergantung pada indeks luas daun (*leaf area index*), karakteristik permukaan daun, dan karakteristik hujan. Intersepsi merupakan komponen penting jika jumlah curah hujan rendah, tetapi dapat diabaikan jika curah hujan tinggi. Apabila curah hujan tinggi, peran intersepsi pohon sangat penting dalam kaitannya dengan pengurangan banjir.

- **Perlindungan agregat tanah.**

Vegetasi dan lapisan serasah melindungi permukaan tanah dari pukulan langsung tetesan air hujan yang dapat menghancurkan agregat tanah, sehingga terjadi pemadatan tanah. Hancuran partikel tanah dapat menyebabkan penyumbatan pori tanah makro sehingga menghambat infiltrasi air tanah, akibatnya limpasan permukaan akan meningkat. Peran lapisan serasah dalam melindungi permukaan tanah sangat dipengaruhi oleh ketahanannya terhadap pelapukan. Serasah yang berkualitas tinggi (mengandung hara, terutama N tinggi) akan mudah melapuk sehingga fungsi penutupan permukaan tanah tidak bertahan lama.

- **Infiltrasi.**

Proses infiltrasi tergantung pada struktur tanah pada lapisan permukaan dan berbagai lapisan dalam profil tanah. Struktur tanah juga dipengaruhi oleh aktivitas biota yang sumber energinya tergantung kepada bahan organik (serasah di permukaan, eksudasi organik oleh akar, dan akar-akar yang mati). Ketersediaan makanan bagi biota (terutama cacing tanah), penting untuk mengantisipasi adanya proses peluruhan dan penyumbatan pori makro tanah.

- Serapan air.

Sepanjang tahun tanaman menyerap air dari berbagai lapisan tanah untuk mendukung proses transpirasi pada permukaan daun. Faktor - faktor yang mempengaruhi jumlah serapan air oleh pohon adalah fenologi pohon, distribusi akar, dan respon fisiologi pohon terhadap cekaman parsial air tersedia. Serapan air oleh pohon antara kejadian hujan akan mempengaruhi jumlah air yang dapat disimpan di dalam tanah dari kejadian hujan berikutnya, sehingga selanjutnya akan mempengaruhi proses infiltrasi dan aliran permukaan. Serapan air pada musim kemarau, khususnya dari lapisan tanah bawah akan mempengaruhi jumlah air tersedia untuk aliran lambat (*slow flow*).

- Drainase lansekap.

Besarnya drainase suatu lansekap (bentang lahan) dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain kekasaran permukaan tanah, relief permukaan tanah yang memungkinkan air tinggal di permukaan tanah lebih lama sehingga mendorong terjadinya infiltrasi, tipe saluran yang terbentuk akibat aliran permukaan yang dapat memicu terjadinya aliran cepat air tanah (*quick flow*).

Pada hutan alami, perlintasan hewan biasanya meninggalkan jalan setapak yang merupakan pemicu pertama terbentuknya jalur aliran permukaan walaupun tingkatannya masih belum terlalu membahayakan. Jalan setapak yang merupakan lintasan kendaraan ringan dan berat selama penebangan pohon di hutan cenderung meningkatkan intensitas aliran permukaan dan penghanyutan sedimen ke sungai.

2.1. Daerah Aliran Sungai (DAS)

Daerah aliran sungai (DAS) didefinisikan sebagai suatu wilayah yang dibatasi oleh topografi secara alami, sehingga setiap air yang jatuh dalam daerah tersebut akan mengalir melalui satu titik pengukuran yang sama (*outlet*) (Sinukaban, 2004). Dalam Bahasa Inggris pengertian DAS sering diidentikkan dengan *watershed*, *catchment area* atau *river basin*.

Menurut Sinukaban *et al.*, (2001) setiap ada kegiatan pada suatu DAS maka kegiatan tersebut dapat mempengaruhi aliran air di bagian hilir baik dari segi kuantitas maupun kualitas. Penebangan hutan secara sembarangan di bagian hulu suatu DAS dapat mengganggu distribusi aliran sungai di bagian hilir. Disamping itu

kualitas air sungai pun akan menurun, karena sedimen yang terangkut akibat meningkatnya erosi cukup banyak. Perubahan penggunaan lahan atau penerapan agroteknologi yang tidak cocok pun dapat mempengaruhi kualitas dan kuantitas air yang mengalir ke bagian hilir.

Daerah aliran sungai merupakan penghubung antara kawasan hulu dengan kawasan hilir, sehingga pencemaran di kawasan hulu akan berdampak pada kawasan hilir. DAS meliputi semua komponen lahan, air dan sumberdaya biotik yang merupakan suatu unit ekologi dan mempunyai keterkaitan antar komponen. Dalam suatu ekosistem DAS terjadi berbagai proses interaksi antar berbagai komponen yaitu tanah, air, vegetasi dan manusia sebagai pelaku pemanfaat sumberdaya alam tersebut. Untuk itu setiap aktifitas perencanaan dan pelaksanaan kegiatan di dalam suatu DAS harus mengacu pada suatu tujuan, yaitu menjaga kelestarian lingkungan untuk kemanfaatan bagi generasi sekarang dan generasi mendatang. Kelestarian lingkungan dalam sistem DAS mencakup kelestarian di hulu hingga hilir, artinya hutan, daerah tangkapan air dan sistem sungai berfungsi dengan baik dan dapat dimanfaatkan untuk kesejahteraan masyarakat.

DAS di beberapa tempat di Indonesia memikul beban amat berat sehubungan dengan tingkat kepadatan penduduk yang sangat tinggi dan pemanfaatan sumberdaya alamnya yang intensif sehingga terdapat indikasi belakangan ini bahwa kondisi DAS semakin menurun dengan indikasi meningkatnya kejadian tanah longsor, erosi dan sedimentasi, banjir, dan kekeringan. Disisi lain tuntutan terhadap kemampuannya dalam menunjang sistem kehidupan, baik masyarakat di bagian hulu maupun hilir demikian besarnya.

Sistem DAS mempunyai arti penting dalam hubungan ketergantungan antara hulu dan hilir. Perubahan komponen DAS di daerah hulu akan mempengaruhi komponen DAS pada daerah hilir. Kerusakan hutan di hulu akan berpengaruh pada kondisi sungai di hulu hingga hilir. Keterkaitan yang kuat antara hulu dan hilir ini melahirkan gagasan untuk mengembangkan suatu indikator yang mampu menunjukkan kondisi DAS. Indikator ini harus dengan mudah dapat dilihat oleh masyarakat luas sehingga dapat digunakan sebagai instrumen pengawasan terhadap pelaksanaan pembangunan di wilayah DAS. Salah satu indikator yang dapat dikembangkan adalah indikator kualitas air di sungai. Dengan melihat kondisi kualitas air sungai, dapat diketahui kondisi hulu sungai, seperti kondisi hutan dan daerah sekitar sungai di hulu.

Tidak optimalnya kondisi DAS antara lain disebabkan tidak adanya ketidakterpaduan antar sektor dan antar wilayah dalam pengelolaan sumberdaya alam dan lingkungan DAS tersebut. Dengan kata lain, masing-masing berjalan sendiri-sendiri dengan tujuan yang kadangkala bertolak belakang. Sulitnya koordinasi dan sinkronisasi tersebut lebih terasa dengan adanya otonomi daerah dalam pemerintahan dan pembangunan dimana daerah berlomba memacu meningkatkan Pendapatan Asli Daerah (PAD) dengan memanfaatkan sumberdaya alam yang ada.

Permasalahan ego-sektoral dan ego-kedaerahan ini akan menjadi sangat kompleks pada DAS yang lintas kabupaten/kota dan lintas propinsi. Oleh karena itu, dalam rangka memperbaiki kinerja pembangunan dalam DAS maka perlu dilakukan pengelolaan DAS secara terpadu.

Di dalam pengelolaan DAS, DAS harus dipandang sebagai satu kesatuan antara wilayah hulu dan hilir, hal ini dikarenakan adanya interdependensi. DAS bagian hulu merupakan daerah *recharge* dan merupakan sumber air bagi daerah di bawahnya, untuk itu diperlukan perhatian yang cukup terhadap wilayah ini. Berkaitan dengan fungsi dan karakteristik DAS bagian hulu, maka pengelolaan hulu DAS lebih dimanifestasikan dengan pengelolaan hutan. Apabila hutan dibagian hulu rusak, maka fungsi hidrologis DAS juga dapat dipastikan akan rusak.

Pengelolaan DAS sebagai bagian integral dari pembangunan wilayah, sampai saat ini masih menghadapi berbagai masalah diantaranya : erosi dan sedimentasi, banjir dan kekeringan, pencemaran air sungai, pengelolaan tidak terpadu, koordinasi yang lemah, institusi belum mantap, konflik antar sektor/kegiatan dan peraturan yang tumpang tindih (Dephut 2001; Brooks *et al.* 1990; dan Easter *et al.* 1986 dalam Banuwa, 2008). Kondisi inilah yang menyebabkan kerusakan DAS setiap tahun semakin meningkat jumlahnya, meskipun pengelolaan DAS terus dilakukan.

Kompleksnya permasalahan dalam pengelolaan DAS tersebut di atas mengharuskan berbagai pihak yang terlibat (*stakeholders*) untuk melakukan langkah-langkah strategis dalam pengelolaan DAS secara terpadu

Adapun sasaran pengelolaan DAS yang ingin dicapai pada dasarnya adalah:

- terciptanya kondisi hidrologis DAS yang optimal.
- meningkatnya produktivitas lahan yang diikuti oleh perbaikan kesejahteraan masyarakat.

- tertata dan berkembangnya kelembagaan formal dan informal masyarakat dalam penyelenggaraan pengelolaan DAS dan konservasi tanah.
- meningkatnya kesadaran dan partisipasi masyarakat dalam penyelenggaraan pengelolaan DAS secara berkelanjutan.
- terwujudnya pembangunan yang berkelanjutan, berwawasan lingkungan dan berkeadilan

Keberhasilan pengelolaan DAS diindikasikan dengan memperkecil fluktuasi debit, beban sedimen sungai, serta terjaganya kelestarian sumber-sumber air. Oleh karena itu, usaha-usaha konservasi tanah dan air perlu dilakukan secara terintegrasi dengan usaha pengembangan sumber-sumber air, dan kedua upaya tersebut harus dilaksanakan secara simultan.

Sinukaban (1994) menyatakan bahwa tujuan pengelolaan DAS adalah keberlanjutan (*sustainability*) yang diukur dari pendapatan, produksi, teknologi, dan erosi. Untuk itu diperlukan suatu strategi pengelolaan DAS yang komprehensif dan terpadu sehingga ketersediaan air dimusim kemarau akan terjaga dan pada musim hujan tidak terjadi banjir. Untuk menyusun strategi pengelolaan DAS yang baik (komprehensif dan terpadu) diperlukan informasi/data yang akurat mengenai karakteristik fisik DAS (bio geofisik) serta kondisi sosial ekonomi dan budaya masyarakat yang tinggal di kawasan tersebut.

2.2. Dampak Alih Guna Lahan Hutan

Didaerah tropis, alih guna lahan hutan menjadi lahan pertanian merupakan suatu hal yang umum terjadi, hal ini dikarenakan sebagian besar penduduknya bermata pencaharian sebagai petani. Isu degradasi hutan tropis di Indonesia sampai saat ini masih terus berlangsung dan tidak terkendalikan bahkan sampai mengundang kontroversi dunia Internasional. Laju degradasi hutan rata-rata di Indonesia sebesar 1.871.000 ha/tahun atau sekitar 2% per tahun dari luas hutan yang tersisa 88.495.000 ha pada tahun 2005. Laju deforestasi di Indonesia rata-rata 51 km²/hari (setara 300 lapangan sepakbola per jam), merupakan rekor tertinggi dibanding dengan negara lainnya (Monde, 2008).

Konversi lahan hutan menjadi lahan pertanian diawali dengan penebangan vegetasi hutan yaitu tanaman kayu-kayuan yang pada mulanya menutup permukaan tanah dengan rapat. Dampak

yang ditumbulkan dari aktifitas ini adalah permukaan tanah menjadi terbuka dan mendapat pengaruh langsung dari curah hujan.

Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa dampak negatif dari pembukaan lahan hutan adalah terjadinya perubahan *water balance*. Contoh analisis data hidrologi untuk sub-DAS Way Besay serta kecenderungan curah hujan total tahunan dari tahun 1975 sampai tahun 1998 menunjukkan bahwa dengan semakin menyempitnya luas hutan dari tahun ke tahun, jumlah hari dalam setahun yang debit airnya melebihi kriteria tertentu (15, 25 dan 35 m³/detik) makin meningkat, walaupun curah hujan tahunan cenderung menurun. Ini berarti bahwa debit sungai meningkat dengan berkurangnya luas hutan. Peningkatan ini dapat dihubungkan dengan berkurangnya intersepsi tajuk pohon-pohonan, sehingga makin banyak air hujan yang jatuh langsung ke permukaan tanah, berkurangnya infiltrasi air ke dalam tanah karena kerusakan struktur tanah lapisan atas pada lahan bekas hutan. Dalam keadaan ekstrim, apabila hutan dibuka pada areal yang luas, akan meningkatkan kemungkinan terjadinya banjir.

Berkurangnya penutupan lahan, baik oleh tajuk maupun serasah tanaman akan mengakibatkan terjadinya pengrusakan oleh tetesan hujan terhadap tanah, sehingga tingkat bahaya erosi menjadi lebih tinggi. Menurut Roose (1986 dalam Monde, 2008) hasil penelitian di DAS kecil di Guyana Perancis terdapat hubungan antara erosi dengan penebangan hutan, dimana erosi akan meningkat secara drastis setelah dilakukannya penebangan hutan. Hasil penelitian yang dilakukan pada skala petak kecil juga menunjukkan bahwa penebangan vegetasi alami telah menyebabkan terjadinya peningkatan koefisien runoff 25-100 kali, sementara itu erosi meningkat pula sampai lebih dari 10 kali lipat.

Selanjutnya menurut Lal (1994), permukaan tanah yang terbuka akan menyebabkan terjadinya fluktuasi suhu dan regim kelembaban tanah menjadi lebih besar. Hal ini menyebabkan terjadinya percepatan penurunan kadar bahan organik tanah.

Dampak lain dari pembukaan lahan hutan adalah terjadinya peningkatan pelepasan karbon (*carbon release*), sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan kadar CO₂ di atmosfer. Pembukaan hutan juga dapat menyebabkan perubahan iklim mikro, diantaranya ditunjukkan oleh perbedaan nilai kelembaban relatif (Palm *et al.*, 1986)



BAB III

EROSI, ALIRAN PERMUKAAN DAN SEDIMENTASI

3.1. Erosi

Istilah erosi tanah umumnya diartikan sebagai kerusakan tanah oleh perbuatan air atau angin. Menurut Arsyad (2010), erosi adalah peristiwa terangkutnya tanah atau bagian-bagian tanah dari suatu tempat ke tempat lain oleh media alami. Menurut media pengangkutannya dikenal dua jenis erosi, yaitu erosi air dan erosi angin.

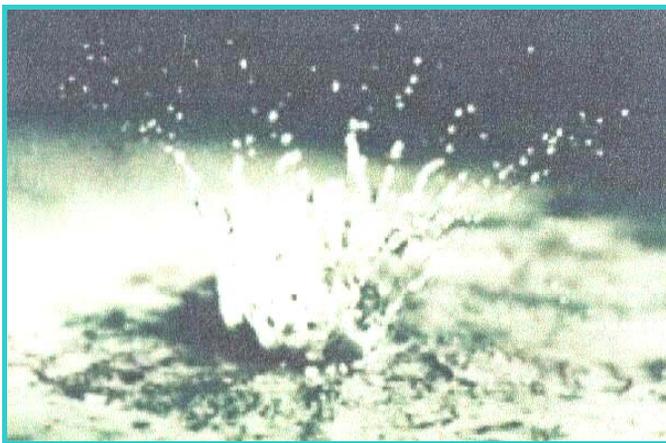
Terjadinya erosi disebabkan oleh kekuatan jatuh butir-butir hujan dan aliran permukaan atau karena kekuatan angin. Pada sebagian besar daerah tropika basah seperti Indonesia, erosi disebabkan oleh kekuatan jatuh butir hujan dan aliran permukaan (Sinukaban, 1989).

Selanjutnya Ellison (1947 dalam Sinukaban 1989) menyatakan bahwa erosi merupakan proses pelepasan (*detachment*) dan pengangkutan (*transportation*) bahan-bahan tanah oleh penyebab erosi. Peristiwa pelepasan dan pengangkutan merupakan komponen-komponen erosi tanah yang penting, dimana di dalam proses terjadinya erosi, peristiwa pelepasan butir tanah mendahului peristiwa pengangkutan. Hal ini menunjukkan bahwa pelepasan merupakan variabel yang penting yang berdiri sendiri, tetapi pengangkutan tergantung dari pelepasan.

Berdasarkan prosesnya (tempat, sumber, magnitud dan bentuk), erosi dapat dibedakan menjadi erosi percikan (*splash erosion*), erosi lembar (*sheet erosion*), erosi alur (*riil erosion*), erosi parit (*gully erosion*), dan lain-lain. Sedangkan berdasarkan agent atau

medianya, erosi dapat dibedakan menjadi erosi air dan erosi angin. Walaupun terdapat perubahan secara spasial dan temporal, proses yang terlibat dalam erosi adalah sama.

Menurut David (1988 dan Lu, *et al.*, 2005) erosi yang diakibatkan oleh air sangat dipengaruhi oleh curah hujan dan *run off*. Proses ini terdiri dari empat sub proses yang interaktif, yaitu : penghancuran oleh curah hujan, pengangkutan oleh curah hujan, penghancuran oleh *run off* (*scour erosion*) dan pengangkutan oleh *run off*. Hujan jatuh di permukaan tanah akan menghancurkan partikel tanah dan memercikan partikel tersebut ke atas kemudian berpindah ke tempat lain (Gambar 3.1).



Gambar 3.1. Energi butir hujan yang jatuh di permukaan tanah

Partikel tanah yang berpindah tempat tersebut dapat menyumbat pori-pori tanah sehingga menyebabkan terjadinya pemadatan tanah (*surface crusting*) sehingga akan mengurangi infiltrasi tanah. Apabila hujan melebihi kapasitas infiltrasi tanah, maka akan terjadi *run off* yang akan menghancurkan partikel tanah dan mengangkutnya dengan tenaga aliran *run off*. Jika kecepatan aliran menjadi lambat atau terhenti, partikel akan mengalami deposisi atau sedimentasi (Mc Clauley dan Jones, 2005).

Berkurangnya penutupan lahan, baik oleh tajuk maupun serasah tanaman menyebabkan terjadinya peningkatan daya rusak tetesan hujan, sehingga tingkat bahaya erosi menjadi lebih tinggi.

Di Indonesia, pengaruh erosi dapat dilihat dari semakin meningkatnya hamparan lahan kritis dan frekuensi dan besaran banjir. Banjir terjadi akibat sedimentasi di sungai, sehingga kapasitas tampung sungai menurun dan air meluap di musim hujan. Peristiwa

erosi juga menyebabkan sedimentasi di berbagai waduk seperti waduk Gajah Mungkur, bendungan Jati luhur, dan lainnya.

Menurut McCauley dan Jones (2005 dalam Sunarti, 2009) kerugian yang ditimbulkan oleh erosi tanah cukup besar, karena mengikis dan mengangkut sebagian tanah, misalnya kehilangan tanah yang terjadi pada lahan pertanian di Amerika dan Montana yang masing-masing mencapai 1.3 juta ton/tahun dan 5.50 ton/ha/tahun serta padang rumput di Wyoming yang telah menyebabkan erosi mencapai 5,10 ton/ha/tahun.

Erosi dapat disebabkan oleh faktor alam dan faktor manusia. Faktor-faktor alami yang mempengaruhi erosi dapat dirinci sesuai dengan pengaruh yang disumbangkannya terhadap proses erosi dan sedimentasi (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Pengaruh beberapa faktor alam terhadap proses dan tingkat erosi tanah

Faktor	Pengaruh terhadap Proses Erosi
Curah Hujan : intensitas, durasi, frekwensi, indeks erosi	Menghancurkan agregat tanah dengan percikan butir air hujan dan mengangkut partikel oleh <i>run off</i> ; <i>surface sealing</i>
Lereng :	
- Kemiringan, panjang dan bentuk	Erosi cenderung meningkat dengan meningkatnya panjang dan kemiringan lereng; bentuk lereng mempengaruhi tingkat kehilangan tanah, yaitu <i>conveks>lurus>confak</i>
- Posisi Terhadap lereng	Mempengaruhi hubungan <i>run off</i> – <i>run on</i> (erosi dan deposisi)
Tanah :	
- Kedalaman	Mempengaruhi kapasitas penyimpanan air tersedia
- Tekstur	Tanah dengan kandungan debu atau pasir halus umumnya paling mudah tererosi; erodibilitas akan menurun dengan meningkatnya kandungan fraksi pasir dan liat
- Struktur dan agregasi	Proporsi air- stabilitas dan ukuran agregat mempengaruhi erodibilitas
- Kandungan Bahan Organik	Mempengaruhi inisiasi <i>run off</i> , infiltrasi, perkembangan struktur tanah, <i>water repellency</i> .

Vegetasi : Struktur, penutupan kanopi, penutupan dasar (<i>ground</i>)	Mempengaruhi intersepsi curah hujan, percikan butir air hujan, infiltrasi, evapotranspirasi dan <i>run off</i> .
--	--

Sumber : Gunn *et al.*,(1988 dalam Sunarti, 2009).

Erosi perlu dikendalikan agar tanah dapat dimanfaatkan secara lestari untuk pertanian dan penggunaan lainnya. Oleh karena itu perlu dilakukan pengukuran terhadap besarnya erosi yang terjadi akibat pemanfaatan lahan untuk penggunaan tertentu, terutama pertanian. Pengukuran langsung di lapang akan membutuhkan waktu yang lama, biaya dan tenaga yang tidak sedikit. Pengembangan model prediksi erosi merupakan salah satu cara yang dapat mempermudah penetapan besarnya erosi yang terjadi pada suatu lahan.

Browning (1979) mengemukakan bahwa prediksi erosi dari sebidang tanah adalah metoda untuk memperkirakan laju erosi yang akan terjadi dari tanah yang dipergunakan dalam penggunaan lahan dan pengelolaan tertentu. Jika laju erosi yang akan terjadi telah dapat diperkirakan dan laju erosi yang masih dapat dibiarkan atau ditoleransikan sudah dapat ditetapkan, maka dapat ditentukan kebijaksanaan penggunaan tanah dan tindakan konservasi tanah yang diperlukan agar tidak terjadi kerusakan tanah dan tanah dapat dimanfaatkan secara produktif dan lestari.

Metode prediksi erosi juga merupakan alat untuk menilai apakah suatu program atau tindakan konservasi tanah telah berhasil mengurangi erosi dari suatu bidang tanah atau suatu daerah aliran sungai (DAS). Prediksi erosi adalah alat bantu untuk mengambil keputusan dalam perencanaan konservasi tanah pada suatu areal tanah.

Menurut Arsyad (2010), secara ideal metode prediksi erosi harus memenuhi persyaratan-persyaratan yaitu harus dapat diandalkan, secara universal dapat dipergunakan, mudah dipergunakan dengan data yang minimum, komprehensif dalam hal faktor-faktor yang dipergunakan dan mempunyai kemampuan untuk mengikuti perubahan-perubahan tataguna tanah dan tindakan konservasi.

Selanjutnya Ward (1971 dalam Gregory and Walling, 1979) mengatakan terdapat tiga tipe model utama yaitu model fisik, model analog dan model digital. Model digital terdiri atas model deterministik, model stokastik, dan model parametrik.

Prediksi erosi yang umum dipergunakan pada saat ini adalah model parametrik, terutama tipe kotak kelabu.

Empat faktor utama yang dianggap terlibat dalam proses erosi adalah iklim, sifat tanah, topografi dan vegetasi penutup lahan. Oleh Wischmeier dan Smith (1975) keempat faktor tersebut dimanfaatkan sebagai dasar untuk menentukan besarnya erosi tanah melalui persamaan umum yang kemudian lebih dikenal dengan sebutan persamaan universal (*Universal Soil Loss Equation.-USLE*).

USLE memungkinkan perencana menduga laju rata-rata erosi suatu tanah tertentu pada suatu kecuraman lereng dengan pola hujan tertentu untuk setiap macam pertanaman dan tindakan pengelolaan (tindakan konservasi tanah) yang mungkin dilakukan atau yang sedang dipergunakan. Persamaan yang dipergunakan untuk mengelompokkan berbagai parameter fisik dan pengelolaan yang mempengaruhi laju erosi kedalam enam peubah utama yang nilainya untuk setiap tempat dapat dinyatakan secara numerik.

USLE adalah suatu model erosi yang dirancang untuk memprediksi rata-rata erosi jangka panjang dari erosi lembar atau alur dibawah keadaan tertentu. Ia juga bermanfaat untuk tempat-tempat bangunan dan penggunaan bukan pertanian, tetapi tidak dapat memprediksi pengendapan dan tidak memperhitungkan hasil sendimen dari erosi parit, tebing sungai dan dasar sungai.

Persamaan USLE hingga saat ini masih relevan dan paling banyak digunakan dan hingga saat ini belum ada yang menggantikan metode USLE ini :

$$A = R K L S C P$$

dimana :

A = adalah banyaknya tanah yang tererosi (ton/hektar/tahun)

R = adalah faktor curah hujan dan aliran permukaan, yaitu jumlah satuan indeks erosi hujan, yang merupakan perkalian antara energi hujan total (E) dengan intensitas hujan maksimum 30 menit (I_{30}) tahunan.

Nilai R dapat ditetapkan dengan menggunakan Peta ISOERODEN. Namun bila data CH tak lengkap dapat digunakan Rumus Bols (1978) atau Lenvain (1975), yaitu :

* Bols (1978)

$$EI_{30} = 6,119 (R)^{1.21} (\text{Days})^{-0.47} (\text{Max P})^{0.53} \quad \text{atau}$$

$$EI_{30} = \frac{2.467 r^2}{0.0727 r + 0.725} \quad r = \text{curah hujan (cm)}$$

* Lenvain (1975)

$$EI_{30} = 2.34 R^{1.98}$$

K = adalah faktor erodibilitas tanah, yaitu laju erosi per indeks erosi hujan (R) untuk suatu tanah yang didapat dari petak percobaan standar, yaitu petak percobaan yang panjangnya 22 m terletak pada lereng 9% tanpa tanaman.

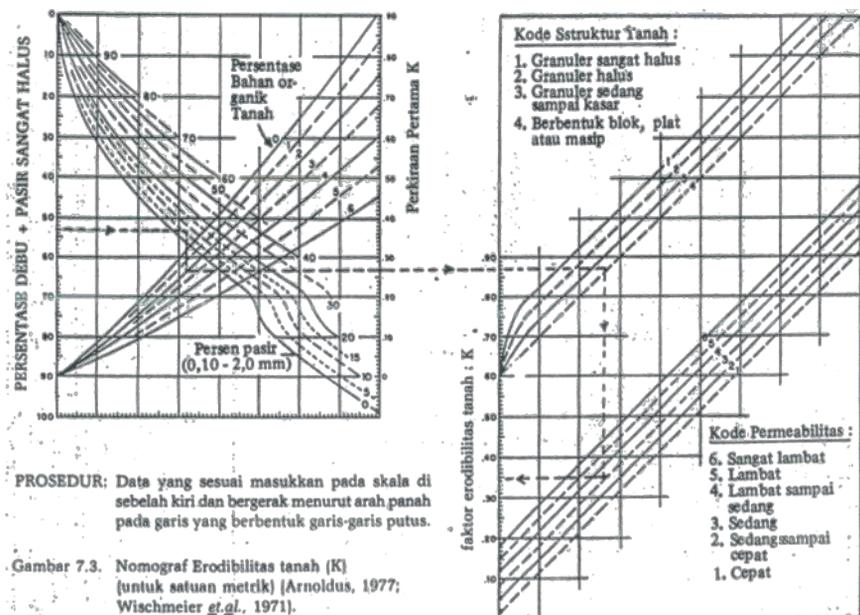
Nilai K dapat dihitung berdasarkan sifat tanah dengan rumus Weischmeier dan Smith sebagai berikut :

$$100 K = 1.292 (2.1 M^{1.14} \times 10^{-4} \times (12 - a) + 3,25 (b - 2) + 2.5 (c - 3))$$

dimana :

- M = (% pasir sangat halus + % Debu) (100 - % liat)
- a = % bahan organik
- b = kode struktur tanah
- c = kelas permeabilitas

atau bisa juga menggunakan Nomograf Erodibilitas Tanah Weischmeier dan Smith (Gambar 3.2).



Gambar 3.2. Nomograf untuk menentukan nilai K

L = adalah faktor panjang lereng, yaitu nisbah antara besarnya erosi dari tanah dengan suatu panjang lereng tertentu

terhadap erosi dari tanah dengan panjang lereng 22 m di bawah keadaan yang identik. L dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{Faktor } L = \left(\frac{x}{22} \right)^m$$

Nilai m tergantung pada kemiringan lereng (m = 0.2 jika s < 1%; m = 0.3 jika 1% < s < 3%; m = 0.4 jika 3.5% < s < 4.5% dan m = 0.5 jika s > 5%)

S = adalah faktor kecuraman lereng, yaitu nisbah antara besarnya erosi yang terjadi dari suatu tanah dengan kecuraman lereng tertentu, terhadap besarnya erosi dari tanah dengan lereng 9% di bawah keadaan yang identik.

Faktor S dapat dihitung dengan rumus :

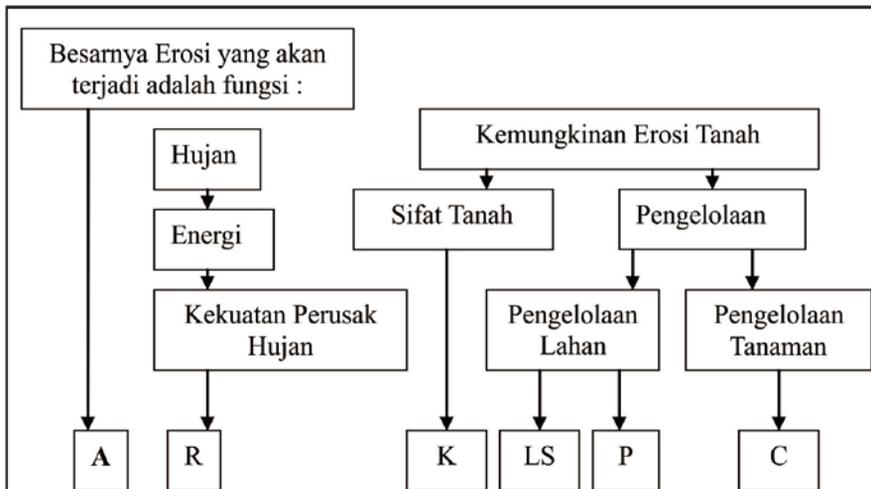
$$\text{Faktor } S = 0.065 + 0.045 s + 0.0065 s^2 \text{ (untuk } s < 12\%)$$

$$\text{Faktor } S = (s/9)^{1.35} \text{ (untuk } s > 12\%)$$

C = adalah faktor vegetasi penutup tanah dan pengelolaan tanaman, yaitu nisbah antara besarnya erosi dari suatu areal dengan vegetasi penutup dan pengelolaan tanaman tertentu terhadap besarnya erosi dari tanah yang identik tanpa tanaman. Faktor C dapat dilihat dari berbagai hasil penelitian yang sudah ada.

P = adalah faktor tindakan khusus konservasi tanah, yaitu nisbah antara besarnya erosi dari tanah yang diberi perlakuan tindakan konservasi khusus terhadap besarnya erosi tanah yang diolah searah lereng dalam keadaan identik. Faktor P juga dapat ditentukan dengan melihat hasil penelitian yang sudah ada.

Secara skematik persamaan USLE dapat dilihat dalam Gambar 3.3 berikut :



Gambar 3.3. Skema Persamaan USLE (Arsyad, 2010)

Kelemahan dan Keunggulan USLE

Menurut Goldman *et al.*, (1986) persamaan USLE mempunyai keterbatasan dan keunggulan sebagai berikut :

Asumsi :

- dapat digunakan pada lereng yang panjangnya ≤ 400 feet
- digunakan pada kemiringan lereng 3% - 18%
- hanya dapat digunakan pada lahan dengan sistem penanaman dan pengelolaan yang konsisten
- hanya dapat digunakan pada DAS yang tidak terlalu luas (DAS kecil)
- efektif digunakan pada unit lahan yang tanahnya bertekstur sedang (tidak untuk tanah yang bertekstur berpasir)

Kelemahan :

- sulit digunakan pada kejadian hujan tertentu
- sulit digunakan pada DAS yang kompleks
- tidak memperhitungkan proses (bersifat empirik)

Keunggulan :

- mudah diaplikasikan
- dapat diterapkan dimana saja (universal), dengan penetapan nilai setiap faktor secara tepat.
- dapat memprediksi erosi dalam jangka panjang pada penggunaan lahan yang berbeda-beda.

Selanjutnya menurut Hudson (1992), terdapat dua aplikasi utama dari persamaan USLE ini, yaitu :

- a. Untuk memprediksi kehilangan tanah akibat erosi
Pada situasi tertentu nilai setiap faktor dalam persamaan adalah tetap, di lapang atau pada tanah tertentu, panjang dan kemiringan lereng diketahui, dengan pola tanam tertentu. Untuk setiap variabel ini dipilih nilai numerik yang tepat, dan jika semua faktor tersebut dikalikan, maka jumlah erosi yang diprediksi oleh persamaan dapat dihitung. Kita mengetahui semua term pada bagian kanan persamaan dapat digunakan untuk menghitung A. Kita juga dapat memprediksi berapa perubahan tanah yang hilang jika kita mengubah nilai beberapa variabel tersebut.
- b. Untuk memilih tindakan dalam pertanian
Dalam hal ini, bagian kiri persamaan, yaitu A (erosi) sama dengan kehilangan tanah maksimum yang dapat diterima. Di bagian kanan persamaan beberapa faktor yang mewakili variabel yang tidak dapat dikendalikan, seperti erosivitas (R), erodibilitas (K), dan kemiringan lereng dan nilai ini juga telah dapat ditentukan. Faktor-faktor lainnya adalah perbedaan sistem penanaman, perbedaan metoda ploughing dan lain-lain. Persamaan dapat memilih kombinasi yang bervariasi dari faktor-faktor ini sehingga persamaan seimbang (balance), yaitu erosi tidak akan melebihi target. Aplikasi ini berguna sebagai pertimbangan dalam membuat rekomendasi untuk para petani dalam pengelolaan tanaman.

Jenis solusi yang dihasilkan dari persamaan mungkin tanpa sedikitpun tindakan konservasi (nilai P tinggi), namun rotasi akan mencakup proporsi yang tinggi dari tutupan tanaman (nilai C rendah perlu untuk menyeimbangkan persamaan). Tetapi jika lahan dibuat teras (untuk mengurangi P) rotasi harus terdiri dari cash crops yang lebih banyak (nilai C menjadi lebih tinggi). Tidak ada solusi tunggal yang mutlak dari persamaan tersebut, yang ada dengan berbagai cara dapat diperoleh lebih dari satu jawaban terhadap bagaimana untuk mengelola lahan.

USLE telah dimodifikasi dan diperluas untuk kondisi yang sesuai di Pasifik Barat laut, Hawaii dan wilayah range land di bagian barat. Modifikasi tersebut telah memasukkan *run off* dan *peak flow* sebagai parameter, menggantikan faktor energi dan intensitas curah hujan untuk memperoleh model sediment yield untuk hujan tertentu (William, 1975).

Penggunaan dan Penyalahgunaan USLE

Persamaan USLE dirancang untuk memprediksi sheet dan riil erosi. Dalam hal ini kehilangan tanah harus dibedakan dengan sediment yield. Kehilangan tanah diprediksi dengan persamaan adalah bagian tanah yang diangkut pada kemiringan tertentu yang ditetapkan sebagai faktor topografi. Informasi ini sangat diperlukan untuk perencanaan konservasi tanah. Namun pada umumnya, tidak semua sedimen dihasilkan pada lereng yang ditinggalkan. Sediment yield di lapang merupakan jumlah kehilangan tanah pada bagian lereng dikurangi deposisi dalam depresi di lahan, pada kaki lereng, sepanjang batasan petak dan di dalam saluran teras. Persamaan USLE tidak menghitung deposisi ini (Weischmeier dan Smith, 1965).

