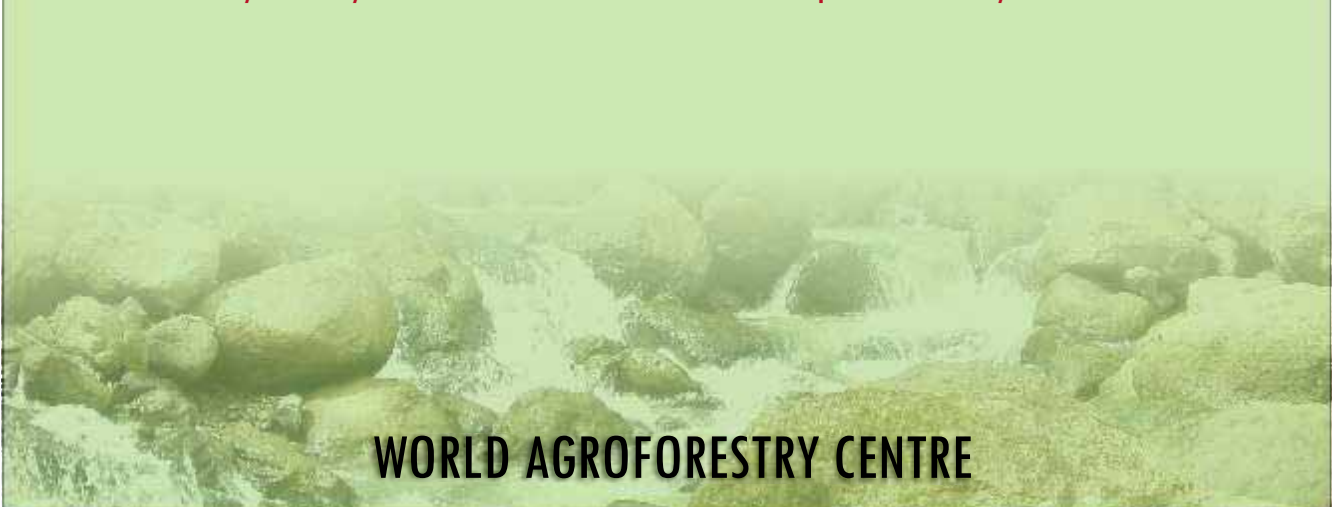




MONITORING AIR DI DAERAH ALIRAN SUNGAI

Subekti Rahayu Rudy Harto Widodo Meine van Noordwijk Indra Suryadi Bruno Verbist



WORLD AGROFORESTRY CENTRE

MONITORING AIR DI DAERAH ALIRAN SUNGAI

Subekti Rahayu, Rudy Harto Widodo, Meine van Noordwijk, Indra Suryadi dan Bruno Verbist



Sitasi:

Rahayu S, Widodo RH, van Noordwijk M, Suryadi I dan Verbist B. 2009. Monitoring air di daerah aliran sungai. Bogor, Indonesia. World Agroforestry Centre - Southeast Asia Regional Office. 104 p.

ISBN:

979-3198-45-3

“Mengutip sebagian isi buku ini diperbolehkan, dengan menyebutkan sumber dan penerbitnya”

2009

World Agroforestry Centre
ICRAF Asia Tenggara
Jl. CIFOR, Situ Gede, Sindang Barang,
Bogor 16115
PO Box 161, Bogor 16001
Indonesia
Tel: +62 251 8625415
Fax: +62 251 8625416
Email: icraf-indonesia@cgiar.org
www.worldagroforestry.org/sea

Foto cover:

Maria Arweström (atas) dan Andy Dedecker & Ans Mouton (bawah)

Disain dan tata letak:

Tikah Atikah, ICRAF SEA

KATA PENGANTAR 1

UCAPAN TERIMA KASIH 5

I. MEMAHAMI LANSKAP DAERAH ALIRAN SUNGAI 7

1. Apa yang perlu diperhatikan dalam menilai lanskap Daerah Aliran Sungai? 7
 - 1.1. Terrain dan Geomorfologi 8
 - 1.2. Pola pengaliran air dan penyimpanan air 9
 - 1.3. Tanda ketidakstabilan lereng 18
 - 1.4. Indikasi erosi dan sedimentasi 20

II. PENGUKURAN PARAMETER HIDROLOGI 25

- 2.1. Debit sungai 25
 - 2.1.1. Persiapan pengukuran debit 25
 - 2.1.2. Pelaksanaan pengukuran debit 26
 - 2.1.3. Monitoring debit 30
- 2.2. Menetapkan muatan sedimen di sungai 31
 - 2.2.1. Pengambilan contoh sedimen melayang 32
 - 2.2.2. Penetapan konsentrasi sedimen 34

III. PEMANTAUAN KUALITAS AIR SUNGAI SECARA FISIK-KIMIA 37

- 3.1. Pendahuluan 37
- 3.2. Pengertian kualitas air 37
- 3.3. Pemantauan kualitas air secara fisik 38
 - 3.3.1. Karakteristik peubah-peubah fisik 38
 - 3.3.2. Prosedur pengukuran 39
- 3.4. Pemantauan kualitas air secara kimia 41
 - 3.4.1. Karakteristik peubah-peubah kimia 42
 - 3.4.2. Prosedur pengukuran 45

IV. PEMANTAUAN KUALITAS AIR SUNGAI SECARA BIOLOGI DENGAN MAKROINVERTEBRATA 49

- 4.1. Pengertian pemantauan secara biologi (biomonitoring) 49
- 4.2. Mengapa Menggunakan Makroinvertebrata? 50

- 4.3. Prosedur Pengambilan Contoh 51
 - 4.3.1. Persiapan pengambilan contoh 51
 - 4.3.2. Pengambilan contoh 53
 - 4.3.3. Pemisahan dan identifikasi contoh 57
- 4.4. Analisa data dan pendugaan kualitas air 59
 - 4.4.1. BISEL Biotik Indeks (BBI) 59
 - 4.4.2. Famili Biotik Indeks (FBI) 60

V. INDIKATOR KUANTITATIF FUNGSI DAS 67

- 5.1. Mengapa indikator fungsi DAS diperlukan? 67
- 5.2. Fungsi Transmisi 70
 - 5.2.1. Neraca air pada tingkat plot 70
- 5.3. Fungsi Penyangga 74
- 5.4. Fungsi pelepasan air secara bertahap 80
- 5.5. Fungsi mempertahankan kualitas air 81
- 5.6. Fungsi mempertahankan kondisi tanah yang baik 82
 - 5.6.1. Pengukuran 85
 - 5.6.2. Pemodelan degradasi fisik dan proses rehabilitasi 86
- Prinsip dasar dalam pemulihan tanah terdegradasi: temuan baru 88
- 5.7. Indikator-indikator kuantitatif bagi fungsi hidrologi DAS 89
- 5.8. Pembahasan 90

PUSTAKA 93

KATA PENGANTAR

Indonesia memiliki jutaan hektar lahan kritis dan daerah aliran sungai (DAS) yang terdegradasi, sehingga perlu dilakukan upaya perbaikan. Salah satu cara untuk memperbaiki DAS terdegradasi adalah melalui kampanye penanaman pohon. Selain itu, diperlukan pula upaya untuk memperbaiki kebijakan yang berkaitan dengan tata guna dan pengelolaan lahan kritis dan DAS.

Berbagai surat kabar dan Lembaga Swadaya Masyarakat (LSM) pemerhati lingkungan selalu menyoroti masalah kerusakan hutan dan penebangan liar setiap kali terjadi bencana banjir dan tanah longsor. Hilangnya hutan dianggap sebagai satu-satunya penyebab hilangnya fungsi hidrologi DAS dan masyarakat yang tinggal di pegunungan seringkali dianggap sebagai penyebab rusaknya lingkungan. Padahal, jika kita amati lebih seksama, banyak daerah di Indonesia dan Asia Tenggara yang memiliki keindahan alam luar biasa namun tetap memiliki fungsi DAS yang baik meskipun tidak lagi mempunyai hutan alam yang luas. Terpeliharanya kondisi DAS terjadi karena aliran sungai dikelola dengan baik, apalagi didukung oleh insititusi sosial yang menjaga keseimbangan antara kepentingan umum maupun individu. Masyarakat telah menyadari bahwa dengan menanam pohon-pohon bernilai ekonomi di sela-sela sistem pertanian berarti mereka telah mempertahankan DAS karena pepohonan mampu menjaga kestabilan lereng perbukitan dan menahan hilangnya tanah akibat erosi dan aliran air.

Berhasil tidaknya masyarakat dalam mengelola lanskap suatu DAS dipengaruhi oleh faktor-faktor berikut yang saling berinteraksi:

- * jumlah penduduk (beserta ternak) dan bagaimana mereka saling berinteraksi, termasuk interaksinya dengan pemerintah daerah. Sebagai contoh, apakah mereka mempunyai aturan adat dan apakah aturan adat tersebut masih mereka terapkan dalam kehidupan sehari-hari
- * sistem penggunaan lahan atau jenis tutupan lahan dapat berbentuk hutan alam, hutan bekas tebangan, tanaman pangan, pohon bernilai ekonomis, padang rumput dan pematang yang ditanami makanan ternak, jalan dan jalan setapak serta perumahan



- * kondisi tanah, seperti tingkat kepadatan tanah, tingkat penutupan tanah oleh lapisan seresah, organisme tanah dan perakaran tumbuhan yang berperan dalam menjaga struktur tanah dari pemadatan
- * topografi lahan dan geologi tanah yang berkaitan dengan kecuraman lereng, bukti adanya pergerakan tanah, sejarah geologi, gempa bumi dan gunung meletus, keseimbangan antara pembentukan tanah dan erosi
- * iklim dan cuaca yang berkaitan dengan curah hujan dan pola musim, siklus harian cahaya matahari dan intensitas hujan (hujan lebat, gerimis), pola aliran sungai yang mengikuti pola bebatuan dan perbukitan, ada tidaknya 'meandering' (pembentukan kelokan sungai) yang menyebabkan sedimentasi tanah yang mungkin berasal dari erosi dan tanah longsor, yang dianggap merusak di masa lalu, namun akhirnya menjadi lahan yang subur.

Dalam memecahkan masalah pengelolaan lanskap harus ada kerja sama secara terpadu antar berbagai disiplin ilmu seperti sosial politik, konservasi, kehutanan, perencanaan wilayah, tanah, geografi, geologi, hidrologi. Masing-masing disiplin ilmu ini harus saling mengisi dan tidak dapat berdiri sendiri. Kerjasama yang terpadu sangat diperlukan untuk memahami kelebihan masing-masing disiplin ilmu, serta memahami pengetahuan dan persepsi masyarakat dan pengambil kebijakan dalam memandang dan menyikapi permasalahan dalam pengelolaan lanskap. Untuk itu komunikasi yang terbuka antar pemangku kepentingan (peneliti/ilmuwan, masyarakat dan pemerintah/pembuat kebijakan) perlu dijaga dan ditingkatkan.

Buku ini merupakan sumbangan kami dalam upaya meningkatkan komunikasi antar pemangku kepentingan dalam upaya pengelolaan DAS. Buku ini berisi pengalaman-pengalaman kami di ICRAF dalam mendiagnosa dan memantau permasalahan dalam pengelolaan DAS. Topik utama yang diangkat dalam buku ini adalah fungsi hidrologis DAS khususnya (i) interaksi antara lanskap dengan curah hujan dan (ii) lanskap sebagai habitat bagi organisme air yang berfungsi sebagai penunjuk kualitas air dan tingkat pencemaran. Hasil pengamatan ini kami harapkan dapat menjadi bahan masukan bagi para pemangku kepentingan dalam berdiskusi dan bernegosiasi dalam upaya mengelola DAS dengan baik sehingga menguntungkan semua pihak. Isu yang berkaitan dengan pengelolaan DAS tidak hanya sekedar membebaskan X juta hektar lahan kritis dengan menanam pohon. Namun, pengelolaan DAS

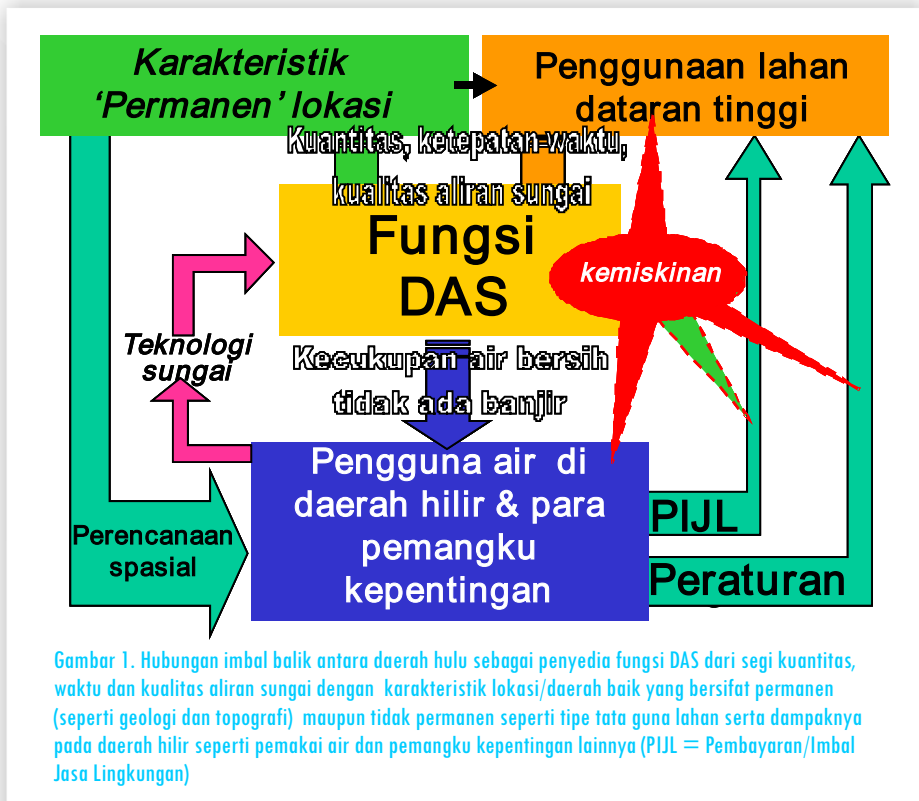
memiliki dimensi permasalahan yang berbeda-beda dan masing-masing permasalahan membutuhkan pendekatan yang berbeda-beda pula.