Banyak variabel dan interaksi yang mempengaruhi sheet dan riil erosi. USLE menggolongkan variabel ini menjadi enam faktor erosi utama, hasilnya untuk suatu kondisi tertentu mewakili kehilangan tanah rata-rata tahunan.

Menurut Weischmeier (1977), ada beberapa sumber kekeliruan dalam menerapkan USLE, yaitu :

- USLE sering digunakan pada DAS yang kompleks, padahal USLE tidak bisa digunakan untuk memprediksi erosi pada DAS yang kompleks karena tidak ada sistem pengelolaan dan penanaman yang konsisten, variabilitas wilayah sangat tinggi. USLE membutuhkan data yang spesifik dan detil. Oleh karena itu hasil perhitungan yang diperoleh akan keliru (atau tidak sesuai dengan kondisi aktualnya).
- USLE akan memberikan hasil yang keliru jika digunakan untuk prediksi sedimentasi di reservoir, karena USLE hanya digunakan untuk memprediksi erosi pada suatu unit lahan, bukan untuk prediksi sedimentasi seperti yang telah dikemukakan sebelumnya.

Penetapan faktor C dan LS juga sering menyebabkan kekeliruan perhitungan erosi berdasarkan USLE. Faktor C sering ditentukan berdasarkan kondisi tanaman dalam satu musim tanam atau berdasarkan hasil interpretasi citra landsat atau foto udara yang terakhir, pada hal faktor C yang dimaksudkan dalam USLE adalah faktor C yang menggambarkan kondisi penanaman selama satu tahun. Selain itu faktor LS sering ditentukan berdasarkan peta topografi sehingga hasil yang diperoleh bias, karena interpretasi dan perhitungan yang kurang tepat. Seharusnya penentuan faktor LS ini harus berdasarkan pengukuran langsung di lapang.

3.2. Air Limpasan

Air limpasan (*run off*) adalah bagian dari curah hujan yang mengalir ke arah sungai, danau atau laut sebagai aliran permukaan, aliran bawah permukaan dan aliran air bumi.

Limpasan permukaan (*surface run off*) merupakan komponen aliran yang besarnya adalah besaran hujan dikurangi besaran infiltrasi.

Aliran bawah permukaan (*subsurface flow* atau *interflow* atau *storm seepage*) adalah bagian dari air limpasan yang dihasilkan oleh bagian curah hujan yang terinfiltrasi pada permukaan tanah dan bergerak secara lateral melalui bagian atas horizon tanah menuju ke arah sungai.

Aliran bawah tanah (*groundwater run off* atau *groundwater flow*) adalah bagian dari air limpasan yang dihasilkan oleh perkolasi dalam (*deep percolation*) dari air infiltrasi yang terus masuk ke dalam tanah menjadi air bumi.

Gabungan dari aliran permukaan, aliran bawah permukaan, aliran air bumi ditambah dengan curah hujan langsung ke dalam saluran dan sungai, merupakan total air limpasan disebut sebagai aliran sungai (*stream flow*). Curah hujan dalam saluran adalah bagian curah hujan yang jatuh langsung pada permukaan air dalam sungai atau danau.

Dalam menghasilkan air limpasan total, curah hujan di saluran dan aliran permukaan dapat memberikan air limpasan dengan segera, sedangkan aliran bawah permukaan dapat segera atau lambat memberikan sumbangan pada air sungai.

Air yang segera memberikan sumbangan pada air limpasan disebut air limpasan langsung (*direct runoff*), sedangkan air yang memberikan sumbangan dalam waktu yang lambat dan lama disebut air limpasan tidak langsung (Chow, 1964 dan Ward, 1975). Selanjutnya Chow (1964) juga mengatakan bahwa curah hujan yang tidak menjadi aliran permukaan disebut sebagai pengurangan (*abstraction*), meliputi: interspesi, evaporasi, transpirasi dan tampungan permukaan. Sedangkan Linsley *et al.*, (1982) menamakan intersepsi, evaporasi dan tampungan permukaan sebagai simpanan permukaan (*surface detention*).

Selanjutnya Chow (1964) menambahkan bahwa air limpasan yang terjadi dalam suatu DAS dipengaruhi oleh 2 (dua) faktor, yaitu:

1. Faktor iklim.

- Curah hujan. Yang perlu diperhatikan adalah ciri atau sifat curah hujan, antara lain: tipe, intensitas, lamanya, distribusi

waktu dan daerah, frekuensi kejadian hujan, arah perpindahan, hujan yang terjadi sebelumnya dan kelembaban tanah.

- Intersepsi, meliputi: species vegetasi, komposisi, umur dan kerapatan tegakan, musim dan ukuran butir hujan.
- Evaporasi, meliputi: suhu, angin, tekanan udara, zat padat yang dapat larut, sifat dan bentuk permukaan.
- Transpirasi, meliputi: suhu, radiasi matahari, angin, kelembaban udara dan tanah dan macam vegetasi.

2. Faktor lahan.

a) Karakteristik DAS

- Faktor geometrik, meliputi: luasan, bentuk, kemiringan dan densitas anak sungai.
- Faktor fisik, meliputi: tataguna lahan dan tumbuhan penutup, kondisi infiltrasi permukaan, tipe tanah, keadaan geologi seperti permeabilitas dan kapasitas formasi air bumi, kondisi topografi seperti lereng, danau, rawa dan drainase buatan.

b) Karakteristik saluran

- Kapasitas saluran meliputi: ukuran dan bentuk penampang, kemiringan, kekasaran, panjang saluran dan banyaknya anak sungai.
- Kapasitas tamping untuk menampung air yang tidak mengalir.

Untuk menduga besarnya air limpasan, Viessman *et al.*, (1977) mengemukakan persamaan dasar yang dapat diterapkan pada sub DAS dengan luasan beberapa ratus hektar sebagai berikut:

$$q = 1.486/n S^{1.2}(D/L)^{5/3}\{1.0 + 0.6(D/De^3)\}^{5/3}$$

dimana :

- q = debit limpasan permukaan (m³)
- n = bilangan Manning untuk kekasaran permukaan
- S = kelerengan (m/m)
- L = panjang lereng (m)
- D = rata-rata simpanan permukaan (m³)
- De = simpanan permukaan (m³)

3.3. Debit Air

Dalam hidrologi, debit air sungai adalah tinggi permukaan air sungai yang terukur oleh alat ukur pada permukaan air sungai yang pengukurannya dilakukan tiap hari. Debit atau aliran sungai adalah laju aliran air (dalam bentuk volume air) yang melewati suatu penampang melintang sungai per satuan waktu. Dalam orizo Satuan Internasional (SI) besarnya debit dinyatakan dalam satuan meter kubik per detik (m^3/dt).

Menurut Soemarto (1987) debit diartikan sebagai volume air yang mengalir

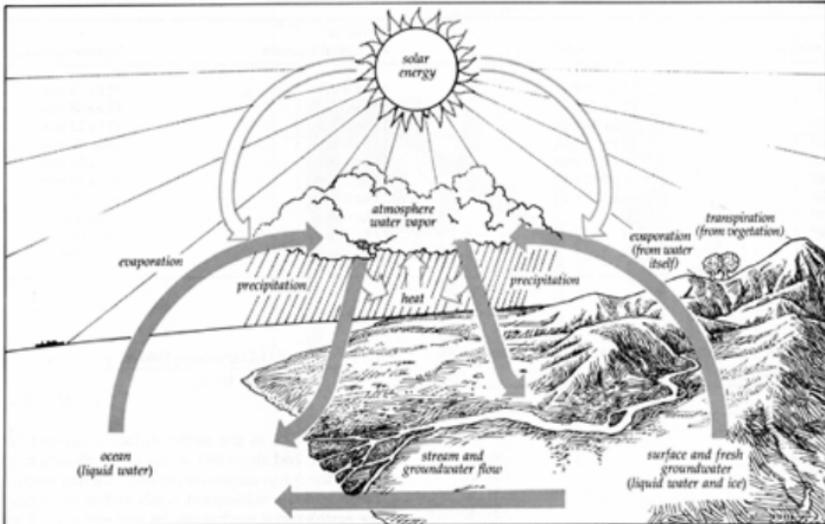
per satuan waktu melewati suatu penampang melintang palung sungai, pipa, pelimpah, akuifer dan sebagainya. Data debit diperlukan untuk menentukan volume aliran atau perubahan-perubahannya dalam suatu sistim DAS. Data debit diperoleh dengan cara pengukuran debit langsung dan pengukuran tidak langsung (Harto, 2000).

Debit aliran biasanya ditunjukkan dalam bentuk hidrograf aliran, yaitu suatu perilaku debit sebagai respon adanya perubahan karakteristik biogeofisik yang ber langsung dalam suatu DAS (oleh adanya pengelolaan DAS) dan atau adanya perubahan (fluktuasi musiman atau tahunan). Kemampuan pengukuran debit aliran sangat diperlukan untuk mengetahui potensi sumberdaya air di suatu wilayah DAS. Debit aliran dapat dijadikan sebuah alat untuk memonitor dan mengevaluasi neraca air suatu kawasan melalui pendekatan potensi sumberdaya air permukaan yang ada.

Proses Terbentuknya Debit

Sungai terbentuk karena adanya aliran air dari satu atau beberapa sumber air yang berada pada suatu ketinggian, kemudian jatuh dan terkumpul dibagian yang cekung, lama kelamaan akan penuh dan akhirnya mengalir keluar melalui bagian bibir cekungan yang paling mudah tergerus air. Selanjutnya air itu akan mengalir di atas permukaan tanah yang paling rendah, mula mula merata, namun karena ada bagian dipermukaan tanah yg tidak begitu keras maka mudah terkikis, sehingga akan menjadi alur alur yang makin hari makin panjang, seiring dengan makin deras dan makin seringnya air mengalir pada alur tersebut, maka semakin panjang dan semakin dalam alur itu akan berbelok atau bercabang. Apabila air yang mengalir tersebut terhalang oleh batu sebesar alur tersebut, atau batu yang banyak, demikian juga dgn sungai di bawah permukaan

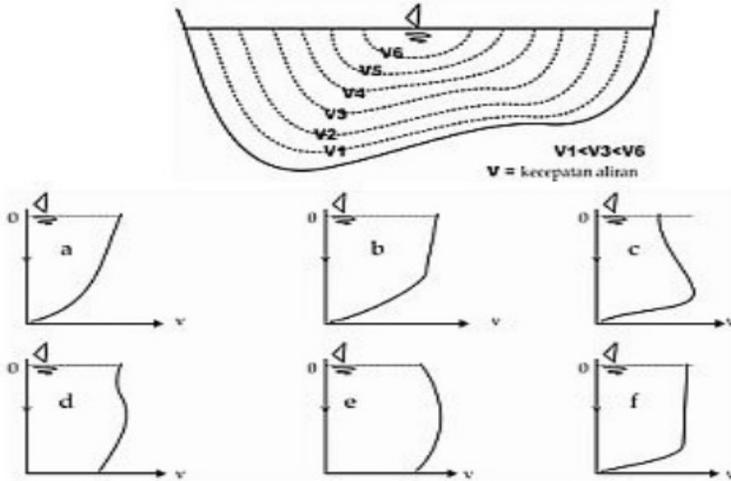
tanah, terjadi dari air yang mengalir dari atas, kemudian menemukan bagian-bagian yang dapat di tembus ke bawah permukaan tanah dan mengalir orizon dataran rendah yg rendah, lama kelamaan sungai itu akan semakin lebar (Gambar 3. 4).



Gambar 3.4. Ilustrasi terbentuknya debit air

Metode Pengukuran Debit Air

Distribusi kecepatan aliran di dalam alur tidak sama, dengan kata lain kecepatan aliran pada tepi alur tidak sama dengan tengah alur dan kecepatan aliran dekat permukaan air tidak sama dengan kecepatan pada dasar alur. Berikut dapat dilihat distribusi kecepatan aliran pada beberapa bentuk saluran (Gambar 3.5)



Gambar 3.5. Distribusi kecepatan aliran

Keterangan :

- a : teoritis
- b : dasar saluran kasar dan banyak tumbuhan
- c : gangguan permukaan (sampah)
- d : aliran cepat, aliran turbulen pada dasar
- e : aliran lambat, dasar saluran halus
- f : dasar saluran kasar/berbatu

Beberapa metode pengukuran debit aliran sungai yaitu :

- Area-velocity method
- Flood area method
- Metode kontinyu

Velocity Method

Pada prinsipnya adalah pengukuran luas penampang basah dan kecepatan aliran. Penampang basah (A) diperoleh dengan pengukuran lebar permukaan air dan pengukuran kedalaman dengan tongkat pengukur atau kabel pengukur.

Kecepatan aliran dapat diukur dengan metode : metode current-meter dan metode apung. *Current meter* adalah alat untuk mengukur kecepatan aliran (kecepatan arus). Ada dua tipe current meter yaitu tipe baling-baling (*orizonta type*) dan tipe cangking (*cup type*). Oleh karena distribusi kecepatan aliran di sungai tidak sama baik arah horizon maupun horizontal, maka pengukuran kecepatan aliran dengan alat ini tidak cukup pada satu titik.

Debit aliran sungai dapat diukur dengan beberapa metode. Tidak semua metode pengukuran debit cocok digunakan. Pemilihan metode tergantung pada kondisi (jenis sungai, tingkat turbulensi aliran) dan tingkat ketelitian yang akan dicapai.

Pengukuran Debit dengan Cara Apung (*Flood Area Methode*)

Jenis-jenis pelampung dapat dilihat pada Gambar dibawah ini (Gambar 6)

Prinsip :

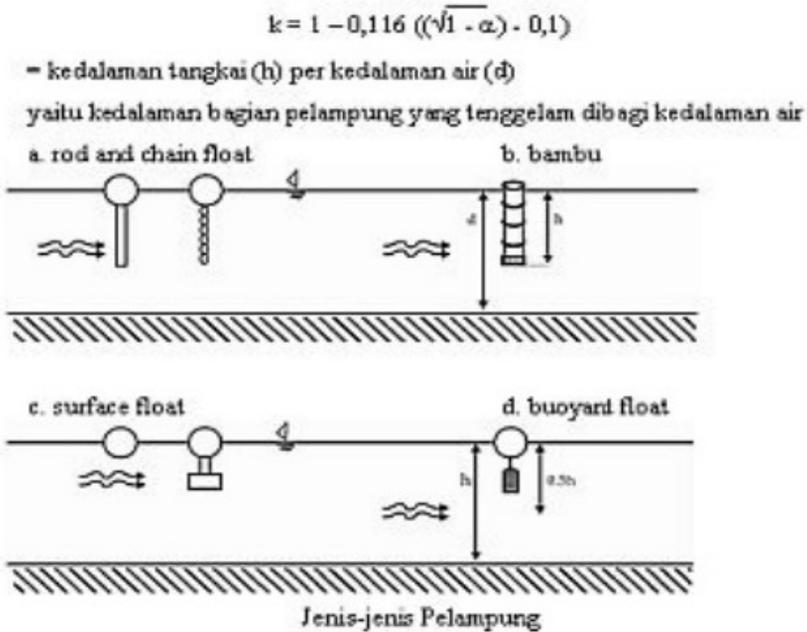
- Kecepatan aliran (V) ditetapkan berdasarkan kecepatan pelampung (U)
- luas penampang (A) ditetapkan berdasarkan pengukuran lebar saluran (L) dan kedalaman saluran (D)

debit sungai (Q) = $A \times V$ atau $A = A \times k$ dimana k adalah konstanta

$$Q = A \times k \times U$$

dimna :

- Q = debit (m³/det)
- U = kecepatan pelampung (m/det)
- A = luas penampang basah sungai (m²)
- k = koefisien pelampung



Gambar 3.6. Jenis-Jenis Pelampung

Pengukuran Debit dengan Current-meter

Prinsip :

Kecepatan diukur dengan current-meter, luas penampang basah ditetapkan berdasarkan pengukuran kedalaman air dan lebar permukaan air. Kedalaman dapat diukur dengan mistar pengukur, kabel atau tali.

Pengukuran :

Tipe	Kedalaman Air (d)	Titik Pengamatan	Kecepatan rata-rata pada vertikal (V)
Satu titik	0,3 – 0,6 m	0,6 dari permukaan	$V = V$
Dua titik	0,6 – 3 m	0,2 dan 0,8 d	$V = \frac{1}{2} (V_2 + V_8)$
Tiga titik	3 – 6 m	0,2 ; 0,6 ; 0,8 d	$V = \frac{1}{2} (V_2 + V_6 + V_8)$
Lima titik	lebih dari 6 m	S; 0,2 ; 0,6 ; 0,8 dan B	$V = \frac{1}{10} (V_s + 3V_2 + 2V_6 + 3V_8 + V_b)$

Ada 4 cara pengukuran kecepatan aliran yang disajikan dalam Tabel 3.2 berikut : Tabel 3.2. Beberapa cara Pengukuran aliran

Keterangan :

Vs di ukur 0,3 m dari permukaan air

Vb di ukur 0,3 m di atas dasar sungai

Kecepatan aliran dihitung berdasarkan jumlah putaran baling-baling per waktu putarannya ($N = \text{putaran}/dt$). Kecepatan aliran $V = aN + b$ dimana a dan b adalah nilai kalibrasi alat current meter. Hitung jumlah putaran dan waktu putaran baling-baling (dengan stopwatch).

Metode Kontinyu

Current meter diturunkan kedalam aliran air dengan kecepatan penurunan yang konstant dari permukaan dan setelah mencapai dasar sungai diangkat lagi ke atas dengan kecepatan yang sama.

$$\bar{V}_{\text{seksi}} = a \frac{N}{t} + b$$

N = jumlah putaran baling-baling.

Menghitung Luas Seksi

Cara menghitung luas seksi ada 2 cara :

- Mean Section

$$a_n = \frac{d_n + d_{n+1}}{2} \times b_n$$

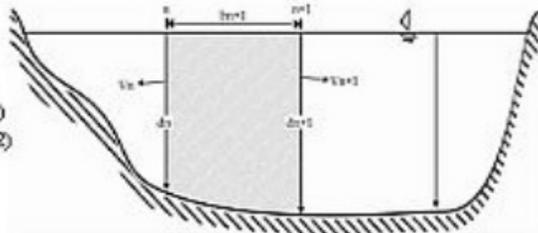
a_n = luas seksi A

d_n = kedalaman sungai (1)

d_{n+1} = kedalaman sungai (2)

b_{n+1} = lebar seksi

$$\bar{V}_n = \frac{V_n + V_{n+1}}{2}$$



Menghitung Luas Seksi dengan Mean Section

\bar{V}_n = kecepatan rata-rata pada seksi ke n

\bar{V} = kecepatan rata-rata pada penampang air.

- Mid Section

$$a_n = \frac{b_n + b_{n+1}}{2} \times d_n$$

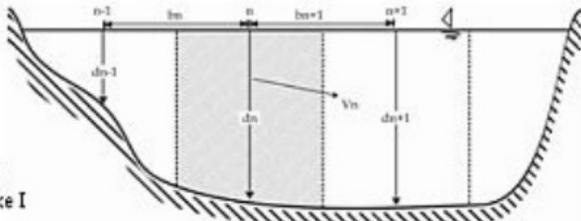
\bar{V}_{n+1} = kecepatan rata-rata pada kedalaman d_{n+1}

Cara menghitung debit (Q) dan debit seksi (q)

$$q_n = a_n \times \bar{V}_{n+1}$$

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i$$

q_n = debit seksi ke n
 q_i = debit tiap seksi ke I
 a_n = luas seksi ke n



Menghitung Luas Seksi dengan Mid Section

\bar{V}_n = kecepatan air rata-rata pada seksi yang bersangkutan (ke n).
 Q = debit sungai

Selanjutnya Asdak (2002) mengatakan metode pengukuran debit air di lapangan dapat dilakukan dalam 4 katagori, yaitu :

1. Pengukuran volume air sungai.

Biasanya dilakukan untuk keadaan aliran air (sungai) lambat. Pengukuran debit dengan cara ini dianggap paling akurat, terutama untuk debit aliran lambat seperti pada aliran mata air. Cara pengukurannya dilakukan dengan menentukan waktu yang di perlukan untuk mengisi kontainer yang telah diketahui volumenya. Prosedur yang biasa dilakukan untuk pengukuran debit dengan cara pengukuran volume adalah dengan membuat dam kecil (alat semacam weir) disalah satu bagian dari badan aliran air yang akan diukur.

Gunanya adalah agar aliran air dapat terkonsentrasi pada satu outlet. Di tempat tersebut (out let) pengukuran volume air dilakukan. Pembuatan dam kecil harus sedemikian rupa sehingga permukaan air di belakang dam tersebut cukup stabil. Besarnya debit aliran dihitung dengan cara:

$$Q = V/t$$

dimana :

Q = debit (m³/det)

V = volume air (m³)

t = waktu pengukuran (detik)

2. Pengukuran debit dengan cara mengukur kecepatan aliran dan menentukan luas penampang melintang sungai.

Yaitu pengukuran debit dengan bantuan alat ukur *current meter* atau sering dikenal sebagai pengukur debit melalui pendekatan *velocity-area method*. Cara ini paling banyak dipraktekkan dan berlaku untuk kebanyakan aliran sungai.

3. Pengukuran debit dengan menggunakan bahan kimia (pewarna) yang dialirkan dalam aliran sungai (substance tracing method).

Sering digunakan untuk jenis sungai yang aliran airnya tidak beraturan (*turbulent*). Untuk maksud-maksud pengukuran hidrologi, bahan-bahan penelusur (*tracers*) seyogyanya dalam bentuk :

- mudah larut dalam aliran sungai
- bersifat stabil
- mudah dikenali pada konsentrasi rendah.
- tidak bersifat meracuni biota perairan dan tidak menimbulkan dampak (negatif) yang permanen pada badan perairan.
- relatif tidak terlalu mahal harganya.

4. Pengukuran debit dengan membuat bangunan pengukur debit seperti *weir* (aliran air lambat) atau *flume* (aliran air cepat).

Cara ini biasanya dengan pembuatan bangunan pengukur debit, dan biasanya untuk pengukuran debit jangka panjang pada stasiun pengamat hidrologi.

Persoalan yang sering muncul ketika melakukan pengukuran debit sungai mendorong para ahli hidrologi mengembangkan alat/bangunan pengontrol aliran sungai untuk tujuan pengukuran debit bangunan tersebut antara lain *weir* dan *flume*. Cara kerja bangunan pengukur debit tersebut diatas adalah dengan menggunakan kurva aliran untuk mengubah kedalaman aliran air menjadi debit. Perbedaan pemakaian kedua alat tersebut adalah

bahwa *flume* digunakan untuk mengukur debit pada sungai dengan debit aliran besar dan sering disertai banyak sampah atau bentuk kotoran lainnya, sedangkan aliran air kecil atau dengan ketinggian aliran (h) tidak melebihi 50 cm biasanya dipakai *weir*. Aliran yang melewati lempengan *weir* akan menunjukkan besar kecilnya debit di tempat tersebut. Kegunaan utama alat tersebut adalah untuk mengurangi kesalahan dalam menentukan hubungan debit (Q) dan tinggi muka air.

Perkiraan debit empiris

Dibanyak negara berkembang, terutama di daera-daerah terpencil alat pencatat aliran air sangat terbatas dan kalau tersedia sering kali dalam kondisi kurang memadai. Namun demikian, terlepas dari segala kekurangan yang ada, prakiraan besarnya aliran air, betapapun kasarnya, sangat diperlukan untuk mengevaluasi keadaan DAS atau untuk merancang bangunan pengairan, terutama dalam kaitannya pengendali banjir. Untuk mengatasi permasalahan seperti tersebut diatas, berikut ini akan dikemukakan teknik atau metoda untuk memprakirakan besarnya debit dengan menggunakan persamaan empiris.

Pada tempat-tempat seperti tersebut diatas, karena keterbatasan alat ukur debit, besarnya debit biasanya ditentukan secara tidak langsung (*indirect measurement*). Cara yang sering digunakan untuk memprakirakan besarnya debit dalam kasus ini adalah melalui pendekatan *slope-area method*. Salah satu metoda yang sering digunakan untuk mengukur kecepatan aliran air melalui pendekatan *slope-area method* adalah persamaan *Manning* (Brooks *et al.*, 1985 dalam Asdak 2002), yaitu :

$$V = [1/n] r^{2/3} S^{1/2}$$

dimana :

- V = Kecepatan aliran (m/det)
- r = Jari-jari hidrolik (meter) (Tabel 3.3)
- S = Kemiringan permukaan air
- n = Koefisien kekasaran Manning (Tabel 3.4)

Dengan mengetahui luas penampang melintang saluran/sungai (A), maka dapat dihitung besarnya debit melalui persamaan :

$$Q = AV$$

Prakiraan besarnya debit dengan pendekatan *slope-area method* akan memberikan hasil yang memadai apabila pemilihan badan air yang akan diprakirakan kecepatannya memiliki aliran yang kurang lebih seragam. Artinya, lebar dan kedalaman aliran, kecepatan aliran air, keadaan dasar sungai, dan kemiringan dasar permukaan sungai/saluran air relatif seragam atau tidak berubah secara mencolok.

Tabel 3.3. Penampang Melintang Sungai dan Persamaan untuk W_p , r dan Lebar permukaan Sungai (Schwab *et al.*, 1982 dalam Asdak, 2002)

Luas penampang (a)	Wetted perimeter (p)	Hydraulic radius ($r = a/p$)	Lebar bagian atas
1. $bd + Z(d \times d)$	$b + 2d \sqrt{(Z \times Z) + 1}$	$\{bd + Z(d \times d)\} / \{b + 2d \sqrt{(Z \times Z) + 1}\}$	$r = b + 2dZ$ $T = b + 2DZ$
2. $Z(d \times d)$	$2d \sqrt{(Z \times Z) + 1}$	$\{Zd\} / \{2 \sqrt{(Z \times Z) + 1}\}$	$r = 2dZ$ $T = (D/d) t$
3. $(2/3) td$	$\{t + 8(d \times d)\} / \{3t\}$	$\{(t \times t) d\} / \{1.5(t \times t) + 4(d \times d)\}$	$r = a / (0.67)d$ $T = r \sqrt{Dd}$

Tabel 3.4. Koefisien Kekasaran Manning “n” (Gray, 1970 dalam Asdak, 2002)

Type Saluran	Minimum	Rata-rata	Maksimum
Saluran buatan :			
1. Tanah liat, lurus, bersih	0,016	0,018	0,020
2. Tanah liat, berumput, beberapa tumbuhan bawah	0,025	0,030	0,033
1. Tanpa vegetasi dasar, saluran berkerikil	0,030	0,040	0,050
2. Dasar berumput, bertumbuhan bawah	0,050	0,070	0,080
Daerah banjir :			
1. Padang rumput, tanpa tumbuhan bawah	0,025	0,030	0,035
2. Bertumbuhan bawah, beberapa tanaman semak	0,035	0,050	0,070
3. Saluran lurus, bervegetasi	0,110	0,150	0,200

Sebagai patokan panjang sungai/saluran air yang memadai untuk tempat pengukuran debit, dalam hal ini, harus diupayakan agar panjang badan sungai yang mempunyai keseragaman karakteristik seperti disebutkan di atas paling sedikit lima kali lebar rata-rata sungai (Gordon *et al.*, 1992).

Untuk memprakirakan besarnya angka A dan r diperlukan survei di sepanjang sungai atau saluran yang akan dikaji. Besarnya angka S di lapangan disetarakan dengan besarnya kemiringan permukaan aliran air dan permukaan dasar sungai. Sedang untuk menentukan besarnya angka n diperlukan pertimbangan yang lebih seksama. Pada saluran buatan, besarnya angka n mudah ditentukan. Kesulitan baru dijumpai apabila pengukuran debit dilakukan di sungai alamiah. Pada sungai-sungai alamiah, angka n bervariasi menurut kedalaman dan besarnya aliran sungai. Sebagai contoh, Bovee dan Milhous (1978) melaporkan bahwa pada sungai dengan permukaan dasar terdiri atas bahan kerikil atau bantuan lainnya, besarnya angka n bervariasi dari 0,05 untuk debit aliran lebih besar dan dari 0,84 m³/dt sampai dengan 0,35 untuk debit aliran kurang dari 0,03 m³/dt.

Beberapa faktor yang mempengaruhi debit air

- Intensitas hujan

Curah hujan merupakan salah satu faktor utama yang memiliki komponen musiman yang dapat secara cepat mempengaruhi debit air, dan siklus tahunan dengan karakteristik musim hujan panjang (kemarau pendek), atau kemarau panjang (musim hujan pendek). Yang menyebabkan bertambahnya debit air.

- Penggundulan Hutan

Fungsi utama hutan dalam kaitan dengan hidrologi adalah sebagai penahan tanah yang mempunyai kelerengan tinggi, sehingga air hujan yang jatuh di daerah tersebut tertahan dan meresap ke dalam tanah untuk selanjutnya akan menjadi air tanah. Air tanah di daerah hulu merupakan cadangan air bagi sumber air sungai. Oleh karena itu hutan yang terjaga dengan baik akan memberikan manfaat berupa ketersediaan sumber-sumber air pada musim kemarau. Sebaiknya hutan yang gundul akan menjadi malapetaka bagi penduduk di hulu maupun di hilir. Pada musim hujan, air hujan yang jatuh di atas lahan yang gundul akan menggerus tanah yang kemiringannya tinggi. Sebagian besar air hujan akan menjadi aliran permukaan dan sedikit sekali infiltrasinya. Akibatnya adalah terjadi tanah longsor dan atau banjir bandang yang membawa kandungan lumpur.

- Pengalihan hutan menjadi lahan pertanian

Risiko penebangan hutan untuk dijadikan lahan pertanian sama besarnya dengan penggundulan hutan. Penurunan debit air sungai dapat terjadi akibat erosi. Selain akan meningkatnya kandungan zat padat tersuspensi (*suspended solid*) dalam air sungai sebagai akibat dari sedimentasi, juga akan diikuti oleh meningkatnya kesuburan air dengan meningkatnya kandungan hara dalam air sungai. Kebanyakan kawasan hutan yang diubah menjadi lahan pertanian mempunyai kemiringan diatas 25%, sehingga bila tidak memperhatikan faktor konservasi tanah, seperti pengaturan pola tanam, pembuatan teras dan lain-lain.

- Intersepsi

Adalah proses ketika air hujan jatuh pada permukaan vegetasi diatas permukaan tanah, tertahan beberapa saat, untuk diuapkan kembali ("hilang") ke atmosfer atau diserap oleh vegetasi yang bersangkutan. Proses intersepsi terjadi selama berlangsungnya curah hujan dan setelah hujan berhenti. Setiap kali hujan jatuh di daerah bervegetasi, ada sebagian air yang tak pernah mencapai permukaan tanah dan dengan demikian, meskipun intersepsi dianggap bukan faktor penting dalam penentu faktor debit air, pengelola daerah aliran sungai harus tetap memperhitungkan besarnya intersepsi karena jumlah air yang hilang sebagai air intersepsi dapat mempengaruhi neraca air regional. Penggantian dari satu jenis vegetasi menjadi jenis vegetasi lain yang berbeda, sebagai contoh, dapat mempengaruhi hasil air di daerah tersebut.

- **Evaporasi dan Transpirasi**

Evaporasi transpirasi juga merupakan salah satu komponen atau kelompok yang dapat menentukan besar kecilnya debit air di suatu kawasan DAS, mengapa dikatakan salah satu komponen penentu debit air, karena melalui kedua proses ini dapat membuat air baru, sebab kedua proses ini menguapkan air dari permukaan air, tanah dan permukaan daun, serta cabang tanaman sehingga membentuk uap air di udara dengan adanya uap air diudara maka akan terjadi hujan, dengan adanya hujan tadi maka debit air di DAS akan bertambah juga. Sedikit demi sedikit.

3.4. Sedimentasi

Sedimentasi adalah peristiwa pengendapan material yang telah diangkut oleh tenaga air atau angin. Pada saat pengikisan terjadi, air membawa material mengalir ke sungai, danau, dan akhirnya sampai di laut. Pada saat kekuatan pengangkutannya berkurang atau habis, material tersebut diendapkan di daerah aliran air tadi. Karena itu pengendapan ini bisa terjadi di sungai, danau, dan di laut

Menurut Pipkin (1977) sedimen adalah pecahan, mineral, atau material organik yang ditransforkan dari berbagai sumber dan diendapkan oleh media udara, angin, es, atau oleh air dan juga termasuk didalamnya material yang diendapkan dari material yang melayang dalam air atau dalam bentuk larutan kimia. Sedangkan Pettijohn (1975) mendefinisikan sedimentasi sebagai proses

pembentukan sedimen atau batuan sedimen yang diakibatkan oleh pengendapan dari material pembentuk atau asalnya pada suatu tempat yang disebut dengan lingkungan pengendapan berupa sungai, muara, danau, delta, estuaria, laut dangkal sampai laut dalam.

Menurut Linsley *et al.*, (1983) sedimentasi menggambarkan material tersuspensi dan diangkut oleh gerakan air dan angin. Dari proses sedimentasi, hanya sebagian aliran sedimen di sungai yang diangkut keluar dari DAS, sedangkan yang lain mengendap dilokasi tertentu dari sungai (Gottschalk, 1948 *dalam* Ven T Chow. 1964)

Selanjutnya Arsyad (2006) mengatakan tanah dan bagian-bagian tanah yang terangkut oleh air dari suatu tempat yang mengalami erosi pada suatu daerah aliran sungai (DAS) dan masuk ke dalam suatu badan air secara umum disebut sedimen.

Besarnya angkutan sedimen pada suatu sungai merupakan salah satu komponen informasi hidrologi selain banjir, kekeringan dan potensi sumber daya air. Data angkutan sedimen merupakan data yang sangat dibutuhkan dalam perencanaan prasarana sumber daya air antara lain untuk memperkirakan umur guna waduk (*dead storage*), perhitungan dimensi kantong lumpur (*sandtrap*) dan untuk operasi dan pemeliharaan irigasi.

Ada beberapa parameter yang mempengaruhi angkutan sedimen dalam suatu sungai antara lain vegetasi penutup (*land covering*), penggunaan lahan (*landuse*), jenis tanah/batuan, kemiringan lahan dan intensitas hujan yang mempengaruhi besarnya debit.

Hasil sedimen (*sediment yield*) adalah besarnya sedimen yang berasal dari erosi yang terjadi di daerah tangkapan air yang diukur pada periode waktu dan tempat tertentu. Hasil sedimen biasanya diperoleh dari pengukuran sedimen terlarut dalam sungai (*suspended sediment*) atau dengan pengukuran langsung di dalam waduk (Asdak, 2002).

Vanoni (1977) menjelaskan bahwa gerakan sedimen di sungai merupakan suatu fenomena alam yang sangat kompleks. Pengembangan peralatan dan teknik pengukuran angkutan sedimen akan sangat bergantung pada pemahaman fenomena erosi, transportasi dan pengendapan.

Akurasi dari penentuan besarnya debit sedimen akan tergantung dari teknik dan peralatan pengukuran dilapangan dalam pengumpulan data. Untuk itu diperlukan pengetahuan mengenai penyebaran sedimen dalam aliran.

Sedimen yang sering kita jumpai di dalam sungai, baik terlarut atau tidak terlarut, adalah merupakan produk dari

pelapukan batuan induk yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan, terutama perubahan iklim. Hasil pelapukan batuan induk tersebut kita kenal sebagai partikel-partikel tanah.

Akibat pengaruh tenaga kinetis air hujan dan aliran air permukaan (untuk terangkut ke tempat yang lebih rendah untuk kemudian masuk ke dalam sungai dan dikenal sebagai sedimen. Oleh adanya transpor sedimen dari tempat yang lebih tinggi ke daerah hilir dapat menyebabkan pendangkalan waduk, sungai, saluran irigasi, dan terbentuknya tanah-tanah baru di pinggirpinggir dan di delta-delta sungai.

Proses sedimentasi dapat memberikan dampak yang menguntungkan dan merugikan. Dikatakan menguntungkan karena pada tingkat tertentu adanya aliran sedimen ke daerah hilir dapat menambah kesuburan tanah serta terbentuknya tanah garapan baru di daerah hilir. Tetapi, pada saat bersamaan aliran sedimen juga dapat menurunkan kualitas perairan dan pendangkalan badan perairan seperti tersebut di atas.

Dalam konteks pengelolaan DAS, kegiatan pengelolaan yang dilakukan umumnya bertujuan mengendalikan atau menurunkan laju sedimentasi karena kerugian yang ditimbulkan oleh adanya proses sedimentasi jauh lebih besar dari pada manfaat yang diperoleh.

Berdasarkan pada jenis sedimen dan ukuran partikel-partikel tanah serta komposisi mineral dari bahan induk yang menyusunnya, dikenal bermacam jenis sedimen seperti pasir, liat, dan lain sebagainya. Tergantung dari ukuran partikelnya, sedimen ditemukan terlarut dalam sungai atau disebut muatan sedimen (*suspended sediment*) dan merayap di dasar sungai atau dikenal sebagai sedimen merayap (*bed load*). Menurut Dunne dan Leopold (1978), berdasarkan ukurannya, sedimen dibedakan menjadi 4 (empat) jenis, lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 3. 5.

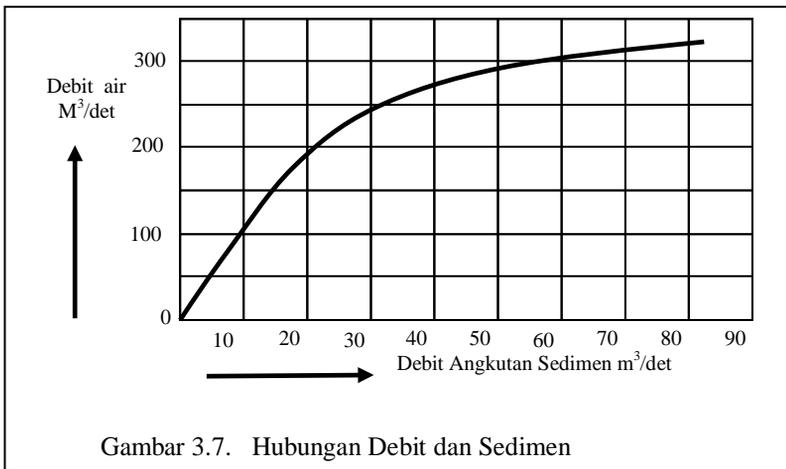
Tabel 3.5. Jenis Sedimen Berdasarkan Ukurannya

No	Jenis Sedimen	Ukuran Partikel (mm)
1.	Liat	< 0,0039
2.	Debu	0,0039 - 0,0625
3.	Pasir	0,0625 - 2,0
4.	Pasir Besar	2,0 - 64,0

Sumber : Arsyad, 20010

Menurut Anwar (2007) kondisi suatu DAS yang disimpulkan berdasarkan *probabilitic causality* yaitu suatu kondisi dimana angkutan sedimen akan terjadi apabila telah terjadi kerusakan DAS :

1. Pengukuran angkutan sedimen dilakukan bersama-sama dengan pengukuran debit aliran pada satu penampang tertentu, sehingga dapat ditarik hubungan antara besar debit dengan besar angkutan sedimen. Penentuan besarnya kandungan sedimen pada debit tertentu dilakukan dengan mengambil sample air sungai kemudian membawanya ke laboratorium untuk dilakukan pengukuran berat sedimen. Jumlah pengambilan sample disesuaikan dengan jumlah pembagian pias dalam pengukuran debit



Gambar 3.7. Hubungan Debit dan Sedimen

2. Pengukuran angkutan sedimen dan pengukuran debit di atas dilakukan berkali-kali pada ketinggian permukaan air sungai yang berbeda-beda sehingga akan diperoleh hubungan antara debit aliran dengan angkutan sedimen seperti grafik di atas.
3. Berdasarkan grafik hubungan antara debit aliran dengan debit angkutan sedimen maka dapat dihitung besar angkutan sedimen setiap saat dalam setahun. Demikian pula besar angkutan sedimen per hektar, per tahun dapat dihitung dengan membagi total angkutan sedimen dengan luas DAS yang diteliti

Transpor Sedimen

Faktor-faktor yang mengontrol terbentuknya sedimen adalah iklim, topografi, vegetasi dan juga susunan yang ada dari batuan. Sedangkan faktor yang mengontrol pengangkutan sedimen adalah

air, angin, dan juga gaya grafitasi. Sedimen dapat terangkut baik oleh air, angin, dan bahkan salju.

Mekanisme pengangkutan sedimen oleh air dan angin sangatlah berbeda. Pertama, karena berat jenis angin relatif lebih kecil dari air maka angin sangat susah mengangkut sedimen yang ukurannya sangat besar. Besar maksimum dari ukuran sedimen yang mampu terangkut oleh angin umumnya sebesar ukuran pasir. Kedua, karena sistem yang ada pada angin bukanlah sistem yang terbatas (*confined*) seperti layaknya channel atau sungai maka sedimen cenderung tersebar di daerah yang sangat luas bahkan sampai menuju atmosfer.

Sedimen-sedimen yang ada terangkut sampai di suatu tempat yang disebut cekungan. Di tempat tersebut sedimen sangat besar kemungkinan terendapkan karena daerah tersebut relatif lebih rendah dari daerah sekitarnya dan karena bentuknya yang cekung ditambah akibat gaya grafitasi dari sedimen tersebut maka susah sekali sedimen tersebut akan bergerak melewati cekungan tersebut. Dengan semakin banyaknya sedimen yang diendapkan, maka cekungan akan mengalami penurunan dan membuat cekungan tersebut semakin dalam sehingga semakin banyak sedimen yang terendapkan. Penurunan cekungan sendiri banyak disebabkan oleh penambahan berat dari sedimen yang ada dan kadang dipengaruhi juga struktur yang terjadi di sekitar cekungan seperti adanya patahan.

Kecepatan transport sedimen adalah hasil perkalian antara berat partikel suatu benda (partikel sedimen) dengan kecepatan rata-rata partikel tersebut. Kekuatan yang diperlukan untuk menggerakkan suatu benda adalah :

$$\text{(berat x jarak) / waktu}$$

Proses yang terjadi ketika aliran air sungai mengangkut sedimen dapat disamakan dengan alat transportasi pada umumnya yang memiliki hubungan karakteristik sebagai berikut :

$$\text{Laju kerja} = \text{kekuatan yang tersedia} \times \text{efisiensi}$$

Dimana kekuatan yang tersedia di dalam aliran sungai berasal dari gerakan massa air dari tempat yang lebih tinggi ke tempat yang lebih rendah.

Besarnya transport sedimen dalam aliran sungai merupakan fungsi dari suplai sedimen dan energy aliran sungai (*stream energy*), dimana ketika besarnya energi aliran sungai melampaui besarnya suplai sedimen maka akan terjadi degradasi sungai. Sebaliknya ketika suplai sedimen lebih besar dari pada energy aliran sungai, maka akan terjadi aggradasi sungai.

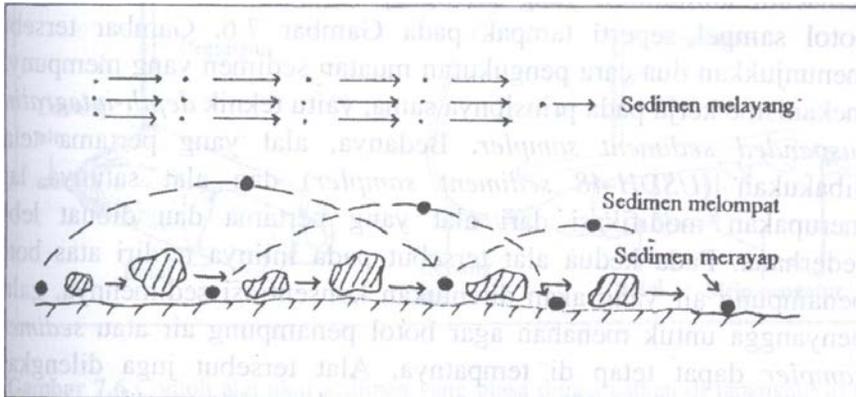
Aliran sungai merupakan system yang bersifat dinamik, sehingga aliran air sungai selalu bervariasi, dimana selama periode aliran besar (*stormflow events*) meningkatnya kurva hidrograf berasosiasi dengan meningkatnya laju transport sedimen atau laju degradasi sungai. Ketika debit aliran puncak telah terlampaui dan debit aliran berkurang dengan cepat, laju sedimenpun berkurang secara cepat dan berakibat terjadinya aggradasi sungai.

Proses Transpor Sedimen

Transpor sedimen akan terjadi ketika sedimen memasuki badan sungai, dimana kecepatan transpor sedimen merupakan fungsi dari kecepatan aliran sungai dan ukuran partikel sedimen.

Sedimen dapat diangkut dengan tiga cara: 1) ***Suspension***: ini umumnya terjadi pada sedimen-sedimen yang sangat kecil ukurannya (seperti lempung) sehingga mampu diangkut oleh aliran air atau angin yang ada, 2) ***Bed load***: ini terjadi pada sedimen yang relatif lebih besar (seperti pasir, kerikil, kerakal, bongkah) sehingga gaya yang ada pada aliran yang bergerak dapat berfungsi memindahkan partikel-partikel yang besar di dasar. Pergerakan dari butiran pasir dimulai pada saat kekuatan gaya aliran melebihi kekuatan inerti butiran pasir tersebut pada saat diam. Gerakan-gerakan sedimen tersebut bisa menggelundung, menggeser, atau bahkan bisa mendorong sedimen yang satu dengan lainnya, 3) ***Saltation*** yang dalam bahasa latin artinya meloncat umumnya terjadi pada sedimen berukuran pasir dimana aliran fluida yang ada mampu menghisap dan mengangkut sedimen pasir sampai akhirnya karena gaya grafitasi yang ada mampu mengembalikan sedimen pasir tersebut ke dasar.

Pada saat kekuatan untuk mengangkut sedimen tidak cukup besar dalam membawa sedimen-sedimen yang ada maka sedimen tersebut akan jatuh atau mungkin tertahan akibat gaya grafitasi yang ada. Setelah itu proses sedimentasi dapat berlangsung sehingga mampu mengubah sedimen-sedimen tersebut menjadi suatu batuan sedimen. Lebih jelasnya transpor sedimen dalam aliran sungai dapat dilihat pada Gambar 3.8 berikut.



Gambar 3.8. Transpor sedimen dalam aliran air sungai

Besarnya ukuran sedimen yang terangkut aliran air ditentukan oleh interaksi factor-factor sebagai berikut : 1) ukuran sedimen yang masuk ke badan sungai/ saluran air, 2) karakteristik saluran, 3) debit, dan 4) karakteristik fisik partikel sedimen. Sedangkan besarnya sedimen yang masuk sungai dan besarnya debit ditentukan oleh factor iklim, topografi, geologi, vegetasi dan cara bercocok tanam di daerah tangkapan air yang merupakan asal datangnya sedimen. Interaksi dari masing-masing factor di atas akan sangat menentukan jumlah dan type sedimen serta kecepatan transport sedimen (Asdak, 2002).

Sedimen dan Nisbah Pelepasan Sedimen

Menurut Asdak (2002) sedimen yang terbawa masuk ke dalam sungai hanya sebagian saja dari tanah yang tererosi dari tempatnya. Sebagian lagi dari tanah yang terbawa erosi akan mengendap pada suatu tempat di lahan di bagian bawah tempat erosi pada DAS tersebut. Nisbah antara jumlah sedimen yang terangkut kedalam sungai terhadap jumlah erosi yang terjadi di dalam DAS disebut Nisbah Pelepasan sedimen (*Sediment Delivery Ratio*).

Nilai pelepasan sedimen (NLS) mendekati satu artinya semua tanah yang terangkut erosi masuk ke dalam sungai, ini hanya mungkin terjadi pada DAS atau Sub DAS kecil yang memiliki lereng-lereng curam, banyak butiran halus (liat) yang terangkut, memiliki kerapatan drainase yang tinggi. Berikut nilai NLS sebagai fungsi dari luas daerah aliran sungai (Tabel 3.6).

Tabel 3.6. Pengaruh Luas DAS Terhadap Nisbah Pelepasan Sedimen (NLS)

No	Luas DAS (km ²)	Nisbah Pelepasan Sedimen (NLS) (%)
1	0,1	53,0
2	0,5	39,0
3	1,0	35,0
4	5,0	27,0
5	10,0	24,0
6	50,0	15,0
7	100,0	13,0
8	200,0	11,0
9	500,0	8,5
10	26000,0	4,9

Sumber : Robinson (1979 dalam Arsyad, 2010)

Beberapa persamaan Sediment Delivery Ratio (SDR) dari hasil penelitian empirik dapat dilihat sebagai berikut :

$$\text{SDR} = 0,41 A^{-0,3}$$

dimana :

A = luas DAS (Boyce, 1975 dalam Julien, 1995)

$$\text{SDR} = 4,40 \times 10^{-12} A^{-0,217} (R_b/L)^{0,3940} (CN)^{5,680}$$

dimana :

A = luas DAS

R_b/L = nisbah relief DAS terhadap panjang lereng

CN = curve number (Williams, 1977)

$$\text{SDR} = -0,02 + 0,385 A^{-0,2}$$

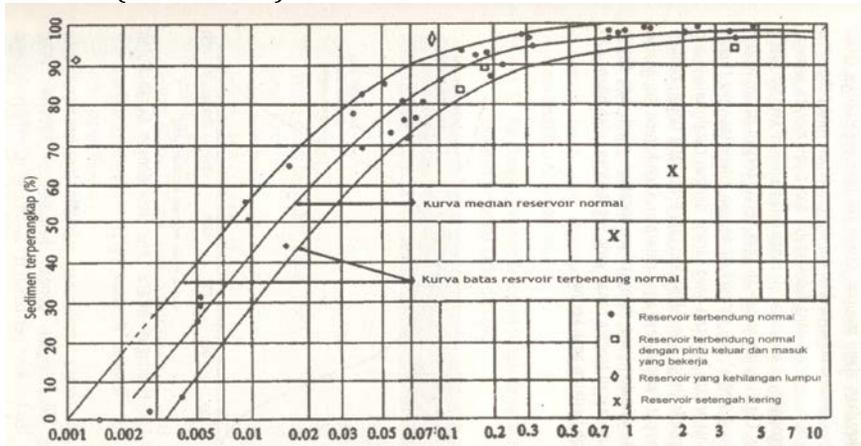
dimana :

A = luas DAS (Auerswald, 1992)

Sedimen yang terbawa oleh aliran air akan masuk kedalam reservoir (danau atau waduk) sebagian akan terendapkan di dalam

reservoir dan sebagian lagi akan terbawa keluar oleh air yang mengalir keluar reservoir. Banyaknya bagian sedimen yang mengendap didalam reservoir menunjukkan efisiensi reservoir dalam menangkap sedimen. Kemampuan reservoir dalam menahan dan mengendapkan sedimen dinyatakan sebagai efisiensi perangkap (*trap efficiency reservoir*) yang menunjukkan perbandingan antara sedimen yang diendapkan terhadap sedimen yang terbawa masuk (dinyatakan dalam persen).

Besarnya efisiensi perangkap dipengaruhi oleh sifat sedimen (distribusi ukuran butir) dan laju aliran air melalui reservoir (Gottschalk, 1964 dalam Arsyad 2006). Penahanan dan pengendapan sedimen didalam reservoir disebut simpanan tahanan (detention storage) yang dipengaruhi oleh hubungan antara kapasitas reservoir menahan air dengan volume aliran masuk reservoir, ukuran dan lokasi tempat aliran keluar juga mempengaruhi efisiensi perangkap. Namun penharuh relative setiap factor belum banyak diselidiki untuk dapat menetapkan nilai kuantitatifnya. Gottschalk (1964 dalam Arsyad 2006) menghubungkan efisiensi perangkap reservoir dengan nisbah kapasitas reservoir terhadap jumlah aliran masuk tahunan (Gambar 3.9).



Gambar 3.9. Hubungan antara efisiensi perangkap dengan Nisbah Kapasitas terhadap air masuk reservoir

Pengukuran sedimen

Vanoni (1977), menjelaskan bahwa gerakan sediment di sungai merupakan suatu phenomena alam yang sangat kompleks.

Pengembangan peralatan dan teknik pengukuran angkutan sediment akan sangat bergantung pada pemahaman fenomena erosi, transportasi, dan pengendapan.

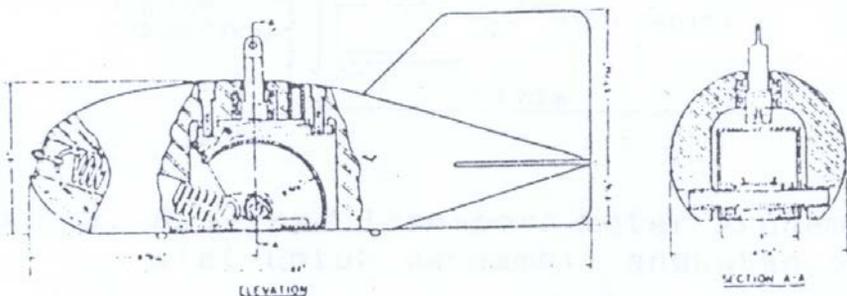
Akurasi dari penentuan besarnya debit sedimen akan tergantung dari teknik dan peralatan pengukuran di lapangan dalam pengumpulan data. Untuk itu diperlukan pengetahuan mengenai penyebaran sedimen dalam aliran.

Di samping perhitungan angkutan sedimen, maka pengukuran akan sangat diperlukan, terutama sebagai pembuktian atas teori-teori perhitungan angkutan sedimen. Teknik yang ada saat ini dapat dibagi dua kelompok: (1) pengukuran dengan samplers; (2) dengan menggunakan teknik tracers radio aktif.

Menurut Vanoni, saat ini banyak peralatan yang digunakan dan sangat bervariasi. Kebanyakan sampler yang digunakan tanpa kalibrasi terlebih dahulu. Akibatnya, banyak data yang didapat oleh para peneliti sebelumnya memberikan hasil yang berbeda dan tidak dapat dibandingkan, dan akurasi tidak dapat dievaluasi. Situasi tersebut telah dipantau oleh beberapa instansi pemerintah USA. Sebagai usaha antisipasinya, kemudian dibentuk Interagency Committee Program yang berkaitan dengan penggunaan peralatan sedimen dan menstandarisasi pengukuran sedimen. Pengkajian tersebut termasuk peralatan pengambilan contoh : sedimen melayang (*suspended sediment*), angkutan dasar (*bed-load*), dan material dasar (*bed-material*)

Alat pengambilan contoh material dasar (*bed material sampler*)

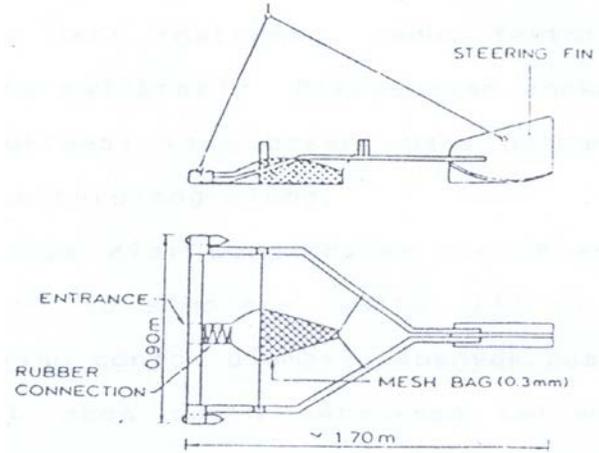
Untuk mengambil material dasar (*bed material*), dikenal beberapa jenis alat, antara lain: Van Veen Grab sampler, US BM-54, "Cambridge" Corer Mark 2



Gambar 3.10. Alat Pengambilan bahan dasar US BM-54 (Interagency committee, 1963 dalam Vanoni, 1977)

Alat pengambilan contoh angkutan dasar (*bed-load samplers*)

Kebanyakan alat ini terdiri dari tipe box atau berbentuk keranjang yang didalamnya terdapat botol contoh (container). Air dan sedimen masuk ke dalam botol contoh, kemudian tertangkap di dalamnya. Salah satu jenis alat contoh untuk mengambil angkutan dasar (bed-load) adalah *Bed-load Transport Meter Arnhem* (BTMA).



Gambar 3.11. Alat untuk mengambil angkutan dasar (Bed-load Transport Meter Arnhem (BTMA))

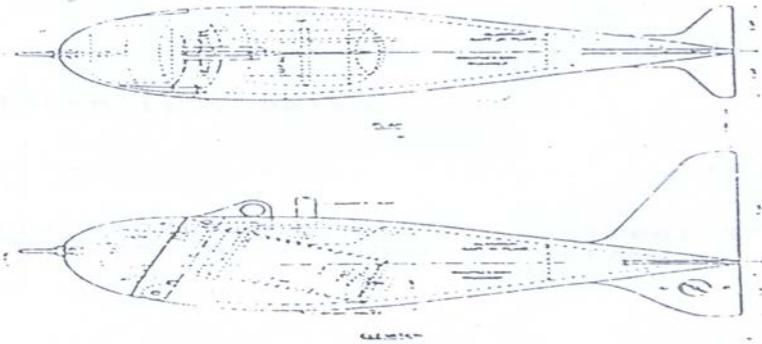
Penggunaan alat pengambilan angkutan dasar (*Bed-load samplers*) sampai saat ini masih mengalami banyak problem, antara lain ialah sangat sulit membuat alat berdiri secara vertikal karena adanya arus sungai dan membuat peralatan berada pada posisi horizontal sesuai bentuk dasar sungai. Selain itu, jika kita menurunkan alat tersebut, maka terjadi gangguan aliran yang menimbulkan penggerusan dan pengurangan kecepatan masuk ke dalam alat pengambilan muatan dasar. Untuk mendapatkan hasil yang nyata (*significant*), perlu dilakukan pengamatan dengan cara pengambilan muatan dasar berulang kali.

Alat pengambilan contoh angkutan melayang (*Suspended load samplers*)

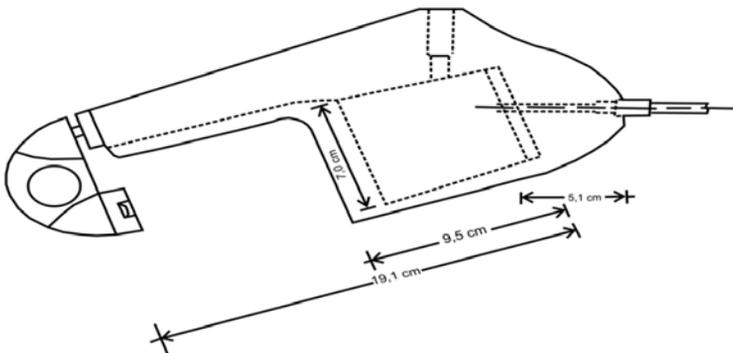
Jenis alat mengambil angkutan melayang, yaitu: Botol Delft, USD-74, USP-61, USDH 48 dan USDH 49. Jumlah material yang tertangkap oleh peralatan tersebut tergantung koefisien hidraulik,

yaitu perbandingan kecepatan aliran di luar alat dengan kecepatan aliran yang masuk ke botol, dan juga efisiensi dari instrumen. Kedua faktor tersebut ditentukan secara kalibrasi. Dikarenakan angkutan melayang menunjukkan fluktuasi yang besar, maka pengambilan contoh perlu dilakukan berulang-ulang.

Ada dua tipe alat pengambilan contoh angkutan melayang *suspended-load samplers*, yaitu: (1) dimana konsentrasi pengambilan contoh diambil sebanyak suatu volume air sebagai contoh pada suatu permukaan tertentu sebagai kedalaman rata-rata dan dikenal peralatan dengan nama: *Nansen bottle*, *mouse trap*, *depth integrating samplers*; (2) dimana kecepatan aliran dan konsentrasi diukur pada suatu permukaan tertentu dengan cara menurunkan alat dengan kecepatan konstan ke dalam dasar (*integration over the depth*).



Gambar 3.12. Alat Pengambil contoh sedimen suspensi US P-61 (interagency committee, 1952 dalam Vanoni, 1977)



Gambar 3.13. Alat Pengambil sedimen suspensi USDH-48 (interagency committee, 1952 dalam Vanoni, 1977)



BAB IV

PERUBAHAN LAND USE TERHADAP RESPON HIDROLOGI

Daerah hulu merupakan faktor produksi dominan yang sering mengalami konflik kepentingan penggunaan lahan untuk kegiatan pertanian, pariwisata, pertambangan, pemukiman dan lain-lain. Kemampuan pemanfaatan lahan hulu sangat terbatas, sehingga kesalahan pemanfaatan akan berdampak negatif pada daerah hilir (Supriadi, 2000). Secara ekologis, hal tersebut berkaitan dengan ekosistem tangkapan air yang merupakan rangkaian proses alami suatu siklus hidrologi yang memproduksi air permukaan dalam bentuk mata air, aliran air dan sungai.

Menurut Sugandhy (1999), jika dihubungkan dengan penataan ruang wilayah, maka alokasi ruang dalam rangka menjaga dan memenuhi keberadaan air, kawasan resapan air, kawasan pengamanan sumber air permukaan, kawasan pengamanan mata air, maka minimal 30 % dari luas wilayah harus diupayakan adanya tutupan tegahan pohon yang dapat berupa hutan lindung, hutan produksi atau tanaman keras, hutan wisata, dan lain-lain. Selanjutnya Juo *et al.*, 1995; Lal, 1986; Moreau, 1986; Obara *et al.*, 1995 mengatakan meskipun alih guna lahan hutan berdampak negatif telah banyak dibuktikan, namun bila kebutuhan akan lahan begitu mendesak, konversi lahan hutan sulit sekali untuk dihindari.

4.1. Dampak alih guna lahan hutan terhadap erosi tanah dan limpasan permukaan (run off)

4.1.1. Erosi dan Aliran Permukaan pada Lahan Pertanian Berbasis Tanaman Kopi.

Propinsi Lampung merupakan provinsi dengan kasus alih guna lahan hutan yang tergolong tinggi, dimana secara keseluruhan kawasan hutannya telah beralih fungsi menjadi kebun kopi dan diperkirakan telah mencapai ± 71.000 ha (Hadisepoetro, 1999). Selanjutnya menurut Ditjen Perkebunan (2000) dari areal pertanaman kopi seluas 137.700 ha, $\pm 52\%$ areal kopi di Provinsi Lampung berada di kawasan hutan.

Penelitian ini berlokasi di Dusun Tepus dan Dusun Laksana, Kecamatan Sumberjaya, Kabupaten Lampung Barat, dimana plot penelitian yang dilakukan merupakan areal tanaman kopi yang berumur 3 tahun, yang sebelumnya merupakan areal tanaman kaliandra yang ditanam saat dilakukan program rehabilitasi lahan kopi pada tahun 1989 dengan kemiringan lahan berkisar antara 50-60% dan curah hujan rata-rata tahunan 2614 mm/tahun.

Pengamatan erosi dan limpasan permukaan dilakukan pada plot pengamatan yang berukuran 15 m (searah lereng) x 8 m (searah kontur). Bagian atas dan samping plot dibatasi seng dengan lebar 30 cm. Sebagian dari seng pembatas (15 cm) ditanam secara vertikal ke dalam tanah. Pada lereng bawah setiap petak dipasang bak penampung (*gutter*) dengan daya tampung 0,13-0,16 m³. Apabila gutter penuh, air limpasan permukaan mengalir ke *Chin Ong meter* (Khan, 1998) dan sebagian (1-3%) dari limpasan permukaan mengalir ke jerigen berukuran 0,025 m³ melalui splitter (*slit*) Chin Ong meter. Pemasangan Chin Ong meter di lapangan dideskripsikan dengan rinci dalam Widiyanto *et al.*, (2004). Untuk mendapatkan proporsi yang tepat dari limpasan permukaan yang mengalir melalui Chin Ong meter, dilakukan kalibrasi dari masing-masing Chin Ong meter.

Penelitian menggunakan rancangan acak kelompok (*completely randomized block design*) dengan 5 perlakuan dan 4 ulangan, dua ulangan terletak di Dusun Tepus dan dua ulangan lainnya terletak di Dusun Laksana. Perlakuan yang diuji meliputi:

1. Monokultur kopi : merupakan bentuk khas usahatani kopi di lokasi penelitian terutama pada saat kopi berumur < 3 tahun (T1)

2. Kombinasi kopi dengan tanaman pelindung *Gliricidia sepium* (T2)
3. Kombinasi antara perlakuan 2 + rorak dengan lebar 0,4 m, panjang 1m, dalam 0,3 m, dengan jarak antar rorak 3 m (T3)
4. Kombinasi antara perlakuan 2 + partial weeding, merupakan strip rumput alami selebar 0,25 m diantara barisan tanaman kopi, jarak antar strip 3m (T4)
5. Kombinasi antara perlakuan 2 + gulud searah kontur, jarak antar gulud adalah 3m (T5)

Erosi dan limpasan permukaan diukur pada setiap kejadian hujan. Limpasan permukaan dan erosi yang terjadi pada setiap plot merupakan total dari aliran permukaan dan sedimen yang tertampung dalam bak penampung (*gutter*) dan yang melewati *Chin Ong meter* setelah terlebih dahulu dikalikan dengan faktor konversi.

Total aliran permukaan untuk setiap kejadian hujan dihitung dengan persamaan:

$$R_t = R_g + (R_c \times F_c)$$

dimana:

R_t = total volume aliran permukaan,

R_g = volume limpasan permukaan yang tertampung di gutter,

R_c = volume limpasan permukaan yang melewati slit *Chin Ong meter*,

F_c = faktor konversi yaitu volume limpasan permukaan yang melewati *Chin Ong meter* dibagi dengan limpasan permukaan yang melalui slit *Chin Ong meter* menuju jerigen.

Koefisien limpasan permukaan, dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$K_R = R_h / (C_H \times C_o \times 100 \%)$$

dimana:

K_R = Koefisien limpasan permukaan (%)

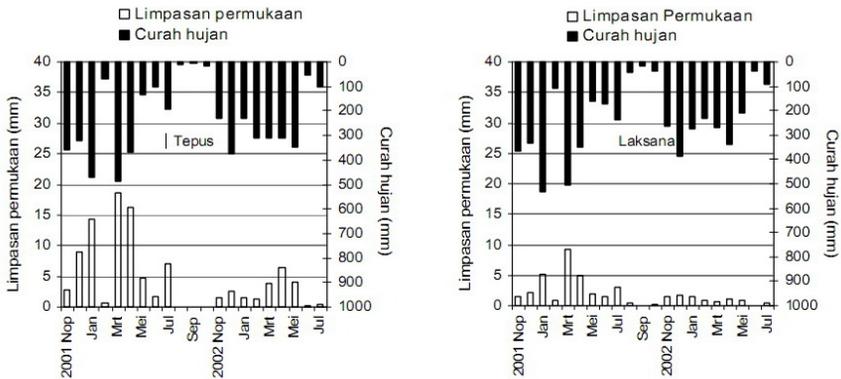
R_h = total volume limpasan permukaan dibagi luas plot (mm)

C_H = jumlah curah hujan (mm), = kemiringan lahan (derajat)

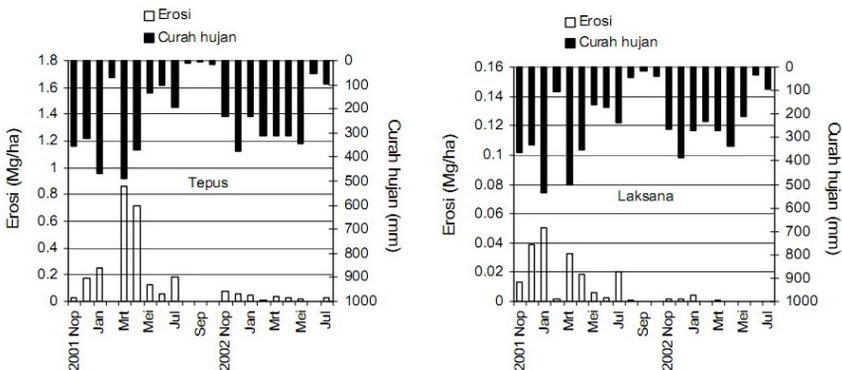
Perkembangan pertumbuhan kopi pada setiap petakan dilakukan dengan mengukur tinggi dan luas kanopi tanaman kopi. Pengukuran dilakukan pada 10 tanaman sample yang dipilih secara acak pada awal penelitian dan dilakukan setiap periode 6 bulan.

Hasil pengukuran aliran permukaan dan erosi bulanan pada skala plot, menunjukkan bahwa puncak limpasan permukaan terjadi

pada periode antara bulan Nopember 2001- Oktober 2002 (baik di Dusun Tepus maupun Dusun Laksana) yaitu pada bulan Januari, Maret dan April 2002. Bulan terjadinya puncak limpasan permukaan rata-rata bersamaan dengan bulan terjadinya puncak musim hujan (Gambar 4.1). Hal ini juga terjadi pada puncak erosi yaitu pada bulan Januari, Maret dan April 2002 (Gambar 4.2).



Gambar 4.1. Rata-rata limpasan permukaan dan curah hujan bulanan selama periode Nopember 2001- Oktober 2002 dan periode Nopember 2002-Juli 2003 di Tepus dan Laksana.



Gambar 4.2. Rata-rata erosi dan curah hujan bulanan selama periode Nopember 2001 - Oktober 2002 dan periode Nopember 2002-Juli 2003 di Tepus dan Laksana.

Erosi dan limpasan permukaan yang terjadi pada periode Nopember 2001-Juli 2003 menurun drastis jika dibandingkan dengan hasil pengukuran pada periode sebelumnya.

Terdapat beberapa faktor penyebab menurunnya erosi dan limpasan permukaan, antara lain jumlah curah hujan yang relatif lebih kecil, yaitu untuk 9 bulan pengamatan total curah hujan di Dusun Tepus dan Dusun Laksana berturut-turut hanya 2100 dan 2264 mm, dibandingkan 2507 dan 2763 mm pada periode yang sama tahun sebelumnya (Nopember 2001-Juli 2002).

Faktor hujan (besarnya curah hujan, intensitas hujan, dan distribusi hujan) yang sangat menentukan kekuatan dispersi hujan terhadap tanah, jumlah dan kecepatan aliran permukaan serta erosi. Rata-rata jumlah curah hujan di dusun Laksana dan dusun Tepus untuk bulan Nopember 2001 sampai dengan Oktober 2002 tergolong tinggi (2539-2862 mm/tahun), namun intensitas dan distribusi hujan dapat menjadi penyebab kecilnya aliran permukaan dan erosi yang terjadi. Menurut Hudson (1976), curah hujan dengan intensitas >25mm/jam merupakan curah hujan yang bersifat erosif. Hasil pengamatan curah hujan dari tahun 1996 sampai dengan tahun 1999 menunjukkan bahwa hanya 14.2% dari curah hujan di Sumberjaya yang mempunyai intensitas yang lebih besar dari 25 mm/jam (Affandi *et al.*, 2002). Selain intensitas yang tergolong rendah, curah hujan di lokasi penelitian terdistribusi hampir sepanjang tahun (8-9 bulan dalam satu tahun), dalam setiap bulannya hujan juga terdistribusi dalam 11-21 hari hujan; curah hujan harian didominasi curah hujan yang besarnya < 10mm/hari.

Faktor vegetasi juga sangat berpengaruh dalam penelitian ini terutama terkait dengan perkembangan tajuk tanaman, dimana peranan tanaman kopi dalam menghambat erosi dan limpasan permukaan juga menjadi lebih besar karena persen penutupan lahan sudah relatif lebih tinggi dibanding periode sebelumnya. Hal ini dapat dilihat bahwa pada tahun pertama setelah tanam, erosi pada lahan kopi mencapai 26 Mg/ha/thn dan erosi menurun sampai 0,6 Mg/ha/thn pada tahun ketiga. Ini juga ditunjukkan oleh hasil penelitian Pujiyanto *et al.*, (2001) di Jember, Jawa Timur. Tanaman umur 4 tahun 8 bulan, rata-rata persen penutupan lahan telah mencapai 85%, sedangkan 19 bulan sebelumnya (umur 3 tahun) sekitar 21%. Penyebaran dan pertumbuhan akar juga sangat berperan dalam meningkatkan peran vegetasi dalam menghambat erosi dan aliran permukaan. Hasil penelitian Hartobudoyo (1979) menunjukkan bahwa 90% perakaran tanaman kopi terkonsentrasi di lapisan tanah antara 0-30 cm. Hal tersebut dapat menyebabkan terbentuknya tenunan akar halus di lapisan permukaan yang mengikat agregat tanah.

Rendahnya tingkat erosi dan aliran permukaan di dua lokasi tersebut selain disebabkan oleh faktor pola hujan dan vegetasi, faktor struktur tanah (fisika tanah) juga ikut mempengaruhi. Hasil analisis tanah menunjukkan bahwa rata-rata persen pori total pada kedua tanah tersebut mencapai 69%, dengan rata-rata proporsi pori makro pada kedalaman 0-10 cm mencapai 26% dan pada kedalaman 10-20 cm mencapai 20%. Stabilitas tanah di kedua lokasi juga tergolong sangat stabil (lihat Tabel 4.1).