Fungsi DAS dapat ditinjau dari dua sisi yaitu sisi ketersediaan (supply) yang mencakup kuantitas aliran sungai (debit), waktu, kualitas aliran sungai, dan sisi permintaan (demand) yang mencakup tersedianya air bersih, tidak terjadinya bencana banjir, tanah longsor serta genangan lumpur (Gambar 1). Sulitnya mendapatkan air bersih merupakan faktor penentu utama kemiskinan dan buruknya kesehatan. Hal ini juga tertera dalam 'Tujuan Pembangunan Milenium' (Millenium Development Goals). Masalah persediaan air yang tidak mencukupi dan tidak tepat waktu bagi masyarakat di daerah hilir dapat ditangani dengan dua pendekatan:

- 1) **Pendekatan teknis**, biasanya diterapkan pada badan sungai di bagian tengah DAS, antara lain dengan meningkatkan kecepatan aliran sungai untuk mengurangi banjir di tempat-tempat yang rawan; membuat waduk atau dam sebagai tempat penampungan air sementara; membuat pipa atau penampung air (embung, menara air) untuk mendistribusikan air minum dari sumber di hulu ke konsumen di hilir.
- 2) **Pendekatan tata guna lahan** di hulu, dengan menetapkan kawasan hutan lindung

Dua cara penanganan lain yang kami tambahkan pada tulisan ini adalah:

- 3) **Perencanaan tata ruang**: kenyataan di lapangan menunjukkan bahwa banyak kerusakan dialami oleh masyarakat akibat banjir karena masyarakat tersebut 'tinggal pada tempat dan waktu yang salah'. Upaya-upaya perencanaan tata ruang yang bertujuan untuk menghindari atau menurunkan kerusakan di hilir perlu dilakukan
- 4) **Pembayaran dan imbal jasa lingkungan**: pendekatan ini dapat menjadi pelengkap berbagai peraturan yang ada yang bersifat mengikat. Insentif berupa imbal jasa lingkungan sudah cukup dikenal dan menjadi topik hangat di setiap dialog dan debat yang berkaitan dengan pengelolaan sumber daya alam. Namun demikian masih perlu diuji keberhasilannya dalam penerapan di lapangan.



Bab-bab di dalam buku ini memaparkan bagaimana petani dan peneliti/ilmuwan dapat bersama-sama menilai 'titik lemah' suatu lanskap yang berdampak besar terhadap situasi dan kondisi di daerah hilir sungai (Bab I), bagaimana memantau sedimen dalam air sungai (II) dan sifat fisika dan kimia air sungai (Bab III) serta bagaimana memanfaatkan organisme air untuk menduga kualitas air sungai (Bab IV). Kami juga memberikan contoh bagaimana mengukur dan memantau aliran air dengan menggunakan beberapa indikator kuantitatif. Indikator ini dapat digunakan sebagai indeks dalam menilai dan membandingkan pola hubungan aliran air sungai dengan hujan yang terjadi saat ini, sebagai dasar untuk memantau perubahan fungsi hidrologis pada skala sub-DAS.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama-tama penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Vlaamse Interuniversitaire Raad (VLIR-Project) dan Reward for Upland Poor Environmental Services (RUPES) yang telah memberikan dana sehingga buku ini dapat terbit.

Penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Beria Leimona selaku RUPES Project Coordinator, kepada Dr. Fahmuddin Agus (Balai Besar Pengelolaan Sumber Daya Lahan), Dr. Kasdi Subagyo (Balai Penelitian Tanaman Pangan) dan Dr. Agus Priyono (Departemen Konservasi Sumberdaya Hutan dan Ekowisata, Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor), Betha Lusiana sebagai 'reviewer' atas saran dan komentarnya, kepada Susanto, Warto, Endri Subagyo dan Asep Nuranjani yang telah banyak membantu kegiatan lapang pengambilan contoh macroinvertebrata di Way Besai, Sumberjaya.

Tanpa sentuhan tangannya, buku ini tidak mungkin tampil cantik dan menarik. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada Tikah Atikah atas desainnya.



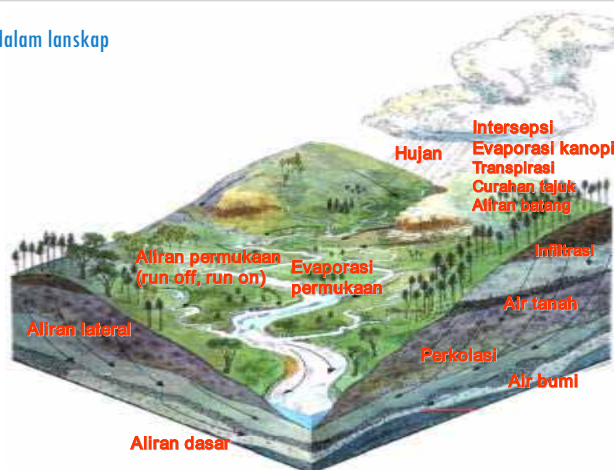
I. MEMAHAMI LANSKAP DAERAH ALIRAN SUNGAI

1. Apa yang perlu diperhatikan dalam menilai lanskap Daerah Aliran Sungai?

Lanskap adalah panorama suatu bidang di permukaan bumi yang merupakan hasil dari proses-proses geomorfologi. Lanskap tersusun oleh komponen berupa daratan, tanah dan penutup lahan. Salah satu contoh lanskap di permukaan bumi adalah Daerah Aliran Sungai (DAS).

DAS adalah daerah tertentu yang bentuk dan sifat alaminya sedemikian rupa sehingga merupakan suatu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungai yang melaluinya. Sungai dan anak-anak sungai tersebut berfungsi untuk menampung, menyimpan dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan serta sumber air lainnya. Penyimpanan dan pengaliran air dihimpun dan ditata berdasarkan hukum alam di sekelilingnya sesuai dengan keseimbangan daerah tersebut. Proses tersebut dikenal sebagai siklus hidrologi (Gambar 1.1.)

Gambar 1.1. Siklus hidrologi dalam lanskap Daerah Aliran Sungai (DAS)



Akhir-akhir ini, persoalan seperti erosi, sedimentasi, longsor dan banjir pada DAS intensitasnya semakin meningkat. Persoalan-persoalan tersebut merupakan bentuk respon negatif dari komponen-komponen DAS terhadap kondisi curah hujan. Kuat atau lemahnya respon sangat dipengaruhi oleh

karakteristik DAS baik secara fisik, maupun sosial ekonomi serta budaya masyarakatnya.

Karakteristik fisik DAS merupakan variabel dasar yang menentukan proses hidrologi pada DAS, sedangkan karakteristik sosial ekonomi dan budaya masyarakat adalah variabel yang mempengaruhi percepatan perubahan kondisi hidrologi DAS. Oleh karena itu, pemahaman mengenai karakteristik fisik DAS, dalam hal ini 'terrain' dan geomorfologi, pola pengaliran dan penyimpanan air sementara pada DAS, dapat membantu mengidentifikasi daerah yang memiliki kerentanan tinggi terhadap terjadinya persoalan DAS, serta perancangan teknik-teknik pengendalian yang sesuai dengan kondisi setempat.

1.1. Terrain dan Geomorfologi

Geomorfologi merupakan ilmu yang mempelajari formasi bentang lahan dan susunannya, yang meliputi bentuk muka bumi sebagai suatu kenampakan bentang alam pada satu cakupan yang luas (lanskap) sampai cakupan yang lebih detail berupa bentuk lahan ('landform') dan pola topografinya ('terrain'). 'Landform' dan 'terrain' terbentuk dari proses struktural (lipatan, patahan dan pengangkatan), proses pelapukan batuan induk (geologi), erosi, pengendapan dan vulkanisme yang menghasilkan konfigurasi ragam bentuk muka bumi berupa pegunungan, perbukitan dan dataran. Tingkat lebih detail pengenalan unsur-unsur 'terrain' sangat diperlukan dalam mempelajari karakteristik lanskap, khususnya karakteristik yang mempengaruhi besarnya potensi limpasan permukaan, erosi, banjir dan tanah longsor. Unsur 'terrain' seperti kemiringan lereng, panjang lereng, arah lereng, konfigurasi lereng serta keseragaman lereng sangat penting untuk diidentifikasi.

1.1.1. Kemiringan lereng

Kemiringan lereng merupakan ukuran kemiringan lahan relatif terhadap bidang datar yang secara umum dinyatakan dalam persen atau derajat. Kemiringan lahan sangat erat hubungannya dengan besarnya erosi. Semakin besar kemiringan lereng, peresapan air hujan ke dalam tanah menjadi lebih kecil sehingga limpasan permukaan dan erosi menjadi lebih besar.

Tabel 1.1. Klasifikasi lereng

No	Relief	Lereng (%)
1	Datar	0-3
2	Berombak/landai	3-8
3	Bergelombang/agak miring	8-15
4	Berbukit/miring	15-30
5	Agak curam	30-45
6	Curam	45-65
7	Sangat curam	>65

Sumber: Arsyad (2000)

1.1.2. Panjang lereng

Panjang lereng merupakan ukuran panjang suatu lahan mulai dari titik awal kemiringan sampai suatu titik dimana air masuk ke dalam sungai atau titik mulai berubahnya kemiringan. Semakin panjang suatu lereng makin besar aliran permukaan yang mengalir menuju ke ujung lereng, sehingga memperbesar peluang erosi. Besarnya erosi yang terjadi di ujung lereng lebih besar daripada erosi yang terjadi di pangkal lereng. Hal ini akibat adanya akumulasi aliran air yang semakin besar dan cepat di ujung lereng.

1.1.3. Konfigurasi lereng

Lereng dapat berbentuk cembung atau cekung. Lereng berbentuk cembung mudah mengalami erosi lembar sedangkan lereng berbentuk cekung akan mudah mengalami erosi parit atau alur.

1.1.4. Keseragaman Lereng

Lereng memiliki kemiringan tidak seragam, artinya pada tempat tertentu kemiringannya curam dan diselingi dengan lereng-lereng datar. Pada kondisi lereng yang tidak seragam, besarnya erosi lebih kecil bila dibandingkan dengan lereng yang seragam.

1.1.5. Arah Lereng

Arah lereng adalah arah hadap lereng terhadap arah mata angin yang ditunjukkan dengan utara (U), timur laut (TL), timur (T), tenggara (TG), selatan (S), barat daya (BD), barat (B) dan barat laut (BL). Arah lereng sangat menentukan tingkat penyinaran matahari dan curah hujan yang turun. Pada lereng yang mendapatkan sinar matahari langsung dan lebih intensif cenderung mengalami erosi lebih besar daripada lereng yang tidak mendapatkan penyinaran matahari secara langsung. Pada umumnya curah hujan terjadi di bagian lereng yang mendapatkan angin dan sebagian kecil saja yang terjadi di bagian lereng belakang.

1.2. Pola pengaliran dan penyimpanan air

Pola pengaliran dan penyimpanan air dalam DAS sangat dipengaruhi oleh karakteristik tanah, bahan induk (geologi), morfometri DAS dan penggunaan lahan. Karakteristik ini menentukan banyaknya air hujan yang dialirkan atau tertahan, kecepatan aliran, dan waktu tempuh air dari tempat terjauh sampai dengan outlet (waktu konsentrasi) yang berpengaruh pada kejadian banjir, baik banjir yang berbentuk genangan (inundasi) maupun banjir bandang pada DAS tersebut.