Tabel 4.1. Kondisi Fisik Tanah di Lokasi Penelitian

Parameter	Kedalaman tanah (cm)	
	0-10	10-20
Pasir (%)	14	12
Debu (%)	15	15
Liat (%)	71	73
BD (g cm ⁻³)	0,82	0,81
Total pori (%)	69	69
Pori drainase cepat (%)	26	20
Pori drainase lambat (%)	5	5
Pori air tersedia(%)	16	15
Permeabilitas (cm/jam)	6,8	2,7
% Agregat	72	73
Stabilitas Agregat	167	176

Peranan sifat fisik tanah sangat besar dalam menentukan tingkat erosi yang terjadi pada lahan usahatani kopi, ini ditunjukkan dengan membandingkan hasil di dusun Tepus dan dusun Laksana dengan hasil penelitian Widiyanto *et al.*, (2004) di desa Bodong. Jumlah erosi yang terjadi pada lahan usahatani kopi umur 3 tahun selama 3 bulan pengukuran di desa Bodong telah mencapai 37 Mg/ha dan koefisien aliran permukaan mencapai 29%.

Kemiringan lahan dan curah hujan di desa Bodong relatif sama dengan dusun Tepus dan dusun Laksana, sedangkan sifat fisik tanahnya sangat berbeda, diantaranya ditunjukkan oleh persen pori makro dan permeabilitas tanah yang jauh lebih rendah dibanding Tepus dan Laksana

Jika dihubungkan dengan nilai tolerable soil loss (TSL), erosi yang terjadi pada lahan usahatani kopi di Dusun Tepus dan Dusun Laksana berada di bawah batas erosi yang masih dapat dibiarkan (*tolerable soil loss*), yang jika dihitung berdasarkan konsep

kedalaman ekivalen dan umur guna tanah (Hammer, 1981), nilai *tolerable soil loss* untuk lokasi penelitian adalah sekitar 10 Mg/ha/th.

Uraian hasil penelitian di atas dapat disimpulkan bahwa struktur tanah (kondisi fisik tanah) merupakan faktor yang sangat dominan dalam menentukan erosi dan aliran permukaan pada lahan usahatani berbasis kopi di Sumberjaya. Pada tanah yang pori makronya > 24% dan permeabilitasnya >6 cm/jam di dusun Tepus dan dusun Laksana, erosi yang terjadi < 2 Mg/ha/thn, sedangkan pada tanah yang pori makronya < 4% dan permeabilitasnya < 2cm/jam di Bodong, erosi telah mencapai 37 Mg/ha dalam jangka waktu 3 bulan.

Perbedaan tingkat erosi pada berbagai struktur tanah yang berbeda, berimplikasi bahwa rekomendasi tindakan konservasi perlu bersifat *soil spesifik* dalam artian diarahkan untuk tanah yang peka terhadap erosi.

4.1.2. Erosi pada Berbagai Penggunaan Lahan Di DAS Citarum

Penelitian dilakukan di DAS Citarum, Jawa Barat, sedangkan lokasi pengamatan tersebar dari daerah hulu sampai hilir aliran sungai Citarum yang daerah penelitian DAS Citarum dibagi menjadi daerah tangkapan air (DTA) bendungan Saguling, Cirata, Jatiluhur, dan daerah hilir yang berada di bagian hilir waduk Jatiluhur.

Dari pengamatan di lapangan menunjukkan bahwa alih fungsi lahan terus berlangsung sesuai dengan kebutuhan, baik untuk mengembangkan permukiman ataupun untuk penggunaan lain, akibatnya terjadi perubahan jumlah tanah yang tererosi. Menurut Wahyunto *et al.*, (2001) di DAS Citarik hulu, sejak tahun 1969 sampai 2000 telah terjadi perubahan penggunaan lahan. Lahan sawah berubah menjadi tegalan seluas 705 ha. Penyusutan lahan sawah sejak tahun 1991 sampai 2000 mencapai 787 hektar (3%), atau penyusutannya mencapai 87,4 ha/tahun (0,3%/tahun), untuk itu dilakukan asumsi rasio untuk setiap daerah tangkapan air yaitu dengan :

$$APL = [(L1991 - L2000)/LCH*100]/31$$

dimana:

- APL = asumsi perubahan lahan
- L1991 = luas penggunaan lahan pada tahun 1991
- L2000 = luas penggunaan lahan pada tahun 2000
- LCH = luas seluruh Sub DAS Citarik Hulu

Asumsi perubahan lahan lebih ditujukan pada perubahan luasan penggunaan lahan (Tabel 4.2).

Tabel 4.2. Asumsi rasio perubahan penggunaan lahan di DAS Citarum per tahun

Penggunaan lahan	DTA				Rata-rata Citarum
	Saguling	Cirata	Jatiluhur	Cit. Hilir	
Tambak/mangrove	0	0	0	-0,02	-0,02
Waduk	0	0	0	0	0
Hutan lindung	0	0	0	0	0
Hutan	-0,24	-0,30	-0,20	-0,24	-0,25
Sawah	-0,05	-0,07	-0,04	-0,06	-0,06
Perkebunan the	0	-0,02	0	0	-0,02
Perkebunan karet	0	-0,05	-0,02	-0,08	-0,04
Tegalan	+0,20	+0,20	+0,20	+0,08	+0,17
Kebun	+0,15	+0,12	+0,20	+0,17	+0,16
campuran/permukiman					
Permukiman/industri	+0,14	+0,14	+0,15	+0,14	+0,14
Semak, belukar, tegalan	-0,42	-0,46	-0,30	-0,65	-0,46

Untuk menghitung besarnya erosi digunakan persamaan USLE, yaitu :

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Hasil penelitian menunjukkan bahwa lahan tegalan mempunyai tingkat erosi paling tinggi (22 - 61 ton/ha/tahun) dibandingkan dengan penggunaan lainnya (Tabel 4.3).

Tabel 4.3. Rata-rata erosi pada berbagai tipe penggunaan lahan di DAS Citarum

Penggunaan lahan	DTA			
	Saguling	Cirata	Jatiluhur	Citarum Hilir
	t/ha/tahun			
Hutan	0,13	0,24	0,14	0,24
Kebun campur	8,40	15,40	36,86	30,68
Karet	0	8,85	11,39	40,75
Permukiman	0,03	0,02	0,15	0,02
Sawah	0,33	0,40	1,45	1,13
Semak belukar	1,12	1,61	0,47	0,95
Tegalan	22,02	61,31	40,05	35,66
The	23,11	26,94	9,65	33,48

Besarnya erosi disebabkan oleh pola tanam yang tidak menguntungkan dalam pengendalian erosi. Penutupan lahan mempunyai peran yang penting dalam mengendalikan erosi. Pengelolaan lahan tegalan yang selalu digunakan untuk tanaman semusim juga menjadi penyebab tingginya erosi, disamping itu

kebun campuran dengan tutupan lahan oleh pepohonan yang jarang dan permukaan tanah dibiarkan terbuka juga merupakan penyebab erosi yang cukup besar setiap tahunnya (30 - 36 ton/ha/tahun).

Perkebunan karet umumnya menempati areal yang peka erosi, sehingga walaupun nilai penutupan lahannya cukup baik, di bagian hilir DAS Citarum mempunyai tingkat erosi yang lebih tinggi, hal ini disebabkan karena keadaan kebun karet yang sangat beragam, ada yang berumur kurang dari 3 tahun dengan tanaman penutup tanah baik, tetapi ada juga yang kondisi penutupannya sangat jelek. Untuk kondisi yang terakhir ini menyebabkan nilai erosi cukup tinggi.

Erosi yang terjadi pada lahan sawah lebih besar dibandingkan dengan lahan permukiman hal ini lebih disebabkan oleh kegiatan pengolahan tanah.

Erosi juga terjadi di area permukiman, terutama di tempat yang tidak terlindung dan di saluran pembuangan air. Di beberapa tempat karena permukiman yang padat dan hampir seluruh permukaan tanah terlindungi maka erosi pun sangat kecil. Akan tetapi perlindungan permukaan tanah yang kurang baik tetap terjadi erosi, terutama disebabkan oleh teknik pengaturan aliran permukaan yang kurang baik.

Pengaruh perubahan penggunaan lahan terhadap erosi

Perubahan penggunaan lahan sawah menjadi kebun campuran dapat meningkatkan erosi sebesar 6 - 10 t/ha/tahun. Di beberapa tempat, erosi sebanyak itu masih dalam ambang batas erosi yang dapat dibiarkan. Lahan hutan yang berubah menjadi lahan kebun campuran, sawah, dan tegalan menyebabkan terjadi peningkatan erosi. Peningkatan erosi terbesar jika lahan hutan berubah menjadi tegalan tanpa penerapan tindakan konservasi tanah. Kasus ini terjadi terutama di sekitar Pangalengan, yaitu lahan hutan dijadikan lahan sayuran. Lahan hutan yang berubah menjadi kebun campuran meningkatkan erosi antara 4 - 10 ton/ha/tahun, sedangkan yang menjadi lahan sawah meningkat 0,5 ton/ha/tahun sampai dengan 4,2 ton/ha/tahun.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa lahan tegalan mempunyai tingkat erosi paling tinggi (22 - 61 ton/ha/tahun) dibandingkan dengan penggunaan lainnya (Tabel 4.3). Pengelolaan lahan tegalan yang selalu digunakan untuk tanaman semusim menjadi penyebab tingginya erosi. Di beberapa tempat, selain

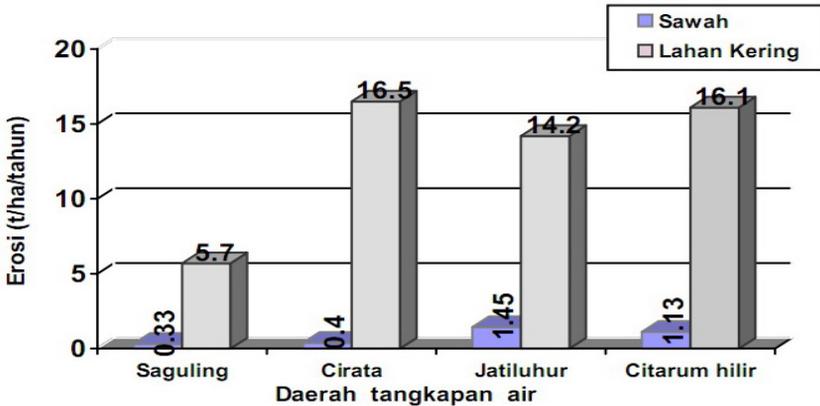
mempunyai kepekaan tanah yang tinggi, besarnya erosi juga disebabkan oleh pola tanam yang tidak menguntungkan dalam pengendalian erosi. Penutupan lahan mempunyai peran yang penting dalam mengendalikan erosi.

Selanjutnya erosi yang terjadi pada lahan sawah diduga tidak lebih besar dari lahan hutan, sebab erosi pada lahan sawah lebih disebabkan oleh adanya aktivitas pengolahan tanah ketika akan menanam dan tidak selalu bergantung kepada kejadian hujan

Erosi yang terjadi pada lahan sawah sangat dipengaruhi oleh kegiatan yang sedang dilaksanakan petani di lahan sawah. Pengolahan tanah kedua dengan kegiatan utama pelumpuran merupakan saat kritis untuk terjadinya erosi dibandingkan dengan kegiatan lainnya (Sutono *et al.*, 2001), sedangkan pada pengolahan tanah pertama dengan kegiatan utama pembajakan atau pencangkulan tidak terjadi aliran air karena pekerjaan tersebut dilakukan dalam kondisi macak-macak. Kejadian ini menunjukkan bahwa erosi pada lahan sawah lebih disebabkan oleh kegiatan pengolahan tanah, walaupun tidak menutup kemungkinan adanya pengaruh hujan pada saat tanaman masih kecil dan permukaan tanah tidak digenangi air. Oleh karena itu, lahan sawah merupakan salah satu teknik konservasi tanah yang dapat melestarikan sumber daya lahan.

Fungsi sawah dalam pelestarian lahan

Jumlah erosi yang terjadi pada lahan sawah lebih kecil dibandingkan dengan lahan kering. Lahan sawah merupakan salah satu ekosistem yang stabil, sehingga jumlah erosinyapun sangat kecil berkisar dari 0,3 – 1,5 ton/ha/tahun (Gambar 4.3). Erosi pada lahan sawah lebih disebabkan oleh aktivitas yang dilakukan sebelum tanam, terutama ketika pelumpuran sedang dilakukan. Besarnya erosi bergantung kepada debit air yang ke luar dari petakan sawah dan berlangsung sampai beberapa jam kemudian setelah pelumpuran selesai. Pada kegiatan penanaman dan penyiangan, erosi yang terjadi tidak lebih banyak dibandingkan dengan saat pelumpuran (Sutono *et al.*, 2001). Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Tarigan dan Sinukaban (2001) bahwa konsentrasi sedimen yang terbawa aliran permukaan meningkat selama pengolahan tanah dan kemudian kembali ke normal setelah 200 menit.



Gambar 4.3. Estimasi erosi pada lahan sawah dan lahan kering

Sedimen yang terangkut ketika pelumpuran lebih banyak dalam bentuk liat dibandingkan dengan debu (Sutono *et al.*, 2001). Oleh karena itu makin tinggi kadar liat pada lapisan bidang olah lahan sawah, erosi yang terjadi akan menjadi lebih banyak. Partikel liat yang lebih halus dapat terangkut lebih jauh untuk kemudian mengendap di daerah-daerah cekungan seperti bendungan. Hal inilah yang menyebabkan erosi pada lahan sawah yang berada di DTA Jatiluhur dan Citarum hilir lebih tinggi dibandingkan dengan DTA Saguling dan Cirata (Gambar 4.3). Kontribusi sedimen dari lahan sawah terhadap konsentrasi sedimen di dalam aliran sungai yang kemudian mengendap di dasar waduk dari tahun ke tahun nilainya lebih kecil dibandingkan dengan rata-rata tertimbang dari lahan kering bukan hutan (Tabel 4.3). Kontribusi dari lahan kering di DTA Saguling paling rendah (5,7 ton/ha/tahun) karena sifat-sifat tanah tidak mendukung untuk terjadinya erosi. Namun jumlah tersebut akan meningkat seiring dengan peningkatan perubahan peruntukan lahan.

4.1.3. Alih Guna Lahan Hutan Menjadi Lahan Pertanian : Sistem Kopi *Monokultur*

Penebangan hutan mengakibatkan terjadinya lahan terbuka, akibatnya pada musim kemarau akan terjadi percepatan proses reaksi kimia dan biologi yang salah satunya adalah penguraian bahan organik tanah (dekomposisi). Sebaliknya pada musim hujan, air hujan akan langsung memukul permukaan tanah tanpa ada yang menghalanginya sehingga akan terjadi pecahnya agregat tanah, meningkatnya aliran air di permukaan tanah sekaligus mengangkut

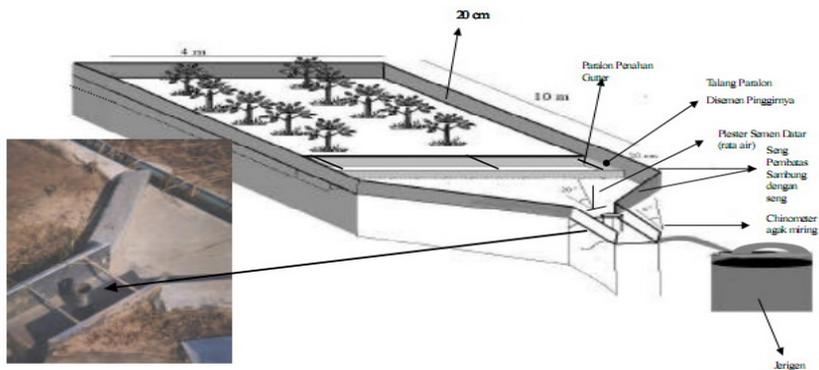
partikel-partikel tanah dan bahan-bahan lain termasuk bahan organik (erosi).

Penanaman kembali pada lahan terbuka dengan pepohonan non-kayu seperti buah-buahan dan tanaman industry (misalnya kopi, karet, kakao, dsb) diharapkan dapat menahan degradasi lahan yang sudah terbuka itu.

Penelitian ini dilakukan pada lahan berbukit sampai bergunung di dusun Bodong, Sumberjaya, Kabupaten Lampung Barat. Kawasan ini berada pada ketinggian antara 800-1.000 m di atas permukaan laut, didominasi tanah-tanah yang berkembang dari bahan vulkanik. Penggunaan lahan di kawasan ini sebelumnya berupa hutan sekunder dengan status hutan konservasi, namun sebagian telah ditebang oleh masyarakat sekitar dan umumnya ditanami kopi. Hal ini mulai terjadi beberapa puluh tahun yang lalu, tetapi akhir-akhir ini menjadi semakin cepat dan luas.

Limpasan permukaan dan erosi dimonitor dan diukur dari petak-petak erosi yang dibangun pada hutan sekunder dan pada hutan yang sudah ditebang habis dan digantikan dengan tanaman kopi, sehingga umur kopi saat percobaan ini adalah berturut-turut 1 ; 3 ; 7 dan 10 tahun. Petak erosi berukuran 40 m², dengan panjang 10 m searah lereng dan lebar 4 m, dengan kemiringan sekitar 30°. Dari luasan lahan tersebut setiap kejadian hujan diukur besarnya limpasan permukaan dengan menggunakan alat penampung *Chin-ong-meter* (Gambar 4.4). Pengukuran limpasan dan erosi dilakukan sesudah setiap peristiwa hujan selama tiga bulan terakhir musim penghujan tahun 2001 (Mei s/d Juli 2001).

Chin-ong meter (Gambar 4.4) merupakan suatu penyalur limpasan permukaan yang dipasang di saluran pembuangan plot pengukur limpasan permukaan dan erosi.



Gambar 4.4. Diagram plot erosi dan alat penampung limpasan permukaan dan erosi tanah.

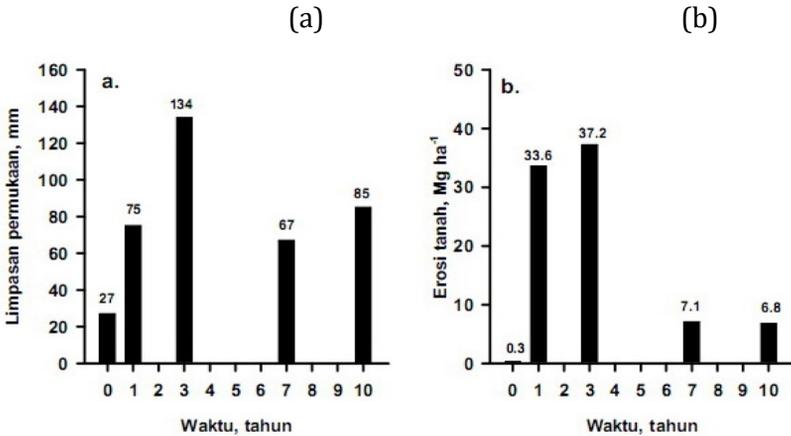
Chin-ong meter ini terbuat dari plat besi setebal 3 mm yang berbentuk persegi panjang dengan panjang 50 cm, lebar 25 cm dan tinggi 15 cm. Di bagian tengah dan bawah dari alat ini dibuat lubang selebar diameter dalam dari pipa besi berdiameter 5 cm. Di dalam pipa tersebut di buat lubang sempit memanjang guna

pembuangan air yang ditampung dalam jerigen untuk pengukuran limpasan permukaan dan erosi. Limpasan permukaan dan erosi yang lainnya diteruskan ke bawah dalam permukaan dasar Chin-ong meter menuju pembuangan. Alat ini pada bagian yang panjang dipasang agak miring namun pada bagian lebar harus

dipasang dalam posisi yang rata dan dicek dengan *water-pas*. Dengan teknik pemasangan tersebut, aliran air diasumsikan sebagai aliran laminar, sehingga sebagian aliran akan masuk silinder dan lainnya terus menuju pembuangan. Perbandingan antara jumlah air yang masuk silinder dan yang keluar setiap alat yang terpasang di lapangan harus dikalibrasikan melalui proses penuangan air 10 liter dari atas alat dan diukur limpasan yang masuk ke dalam jerigen. Selanjutnya jika sudah ada angka kalibrasi untuk setiap alat maka untuk pengamatan limpasan permukaan dan erosi cukup menampung aliran yang lewat Chin-ong meter, kemudian diukur volume air dan sedimen di jerigen penampung.

Infiltrasi dihitung berdasarkan neraca air dengan memberikan curah hujan buatan dari alat curah hujan buatan (*rainfall simulator*) pada luasan tanah 0.2 m x 0.3 m. Intensitas hujan yang diberikan sebesar 60 mm/jam selama 5 menit dan diulang 3 kali untuk setiap plot secara berurutan. Limpasan permukaan diukur setiap 30 detik. Laju infiltrasi dihitung dari pengurangan curah hujan dengan limpasan permukaan. Infiltrasi yang disajikan adalah infiltrasi konstan dimana tanah telah mengalami penenuhan air.

Hasil penelitian menunjukkan terjadinya hujan total sebesar 458 mm selama percobaan menyebabkan terjadinya limpasan permukaan dari lahan yang masih tertutup hutan sebesar 27 mm, sementara limpasan permukaan pada hutan yang sudah ditebang habis mencapai hampir tiga kali lipat (75 mm) (Gambar 4.5a.).



Gambar 4.5. (a) Limpasan permukaan dan (b) erosi tanah dari petak percobaan dengan berbagai umur tanaman kopi dibandingkan dengan petak hutan yang masih belum ditebang, diamati pada periode mei-juli 2001 dengan curah hujan total 458 mm, dimana waktu 0 = hutan sekunder, 1 = kopi umur 1 tahun, 3= kopi umur 3 tahun, 7= kopi umur 7 tahun dan 10 = kopi umur 10 tahun

Tingginya limpasan permukaan ini sejalan dengan erosi yang sangat besar pada kebun kopi yang berumur satu tahun, yakni sebesar 33,6 Mg/ha dibandingkan hanya 0,3 Mg/ha dari lahan yang masih tertutup hutan (Gambar 4.5b).

Perubahan yang besar ini diakibatkan oleh terbukanya permukaan tanah dari hutan dengan kanopi tertutup 100% menjadi terbuka dengan penutupan kanopi hanya 12% (Tabel 4.4), sehingga air hujan yang jatuh akan langsung mengenai dan memukul permukaan tanah. Walaupun perubahan sifat fisik permukaan tanah pada tahun pertama ini tidak besar tetapi jumlah porositas makro tanah dan penurunan laju infiltrasi ternyata sangat menentukan besarnya limpasan permukaan (Suprayogo *et al.*, 2004). Pukulan air hujan yang langsung mengenai permukaan tanah menyebabkan sebagian agregat hancur, sehingga ruang pori makro berkurang dan laju infiltrasi menurun. Cunningham (1963) membuktikan terjadinya penurunan jumlah pori makro dan pori mikro di lapisan permukaan (0-7,5 cm) sebesar 10% bilamana hutan ditebang habis. Sedangkan Moura Filho & Buol *dalam* Sanchez (1976) hanya mendapati bahwa pori makro saja yang menurun sebesar 14-21% di horison A dan B, sedangkan pori mikro justru meningkat.

Tabel 4.4. Karakteristik tajuk tanaman kopi dan penutupan tanah oleh seresah daun.

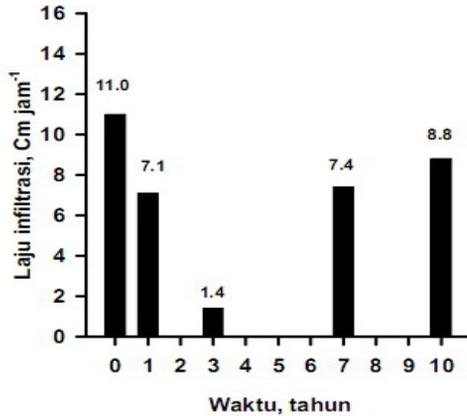
	Hutan	Kopi monokultur (tahun)			
		1	3	7	10
Luas Penutupan Tajuk (%)					
● Rata - rata	100	12	97	95	100
● Kisaran	100	10-20	60-100	50-100	100
Kedalaman tajuk (m)					
● Rata - rata	Multistorey	0,4	1,6	1,8	1,4*
● Kisaran	Multistorey	0,1-0,6	1,3-1,8	1,3-2,0	1,1-1,5
Produksi Seresah					
Penutupan permukaan tanah oleh seresah daun (%)					
● Rata -rata	100	4	47	66	68
● Kisaran	100	2-6	14-81	34-95	46-87

*) dipangkas pada umur 5 tahun

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pembukaan hutan mengakibatkan pecahnya sebagian agregat terutama yang kurang stabil. Penurunan jumlah ruang pori makro akibat hancurnya sebagian agregat mengakibatkan laju infiltrasi menurun, sehingga di bawah kondisi curah hujan yang sama, limpasan permukaan yang terjadi pada lahan terbuka menjadi semakin banyak (Gambar 4.5a).

Menurut Suprayogo *et al.*, (2004) meskipun telah ada tanaman kopi yang berumur tiga tahun dan telah memberikan penutupan tajuk hampir 100%, ternyata kadar bahan organik, jumlah pori makro dan laju infiltrasi semakin kecil pada tahun ketiga. Laju infiltrasi pada tahun ketiga mencapai 1,4 cm/ jam, yang berarti menjadi semakin lambat (Gambar 4.6).

Akibat lambatnya infiltrasi, maka limpasan permukaan semakin besar (134 mm) dan erosi juga bertambah besar (37,2 Mg/ha) (lihat Gambar 4.5a dan 4.5b di atas). Faktor lain yang menyebabkan semakin besarnya limpasan permukaan dan erosi dikarenakan pada fase pertumbuhannya, tanaman kopi tumbuh cepat (umur 3 tahun tajuknya sudah hampir menutupi seluruh permukaan tanah) namun tidak banyak daun-daun tua yang mati dan gugur menjadi seresah yang bisa menambah bahan organik di lapisan tanah atas. . Kadar bahan organik lapisan atas sebesar 1,2%, menunjukkan ada kenaikan sedikit dibanding tahun pertama sebesar 1,1% (Suprayogo *et al.*, 2004).



Gambar 4.6. Laju infiltrasi tanah (cm/jam) dari petak percobaan dengan berbagai umur tanaman kopi dibandingkan dengan petak hutan yang masih belum ditebang, dimana waktu 0 = hutan sekunder, 1 = kopi umur 1 tahun, 3 = kopi umur 3 tahun, 7 = kopi umur 7 tahun dan 10 = kopi umur 10 tahun.

Jumlah serasah yang dihasilkan tanaman kopi muda masih sangat sedikit, sehingga serasah yang ada hanya menutup 47% dari luas permukaan tanah (Tabel 4.4).

Pada tahun ke tujuh setelah penanaman kopi, baru terlihat adanya peningkatan kualitas sifat fisik tanah yaitu laju infiltrasi, jumlah pori makro dan kadar bahan organik yang nilainya bertambah besar dibanding pada tanaman kopi yang berumur tiga tahun. Nilai variabel sifat tanah ini semakin meningkat pada tanaman kopi berumur sepuluh tahun, namun belum bisa menyamai kondisi hutan (Suprayogo *et al.*, 2004). Peningkatan kualitas tanah tersebut bersamaan dengan penutupan tajuk yang semakin rapat dan mengakibatkan penurunan limpasan permukaan dan erosi pada tahun ketujuh sampai tahun kesepuluh. Peningkatan kandungan bahan organik tanah disertai dengan peningkatan jumlah ruang pori makro serta kenaikan laju infiltrasi menunjukkan terjadinya proses perbaikan struktur tanah (Suprayogo *et al.*, 2004). Perbaikan ini sebagian besar merupakan kontribusi dari bahan organik yang berasal dari pelapukan serasah dedaunan terutama daun kopi.

Dengan melihat dan membandingkan keadaan tajuk tanaman kopi yang berumur 3 tahun dan 7 tahun (luas dan kedalaman tajuk hampir sama, Tabel 4.4), berarti produksi serasah sudah mulai banyak dan stabil. Jika dibandingkan dengan peningkatan penutupan

tanah oleh serasah, terjadi peningkatan dari 47% menjadi 66% yang artinya tidak terlalu besar. Kedua kejadian ini mengindikasikan bahwa mulai tahun ketiga sebagian daun-daun yang gugur sudah banyak yang dilapuk (dekomposisi) sehingga menambah kandungan bahan organik terutama tanah di lapisan atas.

Hasil penelitian Suhara (2003) menunjukkan bahwa penutupan tajuk yang semakin rapat mendorong peningkatan kegiatan biologi di permukaan tanah karena ketersediaan bahan organik sehingga terjadi perbaikan lingkungan (iklim mikro dan kelembaban). Kegiatan biologi tanah ini juga berdampak positif terhadap perbaikan struktur dan porositas tanah serta peningkatan laju infiltrasi. Adanya kecenderungan perbaikan sifat-sifat fisik tanah di bawah vegetasi kopi monokultur memberikan harapan dalam upaya melestarikan sumber daya lahan. Namun ternyata penanaman kopi monokultur belum bisa mengembalikan fungsi hidrologis hutan secara penuh, terbukti dari limpasan permukaan dan erosi pada lahan kopi yang berumur 7 - 10 tahun ini masih jauh lebih besar dibandingkan yang terjadi pada lahan hutan.

Memperbaiki sifat fisik tanah dan fungsi hidrologi hutan ternyata tidak bisa dibebankan kepada tanaman kopi saja. Masih ada faktor-faktor lain yang perlu ditambahkan kedalam sistem penanaman kopi ini, menyangkut pengelolaan permukaan tanah seperti pemberian tambahan bahan organik, penutupan permukaan tanah dengan tanaman bawah (*understorey*), pembuatan lubang resapan, teras, saluran air dan sebagainya. Salah satu yang perlu dicoba dan diteliti adalah mencampur tanaman kopi dengan jenis-jenis pohon yang lain sehingga membentuk suatu sistem pertanaman campuran atau agroforestry yang berbasis kopi.

Hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa :

- Penebangan hutan (pepohonan) secara serentak atau tebang habis mengakibatkan kerusakan tanah khususnya di lapisan permukaan dengan ditandai antara lain penurunan kadar bahan organik, penurunan laju infiltrasi dan penurunan jumlah ruang pori makro. Kerusakan menjadi semakin parah setelah beberapa tahun karena minimnya perlindungan terhadap permukaan tanah. Kandungan bahan organik terus menurun karena proses pelapukan semakin cepat, hilang terangkut bersama erosi dan tidak adanya vegetasi yang memberikan serasah sebagai tambahan sumber bahan organik tanah. Pada periode ini bisa terjadi

peningkatan limpasan permukaan dan erosi dibanding keadaan sebelumnya.

- Penanaman pepohonan segera setelah penebangan juga tidak banyak menolong, karena pada tahun-tahun awal pepohonan juga belum dapat berfungsi melindungi permukaan tanah dan memberikan serasah dalam jumlah yang memadai.
- Sistem agroforestry yang terdiri dari beberapa species pohon dengan aneka tanaman bawah (*understorey*) menawarkan solusi untuk menghindari penebangan serentak dan memberikan masukan aneka jenis serasah sebagai sumber bahan organik tanah. Sistem ini perlu mendapat perhatian untuk mencari alternatif solusi dari masalah degradasi lahan dan lingkungan, khususnya menghadapi tekanan terhadap kelestarian hutan dan fungsi hidrologi daerah aliran sungai (DAS).

4.1.4. Erosi dan Limpasan Permukaan pada Lahan Tumpangsari Kopi dan Sengon

Kondisi aktual tingkat erosi dan limpasan permukaan dari suatu wilayah merupakan sebagian dari faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan dalam menyusun perencanaan pengelolaan daerah aliran sungai.

Limpasan permukaan terjadi apabila hujan yang jatuh ke tanah melebihi besarnya infiltrasi, sehingga air yang tersisa mengalir sebagai aliran permukaan. Dengan mengetahui perbandingan antara hujan dan limpasan permukaan atau koefisien limpasan maka akan mempermudah mengetahui keadaan tata air di suatu DAS.

Penanaman secara bersama-sama antara sengon atau albizia (*Paraserianthes*

falcataria) dengan kopi (*Coffea arabica*) merupakan bentuk agroforestry yang memiliki prospek baik karena dapat meningkatkan produktivitas lahan dan pendapatan petani.

Penelitian ini dilakukan pada lahan masyarakat yang terletak di Dukuh Kebondalem Desa Sukorejo dan Desa Mojosari, Kecamatan Mojotengah Kabupaten Wonosobo, Jawa Tengah yang bertujuan untuk mengetahui besar erosi dan limpasan permukaan pada pertanaman kopi dan sengon pada beberapa kombinasi umur tanaman.

Rata-rata curah hujan di lokasi penelitian adalah 6.917 mm/tahun dengan curah hujan terendah 5.202 mm (tahun 1997) dan tertinggi 9.113 mm/tahun (tahun 1993) dengan 9 bulan basah

dan 2 bulan kering dan termasuk dalam tipe iklim A (Smith dan Ferguson).

Lokasi penelitian mempunyai kemiringan lahan rata-rata 10 - 40%, dengan ketinggian tempat antara 1200 - 1300 meter di atas permukaan laut. Tanah-tanah pada lokasi penelitian bertekstur halus serta berstruktur sub angular blocky. Kesuburan tanah sedang hingga tinggi, bobot isi rendah, permeabilitas sedang hingga tinggi, serta kemampuan memegang air sedang hingga tinggi. Kedalaman solum tanah berkisar antara 70-160 cm, serta kedalaman perakaran berkisar antara 50-140 cm. Vegetasi yang ada didominasi oleh tanaman kopi yang ditumpang sarikan dengan tanaman sengon sebagai naungan. Jenis tanaman kayu lain yang ada seperti durian, sungkai, mahoni, suren, sawo dan lain-lain. Sedangkan tanaman musiman yang dibudidayakan antara lain jagung, kapulaga, cabe serta jenis talas.

Satuan pengamatan berupa mini *catchment* (mikro DAS) yang dilengkapi dengan *V-notch weir* di ujung plot. Pengamatan dengan mikro DAS diharapkan memiliki jenis dan sifat-sifat tanah, kelerengan, morfometri DAS dan sifat-sifat hujan yang sama. Perlakuan yang dicobakan terdiri atas 4 macam kombinasi umur, lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Sub DAS	Perlakuan	Kombinasi umur tanaman		Luas (m ²)	Kemiringan (%)
		Sengon	Kopi		
A	Sengon muda kopi muda	2 th	5 th	1.641,7	10
B	Sengon tua + kopi tua	5 th	10 th	2.464,8	36
C	Sengon tua + kopi muda (peremajaan)	6 th	7 th	988,5	22
D	Tanaman Semusim	Jenis : jagung dan ketela pohon (singkong)		1.152,0	34

Tabel 4.5. Kombinasi Perlakuan

Pengamatan sampel banjir/hasil erosi dilakukan pada setiap kejadian hujan yang dilakukan paling sedikit 6 (enam) kali kejadian banjir. Pada masing-masing kejadian hujan selalu dicatat waktu untuk mencapai kenaikan air dengan interval 5 cm pada bak penampung. Parameter yang diamati adalah hujan, erosi dan limpasan permukaan.

Erosi yang Diperbolehkan

Hasil perhitungan nilai T dengan metode Hamer untuk umur guna 300 diperoleh hasil seperti terlihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Besarnya Nilai T Metode Hamer dengan umur guna 300 pada Setiap Lokasi Penelitian

Sub DAS (Penggunaan Lahan)	T_{Hamer} (mm/th)	T_{Hamer} (Ton/ha/th)
A = Sengon muda + Kopi Muda	3,5	42
B = Sengon Tua + Kopi Tua	3,4	40,8
C = Sengon Tua + Kopi Muda	4,1	49,2
D = Tegalan (tan. semusim)	2,1	25,2

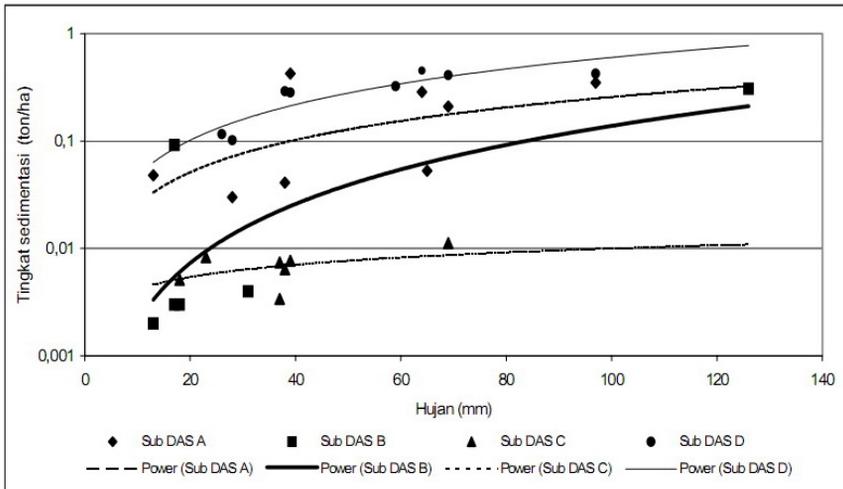
Kedalaman efektif tanah pada lokasi penelitian cukup beragam. Sub DAS D memiliki kedalaman efektif rata-rata 630 mm, sedangkan sub DAS C memiliki nilai rata-rata tertinggi yaitu sekitar 1240 mm. Dengan menggunakan faktor kedalaman satu, maka kedalaman tanah ekuivalen dari berbagai sub DAS tersebut akan sama nilainya dengan kedalaman efektif tanah.