1.2.1. Tanah

Tanah merupakan bahan hasil pelapukan batuan. Karakteristik tanah dan sebaran jenisnya dalam DAS sangat menentukan besarnya infiltrasi limpasan permukaan ('overland flow') dan aliran bawah permukaan ('subsurface flow'). Karakteristik tanah yang penting untuk diketahui antara lain berat isi, tekstur, kedalaman, dan pelapisan tanah (horison).

a. Berat isi tanah (BI)

Berat isi tanah merupakan ukuran masa per volume tanah (gr/cm^3), termasuk di dalamnya volume pori-pori tanah. Berat isi tanah bersama dengan tekstur dan bahan organik tanah menentukan besarnya infiltrasi. Semakin tinggi nilai BI, tanah tersebut semakin padat yang berarti semakin sulit meneruskan air. Berat isi tanah dapat dikategorikan sebagai berikut:

- * Rendah: < 0.9
- * Sedang: $0.9-1.1$
- * Tinggi: > 1.1

b. Tekstur tanah

Tekstur merupakan perbandingan komposisi (%) butir-butir penyusun tanah yang terdiri dari fraksi pasir ($50\mu\text{m} - 2\text{mm}$), debu ($50\mu\text{m} - 2\mu\text{m}$), dan liat ($< 2\mu\text{m}$). Semakin halus tekstur tanah, semakin tinggi kapasitas infiltrasinya.

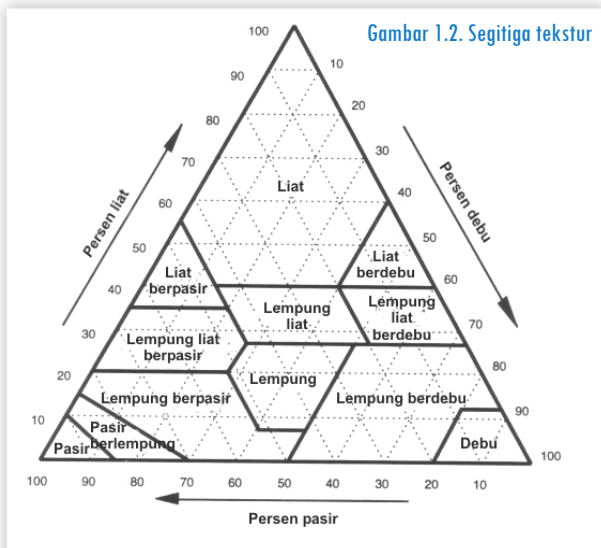
Kelas tekstur tanah dikategorikan menjadi:

- * Sangat halus (sh): liat
- * Halus (h): liat berpasir, liat, liat berdebu
- * Agak halus (ah): lempung berliat, lempung liat berpasir, lempung liat berdebu
- * Sedang (s): lempung berpasir sangat halus, lempung, lempung berdebu, debu
- * Agak kasar (ak): lempung berpasir
- * Kasar (k): pasir, pasir berlempung

Persentase kandungan pasir, debu dan liat dari masing-masing kategori kelas tekstur disajikan dalam segitiga tekstur (Gambar 1.2).

c. Kedalaman tanah

Kedalaman tanah atau solum (cm) merupakan ukuran ketebalan lapisan tanah dari permukaan sampai atas lapisan bahan induk tanah. Pada profil tanah solum tersebut mencakup horison A dan B. Ketebalan solum mempengaruhi kapasitas penyimpanan air, yang secara umum dapat dibedakan menjadi:



- * Sangat dangkal: < 20cm
- * Dangkal: 20 - 50cm
- * Sedang: 50 - 75cm
- * Dalam: > 75 cm

d. Horison tanah

Horizonisasi tanah merupakan bentukan lapisan tanah secara vertikal. Horison tanah berbeda dengan lapisan tanah. Horison tanah dinyatakan dengan simbol A, B dan C, sedangkan lapisan tanah dinyatakan dengan simbol I, II, III dst.

Bentukan tanah ini merupakan cerminan perkembangan tanah yang dipengaruhi oleh kondisi iklim, topografi, bahan induk, vegetasi, organisme dan waktu. Beberapa hal yang perlu diperhatikan saat melihat penampang tanah adalah kedalaman horison, baik pada horison atas maupun horison bawah, keberadaan lapisan kedap air, dan permeabilitasnya. Pada jenis tanah tertentu terdapat hambatan perkembangan yang ditandai dengan adanya horison kedap air. Horison ini dapat menyebabkan proses infiltrasi terhambat.

1.2.2. Bahan induk tanah (geologi)

Tipe bahan induk secara umum akan mempengaruhi bentuk hidrograf aliran, dimana DAS dengan jenis batuan yang kedap air seperti batu lempung ('shale') atau granit, akan menghasilkan hidrograf aliran dengan debit puncak yang tinggi dan waktu konsentrasi yang relatif singkat. Sebaliknya DAS dengan jenis batuan porus seperti batu kapur atau gamping akan menghasilkan hidrograf aliran yang lebih landai dengan debit puncak yang rendah dan waktu konsentrasi yang relatif lebih lama.

1.2.3. Penutupan lahan

Vegetasi penutup lahan memegang peranan penting dalam proses intersepsi hujan yang jatuh dan transpirasi air yang terabsorpsi oleh akar. Lahan dengan penutupan yang baik memiliki kemampuan meredam energi kinetis hujan, sehingga memperkecil terjadinya erosi percik ('splash erosion'), memperkecil

koefisien aliran sehingga mempertinggi kemungkinan penyerapan air hujan, khususnya pada lahan dengan solum tebal ('sponge effect'). Beberapa kelas penggunaan lahan yang perlu diidentifikasi dalam melakukan analisis masalah hidrologi adalah:

- * Persentase tanaman pertanian
- * Persentase rumput dan padang penggembalaan
- * Persentase hutan
- * Persentase pemukiman dan jalan ke arah air
- * Persentase padang rumput dan pohon yang tersebar
- * Persentase lahan kosong
- * Persentase rawa dan waduk

1.2.4. Morfometri DAS

Morfometri DAS merupakan ukuran kuantitatif karakteristik DAS yang terkait dengan aspek geomorfologi suatu daerah. Karakteristik ini terkait dengan proses pengatusan (drainase) air hujan yang jatuh di dalam DAS. Parameter tersebut adalah luas DAS, bentuk DAS, jaringan sungai, kerapatan aliran, pola aliran, dan gradien kecuraman sungai.

a. Luas DAS

DAS merupakan tempat pengumpulan presipitasi ke suatu sistem sungai. Luas daerah aliran dapat diperkirakan dengan mengukur daerah tersebut pada peta topografi.

b. Bentuk DAS

Bentuk DAS mempengaruhi waktu konsentrasi air hujan yang mengalir menuju outlet. Semakin bulat bentuk DAS berarti semakin singkat waktu konsentrasi yang diperlukan, sehingga semakin tinggi fluktuasi banjir yang terjadi. Sebaliknya semakin lonjong bentuk DAS, waktu konsentrasi yang diperlukan semakin lama sehingga fluktuasi banjir semakin rendah. Bentuk DAS secara kuantitatif dapat diperkirakan dengan menggunakan nilai nisbah memanjang ('elongation ratio'/Re) dan kebulatan ('circularity ratio'/Rc).

'Elongation ratio' dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$Re = 1.129 \frac{A^{1/2}}{Lb}$$

dimana:

Re = Faktor bentuk; A = Luas DAS (km²); Lb = Panjang sungai utama (km)

'Circularity ratio' dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$Rc = \frac{4\pi A}{P^2}$$

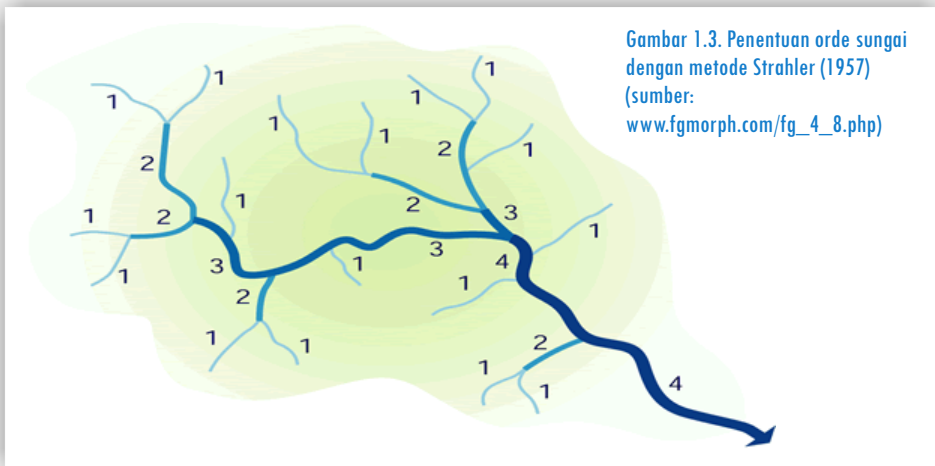
dimana:

Rc= Faktor bentuk; A= Luas DAS (km²); P= Keliling (perimeter) DAS (km)

c. Jaringan sungai

Jaringan sungai dapat mempengaruhi besarnya debit aliran sungai yang dialirkan oleh anak-anak sungainya. Parameter ini dapat diukur secara kuantitatif dari nisbah percabangan yaitu perbandingan antara jumlah alur sungai orde tertentu dengan orde sungai satu tingkat di atasnya. Nilai ini menunjukkan bahwa semakin tinggi nisbah percabangan berarti sungai tersebut memiliki banyak anak-anak sungai dan fluktuasi debit yang terjadi juga semakin besar.

Orde sungai adalah posisi percabangan alur sungai di dalam urutannya terhadap induk sungai pada suatu DAS. Semakin banyak jumlah orde sungai, semakin luas dan semakin panjang pula alur sungainya. Orde sungai dapat ditetapkan dengan metode Horton, Strahler, Shreve, dan Scheidegger. Namun pada umumnya metode Strahler lebih mudah untuk diterapkan dibandingkan dengan metode yang lainnya. Berdasarkan metode Strahler, alur sungai paling hulu yang tidak mempunyai cabang disebut dengan orde pertama (orde 1), pertemuan antara orde pertama disebut orde kedua (orde 2), demikian seterusnya sampai pada sungai utama ditandai dengan nomor orde yang paling besar (Gambar 1.3).



Jumlah alur sungai suatu orde dapat ditentukan dari angka indeks percabangan sungai ('bifurcation ratio'), dengan persamaan berikut:

$$Rb = \frac{N_u}{N_{u+1}}$$

Perhitungan Rb biasanya dilakukan dalam unit Sub DAS atau Sub-sub DAS. Untuk memperoleh nilai Rb dari keseluruhan DAS, maka digunakan tingkat percabangan Sungai Rerata Tertimbang ('Weighted Mean Bifurcation Ratio'/WRb), yang dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$W_{Rb} = \frac{\sum Rb_{u/u+1} (N_u + N_{u+1})}{N_u}$$

dimana:

Rb= Indeks tingkat percabangan sungai; N_u = Jumlah alur sungai untuk orde ke-u; N_{u+1} = jumlah alur sungai untuk orde ke-(u + 1)

Hasil persamaan tersebut dapat menyatakan keadaan sebagai berikut:

- * $Rb < 3$: alur sungai mempunyai kenaikan muka air banjir dengan cepat, sedangkan penurunannya berjalan lambat
- * $Rb 3 - 5$ alur sungai mempunyai kenaikan dan penurunan muka air banjir tidak terlalu cepat atau tidak terlalu lambat
- * $Rb > 5$: alur sungai mempunyai kenaikan muka air banjir dengan cepat, demikian pula penurunannya akan berjalan dengan cepat

d. Kerapatan aliran sungai

Kerapatan aliran sungai menggambarkan kapasitas penyimpanan air permukaan dalam cekungan-cekungan seperti danau, rawa dan badan sungai yang mengalir di suatu DAS. Kerapatan aliran sungai dapat dihitung dari rasio total panjang jaringan sungai terhadap luas DAS yang bersangkutan. Semakin tinggi tingkat kerapatan aliran sungai, berarti semakin banyak air yang dapat tertampung di badan-badan sungai. Kerapatan aliran sungai adalah suatu angka indeks yang menunjukkan banyaknya anak sungai di dalam suatu DAS. Indeks tersebut dapat diperoleh dengan persamaan:

$$Dd = \frac{L}{A}$$

dimana:

Dd= indeks kerapatan aliran sungai (km/km²); L= jumlah panjang sungai termasuk panjang anak-anak sungai (km); A= luas DAS (km²)

Indeks kerapatan aliran sungai diklasifikasikan sebagai berikut:

- * $Dd: < 0.25 \text{ km/km}^2$: rendah
- * $Dd: 0.25 - 10 \text{ km/km}^2$: sedang
- * $Dd: 10 - 25 \text{ km/km}^2$: tinggi
- * $Dd: > 25 \text{ km/km}^2$: sangat tinggi

Berdasarkan indeks tersebut dapat dikatakan bahwa indeks kerapatan sungai menjadi kecil pada kondisi geologi yang permeable, tetapi menjadi besar untuk daerah yang curah hujannya tinggi.