Dari Tabel 4.6 terlihat bahwa nilai T_{Hamer} untuk sub DAS D paling rendah, sedangkan sub DAS C paling besar. Nilai rendah tersebut terutama diakibatkan oleh nilai kedalaman efektif yang lebih dangkal. Banyak penelitian menyebutkan mengenai nilai erosi relatif pada tegalan yang cukup tinggi dibanding hutan. Perlindungan permukaan tanah dari pukulan butir hujan yang minimal serta gangguan terhadap tanah yang cukup intensif pada lahan tegalan merupakan salah satu penyebab tingginya erosi pada lahan ini.

Erosi dan Limpasan Aktual

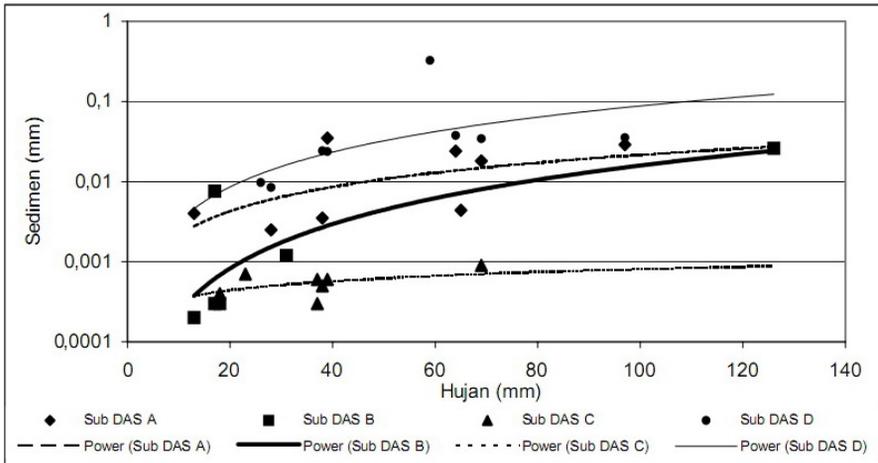
Hasil analisis data erosi dan limpasan memperlihatkan bahwa pada curah hujan yang sama tidak memberikan respon yang sama pula pada setiap perlakuan. Hal tersebut mengindikasikan bahwa keempat Sub DAS perlakuan memiliki karakteristik hidrologi yang berbeda. Parameter erosi, limpasan, sedimen serta koefisien limpasan menggambarkan respon suatu DAS terhadap curah hujan yang jatuh di dalamnya (Gambar 4.7)

Dari grafik (Gambar 4.7) tampak bahwa semua Sub DAS memberikan kecenderungan yang sama, yaitu sedimentasi makin meningkat dengan peningkatan curah hujan. Tingkat sedimentasi paling besar ditunjukkan pada Sub DAS D, diikuti Sub DAS A, B dan C. Pada Sub DAS C kenaikan curah hujan memberikan pengaruh yang paling kecil dalam peningkatan sedimentasi, yang ditunjukkan dengan kemiringan *trendline* yang paling datar.

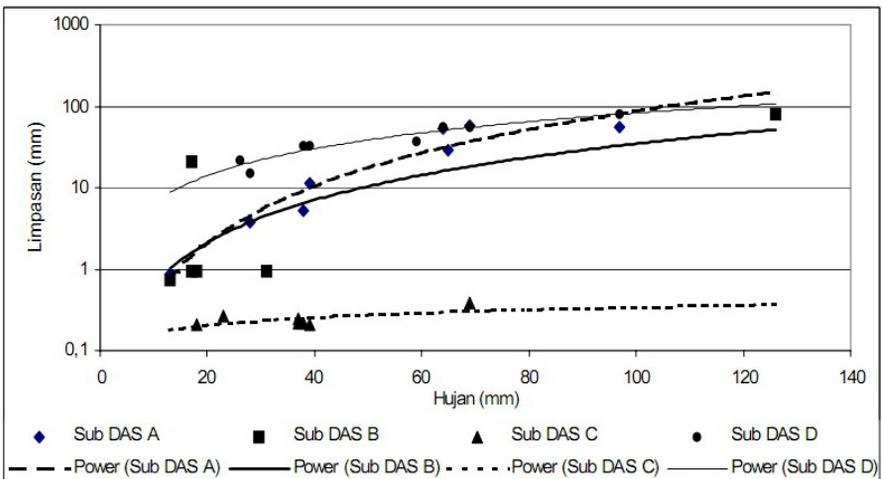


Gambar 4.7. Grafik Hubungan Hujan dan Tingkat Sedimentasi (ton/ha) pada Lokasi Penelitian

Gambar 4.8 memperlihatkan perbandingan besarnya sedimen pada setiap Sub DAS. Ditinjau dari besarnya sedimen yang terangkut, kecenderungan yang sama juga terjadi pada keempat sub DAS tersebut. Sub DAS C mempunyai kecenderungan yang agak merata dengan pengaruh yang paling kecil oleh peningkatan curah hujan.



Gambar 4.8. Grafik Hubungan Hujan dan Sedimen (mm) pada Lokasi Penelitian



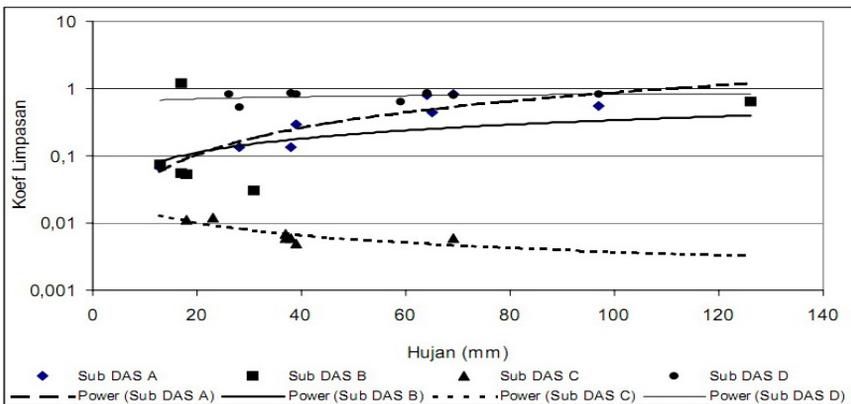
Gambar 4.9. Grafik Hubungan Hujan dan Limpasan Permukaan (mm) pada Lokasi Penelitian

Grafik (Gambar 4.9) di atas menunjukkan bahwa limpasan yang paling besar terjadi pada Sub DAS D dan yang paling kecil Sub DAS C. Keadaan ini sesuai dengan penutupan lahan, dimana sub DAS D adalah tegalan dengan tanaman utama jagung, singkong dan talas tanpa penutup tanah; sedangkan Sub DAS C, A dan B adalah DAS berhutan dengan penutup tanah terdiri dari tanaman sengon, kopi serta tumbuhan bawah yang relatif lebih rapat. Faktor lain yang menyebabkan tingginya limpasan pada sub DAS D adalah keleregan

yang cukup terjal, yaitu 34%. Apabila dibandingkan dengan factor lereng yang sama (Sub DAS B dan Sub DAS D), maka pada Sub DAS B tidak menghasilkan limpasan yang sama besar dengan sub DAS D, hal ini dikarenakan tutupan lahan pada sub DAS B yang lebih rapat.

Selanjutnya pada Gambar 4.10 memperlihatkan bahwa koefisien limpasan pada Sub DAS C adalah yang paling rendah. Koefisien limpasan merupakan perbandingan antara limpasan dengan banyaknya hujan yang jatuh. Nilai tersebut menunjukkan kesehatan suatu DAS.

Keempat parameter hidrologi DAS di atas memberikan kecenderungan yang relatif sama untuk perbandingan keempat lokasi Sub DAS pengamatan. Sub DAS C terlihat memiliki nilai erosi, limpasan, sedimen dan koefisien limpasan paling kecil dengan kemiringan *trendline* paling datar. Hal ini dimungkinkan karena kondisi vegetasi penutup tanah terutama semak dan tanaman bawah paling rapat ($\pm 80\%$). Dengan luas Sub DAS yang relatif paling kecil ($\pm 988,5 \text{ m}^2$) serta kemiringan lahan 22%, maka dibandingkan Sub DAS lainnya Sub DAS C memiliki nilai parameter hidrologi yang lebih kecil.



Gambar 4.10 Grafik Hubungan Hujan dan Koefisien Limpasan pada Lokasi Penelitian

Sub DAS B memiliki luas yang paling besar dengan kemiringan lahan paling besar (36%) dan tutupan lahannya sengon tua dan kopi tua. Secara normal kondisi tersebut akan menimbulkan erosi limpasan yang lebih kecil dibanding Sub DAS A dan C. Tetapi hasil pengamatan dan perhitungan ternyata Sub DAS B memiliki nilai parameter hidrologi yang lebih besar dari Sub DAS C serta hampir sama dengan Sub DAS A.

Fenomena tersebut menunjukkan bahwa yang mempengaruhi erosi limpasan tidak hanya vegetasi pohon saja tetapi juga luas DAS, kemiringan lahan serta terutama penutupan tanah oleh tumbuhan bawah dan serasah. Sub DAS B yang merupakan tanaman sengon tua dan kopi tua memberikan tutupan tajuk pohon yang lebih rapat dengan strata tajuk yang bertingkat menjadikan penutupan lahan yang paling rapat. Demikian juga peran serasah yang menutupi tanah ($\pm 42,5\%$) memberikan kontribusi dalam mengendalikan jatuhnya air hujan yang menimbulkan erosi.

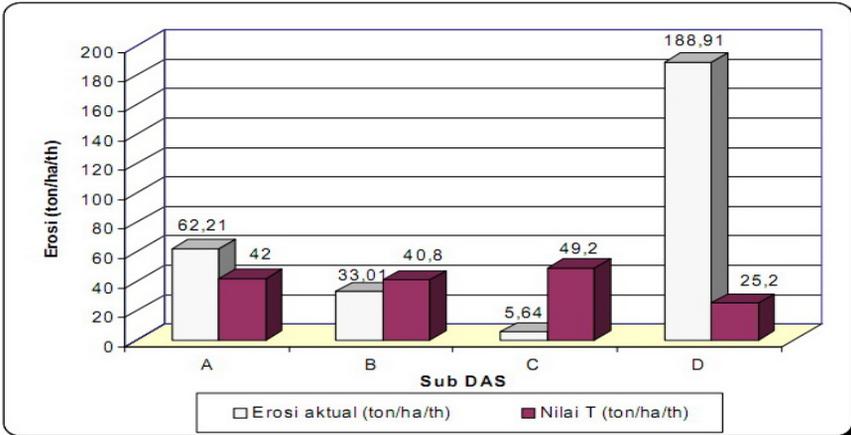
Untuk mendapatkan gambaran besarnya erosi yang terjadi selama satu tahun didekati dengan persamaan hubungan antara tingkat sedimentasi dengan hujan. Dengan memanfaatkan data hujan selama satu tahun, digunakan untuk mencari besarnya tingkat sedimentasi selama satu tahun, kemudian erosi dapat ditentukan berdasarkan persamaan SDR.

Hasil perhitungan erosi dalam ton/ha/tahun tiap sub DAS disajikan pada Tabel 4.7. Nilai SDR yang digunakan merupakan hasil interpolasi dengan nilai SDR dari tabel SDR (Arsyad, 2010) sesuai dengan luas masing-masing sub DAS.

Tabel 4.7. Hasil Perhitungan Erosi Aktual pada Masing-Masing Sub DAS

Plot	Tk. Sed (ton/ha/th)	Erosi (ton/ha/th)	Erosi (mm/th)
A	27,476	62,210	5,184
B	14,577	33,005	2,750
C	2,491	5,640	0,470
D	83,435	188,910	15,742

Jika dibandingkan dengan nilai erosi yang diperkenankan (T) (Gambar 4.11) terlihat bahwa Sub DAS A dan D memiliki nilai erosi aktual yang lebih tinggi dibandingkan dengan nilai erosi yang diperkenankan. Sedangkan Sub DAS B dan C memiliki nilai erosi aktual yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai erosi yang diperkenankan.



Gambar 4.11. Grafik Perbandingan Erosi Aktual dan Erosi yang Diperkenankan

Hal ini berarti bahwa erosi yang terjadi di Sub DAS B dan C masih di bawah ambang batas erosi yang diperbolehkan, artinya bahwa konservasi yang ada pada kedua Sub DAS tersebut berhasil dalam mengendalikan erosi yang terjadi. Sedangkan di Sub DAS A dan D masih memerlukan penerapan konservasi tanah dan air yang lebih baik untuk bisa mengendalikan erosi, terutama Sub DAS D yang merupakan ladang terbuka dengan tanaman semusim. Dari fenomena ini terlihat bahwa DAS berhutan dengan penutupan tanah yang lebih rapat mampu mengendalikan erosi yang lebih baik dibandingkan DAS dengan kondisi yang lebih terbuka.

Agar dapat mengetahui secara keseluruhan keadaan seluruh lokasi penelitian maka dibuat matriks yang berhubungan dengan erosi sebagai terlihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8. Matriks Kondisi Hidrologi Setiap Sub DAS pada Lokasi Penelitian

Indikator	Sub DAS A	Sub DAS B	Sub DAS C	Sub DAS D
Erosi	++	++	+++	+
Sedimen	+++	++	+++	+
Limpasan	++	++	+++	+
Koef. Limpasan	++	++	+++	+
Jumlah	9	8	12	4

Keterangan : +++ = Bagus, ++ = sedang, + = Buruk

Secara umum bisa dikategorikan bahwa dari kondisi parameter hidrologi DAS yang paling baik ditunjukkan oleh Sub DAS C, kemudian diikuti Sub DAS A, B dan D. Jika dibandingkan (Gambar 4.11), terlihat fenomena yang menarik antara Sub DAS A dan Sub DAS B. Walaupun dari matrik kondisi hidrologi DAS di atas terlihat bahwa Sub DAS A lebih baik sedikit dibanding Sub DAS B tetapi ternyata erosi aktual yang terjadi di Sub DAS A lebih besar dibanding Sub DAS B. Sub DAS A yang bervegetasi sengon muda dan kopi muda, dengan lahan tanpa teras menghasilkan erosi yang cukup besar bahkan lebih besar dibanding nilai (T), karena kondisinya cenderung lebih terbuka. Hal tersebut membuat prosentase butiran air hujan yang langsung ke tanah lebih besar sehingga erosi yang terjadi akan lebih besar.

Dari matrik kondisi hidrologi DAS terlihat antara Sub DAS A dan B tidak berbeda jauh, hanya selisih satu poin untuk nilai sedimen, dimana Sub DAS A memiliki sedimen yang lebih kecil (kondisi yang lebih baik) dibanding Sub DAS B. Sedimen yang kecil di Sub DAS A lebih dikarenakan kemiringan lahan yang juga lebih landai dibanding Sub DAS B yang lebih curam, sehingga dari grafik sedimen terlihat kemiringan *trend line* yang lebih tajam pada Sub DAS B dibanding Sub DAS A. Oleh karenanya dilihat dari segi kondisi parameter hidrologi DAS terutama sedimen Sub DAS A lebih baik dibanding Sub DAS B dengan parameter yang lain seperti erosi, limpasan dan koefisien limpasan yang relatif sama. Namun demikian karena erosi di Sub DAS A lebih besar dibanding nilai (T) yang ada, maka dari segi konservasi tanah dan air Sub DAS A harus lebih mendapatkan perhatian terutama dalam pemilihan dan perbaikan teknik konservasi tanah yang diterapkan.

Untuk itu dapat disimpulkan bahwa : 1) Sub DAS A (tanaman kopi muda dan sengon muda), serta Sub DAS D (tanaman semusim) menghasilkan erosi aktual yang cukup tinggi, melebihi nilai erosi yang ditoleransikan, 2) Sub DAS C (tanaman kopi muda dan sengon tua), serta Sub DAS B (tanaman kopi tua dan sengon tua) menghasilkan erosi aktual yang lebih rendah dari nilai erosi yang ditoleransikan dan 3) dari perbandingan keempat Sub DAS melalui matriks kondisi hidrologi DAS disimpulkan bahwa kondisi hidrologi Sub DAS C adalah bagus, sedangkan Sub DAS A dan B sedang, serta Sub DAS D mempunyai kondisi yang buruk.

4.2. Dampak Alih Guna Lahan Hutan terhadap Debit Air

4.2.1. Pengaruh Perubahan Penggunaan Lahan Terhadap Debit dan Banjir Di Bagian Hilir DAS Kaligarang

Perubahan penggunaan lahan di suatu daerah aliran sungai (DAS), khususnya lahan sawah yang berada di sekitar perkotaan untuk penggunaan lain seperti bangunan industri dan perumahan dapat mengancam hilangnya produktivitas lahan dan kelestarian lingkungan. Perubahan penggunaan lahan sawah juga dapat menurunkan fungsinya dalam hal menahan dan mendistribusikan air hujan dan air irigasi secara baik, sehingga menimbulkan kerusakan lingkungan seperti banjir, erosi, dan sedimentasi di daerah hilir. Lahan sawah dapat mencegah atau mempertahankan lingkungan dari kerusakan karena kemampuannya menahan air, berfungsi sebagai dam dan dapat mengurangi erosi karena adanya galengan dan lahannya berteras.

Hasil penelitian di Malaysia menunjukkan bahwa pembangunan perumahan di daerah tangkapan hujan Anal Anyer Batu, Kuala Lumpur telah menyebabkan banjir dan sedimentasi di bagian hilir daerah tersebut, dengan konsentrasi sedimen berkisar antara 4- 81.259 mg/l (Douglas, 1978). Sementara itu konsentrasi sedimen dalam aliran sungai dari suatu lahan yang di bagian hilirnya 40% tertutup vegetasi hutan berkisar antara 7 - 1.080 mg/l (Morgan, 1986). Berdasarkan informasi tersebut jelas bahwa perubahan penggunaan lahan pertanian menjadi non pertanian telah meningkatkan konsentrasi sedimen dalam aliran sungai.

Di Indonesia, banjir yang terjadi di sekitar Bandung, Jakarta, dan Semarang antara lain disebabkan oleh adanya perubahan penggunaan lahan sawah menjadi lahan industri dan perumahan menyebabkan banjir dan sedimentasi di bagian hilir daerah tersebut.

Hasil penelitian di Sub DAS Citarik (Jawa Barat) menunjukkan bahwa selama periode 1983-1994 (\pm 11 tahun) terjadi lima kali banjir dengan luas genangan berkisar antara 1.800-7.250 ha (Pusat Penelitian dan Pengembangan Pengairan, 1995). Hal ini berbeda dengan kejadian banjir sebelum tahun 1945 yang hanya terjadi empat kali, yaitu akhir abad 18, tahun 1917, 1931 dan 1945.

Hasil penelitian yang sama yang dilakukan Pusat Penelitian dan Pengembangan Pengairan (1995) mendapatkan bahwa sedimentasi yang terjadi di alur Sungai Citarum dari Desa Citepus sampai dengan Baktisari sepanjang 4,5 km rata-rata 8,5cm setiap tahun. Selain banjir dan sedimentasi, perubahan penggunaan lahan dapat menyebabkan bertambah kecilnya aliran rendah, sehingga mengganggu distribusi aliran air suatu daerah aliran sungai (Ilyas, 2000).

Penelitian dilaksanakan di DAS Kaligarang, Kabupaten Semarang-Propinsi Jawa Tengah dengan tujuan mempelajari pengaruh alih fungsi lahan sawah menjadi daerah industri, perumahan, dan kegiatan pembangunan lainnya terhadap debit, sedimentasi, banjir. Pemilihan lokasi didasarkan pada perubahan penggunaan lahan yang relatif tinggi dan intensif, khususnya perubahan lahan pertanian (sawah dan lahan kering) menjadi areal bangunan industri dan perumahan.

Penelitian dilaksanakan dengan cara survei, berupa pengumpulan data sekunder dari berbagai instansi relevan dan data primer yang diperoleh langsung melalui penelitian di lapangan atau wawancara dengan masyarakat atau petugas dari instansi yang relevan. Data tersebut dianalisis secara tabulasi dan deskriptif, untuk periode waktu-waktu tertentu sesuai dengan data yang tersedia, baik data perubahan penggunaan lahan, debit, sedimentasi, dan banjir. Selain itu untuk melihat pengaruh perubahan penggunaan lahan terhadap debit air sungai dibuat korelasi antara debit maksimum dan curah hujan harian maksimum yang terjadi.

Data pada Tabel 4.9 memperlihatkan tidak ada pola yang pasti dalam hal perubahan debit maksimum dan debit minimum air Kaligarang, sebagai akibat perubahan penggunaan lahan sawah. Namun demikian terdapat kecenderungan peningkatan nilai rasio Q maksimum terhadap Q minimum dari tahun ke tahun. Nilai rasio Q maksimum terhadap Q minimum tersebut senantiasa lebih besar dari 10 (Sub Balai Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah Citanduy-Cisanggarung, 1987), ini mengindikasikan bahwa Sub DAS tersebut telah mengalami kerusakan tata air. Peningkatan debit maksimum yang terjadi diperkirakan karena lebih besarnya curah hujan dan intensitas hujan yang terjadi dalam setiap tahunnya, kecuali untuk kejadian tahun 2000. Pada tahun 2000 terjadi hujan sebesar 3.158 mm, namun jumlah hari hujannya lebih besar yaitu 203 hari dengan intensitas hujan rata-rata 17 mm/hari.

Meskipun tinggi permukaan air tertinggi dan terendah pada tahun 1998 dan 2000 relatif sama, besarnya debit maksimum dan debit minimum tahun 1998 lebih besar dari tahun 2000. Hal ini sejalan dengan total kandungan sedimen, erosi dan hasil sedimen dalam air Kaligarang pada tahun 1998 lebih tinggi dari data yang sama pada tahun 2000. Bila memperhatikan data perubahan penggunaan lahan di DAS kaligarang bagian hulu, telah terjadi perubahan luas penggunaan lahan sawah sebesar 116 ha dari tahun 1998 ke tahun 2000 (Wahyunto *et al.*, 2001).

Tabel 4.9. Data hujan, debit dan sedimen di DAS Kaligarang, Kabupaten Semarang (1986-2000)

Parameter	1986 ¹⁾	1987 ¹⁾	1988 ¹⁾	1989 ¹⁾	1990 ¹⁾	1995 ²⁾	1996 ²⁾
1 Hujan							
• Curah hujan (mm/tahun)	2.136	2.386	2.181	3.181	2.235	1.788	1.887
• Hari hujan (hari/tahun)	142	118	142	135	132	127	147
• Intensitas (mm/hari)	22	23	15	22	22	14	13
2 Debit (Q)							
• Maksimum(m ³ /detik)	37,20	29,70	22,70	49,10	17,50	13,27	12,50
• Minimum (m ³ /detik)	3,20		1,70	1,90	1,70	0,63	0,58
• Nilai Q maks/Q min	12	1,90	13	26	10	21	22
• Rata-rata tinggi permukaan air		16					
- Tertinggi (m)	-	-	-	-	-	1,70	1,95
- Terendah (m)	-	-	-	-	-	0,19	0,19
3 Sedimen							
• Total muatan padatan tersuspensi (t/tahun)	-	-	-	-	-	268	243
• Erosi (t/ha/tahun)	-	-	-	-	-	14,92	13,88
• Hasil sedimen (mm)	-	-	-	-	-	1,1	1,7

Sumber: ¹⁾ Directorate General of Water Resources Development-Ministry of Public Works, 1993.

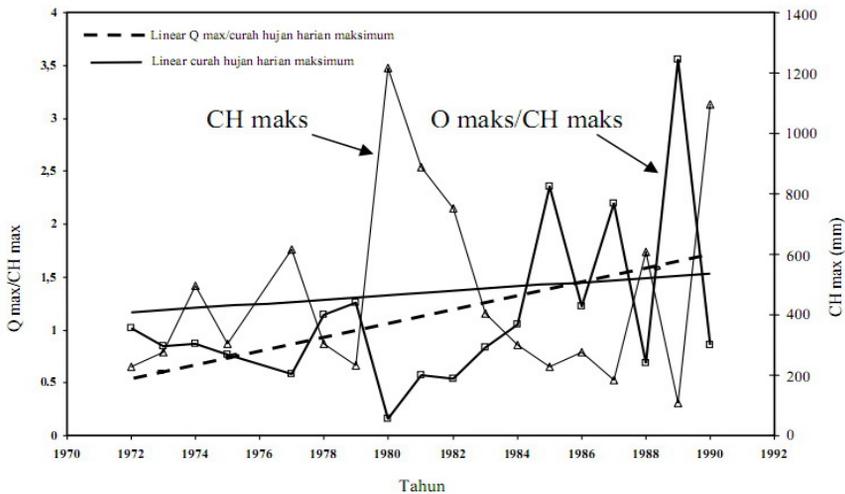
²⁾ Balai Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah Pemali Jratun, 2000.

- = tidak ada data.

Demikian juga luas pemukiman dan rencana pemukiman bertambah luas, seperti halnya juga terjadi peningkatan luas tegalan dan industri. Kondisi ini diyakini mempunyai kontribusi yang besar terhadap peningkatan debit dan kandungan sedimen dalam aliran permukaan, meskipun kondisi hujan (jumlah dan intensitas) relatif tetap.

Pengaruh perubahan fungsi lahan sawah di Sub DAS Garang bagian hulu dalam jangka panjang memperlihatkan peningkatan debit maksimum di Sungai Garang. Pada Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa nilai rasio debit maksimum dan curah hujan harian maksimum dari tahun 1972 - 1990 meningkat, namun curah hujan harian maksimum tidak menunjukkan peningkatan yang nyata dari

tahun ke tahun. Keadaan seperti ini mengindikasikan bahwa kualitas Sub DAS Garang mengalami penurunan. Seperti telah disebutkan bahwa perubahan penggunaan lahan sawah juga telah meningkatkan kandungan sedimen dalam air sungai dan menyebabkan sedimentasi di bagian hilir sub DAS tersebut meningkat (Wahyunto *et al.*, 2001). Dari tahun 1939 sampai tahun 2000 di muara Sungai Garang dan sekitarnya serta pantai arah timur sungai tersebut sepanjang 8,5 km, garis pantai telah maju ke arah laut sekitar 250-750 m (Wahyunto *et al.*, 2001).



Gambar 4.12. Rasio debit maksimum dengan curah hujan harian maksimum (1972-1990)

Hasil pengamatan banjir pada lokasi dam Simongan oleh Dinas Pengairan Propinsi Jawa Tengah di Semarang memperlihatkan bahwa telah terjadi 10 kali banjir pada periode 1961-1990 (Tabel 4.12). Kejadian banjir sebelum tahun 1980 (selama 20 tahun) hanya empat kali, yang berbeda dengan kejadian banjir periode 1981-1990. Grafik pada Gambar 4.12 menunjukkan bahwa curah hujan harian maksimum di DAS Kaligarang cenderung meningkat meskipun tidak nyata.

Pada periode tahun 1981-1990 (10 tahun) terjadi enam kali banjir. Hal ini diduga akibat perubahan penggunaan lahan sawah dan meningkatnya luas pemukiman, perumahan, lahan industri, dan tegalan (Tabel 4.10). Selain itu grafik pada Gambar 4.12 dan data pada Tabel 4.11 memperlihatkan kecenderungan peningkatan curah hujan harian maksimum dari tahun ke tahun.

Tabel 4.10. Luas penggunaan lahan di DAS Kaligarang bagian hulu pada tahun 1939, 1988, 1998, dan 2000

Penggunaan lahan	Luas			
	1939	1988	1998	2000
	ha			
Hutan	2.165	1.838	2.048	2.048
Kebun campuran	9.144	7.351	5.608	5.529
Perkebunan	1.222	1.500	1.511	1.394
Tegalan	0	187	517	668
Sawah	4.933	4.449	4.342	4.333
Pemukiman	2.510	4.719	5.558	5.608
Rencana perumahan	0	0	431	433
Industri	0	37	66	68
Kolam	65	0	0	0
Total	20.009	20.081	20.081	20.081

Tabel 4.11. Curah hujan harian maksimum, Q maksimum, dan rasio Q maks/ curah hujan maksimum di DAS Kaligarang-Jawa Tengah

Tahun	CH. harian maks	Q maksimum	Q maks/CH. harian maks	Intensitas hujan
	mm	m ³ /detik		cm/jam
1972	228	233	1,022	5,64
1973	276	233	0,844	4,96
1974	498	433	0,869	9,13
1975	306	233	0,761	5,56
1977	615	360	0,585	11,43
1978	306	349	1,141	6,12
1979	234	293	1,252	5,07
1980	1215	194	0,160	7,20
1981	888	510	0,574	15,88
1982	753	408	0,542	12,36
1983	405	337	0,832	6,13
1984	301	315	1,047	7,65
1985	228	537	2,355	4,65
1986	276	337	1,221	5,64
1987	186	408	2,194	5,22
1988	609	420	0,690	11,68
1989	108	384	3,556	9,63
1990	1098	942	0,858	22,36

Data pada Tabel 4.12 tersebut memperlihatkan apabila tinggi muka air maksimum di dam Simongan dan kedalaman air rata-rata berturut-turut di atas 7 dan 2 m terjadi banjir dengan debit lebih dari 400 m³/detik. Meskipun pada periode 1981-1990 tersebut terjadi 6 kali banjir besar, ternyata pada tahun-tahun tidak banjirpun debit airnya melebihi 300 m³/detik (315-384 m³/detik). Keadaan seperti inipun merupakan indikator telah terjadi peningkatan jumlah aliran permukaan dan debit sebagai akibat terjadinya perubahan penggunaan lahan dan kecenderungan peningkatan curah hujan harian maksimum, yang pada akhirnya dapat menyebabkan kerusakan biofisik tanahnya. Berkurangnya luas lahan sawah dan penambahan luas pemukiman dan lahan industri

dapat mempertinggi frekwensi banjir dengan debit cukup besar (> 400 m³/detik). Hubungan seperti ini juga dapat dilihat data debit air di dam Simongan pada tahun 1988 (Tabel 4.12) terjadi banjir besar dengan debit 420 m³/detik dan curah hujan harian maksimum 609 mm dan intensitas hujan 11,68 cm/jam (Tabel 4.11), yang relevan dengan terjadinya penurunan luas lahan sawah sebesar 484 ha, dan peningkatan luas pemukiman dan tegalan serta industri berturut-turut sebesar 2.209, 187 dan 37 ha (Tabel 4.10).

Tabel 4.12. Debit banjir Kaligarang yang tercatat di dam Simongan, periode 1961-1990

Tahun	Tinggi muka air maks ^{a)}	Kedalaman air ^{b)}	Debit air	Keterangan
1961	7,9	2,3	458	Banjir
1962	7,3	1,7	315	
1963	9,4	3,8	901	Banjir
1964	6,9	1,3	233	
1965	7,4	1,8	337	
1968	6,6	1,0	175	
1969	7,1	1,5	272	
1970	7,0	1,4	252	
1971	7,0	1,4	252	
1972	6,9	1,3	233	
1973	6,9	1,3	233	
1974	7,8	2,2	433	Banjir
1975	6,9	1,3	233	
1976	7,9	2,3	458	Banjir
1977	7,5	1,9	360	
1978	7,5	1,9	349	
1979	7,2	1,6	293	
1980	6,7	1,1	194	
1981	8,1	2,5	510	Banjir
1982	7,7	2,1	408	Banjir
1983	7,4	1,8	337	
1984	7,3	1,7	315	
1985	8,2	2,6	537	Banjir
1986	7,4	1,8	337	
1987	7,7	2,1	408	Banjir
1988	7,8	2,2	420	Banjir
1989	7,6	2,0	384	
1990	9,4	3,8	942	Banjir

Perubahan penggunaan lahan sawah menjadi lahan pemukiman dan industri di wilayah DAS Kaligarang bagian hulu menyebabkan dampak yang merugikan, yaitu meningkatnya debit dan sedimentasi, banjir di bagian hilir DAS tersebut.

4.2.2. Pengaruh Perubahan Tata Guna Lahan Terhadap Debit dan Banjir Di Daerah Aliran Sungai Banjaran.

Perubahan tata guna lahan Daerah Aliran Sungai (DAS) memberikan pengaruh cukup dominan terhadap debit banjir. Penelitian ini dilakukan Di DAS Banjaran khususnya di bagian hulu yang merupakan Kawasan Wisata Baturraden yang merupakan daerah tangkapan air hujan (*catchments area*) bagi sungai Banjaran (Bappeda, 1998). sungai yang melewati tengah kota mempunyai peranan strategis sebagai penyumbang aliran air (aliran bawah dan aliran permukaan) di kota Purwokerto. Sehingga keberadaannya sebagai kawasan resapan air menjadi sangat diperhatikan.

Saat ini kondisi DAS Banjaran terutama yang berada di kawasan wisata Baturraden telah mengalami perubahan tata guna lahan dari kawasan non terbangun menjadi kawasan terbangun (pemukiman, perumahan, hotel, villa, dll) sebesar 1,26% atau 80,832 ha (1994-2001) (Nastain dan Santoso, 2003). Hal ini mengakibatkan air hujan yang jatuh di kawasan wisata Baturraden tidak banyak lagi yang dapat meresap kedalam tanah melainkan lebih banyak melimpas (*run-off*) sehingga meningkatkan debit banjir di sungai Banjaran terutama di hilir sungai. Peningkatan debit banjir juga dapat berdampak pada kegagalan bangunan pengendali banjir (waduk, bendung, tanggul, saluran drainase, dll). Hal ini disebabkan karena bangunan pengendali banjir tidak mampu menahan beban gaya akibat debit banjir yang telah mengalami peningkatan akibat perubahan tata guna lahan.

Tujuan penelitian ini adalah mengkaji sampai sejauh mana dampak yang ditimbulkan akibat perubahan tata guna lahan di DAS Banjaran terhadap debit banjir pada titik kontrol di daerah Patikraja.

Metode menghitung debit banjir adalah metode rasional. Menurut Wanielista (1990) metode Rasional adalah salah satu dari metode tertua dan awalnya digunakan hanya untuk memperkirakan debit puncak (*peak discharge*). Ide yang melatar belakangi metode rasional adalah jika curah hujan dengan intensitas (I) terjadi secara terus menerus, maka laju limpasan langsung akan bertambah sampai mencapai waktu konsentrasi (Tc). Waktu konsentrasi (Tc) tercapai ketika seluruh bagian DAS telah memberikan kontribusi aliran di outlet. Laju masukan pada sistem (IA) adalah hasil dari curah hujan dengan intensitas I pada DAS dengan luas A. Nilai perbandingan antara laju masukan dengan laju debit puncak (Qp) yang terjadi pada saat Tc dinyatakan sebagai *run off coefficient* (C) dengan ($0 \leq C \leq 1$)

(Chow *et al.*, 1988). Hal di atas diekspresikan dalam formula Rasional sebagai berikut ini (Chow, 1964) :

$$Q_p = 0,278 C I A$$

dimana :

- Q_p : debit puncak (m³/dtk)
- C : koefisien run off, tergantung pada karakteristik DAS (tak berdimensi)
- I : intensitas curah hujan, untuk durasi hujan (D) sama dengan waktu konsentrasi (tc) (mm/jam)
- A : luas DAS (Km²)

Beberapa asumsi dasar untuk menggunakan formula Rasional adalah sebagai berikut (Wanielista 1990) :

- a. Curah hujan terjadi dengan intensitas yang tetap dalam satu jangka waktu tertentu, setidaknya sama dengan waktu konsentrasi.
- b. Limpasan langsung mencapai maksimum ketika durasi hujan dengan intensitas yang tetap, sama dengan waktu konsentrasi.
- c. Koefisien run off dianggap tetap selama durasi hujan.
- d. Luas DAS tidak berubah selama durasi hujan.