Disamping itu, jika nilai kerapatan aliran sungai:

- * $< 1 \text{ mile/mile}^2$ (0.62 km/km^2), maka DAS akan sering mengalami penggenangan
- * $> 5 \text{ mile/mile}^2$ (3.10 km/km^2), maka DAS akan sering mengalami kekeringan

e. Pola aliran

Pola aliran sungai secara tidak langsung menunjukkan karakteristik material bahan induk seperti permeabilitas, struktur geologi dan kemudahannya mengalami erosi. Pola aliran sungai sejajar (parallel) pada umumnya dijumpai pada DAS yang berada pada daerah dengan struktur patahan. Pola aliran dalam DAS dapat digolongkan menjadi:

- * **Dendritrik**: umumnya terdapat pada daerah dengan batuan sejenis dan penyebarannya luas, misalnya daerah yang ditutupi oleh endapan sedimen yang luas dan terletak pada suatu bidang horizontal di daerah dataran rendah. Batuan kapur ('limestone') dan batu lempung ('shale') teranyam bertopografi solusional dapat memiliki pola aliran dendritrik. Pada topografi dengan lereng seragam, pola aliran yang terbentuk adalah **dendritrik medium**, sedangkan pada topografi berteras kecil, pola aliran yang terbentuk adalah **dendritrik halus**. Bentuk pola dendritrik yang lain adalah **kombinasi dendritrik rektangular** yang terdapat pada batuan metamorf dengan puncak membulat. Pola ini memiliki saluran yang hampir sejajar, dalam dan bertekstur halus hingga sedang. Bentuk ini terjadi pada daerah basah. Pada batuan metamorfosa dengan bentuk topografi berpuncak sejajar, dapat membentuk pola dendritrik rektangular halus dan terjadi pada daerah kering. Pada formasi batuan beku di daerah topografi yang menyerupai bukit membulat di daerah basah pola aliran yang terbentuk adalah pola dendritrik medium

- * **Radial**: biasanya dijumpai di daerah lereng gunung api atau daerah dengan topografi berbentuk kubah
- * **Rektangular**: terdapat di daerah batuan kapur
- * **Trellis**: biasanya dijumpai pada daerah dengan lapisan sedimen di daerah pegunungan lipatan
- * **Kombinasi dendritik dan trellis**: dapat dijumpai pada rangkaian pegunungan yang sejajar dan terdapat pada batuan struktural terlipat dengan tekstur halus sampai sedang.

f. Gradien sungai

Gradien sungai merupakan perbandingan antara beda elevasi dengan panjang sungai utama. Gradien menunjukkan tingkat kecuraman sungai, semakin besar kecuraman, semakin tinggi kecepatan aliran airnya. Gradien sungai dapat diperkirakan dengan persamaan:

$$S_u = \frac{(h_{85} - h_{10})}{0,75 Lb}$$

dimana:

S_u = gradien sungai; h_{85} = elevasi pada titik sejauh 85% dari outlet DAS;
 h_{10} = elevasi pada titik sejauh 10% dari outlet DAS; Lb = panjang sungai utama

1.2.5. Iklim

Komponen iklim yang paling berpengaruh terhadap proses hidrologi adalah presipitasi (terutama curah hujan) dan evapotranspirasi.

a. Presipitasi

Presipitasi merupakan curahan air dari atmosfer ke permukaan bumi. Sumber utama presipitasi di daerah tropis berasal dari curah hujan. Unsur yang penting dalam presipitasi adalah jumlah hujan yang dinyatakan dalam satuan kedalaman curah hujan (mm) dan intensitas curah dinyatakan dalam jumlah hujan per satuan waktu. Klasifikasi intensitas hujan dapat dinyatakan seperti pada Tabel 1.2. atau Tabel 1.3.

Tabel 1.2. Klasifikasi intensitas hujan (dalam Kohnke dan Bertrand, 1959)

Klasifikasi	Intensitas hujan (mm /jam)
Rendah (gerimis)	< 6.25
Sedang	6.25-12.5
Lebat	12.5-50.0
Sangat lebat	>50.0

Sumber: Arsyad (2000)

Tabel 1.3. Klasifikasi intensitas hujan

Klasifikasi	Intensitas (mm/jam)
Sangat rendah	0-5
Rendah	5-10
Sedang	11-25
Agak tinggi	26-50
Tinggi	51-75
Sangat tinggi	> 75

Sumber: Arsyad (2000)

b. Evapotranspirasi

Evapotranspirasi merupakan gabungan dari peristiwa evaporasi dan transpirasi. Evaporasi (penguapan) adalah peristiwa berubahnya air menjadi uap dan bergerak dari permukaan tanah serta permukaan air ke udara. Sedangkan peristiwa penguapan dari tanaman disebut transpirasi. Dengan demikian, penguapan air dari permukaan tanah, permukaan air dan tanaman secara bersama-sama disebut evapotranspirasi.

Faktor-faktor utama yang berpengaruh terhadap evapotranspirasi adalah:

- * Faktor-faktor meteorologi
 - Radiasi matahari
 - Suhu udara dan permukaan
 - Kelembaban
 - Angin
 - Tekanan udara
- * Faktor-faktor geografi
 - Kualitas air (warna, salinitas dan lain-lain)
 - Jeluk tubuh air
 - Ukuran dan bentuk permukaan air
- * Faktor-faktor lainnya
 - Kandungan lengas tanah
 - Karakteristik kapiler tanah
 - Jeluk muka air tanah
 - Warna tanah
 - Tipe, kerapatan dan tingginya vegetasi
 - Ketersediaan air (hujan, irigasi dan lain-lain)

Besarnya evapotranspirasi dapat diperkirakan dari hasil pengukuran panci evaporasi dan alat ukur lysimeter. Namun pengukuran langsung evaporasi maupun evapotranspirasi dari air maupun permukaan lahan yang luas akan mengalami banyak kendala. Untuk itu maka dikembangkan beberapa metode pendekatan dengan menggunakan input data yang diperkirakan berpengaruh terhadap besarnya evapotranspirasi. Besarnya evapotranspirasi juga dapat diperkirakan dengan mempergunakan metode Thornwaite, Blaney and Criddle, metode Penman-Monteith dan analisis neraca kelembaban tanah.

1.3. Tanda ketidakstabilan lereng

Longsor merupakan gejala alami, yakni suatu proses perpindahan massa tanah atau batuan pembentuk lereng dengan arah miring dari kedudukan semula, sehingga terpisah dari massa yang mantap karena pengaruh gravitasi, dengan jenis gerakan berbentuk translasi dan/atau rotasi (Gambar 1.4). Secara singkat proses terjadinya longsor adalah sebagai berikut:

- * air meresap ke dalam tanah sehingga menambah bobot tanah
- * air menembus sampai ke lapisan kedap yang berperan sebagai bidang gelincir, kemudian tanah menjadi licin dan tanah pelapukan di atasnya bergerak mengikuti lereng dan keluar dari lereng.



Gambar 1.4. Singkapan pada lereng akibat longsor (Foto: ICRAF-Sumberjaya arsip)

Pada umumnya kawasan rawan bencana longsor merupakan kawasan yang memiliki ciri-ciri sebagai berikut:

- * Kemiringan lereng curam (lebih dari 40%), dan/atau kawasan rawan gempa.
- * Kawasan yang dijumpai banyak alur air dan mata air yang berada di lembah-lembah subur dekat sungai.
- * Lereng-lereng pada belokan sungai, sebagai akibat proses erosi atau penggerusan oleh aliran sungai pada bagian kaki lereng (Gambar 1.5).
- * Daerah tekuk lereng, yakni peralihan antara lereng curam dengan lereng landai yang di dalamnya terdapat pemukiman. Lokasi seperti ini merupakan zona akumulasi air yang meresap dari bagian lereng yang lebih curam. Oleh karena itu daerah tekuk lereng ini sangat sensitif mengalami peningkatan tekanan air pori yang akhirnya melemahkan ikatan antar butir-butir partikel tanah dan memicu terjadinya longsor.
- * Daerah yang dilalui struktur patahan/sesar yang umumnya terdapat hunian. Dicirikan oleh adanya lembah dengan lereng yang curam (di

atas 30%), tersusun dari batuan yang terkekarkan (retakan) secara rapat, dan munculnya mata air di lembah tersebut. Retakan batuan dapat mengakibatkan menurunnya kestabilan lereng, sehingga dapat terjadi jatuhnya atau luncuran batuan apabila air hujan meresap ke dalam retakan atau saat terjadi getaran pada lereng.

- * Geologi (jenis batuan, sifat batuan, stratigrafi dan tingkat pelapukan). Jenis-jenis batuan/tanah antara lain:
 - Tanah tebal dengan tingkat pelapukan sudah lanjut
 - Kembang kerut tanah tinggi seperti pada tanah dengan kadar liat tinggi dengan tipe mineral liat 2:1 seperti monmorillonite
 - Sedimen berlapis (tanah permeabel berada di atas tanah impermeabel)
 - Pelapisan tanah/batuan searah dengan kemiringan lereng
 - Tanah pelapukan tebal
 - Tingkat kebasahan tinggi (curah hujan tinggi)
 - Erosi lateral intensif sehingga menyebabkan terjadinya penggerusan di bagian kaki lereng, akibatnya lereng semakin curam.
- * Morfologi atau bentuk geometri lereng
 - Erosi lateral dan erosi mundur ('backward erosion') yang intensif menyebabkan terjadinya penggerusan di bagian kaki lereng, akibatnya lereng semakin curam. Semakin curam suatu kemiringan lereng, semakin kecil nilai kestabilannya
 - Patahan yang mengarah keluar lereng
- * Curah hujan
 - Daerah dengan curah hujan rata-rata tinggi (di atas 2000 mm/tahun)
 - Akibat hujan terjadi peningkatan kadar air tanah, akibatnya



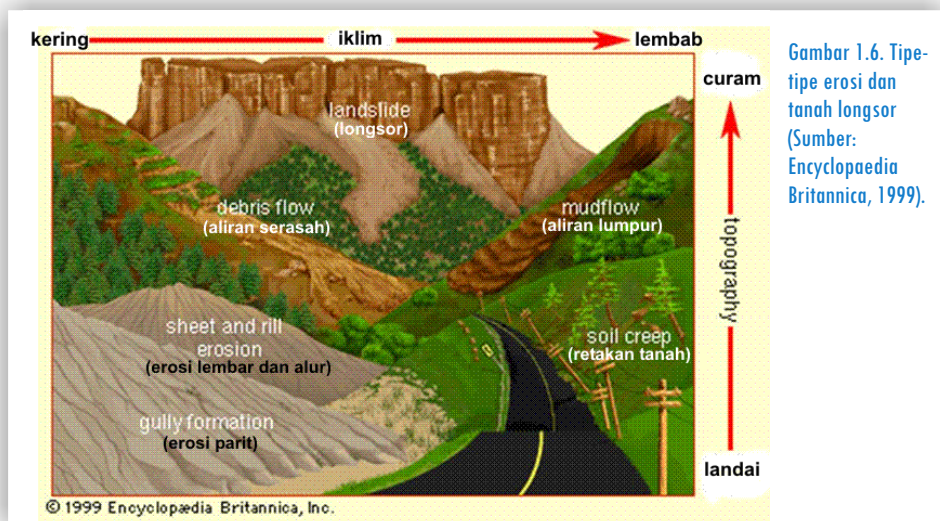
Gambar 1.5. Longsor tebing sungai akibat lahan curam dan penggerusan tikungan sungai
(Foto: ICRAF-Sumberjaya arsip)

menurunkan ketahanan batuan dan menambah beban mekanik tanah

- Curah hujan yang tinggi menyebabkan meningkatnya volume air yang terinfiltrasi sehingga tanah menjadi semakin jenuh dan makin menjenuhi dan menambah beban lapisan tanah di atas bahan gelincir
- ★ Kegiatan manusia
 - Mengganggu kestabilan lereng misalnya dengan memotong lereng
 - Melakukan pembangunan tidak mengindahkan tata ruang wilayah/tata ruang desa
 - Mengganggu vegetasi penutup lahan sehingga aliran permukaan melimpah, misalnya dengan 'over cutting', penjarahan atau penebangan tak terkendali, hal ini akan menyebabkan erosi mundur maupun erosi lateral
 - Menambah beban mekanik dari luar, misalnya penghijauan atau reboisasi yang sudah terlalu rapat, pohonnya sudah besar-besar di kawasan rawan longsor dan tidak dipanen

1.4. Indikasi erosi dan sedimentasi

Erosi dapat diprediksi berdasarkan kondisi lapangan, yaitu dengan cara memperhatikan adanya bentukan hasil erosi seperti erosi lembar permukaan ('sheet erosion'), erosi alur ('rill erosion'), dan erosi parit ('gully erosion') seperti diilustrasikan pada Gambar 1.6.



Pendekatan lain untuk memperkirakan terjadinya erosi di suatu tempat adalah dengan memperhatikan perubahan kondisi permukaan tanah. Pada umumnya tanah-tanah yang telah mengalami erosi dicirikan oleh perubahan warna dan konsistensi tanah, serta munculnya akar tumbuhan atau lapisan batuan di permukaan tanah (Gambar 1.7). Berdasarkan jumlah tanah yang hilang akibat erosi, tingkat bahaya erosi pada suatu tempat dapat dikelompokkan seperti disajikan pada Tabel 1.4.

Tabel 1.4. Tingkat bahaya erosi berdasarkan jumlah tanah yang hilang

Tingkat bahaya erosi	Jumlah lapisan permukaan tanah yang hilang
Tidak ada erosi	0%
Ringan	< 25% lapisan atas hilang
Sedang	25-75% lapisan atas hilang
Agak berat	> 75% lapisan atas sampai < 25% lapisan bawah hilang
Berat	> 25% lapisan bawah hilang
Sangat berat	Erosi parit

Sumber: Arsyad (2000)



Gambar 1.7. Tanah tererosi ditandai oleh perubahan warna tanah dan kekerasan tanah serta munculnya akar tanaman di atas permukaan tanah (Foto: ICRAF-Sumberjaya arsip)

Proses erosi

Faktor utama yang mempengaruhi terjadinya erosi adalah curah hujan, sifat-sifat tanah, lereng, vegetasi dan pengelolaan tanah.

Curah hujan

Sifat curah hujan yang paling berpengaruh terhadap erosi adalah intensitasnya. Meningkatnya intensitas curah hujan, mengakibatkan semakin

tingginya erosi. Intensitas curah hujan yang tinggi akan mempercepat proses penghacuran dan pengangkutan agregat tanah. Hancurnya agregat tanah tersebut dapat menyumbat pori-pori tanah yang menyebabkan air tidak dapat meresap ke dalam tanah, sehingga berdampak pada meningkatnya limpasan permukaan.

Proses penghancuran tanah ('soil detachment') oleh curah hujan ditentukan oleh energi kinetik yang dimiliki curah hujan tersebut. Semakin deras intensitas curah hujan, semakin tinggi pula daya penghancurannya.

Sifat tanah

Sifat-sifat tanah yang perlu diperhatikan adalah sifat tanah yang mempengaruhi kepekaan terhadap erosi yaitu tekstur tanah, bentuk dan kemantapan struktur tanah, kapasitas infiltrasi, permeabilitas tanah dan kandungan bahan organik. Secara umum hubungan antara sifat tanah dengan erosi adalah sebagai berikut:

- * Tanah bertekstur pasir tidak peka terhadap erosi karena memiliki ukuran partikel yang besar sehingga daya angkut aliran (erodibilitas) menjadi lebih kecil. Sedangkan tanah dengan ukuran partikel lebih halus (lempung dan debu) sangat mudah terangkut oleh aliran permukaan, apalagi jika kecepatan aliran permukaan tinggi. Dengan demikian ukuran partikel tanah berpengaruh terhadap proses pengangkutan sediment
- * Tanah berstruktur mantap dengan bentuk struktur membulat (granuler, remah, gumpal membulat) lebih tahan terhadap erosi karena mampu menyerap air lebih banyak dan mengurangi limpasan permukaan
- * Tanah dengan kapasitas infiltrasi tinggi memiliki kepekaan terhadap erosi yang lebih rendah daripada tanah dengan kapasitas infiltrasi rendah
- * Tanah yang kaya bahan organik lebih tahan terhadap erosi karena bahan organik tersebut mempengaruhi tingkat kemantapan agregat

Lereng

Besarnya erosi dipengaruhi oleh lereng. Semakin curam dan panjang suatu lereng, maka erosi akan semakin tinggi. Hal ini terjadi karena kecepatan aliran permukaan semakin meningkat, yang selanjutnya meningkatkan daya angkutnya terhadap partikel tanah yang telah hancur.

Vegetasi

Vegetasi menghalangi curah hujan yang jatuh, sehingga air hujan tidak jatuh langsung di permukaan tanah, akibatnya daya penghancur air hujan berkurang. Vegetasi juga dapat berfungsi untuk menghambat aliran permukaan dan memperbanyak air terinfiltrasi. Penggunaan lahan yang paling efektif untuk mengurangi erosi adalah hutan namun rumput-rumputan yang tumbuh rapat dapat berfungsi sama efektifnya.

Pengelolaan tanah

Manusia merupakan faktor penyebab utama terjadinya erosi. Kegiatan alih guna lahan hutan menjadi lahan pertanian, dan kegiatan pembangunan infrastruktur jalan seperti pada Gambar 1.8. atau pembangunan pemukiman tanpa mengindahkan kaidah konservasi mempercepat terjadinya degradasi lingkungan akibat erosi.



Gambar 1.8. Erosi jalan setapak (Foto: ICRAF-Sumberjaya arsip)

II. PENGUKURAN PARAMETER HIDROLOGI

Debit (kecepatan aliran) dan sedimen merupakan komponen penting yang berhubungan dengan permasalahan DAS seperti erosi, sedimentasi, banjir dan longsor. Oleh karena itu, pengukuran debit dan sedimen harus dilakukan dalam monitoring DAS.

2.1. Debit sungai

Debit merupakan jumlah air yang mengalir di dalam saluran atau sungai per unit waktu. Metode yang umum diterapkan untuk menetapkan debit sungai adalah metode profil sungai ('cross section'). Pada metode ini debit merupakan hasil perkalian antara luas penampang vertikal sungai (profil sungai) dengan kecepatan aliran air.

$$Q = A.V$$

dimana:

Q =Debit aliran (m^3/s); A =Luas penampang vertikal (m); V =Kecepatan aliran sungai (m/s)

Luas penampang diukur dengan menggunakan meteran dan piskal (tongkat bambu atau kayu) dan kecepatan aliran diukur dengan menggunakan 'current meter'.

2.1.1. Persiapan pengukuran debit

Sebelum mengadakan pengukuran, pemilihan lokasi merupakan hal penting yang harus diperhatikan, karena kesesuaian lokasi akan berpengaruh terhadap akurasi hasil pengukuran. Kriteria lokasi yang ideal untuk melakukan pengukuran adalah:

- * tidak ada pusaran air
- * profil sungai rata tanpa ada penghalang aliran air
- * arus sungai terpusat dan tidak melebar saat tinggi muka air naik
- * khusus untuk pengukuran pada sungai besar harus ada jembatan yang kuat

Perlengkapan yang perlu dipersiapkan adalah:

- * Alat tulis (buku, pensil, dan spidol)
- * Timer (stopwatch)



- * Alat pengapung (bola tennis, bambu dengan pemberat)
- * Meteran
- * Benang atau tali
- * Palu dan paku
- * Tongkat bambu atau kayu
- * Penggaris

2.1.2. Pelaksanaan pengukuran debit

Kegiatan yang dilakukan dalam pengukuran debit adalah pembuatan profil sungai dan pengukuran kecepatan aliran

Pembuatan profil sungai

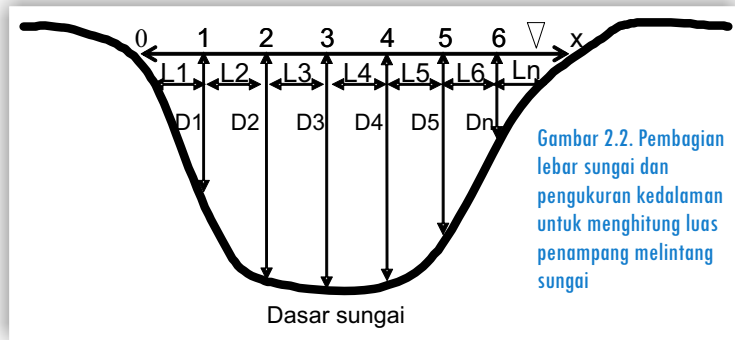
Profil sungai atau bentuk geometri saluran sungai berpengaruh terhadap besarnya kecepatan aliran sungai, sehingga dalam perhitungan debit perlu dilakukan pembuatan profil sungai, dengan cara sebagai berikut:

- * Pilih lokasi yang representatif (dapat mewakili) untuk pengukuran debit
- * Ukur lebar sungai (penampang horisontal)
- * Bagi lebar sungai menjadi 10-20 bagian dengan interval jarak yang sama (Gambar 2.1).
- * Ukur kedalaman air di setiap interval dengan mempergunakan tongkat

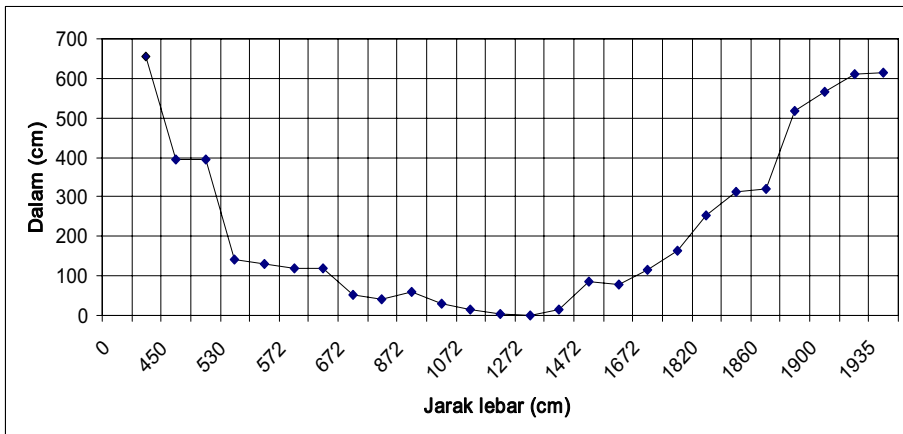


Gambar 2.1. Proses pembuatan profil sungai, (A) jembatan adalah salah satu lokasi yang ideal untuk mengukur debit; (B) pengukuran kedalaman sungai tiap interval; (C) tali dan (D) tongkat pengukur digunakan sebagai alat ukur manual (Foto: ICRAF-Sumberjaya arsip)

Secara ilustrasi pembagian lebar sungai dan pengukuran kedalamannya dapat dilihat pada Gambar 2.2. berikut ini:



Contoh hasil pengukuran profil sungai ditampilkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Contoh hasil profil sungai.

Dengan melakukan pengukuran profil sungai, maka luas penampang sungai dapat diketahui. Luas penampang sungai (A) merupakan penjumlahan seluruh bagian penampang sungai yang diperoleh dari hasil perkalian antara interval jarak horisontal dengan kedalaman air atau dapat dituliskan sebagai berikut:

$$A(m^2) = L_1 D_1 + L_2 D_2 + \dots L_n D_n$$

dimana:

L =lebar penampang horisontal (m); D =Kedalaman (m)

Berdasarkan pada contoh profil pada Gambar 2.3, maka diketahui luas penampang sungai adalah $26,47 \text{ m}^2$ (Verbist et al., 2006)

Pengukuran debit

Kecepatan aliran sungai pada satu penampang saluran tidak sama. Kecepatan aliran sungai ditentukan oleh bentuk aliran, geometri saluran dan faktor-faktor lainnya. Kecepatan aliran sungai diperoleh dari rata-rata kecepatan aliran pada tiap bagian penampang sungai tersebut. Idealnya, kecepatan aliran rata-rata diukur dengan mempergunakan 'flow probe' atau 'current meter' (Gambar 2.4). Alat ini dapat mengetahui kecepatan aliran pada berbagai kedalaman penampang. Namun apabila alat tersebut tidak tersedia, kecepatan aliran dapat diukur dengan metode apung.

Gambar 2.4.
Pengukuran profil
sungai dan
pengukuran kecepatan
aliran sungai dengan
menggunakan flow
probe (Foto: Maria
Arweström)



a. Pengukuran debit dengan alat pengapung

Pengukuran debit dilakukan dengan jalan mengapungkan suatu benda misalnya bola tennis, pada lintasan tertentu sampai dengan suatu titik yang telah diketahui jaraknya. Pengukuran dilakukan oleh tiga orang yang masing-masing bertugas sebagai pelepas pengapung di titik awal, pengamat di titik akhir lintasan dan pencatat waktu perjalanan alat pengapung dari awal sampai titik akhir. Langkah pengukuran debit adalah sebagai berikut:

- * Pilih lokasi pengukuran pada bagian sungai yang relatif lurus dan tidak banyak pusaran air. Bila sungai relatif lebar, bawah jembatan adalah tempat pengukuran yang cukup ideal
- * Tentukan lintasan dengan jarak tertentu, kira-kira waktu tempuh benda yang diapungkan lebih kurang 20 detik.
- * Buat profil sungai pada titik akhir lintasan
- * Catat waktu tempuh benda apung mulai saat dilepaskan sampai dengan garis akhir lintasan

- * Ulangi pengukuran sebanyak tiga kali
- * Hitung kecepatan rata-ratanya

Kecepatan aliran merupakan hasil bagi antara jarak lintasan dengan waktu tempuh atau dapat dituliskan dengan persamaan:

$$V = \frac{L}{t}$$

dimana:

V = kecepatan (m/detik); L=panjang lintasan (m); t = waktu tempuh (detik)

Kecepatan yang diperoleh dari metode ini merupakan kecepatan maksimal sehingga perlu dikalikan dengan faktor koreksi kecepatan. Pada sungai dengan dasar yang kasar faktor koreksinya sebesar 0.75 dan pada dasar sungai yang halus faktor koreksinya 0.85, tetapi secara umum faktor koreksi yang dipergunakan adalah sebesar 0.65.

b. Pengukuran kecepatan aliran dengan 'Flow Probe' atau 'Current-meter'

Pengukuran kecepatan aliran dengan metode ini dapat menghasilkan perkiraan kecepatan aliran yang memadai. Prinsip pengukuran metode ini adalah mengukur kecepatan aliran tiap kedalaman pengukuran (d) pada titik interval tertentu dengan 'current meter' atau 'flow probe'. Langkah pengukurannya adalah sebagai berikut:

- * Pilih lokasi pengukuran pada bagian sungai yang relatif lurus dan tidak banyak pusaran air. Bila sungai relatif lebar, bawah jembatan adalah tempat pengukuran cukup ideal sebagai lokasi pengukuran
- * Bagilah penampang melintang sungai/saluran menjadi 10-20 bagian yang sama dengan interval tertentu
- * Ukur kecepatan aliran pada kedalaman tertentu sesuai dengan kedalaman sungai pada setiap titik interval yang telah dibuat sebelumnya.
- * Hitung kecepatan aliran rata-ratanya

Penentuan kedalaman pengukuran dan perhitungan kecepatan aliran dapat ditentukan dengan menggunakan Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Penentuan kedalaman pengukuran dan perhitungan kecepatan aliran

Kedalaman sungai (m)	Kedalaman pengukuran	Perhitungan kecepatan rata-rata
0-0.6	0.6 d	$V=V_{0.6}$
0.6-3	0.2 d dan 0.8 d	$V=0.5(V_{0.2} + V_{0.8})$
3-6	0.2 d, 0.6 d dan 0.8 d	$V=0.25(V_{0.2} + V_{0.6} + V_{0.8})$
> 6	S, 0.2 d, 0.6 d, 0.8 d dan B	$V=0.1(V_S + 3V_{0.2} + 2V_{0.6} + 3V_{0.8} + V_B)$

dimana:

d= kedalaman pengukuran; S=permukaan sungai; B= dasar sungai;
V= kecepatan (m/detik)

Debit yang dihitung merupakan jumlah total debit aliran pada setiap penampang atau dapat dituliskan dengan persamaan:

$$Q(m^3/det\ ik) = L_1 D_1 V_1 + L_2 D_2 V_2 + L_n D_n V_n$$

dimana:

Q = debit (m³/detik); L = lebar interval (m); D = kedalaman (m);

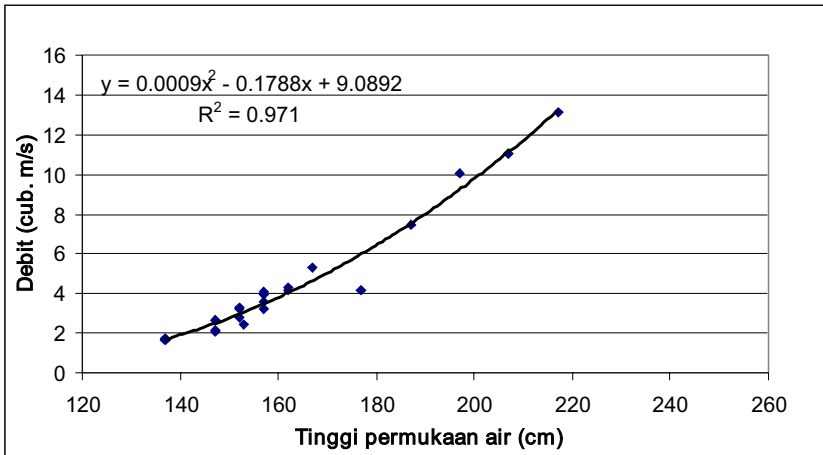
\bar{V} =kecepatan rata-rata pada tiap titik kedalaman pengukuran (m/detik)

2.1.3. Monitoring debit

Monitoring debit sungai secara kontinyu sangat diperlukan untuk melakukan evaluasi DAS dalam jangka panjang. Metode yang digunakan dalam monitoring debit adalah metode lengkung debit atau 'rating curve'. 'Rating curve' merupakan persamaan garis yang menghubungkan tinggi muka air sungai (m) dengan besarnya debit air, sehingga debit dapat diduga melalui ukuran tinggi muka air sungai (Gambar 2.5).

Pemantauan debit dalam jangka panjang dapat dilakukan dengan memperhatikan beberapa hal berikut:

- * Pilih lokasi pada bagian sungai yang relatif lurus, tidak banyak pusaran air dan memiliki dasar sungai yang kuat. Tempat yang ideal adalah di bawah jembatan atau bendung irigasi
- * Pembuatan 'rating curve' harus mewakili variasi tinggi muka air yang mungkin terjadi
- * Lakukan pengecekan profil sungai minimal setiap enam bulan sekali
- * Lakukan pengecekan kecepatan aliran minimal satu tahun sekali



Gambar 2.5. Rating curve untuk menduga besarnya debit aliran berdasarkan tinggi permukaan air pada Sungai Way Besai. Sumber: Verbist, et al. (2006)

2.2. Menetapkan muatan sedimen di sungai

Sedimen merupakan material hasil erosi yang dibawa oleh aliran air sungai dari daerah hulu dan kemudian mengendap di daerah hilir. Proses erosi di hulu meninggalkan dampak hilangnya kesuburan tanah sedangkan pengendapan sedimen di hilir seringkali menimbulkan persoalan seperti pendangkalan sungai dan waduk di daerah hilir. Oleh karena itu besarnya aliran sedimen atau hasil sedimen digunakan sebagai indikator kondisi DAS.

Sedimen di sungai dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu sedimen melayang ('suspended load') dan sedimen merayap ('bed load'). Pengukuran sedimen melayang dapat dilakukan dengan mengambil contoh air sungai melalui metode pengambilan langsung di permukaan ('grab samples'; untuk sungai yang homogen) atau metode integrasi kedalaman ('depth integrated'; untuk sungai dalam dan tidak homogen). Sedangkan sedimen merayap diambil dengan metode perangkap.

Sedimen melayang akan dialirkan lebih jauh dibandingkan dengan sedimen merayap. Disamping itu sedimen melayang biasanya juga mengandung partikel-partikel lain seperti zat hara atau bahan lain yang dapat mencemari air. Oleh karena itu penetapan hasil sedimen melayang lebih sering dilakukan dibandingkan sedimen merayap.

Untuk mengetahui berapa jumlah sedimen melayang di sungai dapat dilakukan dengan cara:

- ✱ mengambil contoh air sungai dengan volume tertentu kemudian diendapkan dan dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 2 x 24 jam sampai kering dan kandungan airnya tetap
- ✱ menimbang berat kering sedimen. Dari berat kering tersebut bisa diukur konsentrasi sedimen dalam contoh air. Selanjutnya, dengan data debit dapat diketahui hasil sedimen.

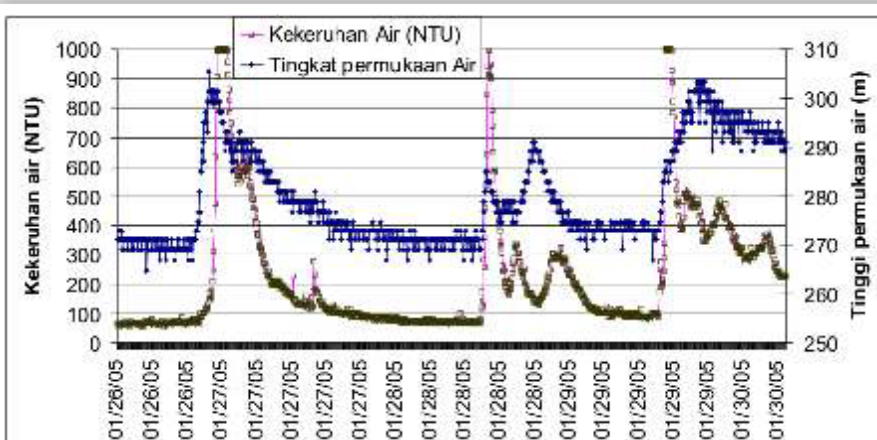
Contoh perhitungan:

Apabila dalam 500 ml contoh air diperoleh berat kering sedimen sebanyak 5 gram, berarti konsentrasi sedimen pada tempat pengambilan contoh air tersebut adalah 5 gram/500 ml air.

2.2.1. Pengambilan contoh sedimen melayang

Sedimen di sungai biasanya berhubungan erat dengan debit. Oleh karena itu, contoh air yang diambil harus disesuaikan dengan besarnya debit air. Sebagai gambaran, ditunjukkan pada Gambar 2.6, dimana kekeruhan air meningkat saat debit puncak yaitu dari 300 NTU menjadi lebih dari 1000 NTU. Dengan demikian pengambilan contoh sedimen harus dilakukan bersamaan dengan pengukuran debit.

NTU (Nephelometer Turbidity Unit) adalah suatu satuan pengukuran kekeruhan air. Nilai NTU dapat diperoleh dari pengukuran kekeruhan air dengan menggunakan alat yang disebut Turbidity meter (secara rinci diterangkan pada Bab III buku ini).



Gambar 2.6. Kekeruhan dan tinggi muka air
Sumber: Verbist, B. (2006)

Alat yang diperlukan saat pengambilan contoh air adalah:

- * Tongkat berskala
- * Botol aqua ukuran 1500 ml yang dilubangi bagian bawahnya dengan diameter sekitar 2 cm, mulut botol dalam keadaan tertutup
- * Plastik atau botol penyimpan sampel
- * Karet gelang
- * Alat tulis
- * Spidol
- * Jam

Langkah pengambilan contoh air seperti disajikan pada Gambar 2.7 adalah sebagai berikut:

1. Ambil contoh air di tengah sungai sebanyak 1 liter, dengan menggunakan botol yang diikat pada tongkat. Turunkan botol secara perlahan dari permukaan air sampai dasar sungai. Catat tinggi muka air atau hitung debit aliran pada saat mengambil sedimen
2. Tuangkan contoh air ke dalam kantong plastik atau botol plastik
3. Beri label tanggal, waktu dan tempat pengambilan contoh air pada kantong plastik atau botol sampel.



Hasil sedimen di DAS dapat diperkirakan dari kurva hubungan debit dan sedimen. Kurva ini dapat dibuat dari hasil pengukuran sedimen terhadap variasi kenaikan muka air sungai. Kurva hubungan yang cukup akurat dapat diperoleh apabila pengukuran konsentrasi sedimen telah mewakili sekitar 30 kali peristiwa kenaikan debit.

2.2.2. Penetapan konsentrasi sedimen

Keberadaan sedimen di dalam air dapat diketahui dari kekeruhannya. Semakin keruh air berarti semakin tinggi konsentrasi sedimennya. Oleh karena itu konsentrasi sedimen dapat didekati dari hasil pengukuran tingkat kekeruhan air.

Metode cepat untuk mengukur kekeruhan di lapangan dapat dilakukan dengan menggunakan 'Secchi disc' atau piringan yang berwarna hitam-putih (Gambar 2.8). 'Secchi disc' ini digunakan sebagai tanda batas pandangan mata pengamat ke dalam air, semakin keruh air, batas penglihatan mata semakin dangkal.

Alat yang diperlukan untuk mengukur kekeruhan adalah:

- * Tabung transparan dengan tinggi 45 cm, tabung dapat dibuat dari dua buah botol air kemasan ukuran 600 ml yang disatukan
- * 'Secchi disc', dibuat dari kayu berbentuk lingkaran dengan diameter 5 cm, diberi warna hitam dan putih, kemudian diberi tongkat sepanjang 35 cm. Selanjutnya tempelkan meteran kain pada tongkat tersebut (Gambar 2.8).

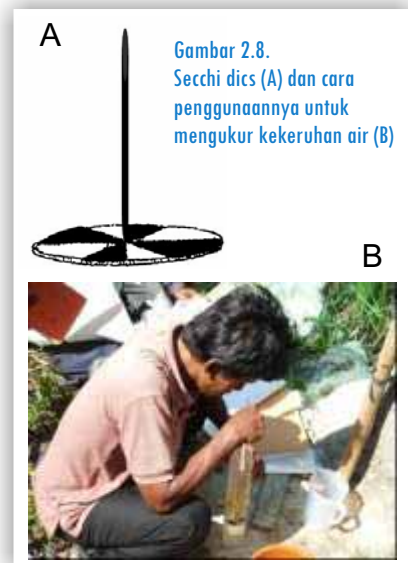
Cara membaca 'Secchi disc':

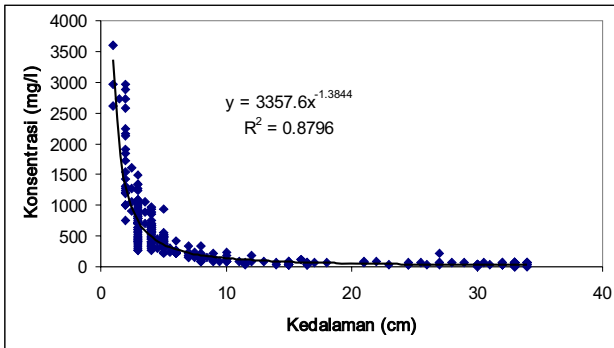
- * Tuangkan contoh air ke dalam tabung atau botol air mineral sampai mencapai ketinggian 30 cm
- * Aduk air secara merata
- * Masukkan 'Secchi disc' ke dalam tabung yang berisi air secara perlahan-lahan dan amati secara tegak lurus sampai warna hitam-putih pada 'Secchi disc' tidak dapat dibedakan
- * Baca berapa centimeter kedalaman 'Secchi disc' tersebut.