Analisis Peta Topografi

Berdasarkan peta topografi DAS Banjaran dapat diketahui data geometri sungai banjaran adalah sebagai berikut:

- luas DAS Banjaran (A) = 58,56 km²
- kemiringan sungai (S) = 0,003 m/m.
- panjang sungai (L) = 28,5 km.

Waktu konsentrasi (T_c) dapat dihitung berdasarkan persamaan Kirpich (Sri Harto 2000) sebagai berikut :

$$T_c = 3,97 * L^{0.77} * S^{-0.385}$$

dimana :

- T_c : waktu konsentrasi (jam)
- L : panjang sungai (km)
- S : landai sungai (m/m)

Sehingga

$$\begin{aligned} T_c &= 3,97 \times (28,5)^{0,77} \times (0,003)^{-0,385} \\ &= 490,152 \text{ jam} \\ &= 20,423 \text{ hari.} \end{aligned}$$

Waktu konsentrasi sangat besar melebihi durasi hujan yang biasa terjadi 1- 6 jam bahkan 12 jam pun jarang terjadi. Hal ini disebabkan luas DAS Banjaran cukup besar dari ideal luas DAS yang dapat dianalisis dengan metode rasional. Sehingga perlu dilakukan modifikasi dengan cara membuat grid. Pada penelitian ini dilakukan pendekatan dengan cara DAS banjaran dibagi menjadi 300 grid dengan luasan 0.21 Km² dan waktu konsentrasi 6.07 jam. Debit banjir DAS Banjaran adalah jumlah debit banjir Sub DAS Banjaran (*grid*).

Analisis Tata Guna Lahan

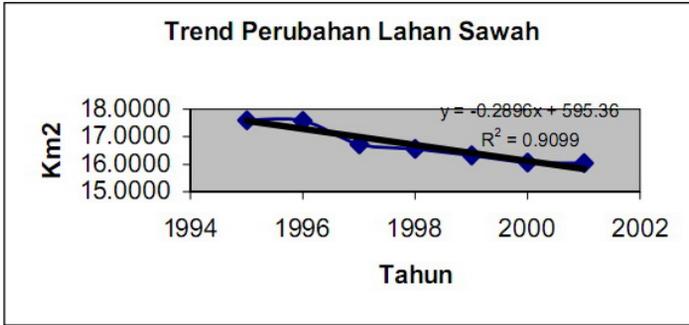
Klasifikasi penggunaan lahan dibagi menjadi : sawah, pemukiman, tegalan, dan lain-lain (sesuai data yang tersedia dari Kantor BPS Kabupaten Banyumas). Klasifikasi penggunaan lahan lain-lain meliputi hutan, perkebunan, kuburan, jalan. Penggunaan lahan secara rinci terlihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13. Luas Tataguna Lahan per Tahun

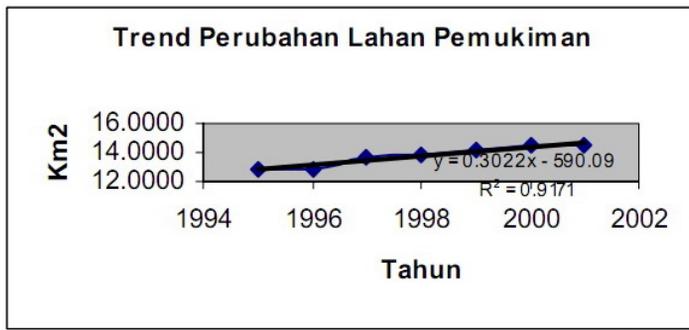
Tahun	Luas Penggunaan Lahan (Km2)				Total
	Sawah	Tegalan	Pemukiman	Lain-lain	
1995	17.5928	2.8954	12.8436	30.8319	64.1637
1996	17.5823	2.8954	12.8541	30.8319	64.1637
1997	16.7353	2.8954	13.7011	30.8319	64.1637
1998	16.5596	2.8604	13.9117	30.8319	64.1636
1999	16.3131	2.8527	14.1660	30.8319	64.1637
2000	16.0684	2.8332	14.4301	30.8319	64.1636
2001	16.0397	2.8332	14.4588	30.8319	64.1636

Sumber : hasil hitungan

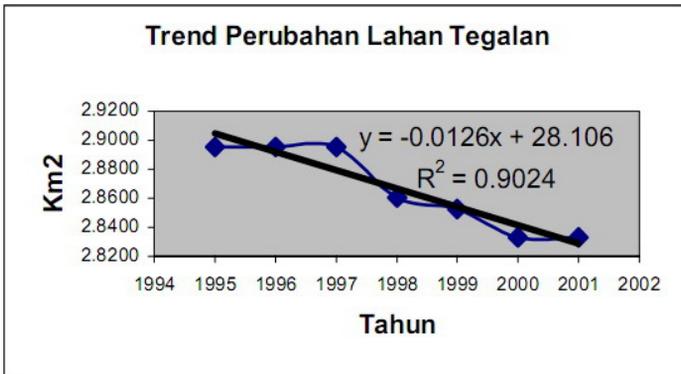
Dari Tabel 4.13 di atas terlihat bahwa tata guna lahan yang mengalami perubahan yang cukup berarti adalah sawah dan pemukiman. Tata guna lahan selain tata guna lahan tersebut relatif sedikit perubahannya. Trend perubahan luas lahan masing-masing tata guna lahan didekati mengikuti *trend linier* seperti terlihat pada Gambar 4.13, 4.14, dan 4.15.



Gambar 4.13. Trend Linier Perubahan Lahan Sawah



Gambar 4.14. Trend Linier Perubahan Lahan Pemukiman



Gambar 4.15. Trend Linier Perubahan Lahan Tegalan

Analisis Debit Banjir

Dalam penghitungan debit banjir menggunakan metode rasional diperlukan data koefisien limpasan (*run off coefficient*). Dalam penelitian ini data koefisien limpasan menggunakan hasil

penelitian yang pernah dilakukan oleh Nastain *et al.*, (2003) seperti terlihat pada Tabel 4.14. Dengan menggunakan metode rasional didapatkan debit banjir seperti terlihat pada Tabel 4.15.

Tabel 4.14. Koefisien Limpasan DAS Banjaran

Tahun	C
1995	0.079
1996	0.079
1997	0.145
1998	0.059
1999	0.114
2000	0.166
2001	0.237

Tabel 4.15. Debit Banjir di outlet DAS Banjaran

Tahun	Debit Banjir (m ³ /dt)											
	T=2th	T=5th	T=10th	T=15th	T=20th	T=25th	T=30th	T=40th	T=50th	T=100th	T=500th	T=1000th
1995	22.76	26.34	28.38	29.44	30.15	30.69	31.11	31.76	32.25	33.70	36.78	38.02
1996	22.76	26.34	28.38	29.44	30.15	30.69	31.11	31.76	32.25	33.70	36.78	38.02
1997	41.77	48.35	52.10	54.04	55.35	56.32	57.10	58.29	59.18	61.85	67.51	69.79
1998	17.00	19.67	21.20	21.99	22.52	22.92	23.23	23.72	24.08	25.17	27.47	28.40
1999	32.84	38.02	40.96	42.49	43.51	44.28	44.89	45.83	46.53	48.63	53.08	54.87
2000	47.82	55.36	59.64	61.87	63.36	64.48	65.37	66.73	67.76	70.81	77.29	79.89
2001	68.28	79.03	85.15	88.33	90.46	92.06	93.33	95.27	96.74	101.09	110.35	114.06

Analisis Pengaruh Perubahan Tata Guna Lahan Terhadap Debit Banjir

Dari analisis *multiple regression*, didapat hubungan antara perubahan tata guna lahan dengan debit banjir, mengikuti persamaan :

$$Y=A+BX_1+CX_2+DX_3+DX_4$$

dimana :

Y = debit banjir(m³/det)

X1 = luas sawah (Ha)

X2 = luas regalan (Ha)

X3 = luas perumahan (Ha)

X4 = luas sisa (hutan, tandas, lainnya) (Ha)

Nilai koefisien A, B, C dan D serta koefisien korelasi R terlihat dalam Tabel 4.16.

T (tahun)	A	B	C	D	Rgab	R _{YX1}	R _{YX2}	R _{YX3}
2	-230.23	0.09	0.06	0.18	0.68	-0.68	-0.62	0.68
5	-266.81	0.09	0.07	0.21	0.68	-0.68	-0.62	0.68
10	-288.20	0.09	0.07	0.24	0.68	-0.68	-0.62	0.68
15	-298.31	0.09	0.07	0.23	0.68	-0.68	-0.62	0.68
20	-306.21	0.09	0.08	0.24	0.68	-0.68	-0.62	0.68
25	-310.36	0.09	0.08	0.25	0.68	-0.68	-0.62	0.68
30	-315.13	0.09	0.08	0.25	0.68	-0.68	-0.62	0.68
40	-321.81	0.09	0.08	0.25	0.68	-0.68	-0.62	0.68
50	-325.78	0.09	0.08	0.26	0.68	-0.68	-0.62	0.68
100	-341.29	0.09	0.08	0.27	0.68	-0.68	-0.62	0.68
500	-372.54	0.09	0.09	0.29	0.68	-0.68	-0.62	0.68
1000	-385.89	0.09	0.10	0.30	0.68	-0.68	-0.62	0.68

Tabel 4.16. Nilai Koefisien Persamaan Linier dan Koefisien Korelasi

dimana :

R_{YX1}= koefisien korelasi untuk luas sawah terhadap debit banjir.

R_{YX2}= koefisien korelasi untuk luas tegalan terhadap debit banjir.

R_{YX3}= koefisien korelasi untuk luas pemukiman terhadap debit banjir.

Dari nilai koefisien korelasi parsial dapat dilihat bahwa perubahan tata guna lahan yang paling berpengaruh terhadap debit banjir selama kurun waktu tahun 1995-2001 adalah lahan sawah dan pemukiman.

Berdasarkan hasil penelitian di atas, maka dapat disimpulkan :

- Perubahan tata guna lahan di DAS Banjaran dari 1759. 28 ha sawah, 289.54 ha tegalan, 1284.36 ha pemukiman pada tahun 1995, menjadi 1603.97 ha sawah, 283.32 ha tegalan, 1445.88 ha pemukiman pada tahun 2001, menyebabkan peningkatan debit banjir.
- Peningkatan debit banjir akibat perubahan tata guna lahan, didekati dengan mengikuti trend linier dengan persamaan $Y=A+B*X_1+C*X_2+D*X_3$. Variabel Y adalah debit banjir, sedangkan X₁, X₂, X₃ dan X₄ masing-masing adalah luas sawah, tegalan, pemukiman. Koefisien korelasi gabungan sebesar 0,682, R_{YX1}=-0.682, R_{YX2}=-0.616, R_{YX3}=0.682.
- Dari nilai koefisien korelasi parsial dapat dilihat bahwa tata guna lahan yang paling berpengaruh terhadap debit banjir adalah lahan sawah dan pemukiman kemudian tegalan.

4.2.3. Analisis Debit Sungai Akibat Alih Guna Lahan dan Aplikasi Model GenRiver pada DAS Way Besai, Sumberjaya

Salah satu fungsi utama dari DAS adalah sebagai pemasok air dengan kuantitas dan kualitas yang baik terutama bagi orang di daerah hilir. Alih guna lahan hutan menjadi lahan pertanian akan mempengaruhi kuantitas dan kualitas tata air pada daerah aliran sungai (DAS) yang akan lebih dirasakan oleh masyarakat di daerah hilir. Persepsi umum yang berkembang pada saat ini, konversi hutan menjadi lahan pertanian mengakibatkan penurunan fungsi hutan dalam mengatur tata air, mencegah banjir, longsor dan erosi pada DAS tersebut.

Hutan selalu dikaitkan dengan fungsi positif terhadap tata air dalam ekosistem DAS (Noordwijk *et al.*, 2003). Tanah hutan memiliki lapisan serasah yang tebal, kandungan bahan organik tanah, dan jumlah makro porositas yang cukup tinggi sehingga laju infiltrasi air lebih tinggi dibandingkan dengan lahan pertanian (Hairiah *et al.*, 2004).

Dalam tiga dasawarsa terakhir di daerah Sumberjaya banyak terjadi konversi hutan menjadi perkebunan kopi dan lahan pertanian lainnya. Pada kurun waktu tersebut terjadi penurunan luasan tutupan hutan dari 58% menjadi 15% (Ekadinata, 2001). Alih guna lahan ini mempengaruhi fungsi hidrologi DAS terutama fungsi tata air dalam ekosistem DAS.

Pengukuran fungsi hidrologi DAS di lapangan memerlukan pemahaman tentang banyak proses yang terlibat sehingga membutuhkan tenaga, waktu dan biaya yang banyak. Dengan demikian ketersediaan model hidrologi sangat diperlukan untuk membantu kita dalam mempelajari proses perubahan debit sungai akibat alih guna lahan dan neraca air pada tingkat DAS.

GenRiver adalah model simulasi sederhana yang berbasis pada proses hidrologi, model ini digunakan untuk mempelajari proses perubahan debit sungai dan neraca air pada tingkat DAS Way Besai, Sumberjaya, Lampung. Model Aliran Sungai Generik (GenRiver) merupakan model yang dikembangkan berdasarkan proses hidrologi (*process based model*). Simulasi model GenRiver menggunakan *Stella* sebagai software yang dihubungkan dengan file *microsoft excel*. Input utama dari model ini adalah curah hujan, tingkat penutupan lahan dan sifat fisik tanah dengan keluaran utama berupa aliran sungai dan neraca air untuk skala DAS.

Komponen utama model GenRiver dan proses-proses yang terlibat sebagai berikut :

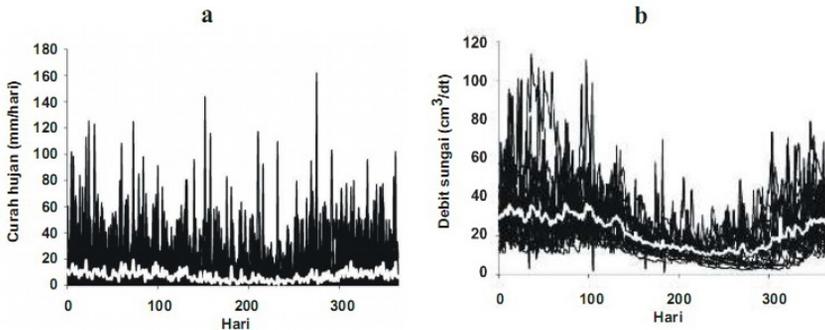
- Curah hujan harian. Curah hujan untuk skala sub-DAS dapat diambil dari data empiris atau menggunakan data bangkitan dari pembangkit data acak (*random generator*) yang mempertimbangkan pola temporal (seperti model rantai Markov) atau model yang mempertimbangkan korelasi ruang (*spatial correlation*) dari hujan pada waktu tertentu.
- Intensitas hujan dan waktu untuk infiltrasi. Intensitas hujan dihitung dari rata - rata data empiris intensitas hujan (mm/jam) dengan mempertimbangkan koefisien variasi dari kumpulan data tersebut. Lamanya hujan menentukan waktu yang tersedia untuk proses infiltrasi. Namun parameter ini dapat dimodifikasi dengan mempertimbangkan intersepsi oleh kanopi dan lamanya penetasan air dari kanopi (*dripping phase*) dengan penetapan awal (*default*) 30 menit.
- Intersepsi. Kapasitas penyimpanan air terintersepsi merupakan fungsi linier dari luas area daun dan ranting dari berbagai tipe penutupan lahan. Evaporasi dari air yang terintersepsi (*interception-evaporation*) mempunyai prioritas sesuai dengan kebutuhan transpirasi tanaman.
- Infiltrasi dan aliran permukaan. Proses infiltrasi dihitung berdasarkan nilai minimum dari : (a) kapasitas infiltrasi harian dan waktu yang tersedia untuk infiltrasi (ditentukan oleh intensitas hujan dan kapasitas penyimpanan lapisan permukaan tanah), (b) jumlah air yang dapat disimpan oleh tanah pada kondisi jenuh dan jumlah air yang dapat memasuki zona air tanah pada rentang waktu satu hari. Apabila kondisi pertama yang terjadi maka model akan menghasilkan aliran permukaan yang dibatasi oleh infiltrasi (*infiltration limited runoff*), sedangkan pada kondisi kedua aliran permukaan yang terjadi merupakan aliran jenuh permukaan (*saturation overland flow*).
- Evapotranspirasi. Total evapotranspirasi yang digunakan pada model ini mengikuti evapotranspirasi potensial Penman - Monteith dengan faktor koreksi yang dipengaruhi oleh: (a) air yang terintersepsi oleh kanopi, (b) kondisi tutupan lahan yang terkait dengan sensitivitas setiap jenis penutupan lahan terhadap kekeringan, (c) faktor pembobot pada evapotranspirasi potensial harian yang mengikuti fenologi dan pola tanam, (d) relatif potensial evapotranspirasi (bulanan) untuk setiap tipe penutupan lahan.

- Redistribusi air tanah. Selama kejadian hujan, tanah dapat mencapai kondisi jenuh air, namun sehari setelah hujan kondisi akan kembali pada kapasitas lapang (kondisi air tanah setelah 24 jam dari kejadian hujan lebat). Perbedaan antara kondisi jenuh dan kapasitas lapang dipengaruhi oleh: (a) transpirasi, (b) adanya aliran air ke zona bawah, (c) adanya aliran air ke sungai sebagai aliran cepat air tanah (soil quick flow) apabila air yang ada melebihi kapasitas lapang.
- Pelepasan air tanah menuju sungai (melalui aliran dasar)
- Jarak (routing distance). Jarak titik pengamatan atau outlet DAS ditentukan dari titik pusat masing-masing sub-DAS. Waktu tempuh (routing time) dari masing-masing sub-DAS dapat diturunkan dari data jarak dan asumsi rata-rata kecepatan aliran air.

Keluaran dari model ini berupa debit sungai harian dan kumulatif neraca air tahunan. Pengolahan lebih lanjut dari output model ini dapat digunakan sebagai indikator dalam mempelajari fungsi DAS.

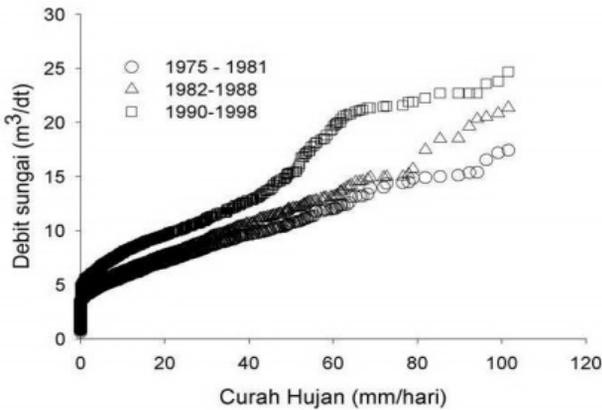
Analisis debit sungai Way Besai, 1975-1998

Peningkatan debit sungai Way Besai terjadi pada musim hujan dengan maksimum 110 m³/det. Penurunan debit sungai pada musim kemarau terjadi hingga mencapai 5 – 20 m³/det. Perbandingan debit rata – rata selama 23 tahun antar musim berkisar antara 35 – 10 m³/det (Gambar 4.16b).



Gambar 4.16. Curah hujan (a) dan debit sungai (b) Way Besai 1975 - 1998. Rata - rata curah hujan dan debit harian sebesar 7 mm dan 22 m³/detik (garis putih pada grafik).

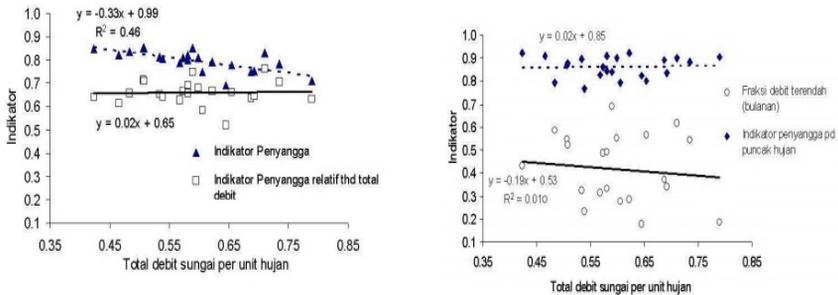
Hubungan antara curah hujan dan distribusi debit sungai dibagi atas tiga periode waktu yaitu pertama (1975 - 1981), kedua (1982 - 1988), ketiga (1990 - 1998) (Gambar 4.17).



Gambar 4.17. Hubungan antara curah hujan dengan distribusi debit sungai dalam tiga periode pengukuran 1975 - 1998. Curah hujan dan debit harian telah dipilah berdasarkan kesamaan exeedance probability (peluang kejadian suatu nilai melebihi suatu nilai tertentu).

Antara periode pertama dan kedua pada rentang curah hujan 0 - 80 mm/hari tidak terdapat perbedaan yang besar pada debit sungai. Pada tingkat curah hujan >80 mm/hari terjadi peningkatan debit sungai yang lebih tinggi pada periode kedua apabila dibandingkan dengan rentang tingkat curah yang sama pada periode pertama. **Pada periode ketiga** ada kecenderungan peningkatan debit yang lebih besar jika dibandingkan dengan dua periode lainnya. Peningkatan ini berhubungan dengan peningkatan aliran permukaan akibat perubahan struktur tanah setelah terjadinya alih guna lahan pada akhir dekade 80-an. Secara umum peningkatan debit sungai seiring dengan peningkatan curah hujan.

Hasil aplikasi perhitungan kuantitatif dari beberapa indikator fungsi hidrologi DAS disajikan pada Gambar 4.18. Indikator penyangga (*buffering indicator*) cenderung berkorelasi negatif dengan total debit sungai sehingga peningkatan debit akan menurunkan kapasitas menyangga dari sungai. Indikator penyangga menunjukkan tingkat penurunan yang relatif rendah pada kondisi puncak kejadian hujan (*buffering peak events*). Peningkatan total debit tidak selalu diikuti dengan peningkatan debit terendah (bulanan) akibat adanya variabilitas hujan antar tahun (*inter-annual*)



Gambar 4.18. Hubungan indikator kuantitatif fungsi hidrologi DAS relatif terhadap total debit sungai per unit hujan menggunakan data empiris DAS Way Besai, Lampung.



Gambar 4.19. Neraca air kumulatif DAS Way Besai hasil simulasi GenRiver dalam periode satu tahun.

Salah satu hasil simulasi GenRiver adalah neraca air tahunan (Gambar 4.19). Pada neraca air ini, kumulatif debit sungai

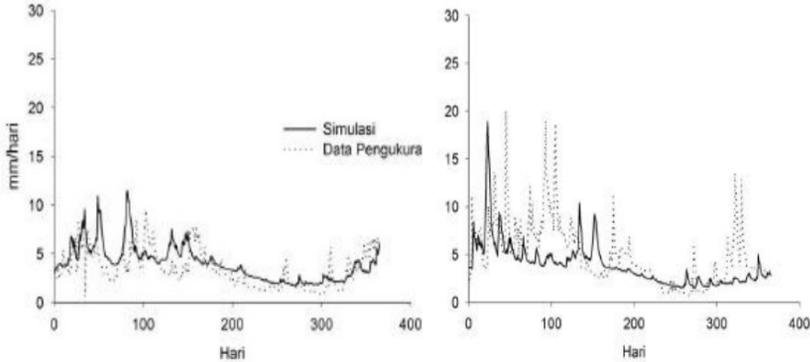
merupakan penjumlahan aliran dasar (*baseflow*), aliran permukaan (*surface quick flow*) dan aliran cepat air tanah (*soil quick flow*). Selain itu, kumulatif debit sungai juga merupakan pengurangan antara kumulatif hujan dan evapotranspirasi. Besarnya evapotranspirasi, debit sungai dan curah hujan berfluktuasi sepanjang tahun dan digambarkan sebagai perubahan simpanan air pada DAS (*delta catchment storage*).

Curah hujan kumulatif mencapai 2500 mm/tahun dengan jumlah evapotranspirasi 1250 mm/tahun. Kumulatif aliran dasar (*base flow*) memberikan kontribusi terbesar pada debit sungai (40%) dengan jumlah aliran cepat air tanah (*soil quick flow*) dan aliran permukaan (*surface quick flow*) yang relative stabil sepanjang tahun. Perubahan parameter neraca air tahunan pada DAS Way Besai lebih terkait dengan adanya perubahan pada kondisi tanah dibandingkan jumlah air yang digunakan oleh vegetasi pada berbagai tipe penggunaan lahan.

Simulasi GenRiver - Kriteria dan Indikator Fungsi Hidrologi DAS

Untuk mempelajari hubungan curah hujan, debit sungai dan alih guna lahan dilakukan simulasi model GenRiver menggunakan data-data daerah Sumberjaya. Untuk itu dilakukan simulasi model dengan komposisi 58% hutan pada awal simulasi dengan penurunan hingga 14% pada akhir simulasi (Ekadinata,2001) dalam periode 20 tahun. Peningkatan luasan kebun kopi dari 12% hingga 70% dengan penurunan luas areal pertanian (tidak termasuk kopi) dari 22% hingga 11%. Perbandingan debit dari data empiris (data pengukuran) dengan hasil simulasi model GenRiver untuk tahun ke - 3 dan 20 disajikan pada Gambar 4.20. Tahun ke - 3 mewakili kondisi awal simulasi (58% areal hutan) dan tahun ke -20 mewakili kondisi akhir simulasi dengan 14% areal hutan. Perbandingan hasil simulasi dengan data pengukuran tidak dapat dilakukan dengan melihat kedekatan setiap titik hasil simulasi dengan data pengukuran. Hasil tersebut secara umum berarti simulasi model dapat menghasilkan pola debit yang sama dengan data pengukuran walaupun masih belum bisa mendekati beberapa titik puncak dan aliran dasar. Debit sungai pada tahun ke-20 relatif lebih tinggi dibandingkan debit pada tahun ke-3 (Gambar 4.20). Peningkatan puncak debit pada tahun ke-20 mencapai dua kali lebih tinggi dari pada tahun ke-3. Hal ini berkaitan dengan penurunan luasan hutan pada tahun ke-20 yang menyebabkan berkurangnya intersepsi tajuk oleh pohon sehingga

meningkatkan aliran permukaan. Selain itu penurunan jumlah evapotranspirasi dan laju infiltrasi akibat rusaknya struktur tanah pada lahan bekas hutan menyebabkan peningkatan jumlah air yang masuk ke dalam sungai.



Gambar 4.20. Hasil simulasi GenRiver pada tahun ke 3 (a) dan ke 20 (b). Kesesuaian antara hasil simulasi dengan data pengukuran dilihat dari kesamaan pola debit hasil simulasi dengan data pengukuran.

Simulasi alih guna lahan dengan beberapa scenario dilakukan untuk mempelajari hubungan antara alih guna lahan terhadap perubahan aliran (debit) sungai. Total curah hujan dan nilai parameter masukan model ini ditetapkan sama untuk setiap skenario simulasi.

Ada 3 skenario alih guna lahan yang disimulasikan, yaitu :

- Skenario 1. Seluruhnya hutan, artinya seluruh DAS tertutup oleh hutan (*all forest*)
- Skenario 2. Lahan terdegradasi, seluruh DAS berupa lahan terdegradasi atau padang alang-alang (*degraded lands/grassland*)
- Skenario 3. Kondisi saat ini, adalah kondisi penutupan lahan di Sumberjaya saat ini (*current land use*) dengan komposisi sebagai berikut:

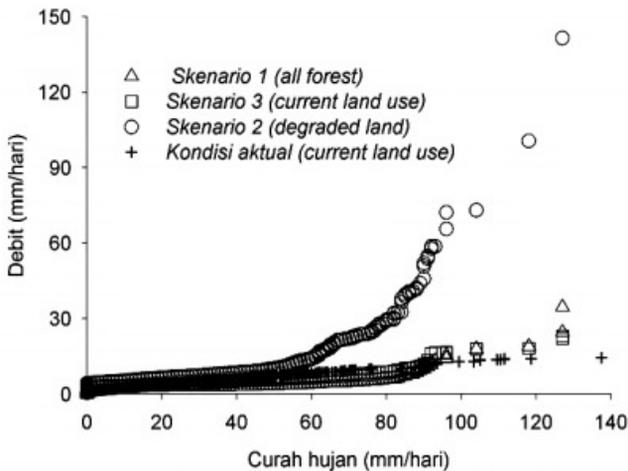
Hasil simulasi dari ketiga skenario ini disajikan pada Gambar 4.21. Sebagai pembandingan (kontrol) disajikan juga data pengukuran dengan kondisi penutupan lahan sama dengan skenario 3 (*current land use*). Tingkat debit terendah dihasilkan dari skenario 1 (*all forest*) dan debit tertinggi dari hasil skenario 2 (*degraded lands/grassland*). Debit maksimum yang dihasilkan pada skenario 1

mencapai 20 mm/hari sedangkan pada skenario 3 bisa mencapai 200 mm/hari. Pada scenario 3 (*current land use*) didapatkan hasil yang mendekati hasil simulasi skenario 1 (*all forest*).

No	Kelas Penutupan Lahan	Tingkat penutupan lahan (%)
1	Hutan	13
2	Semak belukar	1
3	Padang rumput	9
4	Pemukiman	2
5	Lahan kosong	1
6	Kopi monokultur	18
7	Kopi multistrata	35
8	Kopi muda	18

Sumber : Ekadinata, 2001

Tabel 4.17. Penggunaan Lahan di Sumberjaya



Gambar 4.21. Perbandingan debit sungai hasil simulasi debit dengan beberapa skenario alih guna lahan dengan data hasil pengukuran. Total curah hujan dan parameter masukan model ditetapkan sama untuk setiap scenario simulasi.

Perbandingan indikator fungsi hidrologi DAS pada beberapa skenario simulasi alih guna lahan disajikan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18. Beberapa indikator fungsi hidrologi DAS Way Besai dengan beberapa skenario alih guna lahan.

Indikator	Simulasi GenRiver			Data Pengukuran (<i>current LU</i>)
	Skenario 1 (<i>all forest</i>)	Skenario 2 (<i>degraded land</i>)	Skenario 3 (<i>current LU</i>)	
Total debit sungai per unit hujan	0.44	0.62	0.53	0.61
Indikator penyangga (<i>buffering indicator</i>)	0.80	0.68	0.82	0.79
Indikator penyangga relatif terhadap total debit	0.55	0.49	0.66	0.66
Indikator penyangga pada puncak kejadian hujan	0.76	0.78	0.81	0.86
Total debit maksimum terhadap rata-rata curah hujan bulanan	1.65	1.58	2.19	1.92
Total debit minimum terhadap rata-rata curah hujan bulanan	0.50	0.46	0.54	0.39
Total aliran permukaan terhadap debit total	0.00	0.36	0.11	*
Total aliran cepat air tanah terhadap debit total	0.02	0.00	0.10	*
Total aliran lambat terhadap debit total	0.29	0.25	0.30	*

Skenario 1 (*all forest*) menghasilkan total debit sungai terendah (44%) diantara scenario lainnya, sedangkan skenario 2 (*degraded lands/grassland*) dan 3 (*current land use*) menghasilkan 62% dan 53%. Bila hasil simulasi ini dibandingkan dengan hasil pengukuran, ternyata hasil simulasi debit sungai sekitar 14 % lebih tinggi dari pada hasil pengukuran. Hal ini berkaitan dengan nilai evapotranspirasi pada GenRiver yang masih memerlukan parameterisasi lebih lanjut.

Hasil indikator penyangga (*buffering indikator*) tertinggi diperoleh dari simulasi skenario 3 (*current and use*) diikuti oleh skenario 1 (*all forest*) dan 2 (*degraded lands/grassland*). Nilai indikator penyangga dengan kondisi penutupan lahan saat ini (Tabel 3.18) masih cukup tinggi dan mendekati nilai indikator penyangga dengan skenario 1 (*all forest*).

Perbandingan indikator – indikator yang dihasilkan dari hasil simulasi model untuk kondisi *current land use* secara umum dapat diterima tingkat kesesuaiannya dengan pengolahan indikator menggunakan data pengukuran. Hal ini menunjukkan bahwa

penggunaan model GenRiver dengan parameterisasi model yang menggunakan data dan kondisi lokal dapat dipakai untuk mempelajari fungsi hidrologi DAS dengan berbagai skenario alih guna lahan.

Dari hasil penelitian di atas dapat disimpulkan :

- Hubungan antara curah hujan dan debit sungai pada DAS Way Besai selama 23 tahun (tahun 1975 - 1998) pengamatan menunjukkan adanya peningkatan debit pada periode 1990–1998. Peningkatan ini berkaitan dengan pengurangan luasan hutan dari 60% menjadi 12% dari tahun 1970-an sampai 2000.
- Pengolahan data empiris debit menunjukkan perubahan indikator penyangga (*buffering indicator*). Perubahan ini memiliki kecenderungan menurunnya indikator penyangga dengan meningkatnya total debit sungai.
- Model GenRiver dapat digunakan untuk mempelajari fungsi hidrologi DAS dan hubungannya dengan alih guna lahan. Beberapa hasil utama dari simulasi GenRiver:
 - Aliran dasar (*base flow*) memberikan kontribusi terbesar (40%) pada debit sungai dengan jumlah aliran cepat air tanah (*soil quick flow*) dan aliran permukaan (*surface quick flow*) yang relatif stabil sepanjang tahun.
 - Debit sungai hasil simulasi mendekati pola debit hasil pengukuran, walaupun titik puncak dan aliran dasar yang diperoleh masih perlu parameterisasi lebih lanjut.
 - Skenario seluruh DAS tertutup hutan menghasilkan jumlah debit sungai paling kecil dibandingkan skenario kondisi terdegradasi dan skenario kondisi saat ini. Indikator fungsi hidrologi menunjukkan peningkatan hasil air sungai dan peningkatan resiko banjir karena alih fungsi hutan.
- Perubahan kondisi tanah sesudah alih fungsi hutan adalah penyebab utama terjadinya perubahan fungsi DAS. Sistem agroforestri berbasis kopi dapat mengembalikan kelestarian fungsi hidrologi DAS.

4.2.4. Perubahan Penggunaan Lahan dan Pengaruhnya Terhadap Hidrologi Daerah Aliran Sungai

Peningkatan deforestasi dengan dampak negatifnya telah dikenali terjadi di sejumlah daerah aliran sungai (DAS) di Jawa

sejak awal abad 20 lalu, dan disadari sebagai awal permasalahan lingkungan hidup di Indonesia. Mohr (1906 dalam ECI, 1994) mengemukakan bahwa pengaruh merugikan pada lahan sawah beririgasi untuk air dari Sungai Pekacangan, anak sungai dari Serayu, yang mengandung deposit kelabu dari butiran kuarsa, telah menurunkan kesuburan dan produksi beras. Laju erosi untuk sebagian daerah Serayu diduga mencapai 5.700 ton/km² di Sojokerto sampai 24.600 ton/km² untuk Sungai Pekacangan. Rutten (1917 dalam ECI, 1994) membandingkan hasil sedimen layang berdasarkan ciri litologi dan menyimpulkan bahwa laju penggundulan sangat ditentukan oleh jenis litologi setempat. Material vulkanik memiliki laju erosi rendah (0,1-0,4 mm/tahun) dibandingkan dengan jenis batuan marl (1,6-5,0 mm/tahun). Sedangkan Van Dijk dan Vogelzang (1948 dalam ECI, 1994) membandingkan hasil sedimen DAS Cilutung di Jawa Barat untuk masa 1911-1912 dan 1934-1935, masing-masing 900 m³/km² pada curah hujan tahunan 1.797 mm dan 1.900 m³/km² pada curah hujan tahunan 1.941 mm. Menurut Thijsse (1974, 1976 dalam ECI, 1994) sekitar 40% dari total lahan kering Indonesia, sejumlah 100 juta ha sudah dalam kondisi rusak (*desert land*). Perkiraan konservatif sebesar 80 juta ha dari lahan marginal ini akan terjadi menjelang tahun 2000.