Hasil bacaan 'Secchi disc' dapat dikonversi menjadi konsentrasi sedimen (Gambar 2.9). Sebagai contoh, konsentrasi sedimen hasil pengukuran 'Secchi disc' yang dilakukan oleh ICRAF di Lampung Barat, dapat diduga dengan mempergunakan persamaan berikut (Verbist et. al., 2006):

$$\text{Konsentrasi Sedimen (mg/l)} = (3357.6 * D^{-1.3844})$$

dimana: D adalah kedalaman sechhi disc (cm)

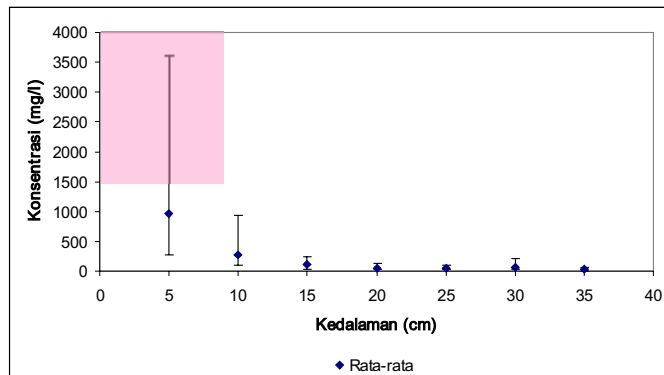




Gambar 2.9. Konversi kedalaman bacaan 'Secchi disc' dengan konsentrasi sedimen (mg/l)
Sumber: Verbist et al. (2006)

Tingkat ketelitian pengamat dalam membaca 'Secchi disc' dan ukuran partikel terlarut di sungai menentukan akurasi hasil penetapan sedimen. Akurasi bacaan 'Secchi disc' terbaik diperoleh pada kisaran kedalaman 10-30 cm. Pada kedalaman kurang dari 10 cm, hasil bacaan kurang akurat karena air terlalu keruh (Gambar 2.10).

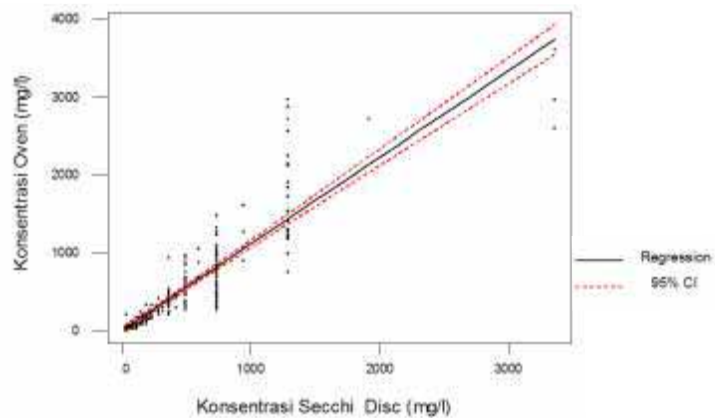
Gambar 2.10. Akurasi penggunaan Secchi disc dalam pengukuran kekeruhan air pada berbagai kedalaman yang ditunjukkan oleh rendahnya simpangan baku pada kedalaman antara 10-35 cm)



Selain pada kedalaman di bawah 10 cm, 'Secchi disc' juga menunjukkan pengukuran yang kurang akurat apabila konsentrasi sedimen lebih dari 500 mg/l (Gambar 2.11).

Kondisi geologi, material dasar sungai, dan jenis tanah lokasi pengamatan sangat mempengaruhi tipe sedimen yang mengalir di suatu DAS. Oleh karena itu, dalam melakukan pengukuran dengan metode 'Secchi disc' perlu memperhatikan beberapa hal yaitu kalibrasi pengamat untuk mengetahui tingkat ketelitian para pengamat dan kalibrasi hasil bacaan 'Secchi disc' dengan konsentrasi sedimen.

Gambar 2.11. Akurasi penggunaan 'Secchi disc' dalam pengukuran kekeruhan air pada berbagai konsentrasi sedimen yang ditunjukkan bervariasinya sebaran data konsentrasi sedimen yang mengendap pada konsentrasi hasil pengamatan secchi disc di atas 500 mg/l



Kalibrasi pengamat dan konsentrasi sedimen dapat dilakukan sekaligus, dengan cara:

- * Kumpulkan contoh air sungai dengan tingkat kekeruhan berbeda.
- * Baca masing-masing contoh tersebut dengan 'Secchi disc'
- * Tampung 300 ml contoh air dalam mangkok alumunium yang telah diketahui beratnya lalu Endapkan selama 24 jam dan buang sebagian airnya secara hati-hati
- * Keringkan endapan dengan oven pada suhu 105°C selama 2 x 24 jam
- * Timbang berat keringnya (g) dan hHitung konsentrasi dengan persamaan: konsentrasi (g/l) = berat sedimen (g)/volume air contoh (l)
- * Plotkan hasil bacaan tersebut ke dalam grafik

Dengan melakukan kalibrasi ketelitian pengamat, diharapkan hasil pengukuran yang diperoleh akan lebih teliti.

Seperti telah diketahui bahwa ketelitian pengamatan semakin berkurang pada kekeruhan di atas 500 mg/liter air atau 'Secchi discs' baru dapat dibedakan warnanya pada kedalaman kurang dari 10 cm. Apabila pada saat pengamatan 'Secchi dic' baru terlihat pada kedalaman kuran dari 10 cm, sebaiknya dilakukan pengenceran dengan menambahkan sejumlah air jernih (misalnya aquades). Konsentrasi sedimen dikonversi sesuai dengan pengencerannya.

Contoh:

Pada pengamatan sebanyak 400 ml air ternyata 'Secchi disc' baru terlihat pada kedalaman kurang dari 10 cm. Untuk akurasi pengamatan, air diencerkan dengan menambahkan air jernih sebanyak 400 ml, sehingga menjadi 800 ml. Dari 800 ml tersebut diambil sebagian dan diamati kembali. Misalnya 'Secchi disc' terlihat pada kedalaman 15 cm setelah pengenceran, berarti kedalaman sebenarnya adalah 30 cm, karena pengenceran yang dilakukan adalah 2 kali volume semula.

III. MONITORING KUALITAS AIR SUNGAI SECARA FISIK-KIMIA

3.1. Pendahuluan

Akhir-akhir ini, penurunan kualitas air sungai tidak hanya terjadi di daerah hilir, tetapi juga di daerah hulu. Alih guna lahan hutan menjadi lahan pertanian dan pemukiman merupakan faktor utama penyebab terjadinya penurunan kualitas air sungai di daerah hulu melalui sedimentasi, penumpukan hara dan pencemaran bahan-bahan kimia pestisida.

Penurunan kualitas air sungai berpengaruh terhadap kesehatan manusia dan keberadaan makhluk hidup yang ada di perairan. Penumpukan unsur hara di perairan memicu pertumbuhan alga dan jenis tumbuhan air lainnya secara tak terkendali, sehingga menyebabkan matinya beberapa jenis makhluk hidup air yang merupakan sumber makanan bagi ikan. Akumulasi racun yang berasal dari pestisida, tidak hanya mengakibatkan kematian hewan air, tetapi juga membahayakan kehidupan manusia karena dapat menimbulkan berbagai jenis penyakit. Sementara itu, sedimentasi yang terjadi pada sungai mengakibatkan pendangkalan sehingga memicu terjadinya banjir.

3.2. Pengertian kualitas air

Kualitas air adalah mutu air yang memenuhi standar untuk tujuan tertentu. Syarat yang ditetapkan sebagai standar mutu air berbeda-beda tergantung tujuan penggunaan, sebagai contoh, air yang digunakan untuk irigasi memiliki standar mutu yang berbeda dengan air untuk dikonsumsi. Kualitas air dapat diketahui nilainya dengan mengukur peubah fisika, kimia dan biologi.

Klasifikasi dan kriteria kualitas air di Indonesia diatur dalam Peraturan Pemerintah No. 82 Tahun 2001. Berdasarkan Peraturan Pemerintah tersebut, kualitas air diklasifikasikan menjadi empat kelas yaitu:

- * Kelas I: dapat digunakan sebagai air minum atau untuk keperluan konsumsi lainnya
- * Kelas II: dapat digunakan untuk prasarana/sarana rekreasi air, pembudidayaan ikan air tawar, peternakan dan mengairi tanaman
- * Kelas III: dapat digunakan untuk pembudidayaan ikan air tawar, peternakan dan mengairi tanaman
- * Kelas IV: dapat digunakan untuk mengairi tanaman



Kriteria kualitas air untuk tiap-tiap kelas didasarkan pada kuantifikasi kondisi fisik, kandungan bahan kimia, biologi dan radioaktifnya seperti tercantum dalam Lampiran 1.

Secara sederhana, kualitas air dapat diduga dengan melihat kejernihannya dan mencium baunya. Namun ada bahan-bahan pencemar yang tidak dapat diketahui hanya dari bau dan warna, melainkan harus dilakukan serangkaian pengujian. Hingga saat ini, dikenal ada dua jenis pendugaan kualitas air yaitu fisik-kimia dan biologi.

3.3. Monitoring kualitas air secara fisik

Monitoring kualitas air secara fisik dapat dilakukan dengan mengukur peubah-peubahnya seperti suhu, muatan sedimen, kecepatan aliran, ukuran batuan dasar sungai, turbiditas/kekeruhan, warna, bau, keadaan kanopi dan jenis vegetasi di sekitar sungai. Peubah-peubah yang digunakan pada pemantauan fisik merupakan informasi pendukung dalam penentuan kualitas air secara kimia dan biologi.

3.3.1. Karakteristik peubah-peubah fisik

a. Suhu

- * Suhu merupakan faktor penting dalam keberlangsungan proses biologi dan kimia yang terjadi di dalam air, seperti kehidupan dan perkembangbiakan organisme air.
- * Suhu mempengaruhi kandungan oksigen di dalam air, proses fotosintesis tumbuhan air, laju metabolisme organisme air dan kepekaan organisme terhadap polusi, parasit dan penyakit. Pada kondisi air yang hangat, kapasitas oksigen terlarutnya berkurang. Oleh karena itu, pengukuran oksigen terlarut harus dilakukan pada tempat yang sama dengan pengukuran suhu.
- * Suhu air bervariasi antar kedalaman sungai, danau, maupun badan air lainnya.

b. Lebar, kedalaman dan kecepatan aliran sungai

- * Lebar dan kedalaman sungai berpengaruh terhadap karakteristik fisik, kimia dan biologi sungai. Sungai yang lebar dan dangkal akan mendapatkan cahaya matahari lebih banyak sehingga suhu air sungai meningkat.
- * Kecepatan aliran sungai juga dipengaruhi oleh lebar dan kedalamannya. Sungai yang dalam dan lebar memiliki kecepatan aliran yang lebih besar.

c. Penutupan permukaan (kanopi) sungai

- * Penutupan permukaan sungai adalah perbandingan antara luasan contoh yang ternaungi oleh vegetasi dengan total luasan contoh.
- * Kanopi sungai merupakan faktor penting dalam mempertahankan kualitas air, karena vegetasi yang menaungi sungai menghalangi cahaya matahari langsung ke dalam badan sungai sehingga menjaga suhu sungai tetap dingin dan memberikan input nutrisi yang berasal dari seresah jatuh.
- * Perakaran vegetasi yang tumbuh di sekitar sungai dapat menstabilkan tebing sungai dan mengurangi terjadinya erosi.

d. Ukuran batuan dasar sungai

- * Ukuran batuan dasar sungai berpengaruh terhadap aliran air. Dasar sungai yang terdiri dari campuran batu-batu berukuran besar dan kecil cenderung meningkat turbulensi aliran airnya sehingga meningkatkan kandungan oksigen di dalam air.
- * Ukuran batuan juga mempengaruhi jenis-jenis organisme yang hidup di dalamnya.

e. Kekeruhan (turbiditas)

- * Mengukur kekeruhan berarti menghitung banyaknya bahan-bahan terlarut di dalam air misalnya lumpur, alga (ganggang), detritus dan bahan-bahan kotoran lainnya. Apabila kondisi air sungai semakin keruh, maka cahaya matahari yang masuk ke permukaan air berkurang dan mengakibatkan menurunnya proses fotosintesis oleh tumbuhan air. Dengan demikian suplai oksigen yang diberikan oleh tumbuhan dari proses fotosintesis berkurang. Bahan-bahan terlarut dalam air juga menyerap panas yang mengakibatkan suhu air meningkat, sehingga jumlah oksigen terlarut dalam air berkurang.

f. Total bahan terlarut

- * Pengukuran total bahan terlarut perlu dilakukan dalam pengujian kualitas air. Rendahnya konsentrasi bahan terlarut mengakibatkan pertumbuhan organisme air terhambat karena kekurangan nutrisi. Namun, tingginya konsentrasi bahan terlarut dapat menyebabkan eutrofikasi atau matinya jenis-jenis organisme air.