Kondisi hidrologi Pulau Jawa dan Indonesia umumnya saat ini dicirikan oleh meningkatnya kejadian ekstrem seperti banjir dan kekeringan dengan kandungan cemaran yang tinggi di badan-badan air seperti sungai dan danau. Krisis air juga semakin terasa, terutama menjelang dan selama musim kemarau, khususnya untuk Pulau Jawa yang sudah diantisipasi akan mengalami kelangkaan air yang serius akibat tekanan penduduk yang akut dan kondisi perubahan penggunaan lahan yang buruk. Diperkirakan bahwa sebagai dampak yang perlu dicermati dari perubahan penggunaan lahan dalam skala luas adalah telah terjadinya penurunan curah hujan dan rezim hidrologi di sejumlah wilayah di Indonesia, termasuk Pulau Jawa. Pengaruh perubahan penggunaan lahan terhadap aspek hidrologi DAS dan frekuensi banjir menjadi fokus kajian dalam tulisan ini.

Informasi dasar mengenai karakteristik hidrologi sejumlah sungai utama di Indonesia dan negara-negara Asia-Pasifik dapat diperoleh di Catalogue of Rivers

1995, 1997, 2000, dan 2002 (Publikasi Unesco-IHP) yang memuat karakteristik 10 sungai di Indonesia seperti disajikan pada Tabel 4.19 dan 4.20. Delapan dari sepuluh sungai tersebut terdapat di Jawa dengan total luas seluruh DAS mencapai separuh dari luas

Pulau Jawa dan total rerata debit sebanding dengan proporsi luas DAS. Status penggunaan lahan dari sepuluh DAS utama ini sudah didominasi oleh lahan budi daya dan perkotaan yang menunjukkan tingkat perkembangan wilayah yang ada.

Tabel 4.19. Karakteristik beberapa sungai utama di Indonesia dengan status penggunaan lahan

No.	Nama sungai	Panjang luas DAS	Titik tertinggi Titik terendah	Populasi kota utama	Penggunaan lahan ¹⁾				
					F	L	A	P	U
		Km/km ²	m	jiwa	%				
1.	Citarum	269 6.080	1.700 0	Bandung 2.513.000 (1992)	20	2,5	18	30	29,5
2.	Cimanuk	230 3.600	3.078 0	Cirebon 256.134(1995)	22,8	0,01	29,8	36	6,6
3.	Citanduy	170 4.460	1.750 0	Tasik 187.609 Ciamis 145.406 Banjar 130.197 (1995)	9,3	0,08	48	24	16,6
4.	Serayu	158 3.383	2.565 0	Purwokerto 209.005 (-)	17	-	35,6	24,6	22,7
5.	Progo	140 2.380	1.650 0	Magelang 116.468 (1995)	4	-	32	45	19
6.	Bengawan Solo	600 16.100	3.265 0	Solo: 525.371 Ngawi: 829.726 (1993)	3,0	5	24,5	66	6,0
7.	Brantas	320 12.000	3.369 0	Surabaya 2.270.081 (1990)	22,1	-	19,8	29,2	28,9
8.	Tuntang	139 798	3.142 0	Salatiga: 104.834 Ambarawa: 42 738.000(1997)	21,3	3,0	37,5	30,5	7,7
9.	Asahan	147 3.741	2457 0	Parapat, Porsea, Balige, Kisaran, Tj.Balai 889.997 (1992)	35,0	10,0	40,0	10,0	5,0
10.	Jeneberang	78,75 727	2.876 0	Makassar Malino, Bili-bili, Sungguminasa 982.248 (1993)	40,0	-	27,0	20,0	13,0

Sumber: Catalogue of Rivers (1995, 1997, 2000, 2002).

¹⁾ F: hutan; L: danau, sungai, rawa; A: lahan pertanian; P: sawah; U: kota

Penggunaan lahan pertanian dan padi sawah telah mencapai 50-85%, dan perkotaan mencapai hampir 30% untuk Citarum dan Brantas, sedangkan luas lahan hutan kebanyakan sudah di bawah 20%. Data terakhir dari Badan Planologi Dephut menyatakan bahwa luas tutupan hutan Pulau Jawa saat ini tinggal 4%.

Tabel 4.20. Karakteristik debit beberapa sungai utama

No	Nama sungai	Stasiun	Luas DAS (A)	Q	Qmax	Qmin	Qmax/A
			km ²		m ³ /s		m ³ /s/100km ²
1	Citarum	Nanjung	1.675	68,7	455,0	5,4	27,1
2	Cimanuk	Rentang	3.003	134,7	305,6	19,9	14,6
3	Citanduy	Cikawung	2.515	204,0	710,6	16,3	39,2
4	Serayu	Rawalo	2.631	273,4	1.497	58,8	76,8
5	Progo	Bantar	2.008	89,3	596,0	9,0	29,8
6	Bengawan Solo	Bojonegoro	12.804	362,9	2.127	19,0	17,0
7	Brantas	Jabon	8.650	258,7	866,1	46,6	10,0
8	Tuntang	Glapan	798	27,7	500,0	4,5	137,0
9	Asahan	Siruar	3.741	96,6	133,1	42,1	7,0
10	Jeneberang	Patalikang	384,4	43,5	352,2	0,3	182,4

Sumber: Catalogue of Rivers, 1995, 1997, 2000, 2002

Q = debit sungai, Qmax/A = debit jenis

Karakteristik debit sungai sebagaimana tercantum pada Tabel 4.20 menunjukkan variasi aliran yang tinggi, baik untuk rezim aliran sungai-sungai tertentu maupun antar-sungai. Rasio debit maksimum/minimum bervariasi dari kurang dari 20 kali sampai lebih dari 100 kali, walau perlu dicermati juga akurasi informasi debit yang diberikan ini antara debit maksimum sesaat atau rerata bulanan. Sebagai indikator penting untuk menilai karakteristik hidrologi banjir dari suatu sungai adalah debit jenis (*specific discharge*) yang dibataskan sebagai besar debit per satuan luas ($\text{m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$). Nampak bahwa sungai-sungai utama di Indonesia ini memiliki sifat banjir yang moderate dibandingkan dengan sungai-sungai di dunia, yaitu dengan debit jenis (Q_{max}/A) antara 10-80 $\text{m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$ kecuali Tuntang dan Jeneberang yang melampaui 100 $\text{m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$ atau termasuk tinggi. Sebagai ukuran ketersediaan air dapat dinyatakan debit jenis terhadap debit rerata yang menghasilkan besaran antara 4-10 $\text{m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$. Debit minimum menyatakan kondisi ketersediaan air pada musim kering yang tentunya harus digunakan terbatas untuk jenis penggunaan air tertentu saja, seperti penggunaan domestik dan industri, dan tidak untuk pertanian.

Perkembangan penggunaan lahan di sejumlah daerah aliran sungai di Indonesia dalam tiga dasawarsa terakhir ini telah memberi dampak berupa peningkatan frekuensi, debit, dan volume banjir yang telah menggenangi wilayah permukiman dan infrastruktur

umum yang mengakibatkan kerusakan dan kerugian material dan non-material. Untuk itu kajian hidrologi DAS sangat diperlukan untuk memberikan gambaran mengenai fungsi hidrologi, khususnya yang menyangkut hubungan sebab-akibat yang dinyatakan dengan koefisien limpasan dan waktu konsentrasi, serta faktor-faktor yang berperan, seperti kondisi penggunaan lahan dan perubahannya.

DAS Ciliwung yang merupakan salah satu sungai utama yang bermuara ke Teluk Jakarta dengan total luas daerah aliran 347 km² dan panjang sungai utama 117 km. Estimasi debit banjir menurut Nedeco-PBJR (1973) :

- Untuk 2-tahunan adalah 100 m³/s dan
- untuk 25-tahunan sebesar 200 m³/s,

dan nampaknya nilai estimasi ini telah berubah sejalan dengan perubahan penggunaan lahan yang telah terjadi dalam tiga dasawarsa terakhir ini :

- Debit banjir untuk 100 tahunan diperkirakan telah meningkat dari 370 m³/s (1973) menjadi 570 m³/s (2000) dan hal ini terkait erat dengan perubahan penggunaan lahan di wilayah DAS, khususnya di wilayah hulu.

Lebih jelasnya penggunaan lahan DAS Ciliwung Hulu dan Tengah tahun 1981 dan 1999 dapat dilihat pada Tabel 4.21.

Jenis penggunaan lahan	Luas Ciliwung Hulu		Luas Ciliwung Tengah	
	1981	1999	1981	1999
	-----ha-----			
Hutan	5.312	5.310	108	101
Kebun campuran/perkebunan	3.266	3.231	1.837	1.704
Kawasan pemukiman	255	506	1.147	1.961
Sawah teknis	2.270	2.227	1.499	1.283
Sawah tadah hujan	289	271	203	197
Tegalan/ladang	3.490	3.338	2.907	2.456
Sungai, setu dll	81	81	52	48
Total	14.963	14.964	7.663	7.706

Sumber: Singgih (2000).

Tabel 4.21. Penggunaan lahan DAS Ciliwung Hulu dan Tengah tahun 1981 dan 1999

Perubahan penggunaan lahan dari kondisi dua tahun pengamatan ini menunjukkan penurunan luas hutan di Ciliwung Hulu seluas 2 ha, perkebunan seluas 35 ha, sawah total seluas 62 ha, dan lahan tegalan/ladang seluas 152 ha. Penurunan penggunaan lahan serupa didapati juga pada kawasan tengah. Peningkatan yang mencolok terjadi pada luas kawasan permukiman, baik di Ciliwung Hulu maupun Tengah, masing-masing meningkat dari 255 ha menjadi 506 ha untuk Ciliwung Hulu dan dari 1.147 ha menjadi 1.961 ha untuk Ciliwung Tengah, atau peningkatan masing-masing sebesar 98% dan 71%, yang diperoleh terutama dari pengurangan luas sawah dan tegalan, baik di kawasan hulu maupun tengah.

Perubahan pola penggunaan lahan ini memberi dampak pada pengurangan kapasitas resapan, terutama dilihat dari proporsi perubahan luasan permukiman ini di Ciliwung Tengah, sehingga akan meningkatkan laju limpasan permukaan yang menghasilkan banjir di kawasan hilir Ciliwung, sampai ke Jakarta. Rachman (1992) menyatakan penurunan nyata laju infiltrasi untuk berbagai penggunaan lahan di Ciliwung Hulu mulai dari hutan alami, pertanian, kebun teh, dan permukiman.

Pengaruh Perubahan Penggunaan Lahan Terhadap Fungsi Hidrologi DAS

Perubahan penggunaan lahan dengan pembangunan kota tentunya tidak terhindarkan, mulai dari penggundulan hutan yang digantikan dengan permukaan kedap berupa atap perumahan, jalan-jalan, tempat parkir, bandara, dan sebagainya. Dampaknya secara nyata telah meningkatkan frekuensi dan intensitas banjir. Tercatat bahwa antara tahun 1981 dan 1999 telah terjadi peningkatan kawasan permukiman untuk Ciliwung Hulu sebesar 100% dengan dampak berupa peningkatan debit banjir di Katulampa sebesar 68%, dan di Depok 24%, sedangkan peningkatan volume banjir adalah 59% untuk Katulampa dan 15% untuk Depok (Pawitan, 2002).

Fakta hidrologi demikian telah lama melahirkan mitos yang menyatakan bahwa gunung dan hutan berperan menahan/menyimpan air hujan, serta menghindari terjadinya banjir dan kekeringan, yang sepertinya dapat diterangkan oleh hukum sebab-akibat. Persepsi yang keliru tentang hubungan hutan dan fungsi DAS seperti dibahas oleh Van Noordwijk *et al.*, (2003) sangat relevan untuk disimak, khusus pada kesimpulan bahwa yang

penting dipertahankan adalah adanya tutupan vegetasi dan lapisan serasah dan tidak semata dalam bentuk hutan.

Menurut Calder, (1998 dalam Pawitan, 2004) ada enam aspek pengaruh hutan terhadap fungsi hidrologi wilayah, yaitu :

- a. Hutan meningkatkan curah hujan: Walaupun awalnya sulit dibuktikan, saat ini dapat ditunjukkan bahwa hilangnya hutan juga diikuti oleh berkurangnya curah hujan seperti yang dialami oleh Pulau Jawa. Pengurangan hutan yang nyata dalam kawasan yang luas dalam tiga dekade terakhir ini telah menurunkan jumlah curah hujan tahunan sampai 1.000 mm/tahun atau 25% lebih rendah dari kondisi awal abad ini. Implikasi lebih serius dapat terjadi dengan hilangnya kawasan hutan.
- b. Hutan meningkatkan aliran sungai: Yang terjadi adalah vegetasi hutan juga mengkonsumsi air dalam jumlah yang besar, sehingga hutan justru cenderung menurunkan aliran sungai. Walaupun untuk hutan yang mapan, telah terjadi keseimbangan hidrologi wilayah, sehingga penurunan ini tidak terasa lagi. Sebaliknya, dengan hilangnya hutan maka aliran sungai akan meningkat dengan banjirnya, sampai tercapai keseimbangan hidrologi yang baru setelah jangka waktu yang panjang (ratusan tahun).
- c. Hutan mengatur fluktuasi aliran sungai - meningkatkan aliran rendah musim kemarau: Pengamatan di Inggris dan juga di Afrika Selatan menunjukkan bahwa penghutanan kembali padang rumput dengan pohon pinus tidak hanya menurunkan aliran sungai sejumlah 440 mm/tahun, tetapi juga menurunkan aliran rendah musim kemarau sebesar 15 mm. Kesimpulannya adalah: pengaruh hutan terhadap aliran rendah sangat *site specific* dan tidak ada jaminan penghutanan akan meningkatkan aliran rendah musim kemarau.
- d. Hutan mengurangi erosi: Hal ini sangat bergantung pada situasi dan kondisi, seperti intensitas hujan, kelerengan lahan, dan faktor geologi batuan, serta metode pengelolaan yang dipilih. Pengalaman di Jawa, hutan jati menunjukkan tingkat erosi yang tinggi.
- e. Hutan mengurangi banjir: Barangkali pengalaman dan pemberitaan media massa membenarkan pernyataan ini, padahal kajian hidrologi umumnya menunjukkan lemahnya hubungan penggunaan lahan dan banjir dan menyimpulkan

kurangnya bukti ilmiah yang mendukung laporan bahwa deforestasi meningkatkan banjir. Perkembangan teori saat ini menunjukkan peran skala DAS dalam hubungan hujan-limpasan, di mana semakin luas DAS semakin kecil peran aktivitas manusia.

- f. Hutan meningkatkan mutu pasokan air: Kecuali pada daerah dengan iklim yang tercemar berat yang menghasilkan hujan asam, mutu air lazimnya lebih baik pada kawasan berhutan, walaupun sangat dipengaruhi oleh praktek pengelolaan hutan itu sendiri. Saat ini DAS berhutan menjadi andalan untuk menjamin pasokan air bersih kota-kota metropolitan dunia.

Perubahan jangka panjang keseimbangan hidrologi Pulau Jawa

Perubahan tutupan lahan telah berlangsung di Pulau Jawa sejak awal abad lalu akibat konversi lahan dari hutan menjadi penggunaan lain dan hal ini berlangsung sejalan dengan pertambahan jumlah penduduk dari empat juta pada awal abad 19 yang meningkat menjadi 40 juta pada awal abad 20 dan saat ini mencapai 130 juta jiwa.

Pertambahan penduduk ini berbanding terbalik dengan luas hutan yang terus berkurang hingga kurang dari 20%. Penggundulan lahan ini telah berlangsung sejak awal abad 20 dan meningkat secara luas dalam tiga dasawarsa terakhir ini. Dampak perubahan tutupan lahan dalam skala luas ini nampak dari perubahan fungsi hidrologi DAS yang berawal dari penurunan curah hujan wilayah dan diikuti oleh hasil air DAS.

Gejala penurunan curah hujan Pulau Jawa nampak dari rata-rata curah hujan tahunan periode 1931-1960 dan 1968-1998 di banyak stasiun yang meliputi sepanjang Jawa bagian selatan yang mencapai selisih 1.000 mm antara dua periode pengamatan tersebut. Hasil serupa juga diamati dengan perubahan jangka panjang untuk DAS Citarum untuk masa 1896-1994 yang mengalami trend penurunan curah hujan dengan laju 10 mm/tahun dan diikuti oleh penurunan debit limpasan sebesar 3 mm/tahun.

Kepekaan sistem hidrologi DAS

Penilaian kepekaan dan daya dukung sistem hidrologi DAS akibat perubahan penggunaan lahan dapat dilakukan dalam tiga

tahapan berikut: (i) pengembangan skenario perubahan penggunaan lahan; (ii) simulasi hidrologi wilayah; dan (iii) evaluasi dampak dari variasi hidrologi yang dihasilkan sistem sumber daya air yang meliputi aspek pengembangan dan pengelolaan serta menilai kinerja sistem akibat bencana seperti banjir dan kekeringan, operasi waduk, saluran, mutu air, serta berbagai isu lingkungan.

Menurut Pawitan (1999), perubahan pola penggunaan lahan berdampak pada penurunan ketersediaan air wilayah akibat meningkatnya fluktuasi musiman dengan gejala banjir dan kekeringan yang semakin ekstrim, dan ukuran DAS serta kapasitas sistem storage DAS, baik di permukaan (tanaman, sawah, rawa, danau/waduk, dan sungai) maupun bawah permukaan (lapisan tanah dan air bumi), akan merupakan faktor dominan yang menentukan kerentanan dan daya dukung sistem sumber daya air wilayah terhadap perubahan iklim. Dalam kaitan ini perubahan paradigma dari pengelolaan sumber daya air dari *blue water* menjadi *green water* menjadi relevan saat ini.

Kajian dampak perubahan penggunaan lahan antara tahun 1981 dan 1999 menggunakan model hidrologi HEC-1 menunjukkan meningkatnya debit banjir Ciliwung Hulu (Katulampa) sebesar 68% dan untuk Ciliwung Tengah sebesar 24%, sedang peningkatan volume banjir untuk Ciliwung Hulu sebesar 59% dan Ciliwung Tengah sebesar 15%. Perubahan ini juga telah diikuti oleh terjadinya peningkatan andil daerah hulu terhadap debit dan volume banjir di daerah hilir DAS.

Frekwensi Banjir sejumlah sungai Utama

Untuk mengetahui tingkat banjir (*flood severity*) suatu sungai dapat digunakan ukuran debit jenis seperti ditunjukkan pada Tabel 4.20 di atas, dengan Sungai Tuntang dan Jeneberang dari sepuluh sungai tersebut memiliki debit jenis melampaui 100 m³/s/100 km². Untuk Pulau Jawa sesungguhnya dicatat sejumlah sungai dengan langganan banjirnya. Dari debit jenisnya, selain Tuntang, hanya Sungai Citanduy dan Serayu saja yang masih dapat dikelaskan sebagai *moderate* (sedang), sedangkan sungai-sungai lainnya tergolong rendah. Untuk sungai-sungai dengan luas <100 km² atau bagian hulu yang dicirikan oleh lereng yang curam, perlu dikenali juga bahaya bencana banjir bandang untuk daerah hulu sungai (*headwater area*) yang dapat menghasilkan debit sangat tinggi.

Dari uraian di atas, dapat disimpulkan :

1. Perkembangan pembangunan nasional selama ini telah menunjukkan sejumlah dampak negatif berupa perubahan penggunaan lahan yang berakibat hilangnya tutupan lahan hutan menjadi jenis penggunaan lahan lainnya, yang terbukti memiliki daya dukung lingkungan lebih terbatas, sehingga bencana banjir dan kekeringan semakin sering terjadi, disertai bencana ikutannya seperti longsor, korban jiwa, pengungsian penduduk, gangguan kesehatan, sampai kelaparan dan anak putus sekolah.
2. Karakteristik DAS sejumlah sungai utama di Indonesia, khususnya di Jawa, dicirikan oleh dominasi lahan budi daya pertanian dan padi sawah yang mencapai 50-85%, dan perkembangan perkotaan yang sudah mencapai 30% untuk Citarum dan Brantas, sedangkan luas hutan sudah dibawah 20%. Hal ini diyakini telah ikut mempengaruhi terjadinya peningkatan frekuensi dan volume debit banjir maupun kekeringan di banyak wilayah di Indonesia.
3. Dari besaran debit jenis sungai-sungai utama dapat dikatakan bahwa sifat banjir sungai-sungai di Indonesia (Jawa) termasuk moderat dengan nilai 10-80 m³/s/100 km² kecuali untuk Tuntang dan Jeneberang yang lebih dari 100 m³/s/100 km².
4. Perubahan penggunaan lahan hampir pasti mengikuti pola dari jenis penggunaan hutan ke pertanian, perkebunan, dan berlanjut ke permukiman sejalan dengan perkembangan wilayah perkotaan. Perubahan demikian jelas sangat berpengaruh terhadap neraca air wilayah dan rezim hidrologi DAS bersangkutan. Perlu dicermati adanya kesimpulan yang menyederhanakan dampak perubahan penggunaan lahan seolah-olah jenis tutupan vegetasi tidak banyak berperan dan mengabaikan air konsumtif tanaman.
5. Kepekaan sistem hidrologi DAS terhadap perubahan penggunaan lahan dapat dievaluasi menggunakan model-model hidrologi dan ditentukan oleh sifat biofisik DAS bersangkutan. Untuk kasus DAS Ciliwung dengan model HEC-1 didapatkan bahwa dampak perubahan penggunaan lahan dari kondisi 1981 ke 1999 telah meningkatkan debit puncak banjir Ciliwung Hulu sebesar 68% dan Ciliwung Tengah sebesar 24%, sedangkan peningkatan volume banjir untuk Ciliwung Hulu adalah 59% dan Ciliwung Tengah 15%.

4.3. Dampak alih guna lahan hutan terhadap sedimentasi

4.3.1. Dampak Gangguan Tutupan Lahan Terhadap Sedimentasi pada Waduk Di DAS Wain, Balikpapan.

Penelitian ini dilakukan pada waduk dan DAS Wain Balikpapan dengan luasan sekitar 10.025 ha yang di dalamnya terdapat kawasan hutan lindung Sungai Wain. Pemanfaatan sungai Wain yang terdapat di dalam DAS tersebut selain sebagai sarana transportasi, tempat cuci dan mandi bagi masyarakat yang bermukim di sekitar saluran sungai, sementara itu pada bagian tengah/hilir sungai tersebut dibangun waduk Wain yang luasannya sekitar 4 ha yang sampai saat ini dimanfaatkan sebagai waduk penampung air untuk memasok kebutuhan air minum bagi pihak Pertamina Balikpapan dan penduduk sekitarnya.

Permasalahan yang didapat pada DAS Wain adalah terjadi kegiatan perambahan hutan dan lahan serta bencana kebakaran yang mengakibatkan luasan hutan menjadi berkurang dan menimbulkan penambahan luasan lahan non produktif yang berupa lahan alang-alang maupun semak belukar (Tabel 4.22)

Tabel 4.22. Perubahan Luasan Penggunaan Lahan pada DAS Wain yang Terjadi pada Tahun 1987 dan 1996.

No	Penggunaan Lahan	Luasan Penggunaan Lahan			
		1987		1996	
		Ha	%	Ha	%
1.	Hutan Primer	7.304,0	72,9	4.914,0	49,0
2.	Semak Belukar Dan Alang-alang	2.051,2	20,4	4.405,9	43,9
3.	Sawah	493,5	4,9	493,5	5,0
4.	Ladang	148,1	1,5	183,5	1,8
5.	Hutan Mangrove	28,7	0,3	28,6	0,3
Jumlah Luasan		10.025,5	100,0	10.025,5	100,0

Hasil prediksi total sedimen pada waduk Wain terjadi peningkatan, dimana tahun 1997 total sedimen sebesar 26.114 ton dan pada tahun 1998 total sedimen menjadi 35.040 ton dengan demikian terjadi penambahan jumlah sedimen rata-rata tahunannya sebesar 8.926 ton/tahun. Hal ini diduga karena adanya penambahan kontribusi tanah tererosi yang menjadi sedimen dari DAS Wain, yang pada tahun s/d 1997 hasil prediksi total tanah tererosi sebesar 66.954 ton, sedangkan pada tahun 1998 terjadi peningkatan sebesar 68.669 ton. Sebaliknya, pada tahun 1997 volume air yang tertampung pada waduk Wain sebanyak 43.684 m³, kemudian menurun menjadi 38.757 m³ pada tahun 1998. Pengurangan volume air yang tertampung ini tentu disebabkan oleh selain pada waduk terjadi penambahan akumulasi sedimen, juga didukung dengan terjadinya musim kemarau panjang pada tahun 1997/1998 yang mengakibatkan pengurangan input air hujan.

Oleh karena itu, terjadinya peningkatan total sedimen dan pengurangan volume tampungan air pada waduk secara komprehensif diduga disebabkan oleh perluasan lahan yang terbuka atau pengurangan penutupan lahan (*land covering*), hal ini selain diakibatkan oleh kegiatan perambahan hutan dan lahan, juga akibat terjadinya bencana kebakaran hutan dan lahan pada tahun 1997/1998. Secara hidrologik perluasan lahan yang terbuka pada DAS tersebut dapat mempercepat proses terjadinya tanah tererosi bila turun hujan yang relatif deras. Selanjutnya, tanah yang tererosi itu terangkut bersama-sama limpasan air permukaan menjadi material sedimen yang mengalir melalui saluran sungai dan bermuara ke dalam waduk.

Dari hasil analisis beberapa sampel tanah yang mewakili kondisi permukaan lahan DAS Wain menunjukkan bahwa ukuran partikel tanah terbesar yaitu 0,20 mm sangat mendominasi (32,5%) sedangkan ukuran partikel tanah 0,05 mm mendominasi sedimen pada waduk Wain yaitu 28,0%. Ini berarti bahwa nilai persentase berat mendominasi dari komposisi ukuran partikel tanah pada permukaan lahan DAS dibandingkan dengan sedimen pada waduk ternyata berbanding terbalik, yaitu pada permukaan lahan DAS didominasi oleh ukuran partikel besar, sedangkan pada sedimen dari waduk didominasi oleh ukuran partikel kecil.

Selanjutnya dari ukuran fraksi tanah pada permukaan lahan DAS Wain maupun sedimen pada waduk Wain didominasi oleh fraksi tanah pasir yaitu 72,3% dan 74,0%. Hal ini mengindikasikan bahwa permukaan lahan pada DAS Wain yang merupakan asal tanah tererosi, fraksi tanahnya didominasi oleh pasir dengan ukuran

partikelnya relatif besar. Sedangkan sedimen pada waduk yang merupakan hasil kontribusi akumulatif dari tanah tererosi pada permukaan lahan DAS yang terangkut oleh limpasan air permukaan melalui saluran sungai menuju waduk tersebut, fraksi tanahnya juga didominasi oleh pasir namun ukuran partikelnya relatif kecil. Perbedaan ukuran partikel tanah tersebut disebabkan oleh saat larutan sedimen masuk ke dalam waduk, larutan sedimen tersebut tertahan oleh bendungan waduk, sehingga kecepatan limpasan larutan tersebut semakin melambat dan ukuran partikel tanah yang relatif besar akan mudah mengendap terlebih dahulu ke bagian bawah dibandingkan dengan ukuran partikel tanah kecil yang akan menempati pada lapisan yang lebih atas.

Untuk itu dapat disimpulkan bahwa beberapa elemen kondisi biogeofisik DAS Wain seperti curah hujan yang relatif tinggi sepanjang tahun, faktor lereng dan faktor sifat tanahnya yang relatif peka terhadap erosi secara sinergik dapat mempercepat laju limpasan air (*run off*) yang mengakibatkan terjadinya erosi tanah dan dapat menopang terjadinya proses percepatan sedimentasi pada waduk Wain, 2) Luasan lahan hutan primer yang cenderung semakin berkurang, sebaliknya areal -areal semak belukar maupun alang-alang yang semakin meluas serta terjadinya bencana kebakaran hutan dan lahan, dapat mengakibatkan perluasan lahan yang terbuka atau sebaliknya pengurangan luasan penutupan lahan (*land covering*), juga dapat meningkatkan laju limpasan air permukaan (*surface runoff*) maupun tanah tererosi tererosi yang selanjutnya dapat menambah kontribusi sedimen 3) Pada waduk Wain terjadi peningkatan total sedimen dan pengurangan volume tampungan air, yang secara komprehensif diduga disebabkan oleh kontribusi erosi tanah dari DAS Wain yang terangkut bersama-sama limpasan air permukaan menjadi material sedimen yang mengalir melalui saluran sungai dan bermuara ke dalam waduk, dan 4) Pada permukaan lahan DAS Wain yang merupakan asal tanah tererosi, fraksi tanahnya didominasi oleh pasir dengan ukuran partikelnya relatif besar, sedangkan sedimen pada waduk fraksi tanahnya juga didominasi oleh pasir namun ukuran partikelnya relatif kecil.

4.3.2. Aplikasi SIG dan Penginderaan Jauh Untuk Model Hidrologi ANSWERS dalam memprediksi Erosi dan Sedimentasi - Studi Kasus : DTA Cipopokol Sub DAS Cisadane Hulu Kabupaten Bogor)

DAS bagian hulu seringkali menjadi fokus perencanaan pengelolaan DAS, hal ini dikarenakan selain fungsinya yang sangat penting sebagai daerah tangkapan air (*water catchment area*) juga adanya keterkaitan biofisik dengan daerah tengah dan hilir. Segala bentuk kerusakan yang terjadi di daerah hulu tidak hanya akan membawa dampak bagi daerah hulu saja namun akhirnya juga berdampak pada daerah tengah dan terutama daerah hilir.

DAS Cisadane berhulu di Gunung Gede Pangrango dan Gunung Halimun, saat ini kondisi peruntukan lahan di kawasan hulu telah mengalami banyak perubahan akibat pemanfaatan lahan yang kurang sesuai dengan fungsinya. Luas lahan kritis yang telah dipetakan oleh Balai Pengelolaan DAS Citarum-Ciliwung pada tahun 2003 mencapai angka 12.723,20 Ha atau sekitar 8% dari luas keseluruhan DAS Cisadane (156.043 Ha).

Daerah Tangkapan Air Cipopokol merupakan bagian dari DAS Cisadane bagian hulu yang saat ini telah mengalami banyak perubahan tutupan lahan menjadi pemukiman, perkebunan, lahan pertanian dan sebagainya. Perubahan ini tentunya akan membawa pengaruh yang cukup besar bagi kemampuan lahan untuk menangkap air hujan yang jatuh untuk kemudian menyerap dan menyimpannya di dalam tanah (BAPEDA Jawa Barat, 2004).

Prediksi tingkat bahaya erosi akibat perubahan tutupan lahan telah banyak dilakukan melalui pendekatan model hidrologi, diantaranya USLE (*Universal Soil Loss Equation*). Dalam pemodelan hidrologi metode USLE termasuk ke dalam model empiris yang bersifat *lumped*, dimana parameter dan variabel masukan, keluaran dan besaran yang mewakilinya tidak memiliki variabilitas keruangan atau *spatial* (Harto, 1993). Namun sesuai dengan perkembangannya, saat ini model USLE telah dapat diaplikasikan dengan menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG). Model hidrologi lain yang banyak digunakan selain USLE yaitu ANSWERS (*Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation*). Model hidrologi yang diperkenalkan oleh Beasley dan Huggins (1991) kemudian dikembangkan kembali oleh *Environmental Protection Agency* (EPA) di bawah **Purdue Agricultural Experiment Station**. ANSWERS merupakan model simulasi karakteristik DAS

yang biasanya digunakan untuk mengevaluasi kondisi DAS khususnya di daerah pertanian. Keunggulan utama model ini adalah dapat digunakan untuk kegiatan simulasi perencanaan dan mengevaluasi strategi dalam mengendalikan erosi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkombinasikan aplikasi SIG dan Inderaja dengan model hidrologi ANSWERS. Kombinasi dari metode ini diharapkan dapat memprediksi besarnya nilai erosi dan sedimentasi di DTA Cipopokol untuk selanjutnya dapat dipetakan tingkat penyebaran erosi dan sedimentasi. Informasi yang dihasilkan diharapkan dapat menjadi pertimbangan bagi kegiatan rehabilitasi DTA (Daerah Tangkapan Air) Cipopokol Sub DAS Cisadane Hulu.

Penelitian dilaksanakan di Daerah Tangkapan Air Cipopokol yang merupakan bagian dari hulu DAS Cisadane di Kabupaten Bogor. Data yang dikumpulkan digunakan sebagai masukan atau input data untuk model hidrologi ANSWERS.

Simulasi penggunaan lahan dilakukan dengan tujuan untuk menentukan besarnya nilai erosi dan sedimentasi yang dihasilkan pada tutupan lahan yang berbeda.

Hasil interpretasi tutupan lahan daerah penelitian dapat dikelompokkan ke dalam 6 (enam) kelas tutupan lahan yang terdiri dari hutan seluas 8,80 Ha, perkebunan 41,12 Ha, pertanian lahan kering 75,20 Ha, pemukiman 4,48 Ha, sawah 3,84 Ha dan semak belukar 25,76 Ha. Nilai akurasi hasil klasifikasi citra ASTER sebesar 81,82% untuk *overall classification accuracy* dan 72,45% untuk *overall kappa statistic*.

Data curah hujan diperoleh dari hasil pembacaan kertas pias ARR (*Automatic Rainfall Recorder*) tahun 2005 yang telah dikumpulkan. Dari data yang dikumpulkan, terpilih satu data yaitu kejadian hujan pada tanggal 8 Januari 2005 dengan intensitas hujan sebesar 46,70 mm. Berikut ini data curah hujan, tinggi muka air dan debit setiap 30 menit (Tabel 4.23).

Tabel 4.23. Data Curah Hujan Tanggal 8 Januari 2005

Waktu (jam)	Curah hujan (mm)	Tinggi muka Air (m)	Debit (liter/detik)
15.30 - 16.00	0,00	0,18	88,80
16.00 - 16.30	8,00	0,23	188,00
16.30 - 17.00	9,00	0,32	399,00
17.00 - 17.30	9,00	0,34	467,00
17.30 - 18.00	11,00	0,46	1028,00
18.00 - 18.30	9,70	0,51	1345,00
Jumlah	46,70	-	3515,80

Keluaran data yang dihasilkan dari model ini terdiri dari tiga bagian yaitu ringkasan (*summary report*), data spasial dan grafik hydrograph. Hasil output menjelaskan bahwa dari kejadian hujan pada tanggal 8 Januari 2005 dengan intensitas 46,70 mm mampu menghasilkan *run off* sebesar 4041 mm, rata-rata kehilangan tanah 0,398 ton/ha. Kehilangan tanah maksimum adalah sebesar 29,88 ton/ha dan laju pengendapan maksimum yang terjadi adalah 4,624 ton/ha.

Puncak *run off* dihasilkan oleh model sebesar 30471 mm/jam yang terjadi pada menit ke 152. Seiring dengan menurunnya intensitas hujan, maka aliran permukaan berangsur-angsur mulai turun.

Prediksi nilai erosi dan sedimen bertujuan untuk memberikan gambaran secara menyeluruh terhadap erosi tanah yang terjadi, untuk DTA Cipokol yang merupakan bagian hulu dari DAS Cisadane. Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan model hidrologi ANSWERS dapat diketahui bahwa jumlah elemen yang mengalami erosi atau kehilangan tanah sebanyak 852 elemen atau sebesar 136,32 ha dan sisanya sebanyak 103 elemen atau seluas 22,88 ha mengalami sedimentasi atau pengendapan. Hasil prediksi nilai erosi dan sedimentasi pada setiap kelas penutupan lahan dapat dilihat dalam Tabel 4.24.

Tabel 4.24. Prediksi Nilai Erosi Sedimentasi

Kelas tutupan lahan	Kelas Sedimentasi (ton/ha)			Kelas Erosi (ton/ha)				
	0 - 0,5	0,5 - 1	> 1	0 - 0,5	0,5 - 1	1 - 5	5 - 10	> 10
Hutan	0,32	0,00	0,00	1,12	3,68	3,68	0,00	0,00
Perkebunan	0,00	0,00	0,00	4,80	16,8	18,24	0,96	0,32
Pert. Lahan Kering	0,16	0,00	0,16	0,64	24,8	47,36	2,08	0,00
Pemukiman	0,00	0,00	0,00	0,16	0,80	3,52	0,00	0,00
Sawah	2,56	0,00	0,00	1,28	0,00	0,00	0,00	0,00
Semak Belukar	16,8	2,24	0,80	6,08	0,00	0,00	0,00	0,00
	19,84	2,24	0,96	14,08	46,08	72,8	3,04	0,32

Sebagian besar elemen pada kelas penutupan lahan berupa pertanian lahan kering dan perkebunan, hampir seluruhnya mengalami kehilangan tanah yaitu masing-masing sebanyak 468 elemen atau sebesar 74,88 Ha dan 257 elemen atau sebesar 41,12 Ha. Kelas penutupan lahan berupa hutan menghasilkan erosi seluas 8,38 Ha, kelas penutupan lahan berupa sawah menghasilkan erosi seluas 1,28 Ha dan kelas penutupan lahan berupa semak/belukar menghasilkan erosi seluas 6,08 Ha.

Kisaran nilai erosi antara 1-5 ton/Ha merupakan kisaran nilai erosi paling luas di wilayah DTA Cipopokol yaitu sebesar 72,80 Ha, dengan kelas penutupan lahan berupa pertanian lahan kering merupakan penyumbang erosi terbesar yaitu 47,36 Ha. Diikuti dengan kisaran kelas erosi 0,5 – 1 Ton/Ha seluas 46,08 Ha.

Kisaran nilai erosi terbesar yaitu lebih dari 10 Ton/Ha terjadi pada kelas penutupan lahan berupa perkebunan seluas 0,32 Ha yang berarti bahwa hanya dua elemen berada pada nilai kisaran kelas erosi tersebut. Kisaran kelas sedimentasi atau pengendapan yang paling luas terjadi pada 0 – 0,5 Ton/Ha. Berdasarkan kelas penutupan lahannya, sedimen yang paling banyak terjadi adalah kelas penutupan semak/belukar seluas 19,68 Ha.

Kelas penutupan lahan berupa hutan dan semak belukar menghasilkan nilai erosi yang lebih kecil dibandingkan perkebunan dan pertanian lahan kering. Jenis vegetasi hutan yang ditemukan di DTA Cipopokol adalah hutan pinus dengan struktur penutupan tajuk jarang, namun kerapatan tumbuhan bawah yang ada di sekitar hutan

pinus mampu menciptakan suatu stratifikasi tajuk yang berlapis sehingga dapat menurunkan kecepatan terminal air hujan serta memperkecil diameter tetesan air. Tumbuhan bawah merupakan stratum vegetasi terakhir yang menentukan besar kecilnya nilai erosi percikan. Hal yang sama dikemukakan oleh Suwardjo *et al.* dalam Purnama (2005) yang menyatakan bahwa alang-alang yang bercampur semak akan lebih efektif dalam mencegah tanah longsor daripada alang-alang murni. Campuran antara *Albizzia sp* dengan semak belukar akan sama efektifnya dengan alang-alang murni, namun apabila semaknya dibersihkan maka erosi akan meningkat menjadi 114 kali lipat. Sedangkan alang-alang yang dicangkul bersih setiap tahun akan meningkatkan erosi sebesar 84 kali lipat dibandingkan dengan erosi pada alang-alang murni.

Sedimen atau pengendapan yang terjadi sebagai akibat dari proses erosi di Daerah Tangkapan Air Cipopokol, sebagian besar terjadi pada kelas penutupan lahan berupa semak belukar. Keberadaan semak/belukar yang sebagian besar merupakan tumbuhan bawah di sepanjang sungai Cipopokol mampu memberikan perlindungan terhadap erosi dan aliran permukaan, serta mampu menahan pengangkutan tanah yang tererosi untuk masuk ke dalam sungai. Sedimen yang mengendap akibat pengangkutan tanah oleh air memiliki kecenderungan berada tersebar di sepanjang sungai Cipopokol.

Simulasi penggunaan lahan dilakukan dengan melakukan penyusunan luas penggunaan lahan melalui beberapa skenario. Skenario yang disusun berdasarkan pada RTRW (Rencana Tata Ruang Wilayah) Kabupaten Bogor dan berdasarkan UU No.32 tahun 1990 yang mengatur tentang kawasan lindung.

Hasil overlay dengan peta Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Bogor, Daerah Tangkapan Air Cipopokol merupakan kawasan yang diperuntukan bagi budidaya tanaman tahunan atau perkebunan.

Menurut UU No.32 Tahun 1990 dijelaskan mengenai kriteria-kriteria tentang kawasan lindung. Beberapa point yang digunakan sebagai dasar simulasi penggunaan lahan diantaranya kawasan pada keterenggan >40% dan buffer 50 meter untuk sungai dengan lebar kurang dari 30 meter. Simulasi penggunaan lahan berikut nilai sedimen, erosi dan runoff yang dihasilkan dapat dilihat dalam Tabel 4.25.

Hasil simulasi dari skenario 1 (satu) menunjukkan bahwa perubahan penutupan lahan menjadi kawasan perkebunan akan meningkatkan nilai runoff, nilai rata-rata kehilangan tanah dan erosi

maksimum. Penurunan yang cukup signifikan terjadi pada pengendapan maksimum sebesar 1,941 Ton/Ha dibandingkan pada kondisi aktual sebesar 4,624 Ton/Ha. Hal yang sama terjadi pada skenario 3 (tiga) yaitu perubahan penutupan lahan menjadi kawasan budidaya dalam bentuk pertanian lahan kering. Peningkatan terjadi pada parameter rata-rata kehilangan tanah dan laju pengendapan maksimum, sedangkan nilai runoff, laju erosi maksimum mengalami penurunan dibandingkan pada kondisi aktual dan hasil skenario satu.

Tabel 4.25. Simulasi Penggunaan Lahan

Skenario	Tutupan Lahan	Luas	Run off (mm)	Rata-rata hilang tanah (kg/Ha)	Erosi maksimum (kg/Ha)	Pengendapan maksimum (kg/Ha)
Kondisi Aktual	Hutan	8,80				
	Perkebunan	41,12				
	Pertanian lahan kering	75,20				
Skenario 1	Pemukiman	4,48	4014	398	29088	4624
	Sawah	3,84				
	Semak belukar	25,71	4194	432	30503	1941
Skenario 2	Pemukiman	154,72	3864	546	27609	5298
	Sawah	4,48				
Skenario 3	Perkebunan	154,72	3972	383	29088	2017
	Pemukiman	4,48				
Skenario 3	Pertanian Lahah Kering	37,92				
	Pemukiman	30,88				
	Hutan (>40%)	63,84				
	Perkebunan	3,68				
	Pertanian	3,84				
	Hutan (>40%)	19,04				

lahan kering Pemukiman Sawah Semak Belukar						
--	--	--	--	--	--	--

Perbandingan nilai run off antara penutupan lahan berupa perkebunan dan pertanian lahan kering menunjukkan bahwa perkebunan menghasilkan nilai runoff yang lebih besar dibandingkan pertanian lahan kering. Hal ini lebih disebabkan oleh adanya perbedaan nilai parameter-parameter penggunaan lahan. Besar kecilnya nilai runoff dipengaruhi oleh faktor pengelolaan lahan. Penutupan lahan pertanian lahan kering di Daerah Tangkapan Air lebih banyak menerapkan teknik-teknik konservasi tanah diantaranya sistem teras dan guludan, berbeda dengan kelas perkebunan yang kurang menerapkan teknik konservasi (Arsyad, 1989).

Simulasi ketiga dilakukan dengan melakukan revegetasi pada kawasan dengan kelerengan >40% dan sepanjang kanan-kiri sungai. Hasil yang diperoleh menunjukkan penurunan terjadi pada nilai parameter runoff, rata-rata kehilangan tanah, dan laju pengendapan maksimum, namun laju erosi maksimum tidak mengalami perubahan dari kondisi aktual.

Dari hasil simulasi di atas, maka dapat disimpulkan bahwa tindakan revegetasi untuk Daerah Tangkapan Air Cipopokol sangat diperlukan, terutama untuk kawasan yang telah ditetapkan menjadi kawasan perlindungan setempat (lahan pada kelerengan >40% dan kawasan sempadan sungai) yang pada kondisi aktual saat ini telah berubah fungsi menjadi lahan pertanian. Perlindungan terhadap kawasan resapan air dilakukan dengan tujuan untuk memberikan ruang yang cukup bagi peresapan air hujan pada suatu daerah tertentu guna keperluan penyediaan kebutuhan air tanah serta penanggulangan banjir, baik kawasan bawahnya maupun kawasan yang bersangkutan.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kawasan budidaya berupa pertanian lahan kering dan perkebunan menghasilkan nilai rata-rata kehilangan tanah yang cukup tinggi dibandingkan pada kondisi aktual. Hasil indeks sensitifitas terhadap parameter tanah maupun penggunaan/penutupan lahan diperoleh bahwa parameter FC atau laju infiltrasi merupakan parameter yang memiliki tingkat sensitifitas tertinggi, sehingga dalam hal ini pengolahan atau

pemadatan tanah yang dilakukan akan meningkatkan rata-rata kehilangan tanah, sehingga perlu adanya upaya teknik konservasi yang dapat meningkatkan laju infiltrasi. Teknik konservasi yang sangat efektif diterapkan adalah tanaman penutup tanah atau *cover crop*, khususnya pada kawasan perkebunan dan pemberian mulsa atau bahan organik pada kawasan pertanian lahan kering. Penggunaan tanaman penutup tanah (*cover crop*) akan sangat berperan dalam melindungi tanah dari ancaman kerusakan oleh erosi. Hal ini akan menyebabkan berkurangnya dispersi air hujan dan mengurangi jumlah serta kecepatan aliran permukaan sehingga mampu mengurangi erosi dan memperbesar infiltrasi ke dalam tanah. Bahan organik dan mulsa akan berperan dalam peningkatan ketahanan struktur tanah, memperbesar kemampuan tanah untuk menyerap dan menahan air hujan serta mampu menambah unsur hara.

4.3.3. Pengaruh Perubahan Tutupan Lahan Terhadap Sedimen dan Produksi Air Daerah Aliran Sungai

Perubahan tutupan lahan terutama berupa kerusakan hutan di sub daerah aliran sungai yang ada disekitar waduk Jatiluhur (sub DAS Cikao, Ciherang dan Cilalawi) berpengaruh negatif ditinjau dari besarnya aliran permukaan dan sedimen yang terjadi serta produksi air DAS.

Penelitian ini bertujuan untuk menyusun rekomendasi jenis penggunaan lahan yang proporsional berdasarkan kondisi fisik daerah aliran sungai dan analisa dari pemodelan penduga persamaan sedimen yang diperoleh pada sub DAS Cikao, Ciherang dan Cilalawi.

Model yang digunakan dalam penelitian ini adalah model AGNPS (*Agricultural Non Point Source Pollution*) yang dapat memprediksi aliran permukaan dan sedimen di suatu DAS. Model ini juga dapat merekonstruksi hubungan penggunaan lahan, sifat fisik DAS dengan aliran permukaan, sedimentasi dan produksi air.

Metode penelitian ini terdiri dari 3 (tiga) tahap, tahap pertama adalah diawali dengan pengkajian tutupan lahan runtu waktu, dianalisis untuk diklasifikasikan jenis penggunaannya. Tahap kedua melakukan pengukuran langsung sedimen sungai dengan cara pengambilan contoh sedimen pada beberapa daerah tangkapan. Tahap ketiga mengkaji dampak dari *trend* perubahan penggunaan lahan terhadap karakteristik: debit dan sedimen sungai. Analisis dan

uji kebenaran hasil klasifikasi ini divalidasi dengan pengecekan langsung ke lapangan.

Tanah dilokasi penellitian didominasi oleh tanah-tanah yang berkembang dari bahan volkan dan endapan yaitu Latosol (Hapludults, Dystrudepts), Andosol (Hapludands) dan Kambisol (Dystrudepts dan Eutrudepts). Pada jalur aliran dan dataran aluvial, didominasi oleh tanah-tanah Gleisol (Endoaquepts).

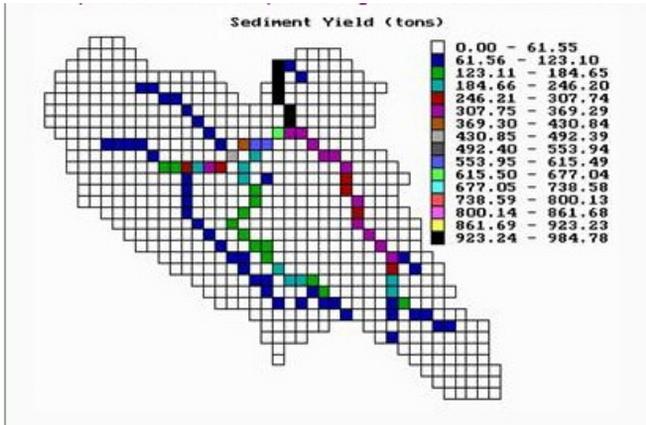
Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan lahan di sub DAS Cilalawi, Cikao dan Ciherang pada tahun 1992 berbeda dengan penggunaan lahan tahun 2002, dimana pemukiman secara keseluruhan semakin bertambah luas, kerusakan hutan semakin meluas, akan tetapi kebun karet, jati dan tegalan meningkat, dan penggunaan sawah yang menurun.

Hasil prediksi aliran permukaan dengan model AGNPS adalah sebagai berikut :

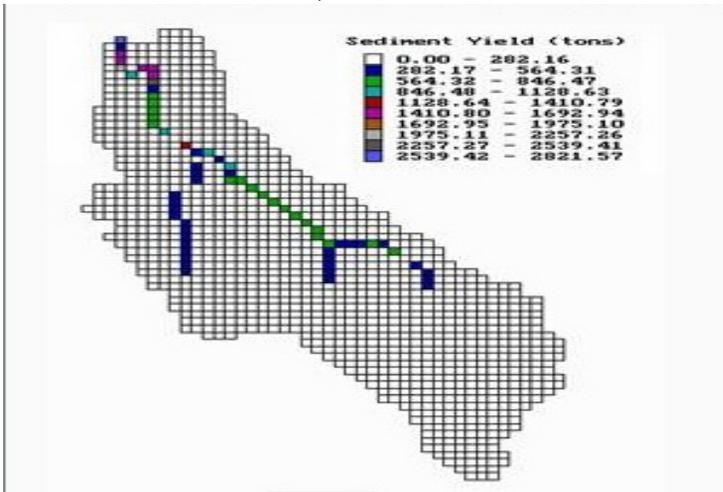
- di sub DAS Cilalawi (kondisi tutupan lahan tahun 1992 dan 2002) dengan curah hujan 14,48 cm dan EI30 171 : aliran permukaan yang terjadi pada tahun 1992 sebesar 2,54 cm dengan *peak runoff rate* 64,38 m³/detik dan pada tahun 2002 sebesar 2,79 cm dengan *peak runoff rate* 67,95 m³/detik
- di sub DAS Cikao (kondisi tutupan lahan tahun 1992 dan 2002) dengan curah hujan 7,37 cm dan EI30 69 : aliran permukaan tidak menunjukkan perbedaan yaitu sebesar 0,25 cm. Tetapi *peak runoff rate* menunjukkan perbedaan, pada tahun 1992 sebesar 10,02 m³/detik dan pada tahun 2002 sebesar 8,07 m³/detik.
- di sub DAS Ciherang (kondisi tutupan lahan tahun 1992 dan 2002) dengan curah hujan 7,11 cm dan EI30 39 : aliran permukaan tidak menunjukkan perbedaan, sebesar 0,25 cm. *Peak runoff rate* menunjukkan perbedaan, pada tahun 1992 sebesar 5,24 m³/detik dan pada tahun 2002 sebesar 4,75 m³/detik (curah hujan 7,11 cm dan EI30 39).

Hasil prediksi sedimen dengan model AGNPS adalah sebagai berikut :

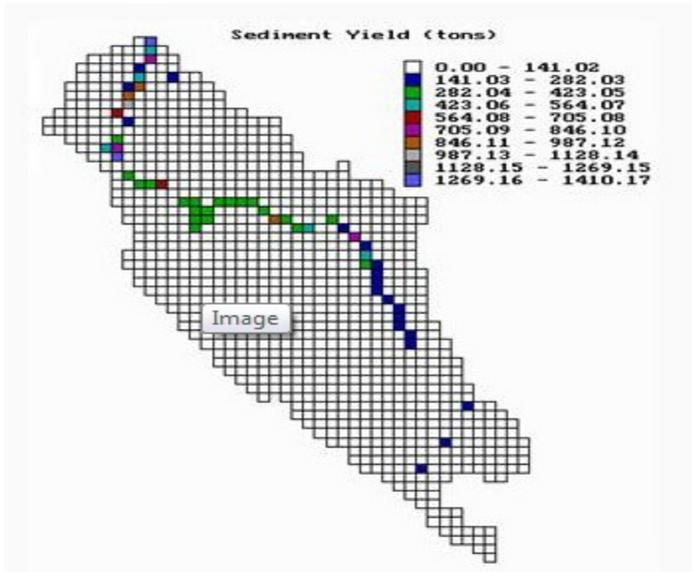
- di sub DAS Cilalawi (kondisi tutupan lahan tahun 1992 dan 2002) dengan curah hujan 14,48 cm dan EI30 171 : sedimen yang terjadi pada tahun 1992 sebesar 12508,10 ton dan pada tahun 2002 sebesar 14504,30 ton.



- di sub DAS Cikao (kondisi tutupan lahan tahun 1992 dan 2002) dengan curah hujan 7,37 cm dan EI30 69 : sedimen yang terjadi pada tahun 1992 sebesar 1850,90 ton dan pada tahun 2002 sebesar 2821,60 ton.



- di sub DAS Ciherang (kondisi tutupan lahan tahun 1992 dan 2002) dengan curah hujan 7,11 cm dan EI30 39 : sedimen yang terjadi pada tahun 1992 sebesar 1804,10 dan pada tahun 2002 sebesar 1410,20 ton



Simulasi model AGNPS dengan meningkatkan luas hutan seluas 5% dan 10% dari luas sub DAS Cilalawi, Cikao dan Ciherang, dapat menurunkan aliran permukaan, *peak runoff rate*, erosi permukaan dan sedimen.

Peningkatan luas hutan 5 persen di sub DAS Cilalawi dapat menurunkan aliran permukaan sebesar 8,96 persen, menurunkan erosi permukaan 81,32 persen yaitu dari 393,33 ton/ha menjadi 73,46 ton/ha dan menurunkan sedimen 25,78 persen yaitu dari 14504,30 ton/ha menjadi 10765,40 ton/ha. Selanjutnya, peningkatan luas hutan sebesar 10 persen, aliran permukaan menurun sebesar 8,96 persen, erosi permukaan menurun 86,82 persen yaitu dari 393,33 ton/ha menjadi 51,84 ton/ha, sedimen menurun 40,47 persen yaitu dari 14504,30 ton/ha menjadi 8634,00 ton/ha.

Peningkatan luas hutan sebesar 5 persen di sub DAS Cikao, dapat menurunkan erosi permukaan sebesar 76,62 persen yaitu dari 227,77 ton/ha menjadi 62,37 ton/ha dan menurunkan sedimen 2,69 persen, tetapi aliran permukaan tidak menurun (0,25 cm). Peningkatan luas hutan 10 persen dapat menurunkan erosi permukaan sebesar 80,85 persen yaitu dari 227,77 ton/ha menjadi 43,61 ton/ha dan menurunkan sedimen sebesar 5,72 persen, tetapi aliran permukaan tetap tidak menurun (0,25 cm).

Peningkatan luas hutan sebesar 5 persen di sub DAS Ciherang dapat menurunkan erosi permukaan sebesar 62,75 persen yaitu dari 162,91 ton/ha menjadi 60,69 ton/ha dan menurunkan sedimen

sebesar 2,21 persen, tetapi aliran permukaan tidak menurun (0,25 cm). Peningkatan luas hutan sebesar 10 persen dapat menurunkan erosi permukaan sebesar 75 persen yaitu dari 162.91 ton/ha menjadi 40.15 ton/ha dan menurunkan sedimen sedikit sebesar 4,55 persen, tetapi aliran permukaan tetap tidak menurun (0,25 cm).



DAFTAR PUSTAKA

- Afandi, Manik, T.K., Rosadi, B., Utomo, M., Senge, M., Adachi, T. and Oki, Y. 2002. Soil Erosion under Coffee Trees with Different Weed Management in Humid Tropical Hilly Area of Lampung, South Sumatera, Indonesia. *J. Jpn. Soc. Soil Phys.* No. 91:3-14.
- Agus, F., Gintings, A.N. dan M. Van Noordwijk. 2002. Pilihan Teknologi Agroforestri/Konservasi Tanah Untuk Areal Pertanian Berbasis Kopi di Sumberjaya, Lampung Barat. International Center for Research in Agroforestry (ICRAF). Bogor, Indonesia. 60 p.
- Anonymos. 2007. Indonesia Masuk Rekor Dunia, Tercatat sebagai penghancur hutan tercepat di dunia. *Harian KOMPAS*, 4 Mei 2007.
- Anonim. 2001. Kondisi Lingkungan Kian Rapuh. *Harian Kompas* tgl. 2/11/2001. Jakarta.
- Arsyad, S. 2010. *Konservasi Tanah dan Air*. Penerbit IPB. Bogor.
- Asdak, C. 2002. *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Auerswald, K. 1992. Predicted and Measured Sediment loads of Large Watersheds in Bavaria. 5th International Symposium on River Sedimentation, Karlsruhe, 1031 - 1036.
- Banuwa, I. S. 2008. Pengembangan Alternatif Usaha tani Berbasis Kopi Untuk Pembangunan Pertanian Lahan Kering Berkelanjutan Di DAS Sekampung Hulu. [Disertasi]. Bogor : Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- [Bappeda] Badan Perencana Daerah Banyumas. 1998. Project Plan : Rehabilitasi lahan dan konservasi tanah (RLKT) Kabupaten Banyumas. Proyek Penyusunan Project Plan RLKT Kabupaten Banyumas Tahun Anggaran 1998/1999, Purwokerto.

- [Baplan] Badan Planologi Departemen Kehutanan RI. 2003. <http://www.walhi.or.id/kampanye/hutan>.
- Baver, L.D. 1972. Soil Physics. John Wiley and Son Inc. New York. Charles E. Tuttle Company. Modern Asia Edition. Third Edition.
- Beasley, D.B. dan L.F. Huggins. 1982. ANSWERS. User's Manual. U.S. EPA Region V. Chicago.
- Browning, G.M. 1979. Development for and of the universal soil loss equation. SSSA Special Publication Number 8. universal Soil Loss Equation : past, present and future. SSS of America
- Calder, I.R. 1998. Water Resources and Land Use Issues. System Wide Initiative on Water Management, Paper No.3, IWMI, Colombo, Sri Lanka.
- Chow, V.T. 1964. Handbook of Applied Hydrology. Mc. Graw-Hill Book Company. New York.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York.
- Cunningham, R.K. 1963. The Effect of Clearing a Tropical Forest Soil. J. Soil Sci. 14 : 334-345.
- Dariah A.I. 2004. Tingkat Erosi dan Kualitas Tanah pada Lahan Usahatani Berbasis Kopi di Sumber Jaya Lampung Barat [Disertasi]. Bogor: Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Deutsch, G. W. and L. A. Busby. 2000. Community-Basid Water Quality Monitoring: fraom Data Collection to Sustainable Management of Water Resources. Land and Water Development Division FAO Rome, Rome.
- Douglas, I. 1978. The impact of urban of fluvial geomorphology in the humid tropic, Geo. Eco. Trop. 2.
- [Ditjen Perkebunan]. Direktorat Jendral Perkebunan. 2000. Statistik Perkebunan Indonesia 1998-2000. Kopi (Coffee) Departemen Kehutanan dan Perkebunan. Direktorat Jenderal Perkebunan. Jakarta. 2000.
- [Ditjen RLPS] Direktorat Jenderal Rehabilitasi Lahan Perhutanan Sosial. 2003. Peta Jenis Tanah. Departemen Kehutanan.

- [Ditjen RRL] Direktorat Jenderal Reboisasi dan Rehabilitasi Lahan Departemen Kehutanan. 1999. Luas Lahan Kritis di Indonesia dan Statistik Dalam Angka. Ditjen RRL Departemen Kehutanan. Dephut. Jakarta
- [Ditjen SDA] Direktorat Jenderal Sumberdaya Air Departemen Pertanian. 2004. Sebanyak 65 DAS Dalam Kondisi Semakin Kritis. Harian Kompas tanggal 20 Agustus 2004. hal 15. Jakarta.
- Dunne, T dan L.B. Leopold. 1978. Water in Environmental Planning. W.H. Freeman and Company, San Fransisco.
- [ECI] Engineering Consultants International. 1994. Segara Anakan Conservation and Development Project – Indonesia. Draft Final Report. TA No. 1624 –INO (Unpublished).
- Ekadinata, A. 2001. Deteksi Perubahan Lahan dengan Citra Satelit Multisensor di Sumberjaya, Lampung. Skripsi. Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Forest Watch Indonesia. 2001. Potret Kehutanan Indonesia. Forest Watch Indonesia, Bogor.
- Frevert, R.K, G.O. Schwab, T.W. Edminster, and K.K. Barness. 1963. Soil and Water Conservation Engineering (Third Edition) John Wiley and Son Inc. New York.
- [FWI/GFW] Forest Watch Indonesia-Global Forest Watch . 2001. *Potret Keadaan Hutan Indonesia*. Bogor, Indonesia: ISBN : 979-96730-0-3. Forest Watch Indonesia dan Washington D.C. Global Forest Watch.
- Goldman, S.J., K. Jackson dan T.A. Bursztynzky. 1986. Erosion and Sediment Control Handbook. McGraw-Hill Book Company.
- Gordon, N.D., T.A. McMahon and B.L. Finlayson. 1992. Stream Hydrology : and introduction for ecologists. Jhon Wiley & Sons. Chichester. 526 hal.
- Hadisepoetro, S. 1999. Permasalahan tanaman Kopi di Kawasan Hutan Lindung, Taman Hutan Raya, dan Taman Nasional di Propinsi Lampung; serta alternatif pemecahannya. Warta Pusat Penelitian Kopi dan Kakao, 15 (1): 22-27. Pusat Penelitian Kopi dan kakao, Jember.

- Haeruman, H. 1996. Upaya Pengentasan Kemiskinan di DAS Kritis. Prosiding Kongres ke II dan Seminar Nasional Masyarakat Konservasi Tanah dan Air Indonesia. Yogyakarta.
- Hairiah, K., Suprayogo, D., Widiyanto, Berlian, Suhara, E., Mardiasuning, A., Widodo, H. R., Prayogo, C. dan Rahayu, S. 2004. Alih Guna Lahan Hutan Menjadi Lahan Agroforestri Berbasis Kopi: ketebalan seresah, populasi cacing tanah dan makroporositas tanah. *Agrivita* 26 (1):75-88.
- Hammer, W.I. 1981. Second Soil Conservation Consultant Report. Agof/Ins/78/606 note. No.10. Center for Soil Research, Bogor.
- Harto, S. 1993. Analisis Hidrologi. PT Gramedia, Jakarta.
- Hartobudoyo, D. 1979. Pemangkasan kopi. Balai Penelitian Perkebunan, Sub Balai Penelitian Budidaya, Jember.
- Hudson, N.W. 1976. Soil Conservation. Batsford Ltd. London
- Hudson, N. 1992. Soil Conservation. BT Batsford Limited. London.
- Ilyas, M.A. 2000. Dampak Perubahan Lahan terhadap Banjir, Erosi dan Sedimentasi pada Studi Kasus Bandung Utara.
- Julien, P.Y. 1995. Erosion and Sedimentation. Cambridge University Press. N.Y.
- Khan, A.A.H. 1998. Design, calibration, use and production of a simple, robust, low cost pipe samples for measuring soil and water loss in catcment. Consultant's Report, ICRAF (unpublished).
- Lal, R. 1986. Deforestation and Soil Erosion. In R. Lal, P.A. Sanchez, R.W. Cummings, JR (Ed.) Land Clearing and Development in The Tropics. A.A. Balkemal, Rotterdam, Boston. p. 299-316
- Lal, R. 1994. Soil Erosion by Wind and Water : Problem and Prospects. In Lal, (Ed). Soil Erosion Research Methods. Soil and Water Conservation Society. Florida. p 1-10
- Lamb, D. 1994. Reforestation of Degraded Tropical Forest Lands in the Asia-Pasific Region. *Journal of Tropical Forest Science* 7(1):1-7
- Linsley, Jr. R.K, M.A. Kohler and J.L.H. Paulus. 1983. Hydrology for Engineers (Third Edition) Mc. Graw-Hill Book Company. New York.

- Marwah, S. 2008. Optimalisasi Pengelolaan Sistem Agroforestry untuk Pembangunan Pertanian Berkelanjutan Di DAS Konawehea, Sulawesi Tenggara. [Disertasi]. Bogor : Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Monde, A. 2008. Dinamika Kualitas Tanah, Erosi dan Pendapatan Petani akibat alih Guna Lahan Hutan Menjadi Lahan Pertanian Kakao/Agroforestry Kakao Di DAS Nopu, Sulawesi Tengah [Disertasi]. Bogor : Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Morgan, R. C. 1986. Soil Erosion and Conservation. In D. A. Davidson (Ed.). Longman Scientific and Technical. Copublished in The United States with John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Nastain dan Santoso, P.B. 2003. Pengaruh Alih Fungsi Lahan kawasan Baturraden Terhadap Debit Air Sungai Banjaran. Jurnal Ilmiah Unsoed, Purwokerto.
- Nedeco-PBJR. 1973. Masterplan of Jakarta Urban Drainage System 1965-1985. Project Report by Nedeco and Proyek Banjir Jakarta Raya.
- Oldeman, L.R. 1992. The Global Extent of Soil Degradation. In Greenland, D.J. and Szabolcs, I. (Ed). Soil Resilience and Sustainable Land Use. CAB International. 561 pp.
- Pawitan, H. 1999. Penilaian kerentanan dan daya adaptasi sumber daya air terhadap perubahan iklim. Makalah Lokakarya Nasional – Kantor Menteri Negara Lingkungan Hidup, Jakarta, Februari 1999.
- Pawitan, H. 2002. Present situation of water resources and water related disasters and the role of agro-environmental education in Indonesia. Presented at the Tsukuba Asian Seminar on Agricultural Education, Tsukuba, Japan, November 6-12.
- Pujianto, Wibawa, A., dan Winaryo. 2001. Pengaruh teras dan tanaman penguat teras terhadap erosi dan produktivitas kopi arabika. Pelita Perkebunan Vol 17(1):18-29. Pusat Penelitian Kopi dan Kakao Indonesia. Asosiasi Peneliti Perkebunan Indonesia.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Pengairan. 1995. Penelitian Aliran Banjir Daerah Genangan Bandung Selatan. Pusat

Penelitian dan Pengembangan Pengairan-Badan Penelitian dan Pengembangan Pengairan.

- Rachman, S. 1992. Infiltration under Different Land use Types at the Upper Ciliwung Watershed of West Java, INDONESIA. M.Sc. Thesis. University of Canberra, Australia.
- Rodriguez-Iturbe, I., dan Rinaldo. A. 1997. Fractal river basins. Chance and self-organization. Cambridge Univesity Press. 547p.
- Roose, E.J. 1986. Runoff and erosion before and after clearing depending on the type of crop 'in Western Africa. p. 317-330. In R. Lal, P.A. Sanchez, R.W. Cummings, JR (Edv.) Land Clearing and Development in The Tropics, AA. Balkema/Roterdam/Boston
- Sanchez, P.A. 1976. Properties and Management of Soils in the Tropics. John Wiley and Sons. New York, p.96-134.
- Setiawan, Indra, B. 1999. Land Use Planning For Cigulung Maribaya Sub Watershed Using ANSWERS Model. Proceeding of International Workshop on Sustainable Resource Management for Cidanau Watershed. RUBRD-UT/IPB. Bogor.
- Seyhan, E. 1990. Dasar-dasar Hidrologi. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Sinukaban, N., H. Pasaribu, dan O. Siagian. 2001. Pengelolaan Danau Toba : Peluang dan Ancaman Dalam Kebijakan Konservasi Tanah dan Air Dalam Mendukung Pelaksanaan Otonomi Daerah. Prosiding Kongres IV dan Seminar Nasional MKTI tanggal 25 - 27 Mei 2000, Medan.
- Sinukaban, N. 2004. Pengelolaan DAS. Materi Kuliah Pengelolaan DAS. IPB. Bogor.
- Sinukaban, N. 2008. Analisis dan Strategi Pencegahan Banjir. Harian Suara Pembaharuan, tanggal 12/02/2008.
- Sugandhy, A. 1999. Penataan Ruang dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup. PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta
- Suhara, E. 2003. Hubungan Populasi Cacing Tanah dengan Porositas Tanah pada Sistem Agroforestri berbasis Kopi. Skripsi. Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya, Malang.

- Suhardjono. 1993. *135 Pertanyaan dan Jawaban tentang Pengantar Penelitian Ilmiah*. UPT Penerbitan FT Universitas Brawijaya. Malang.
- Sunarti. 2009. Perencanaan Usahatani Karet dan Kelapa Sawit Berkelanjutan di DAS Batang Pelepat Kabupaten Bungo Provinsi Jambi. [Disertasi]. Bogor : Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Suprayogo, D., Widiyanto, Purnomosidi, P. Widodo, R.H., Rusiana, F., Aini, Z. Z., Khasanah, N. dan Kusuma, Z. 2004. Degradasi sifat fisik tanah sebagai akibat alih guna lahan hutan menjadi sistem kopi monokultur: kajian perubahan makro porositas tanah. *Agrivita* 26 (1):60-68.
- Supriadi, D. 2000. Uplands Management: Cases of Cimanuk and Cisanggarung River Basin, makalah pada Linggarjati Environmental Meeting, 9-13 November 2000.
- Sutono, S., Kusnadi, H., dan Djunaedi, M.S. 2001. Pendugaan erosi pada lahan sawah dan lahan kering sub DAS Citarik dan DAS Kaligarang. hlm. 79-92 *dalam* Prosiding Seminar Nasional Multifungsi Lahan Sawah. Bogor, 1 Mei 2001. Departemen Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, bekerjasama dengan MAAF Jepang dan Sekretariat ASEAN.
- Tarigan, S.D. dan Sinukaban, N. 2001. Peran sawah sebagai filter sedimen, studi kasus di DAS Way Besai, Lampung. hlm. 29-37 dalam Prosiding Seminar Nasional Multifungsi Lahan Sawah. Bogor, 1 Mei 2001. ASEAN Secretariat - MAFF Japan - Puslitbang Tanah dan Agroklimat.
- The World Bank. 1990. *Indonesia: Sustainable Development of Forest, Land and Water. A World Bank Country Report*. Washington.
- Thompson, L.M. 1957. *Soils and Soil Fertility*, Mc. Graw-Hill Book Company. New York.
- Utomo, Wani Hadi.1989. *Konservasi Tanah di Indonesia: Suatu Rekaman dan Analisa*. Universitas Brawijaya. Malang.
- Van Noordwijk, M., Farida, A., Verbist, B. dan Tomich, T. 2003. *Agroforestry and Watershed Functions of Tropical Land Use Mosaics*. In *Proceeding 2nd Asia Pacific Training Workshop on Ecohydrology*. Cibinong, July 21-26 July, 2003.

- Van Noordwijk, M., Richey, J dan Thomas, D. 2003. Landscape and (Sub) Catchment Scale Modeling of Effect of Forest Conversion on Watershed Functions and Biodiversity in SouthEast Asia. Functional Value of Biodiversity – Phase II Report. ICRAF, Bogor.
- Vanoni, V.A. 1977. Sedimentation Engineering. American Society of Civil Engineers. New York.
- Wahyunto., M. Z. Abidin., Priyono, A dan Sunaryo. 2001. Studi perubahan penggunaan lahan di Sub DAS Citarik, Jawa Barat dan DAS Kaligarang, Jawa Tengah. hlm. 39 - 63 dalam Prosiding Seminar Nasional Multifungsi Lahan Sawah. Bogor, 1 Mei 2001. Departemen Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Wanielista, M.P. 1990. Hydrology and Water Quality Control. John Wiley & Sons, Florida - USA.
- Weischmeier, W.H dan D.D. Smith. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountain. Agric. Handb. No. 282, USDA. US Government Printing Office, Washington, DC.
- Weischmeier, W.H. 1977. Use and misuse of the universal soil loss equation. p 371- 378. In Soil erosion prediction and control, Spec. Pub. No. 21. Soil Conservation Soc. Am. Ankeny, IOWA.
- Weischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. Agricultural Handbook. Science and Education. U.S. Department of Agriculture.
- Widianto, Noveras, H., Supratogo, D., Purnomosidhi, P. dan Van Noordwijk, M. 2004. Konversi hutan menjadi lahan pertanian: Apakah fungsi hidrologis hutan dapat digantikan agroforestri berbasis kopi. Agrivita 26 (1): 47- 52.
- William, JR. 1977. Sediment delivery ratio determined with universal equation using run off energy factor. P. 168 – 179. Proc. Of Paris Symp., erosion and solid matter transport in inland water. July 1977. Assoc. of Hydrology Science –Assoc. Int. des Science Hydrologiques Pub No. 122.