3.3.2. Prosedur pengukuran

Semua peubah fisik dapat diukur langsung di lapangan. Prosedur pengukuran untuk masing-masing peubah adalah sebagai berikut:

a. Suhu

Alat yang digunakan dalam pengukuran suhu air adalah termometer standar (tidak perlu menggunakan termometer khusus pengukur air). Langkah dalam pengukuran suhu adalah:

- * Catat suhu udara sebelum mengukur suhu di dalam air
- * Masukkan termometer ke dalam air selama 1-2 menit
- * Baca suhu saat termometer masih di dalam air, atau secepatnya setelah dikeluarkan dari dalam air
- * Ukur suhu di dua titik yang berbeda (kurang lebih berjarak 1 km dari titik awal atau tergantung panjang sungai) untuk mengetahui perbedaan suhu di sungai tersebut.

b. Lebar, kedalaman dan kecepatan aliran

Pengukuran lebar, kedalaman dan kecepatan aliran air sungai telah diterangkan secara rinci pada Bab II dari buku ini mengenai Pengukuran Parameter Hidrologi.

c. Penutupan kanopi

Penutupan kanopi dihitung dalam satuan persen. Langkah-langkah dalam menghitung persentase penutupan kanopi adalah:

- * Tentukan plot contoh berukuran minimal 400 m²¹⁾ pada bagian sungai. Lebar plot contoh mengikuti lebar sungai, sementara ukuran panjang disesuaikan sehingga memperoleh luasan minimal 400 m²
- * Hitung persentase kanopi vegetasi yang menutupi permukaan badan sungai pada plot contoh
- * Hitung luas plot contoh, lalu bandingkan antara persen kanopi yang menutupi sungai dengan luas plot. Secara sederhana dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$CC(\%) = \frac{AV}{AP} \times 100\%$$

dimana: CC=penutupan kanopi (%); AV=luas area yang tertutup vegetasi (m²); AP=luas plot (m²)

- * Lakukan minimal pada tiga plot contoh yang memiliki kerapatan kanopi rendah, sedang dan tinggi

¹ Ukuran ini disesuaikan dengan metode yang biasa digunakan dalam pengukuran persen kanopi pohon pada daerah terestrial.

d. Ukuran batuan dasar sungai

Seperti halnya pengukuran penutupan kanopi, pendugaan persentase batuan dasar sungai juga dilakukan pada plot contoh.

- * Hitung luasan permukaan dasar sungai yang tertutup batu, pasir dan lumpur
- * Bandingkan luasan masing-masing dengan luas plot contoh, kemudian kalikan dengan 100%.

e. Turbiditas/kekeruhan

Turbiditas/kekeruhan air sungai dapat diukur dengan 3 cara yaitu:

- * "Turbidity meter". Pengukuran dengan alat ini dapat langsung dilakukan di lapangan dan secara otomatis nilai kekeruhannya dapat diketahui dalam satuan NTU (Nephelometer Turbidity Units)
- * Secchi Disc. Cara penggunaan Secchi disc secara rinci telah disampaikan pada Bab II buku ini mengenai Pengukuran Parameter Hidrologi
- * Dengan metode kimia yang harus dilakukan di laboratorium

Dari ketiga metode tersebut, penggunaan Secchi dislah yang paling praktis digunakan di lapangan.

3.4. Monitoring kualitas air secara kimia

Peubah-peubah yang diamati pada monitoring kualitas air secara kimia adalah keasaman (pH), oksigen terlarut, daya hantar listrik, kandungan nitrat, nitrit, amonia, fosfat, keberadaan bakteri dan kandungan bahan kimia lainnya sesuai dengan penggunaan air. Sebagian besar peubah dalam monitoring kualitas air secara kimia hanya dapat diketahui di laboratorium, karena memerlukan analisa tertentu.

Pengukuran kualitas air berdasarkan peubah kimia telah menjadi standar umum untuk mengetahui kualitas air karena:

- * Hasil pengukuran secara langsung dapat menunjukkan jenis bahan pencemar yang menyebabkan penurunan kualitas air
- * Hasil pengukuran berupa nilai kuantitatif yang dapat dibandingkan dengan nilai ambang batas anjuran sehingga dapat menunjukkan tingkat pencemaran yang terjadi

Meskipun demikian, pengukuran peubah kimia memiliki keterbatasan yaitu:

- * Memerlukan biaya yang relatif mahal dan harus dilakukan di laboratorium
- * Hasil pengukuran bersifat sesaat, karena hanya mewakili saat pengambilan contoh saja. Oleh karena itu, pengukuran harus dilakukan secara berulang-ulang dalam seri waktu

- * Belum ada standarisasi teknik analisis, sehingga antara laboratorium satu dengan lainnya menggunakan cara yang berbeda-beda dan tentunya akan memberikan hasil yang berbeda-beda pula
- * Belum ada standarisasi nilai ambang batas jenis-jenis bahan pencemar yang diperbolehkan, sehingga masing-masing negara memiliki nilai ambang batas yang berbeda-beda.

3.4.1. Karakteristik peubah-peubah kimia

a. pH

- * pH menunjukkan tingkat keasaman air yang dapat ditunjukkan dengan kertas indikator atau kertas lakmus (Gambar 2). Skala pH berkisar antara 0-14, dengan kisaran sebagai berikut:
 - pH 7: netral
 - pH <7: asam
 - pH >7: basa
- * pH 6,5-8,2 merupakan kondisi optimum untuk makhluk hidup. pH yang terlalu asam atau terlalu basa akan mematikan makhluk hidup.
- * pH dapat berubah antar musim, bahkan antar jam dalam satu hari.



Gambar 3.1. Warna pada kertas indikator yang menunjukkan tingkat keasaman air

b. Alkalinitas

- * Pengukuran alkalinitas dilakukan untuk mengetahui kemampuan sungai dapat bertahan akibat perubahan pH. Pada ekosistem air tawar, nilai alkalinitas berkisar antara 20-200 ppm.

c. Hardness (Kekerasan air)

- * Hardness menunjukkan total konsentrasi kation di dalam air, terutama kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), besi (Fe^{2+}) dan mangan (Mn^{2+}). Tingginya konsentrasi kation-kation tersebut dapat menjadi permasalahan untuk air yang dikonsumsi.

Tabel 3.1. Pengaruh pH pada kehidupan di air

Kisaran pH	Pengaruh terhadap kehidupan di air
3.0 - 3.5	Sangat kecil kemungkinan ikan dapat bertahan hidup dalam beberapa jam pada kisaran pH ini; hanya beberapa hewan invertebrata dapat ditemukan pada kisaran pH ini
3.5 - 4.0	Akan menyebabkan kematian beberapa jenis ikan
4.0 - 4.5	Semua ikan, sebagian besar kodok dan serangga tidak terdapat pada kisaran pH ini
4.5 - 5.0	Beberapa jenis serangga tidak terdapat pada kisaran pH ini, dan sebagian besar telur ikan tidak bisa menetas
5.0 - 5.5	Bakteri pengurai tidak dapat hidup. Sampah daun dan batang mulai menumpuk, sehingga menyebabkan siklus kimia terganggu. Plankton mulai hilang, begitu juga dengan siput. Koloni jamur mulai muncul
5.5-6.0	Pada umumnya bahan metal terperangkap di dalam sedimen dan akan menjadi racun dalam air
6.0 - 6.5	Udang air tawar tidak terdapat pada kisaran pH ini, akan berbahaya juga bagi ikan kecuali bila kandungan CO ₂ bebas dalam air tinggi
6.5 - 8.2	Kisaran optimal bagi sebagian besar makhluk hidup
8.2 - 9.0	Bahaya langsung bagi ikan tidak ada, tetapi efek tidak langsungnya adalah perubahan kandungan kimia di dalam air
9.0 - 10.5	Akan membahayakan beberapa jenis ikan jika berlangsung dalam waktu yang lama
10.5 - 11.0	Dalam waktu yang lama akan menyebabkan kematian pada jenis ikan gurame dan ikan merah
11.0 - 11.5	Kematian pada semua jenis ikan

d. Nitrat, Nitrit dan Amonia

- * Merupakan bentuk unsur nitrogen yang terdapat di dalam air
- * Berasal dari pupuk yang larut, kotoran hewan, dan lain-lain
- * Berfungsi sebagai hara atau pupuk untuk tanaman air
- * Kandungan yang tinggi di dalam air akan meningkatkan pertumbuhan dan aktivitas tumbuhan air sehingga kandungan oksigen di dalam air semakin berkurang dan menyebabkan hewan air sulit berkembang bahkan mati. Peristiwa ini disebut eutrofikasi
- * Kandungan yang tinggi di dalam air minum sangat berbahaya pada bayi, karena hemoglobin darah terikat oleh Nitrat, sehingga menyebabkan darah pada bayi kekurangan oksigen. Akibatnya bayi menjadi rentan terhadap penyakit hemoglobinosa.

e. Fosfat

- * Merupakan bentuk dari unsur fosfor yang terdapat di dalam air
- * Berasal dari detergent sisa cucian, kotoran hewan, pupuk yang terlarut, dan lain-lain
- * Berfungsi sebagai hara untuk tanaman air, dan dapat mengakibatkan proses eutrofikasi

f. Oksigen terlarut/Dissolved Oxygen (DO)

- * Merupakan oksigen yang ada di dalam air
- * Berasal dari oksigen di udara dan hasil fotosintesis tumbuhan air
- * Sangat dibutuhkan dalam kehidupan hewan dan tumbuhan air
- * Kandungan oksigen di dalam air lebih sedikit dibandingkan dengan di udara
- * Kandungan oksigen pada air yang bergerak lebih banyak dibandingkan dengan air yang tergenang
- * Kandungan oksigen berbeda antar musim, bahkan antar jam dalam satu hari, dan berubah sesuai dengan suhu dan ketinggian tempat
- * Kekurangan oksigen akan menyebabkan tumbuhan atau hewan air sulit untuk berkembang

g. Biological Oxygen Demand (BOD)

- * BOD ialah jumlah oksigen yang digunakan mikroorganisme (bakteri) untuk menguraikan bahan-bahan organik di dalam air
- * Jumlahnya tergantung pada pH, suhu, jenis mikroorganisme dan jenis bahan organik dan inorganik di dalam air
- * Sumber BOD daun-daun dan potongan kayu pada air tergenang, tumbuhan atau hewan yang sudah mati, kotoran hewan, dan lain-lain
- * Semakin tinggi BOD, semakin cepat oksigen di dalam air habis, sehingga akan membawa dampak negatif bagi perkembangan makhluk hidup yang ada di dalam air

h. Kandungan Coliform

- * Coliform adalah bakteri yang terdapat di dalam saluran pencernaan dan membantu proses pencernaan
- * Dapat berada di dalam sungai melalui perantara seperti mamalia, burung atau saluran-saluran pembuangan
- * Bersifat non patogenik
- * Keberadaannya merupakan petunjuk bahwa pada sungai tersebut telah terdapat kotoran yang kemungkinan mengandung mikroba patogen. Apabila kandungan coliform > 200 koloni per 100 ml air menunjukkan bahwa kemungkinan telah terdapat mikroorganisme patogen pada air tersebut

i. Daya hantar listrik (DHL)

- * Daya hantar listrik adalah kemampuan air untuk menghantarkan listrik
- * Menunjukkan adanya bahan kimia terlarut seperti NaCl
- * Konduktivitas air dapat meningkat dengan adanya ion-ion logam berat yang dilepaskan oleh bahan-bahan polutan

3.4.2. Prosedur pengukuran

Umumnya, peubah dalam monitoring kualitas air secara kimia hanya dapat diukur di laboratorium, kecuali pH. Namun dengan berkembangnya teknologi, beberapa peubah dapat diukur langsung di lapangan menggunakan bahan kimia penguji dalam bentuk tablet yang telah tersedia dan dikenal dengan nama 'water test kit'. Akan tetapi bahan tersebut hanya tersedia di tempat-tempat tertentu dan harganya relatif mahal.

Sebelum melakukan pengujian, tentunya harus dilakukan pengambilan contoh air. Tahapan yang lebih rinci untuk pengambilan contoh air disampaikan pada Bab IV dalam buku ini mengenai Monitoring Kualitas Air Secara Biologi.

Contoh air yang telah diambil, selanjutnya akan diuji secara kimia untuk beberapa peubah yang diperlukan dalam monitoring kualitas air seperti pH, Nitrat, Fosfat, DO, BOD dan Coliform. Pengujian dapat dilakukan dengan menggunakan 'water test kit' atau membawa contoh air untuk diuji di laboratorium.

Pengujian variabel kimia air seperti pH, Nitrat, Fosfat, DO dan BOD menggunakan 'water test kit' dapat dilakukan sesuai dengan petunjuk yang tertera pada peralatan tersebut.

Sementara itu, pengujian pH dapat juga dilakukan dengan menggunakan kertas indikator pH (kertas lakmus) atau bahan khusus penguji pH yang tersedia di toko kimia. Cara pengukurannya adalah:

- * Siapkan gelas ukur/tabung untuk pengujian, cuci tabung dan isi dengan air yang akan diuji
- * Celupkan kertas lakmus ke dalamnya, biarkan beberapa saat sampai terjadi perubahan warna. Bandingkan warna kertas lakmus dengan warna standar
- * Catat pH sesuai dengan warna standar

Pengujian kandungan Coliform

Escherichia coli (*E. coli*) adalah suatu jenis coliform, dan terdapat sekitar 700 sub-jenis yang umumnya tidak berbahaya. Pengujian Coliform tidak dapat dilakukan langsung di lokasi pengambilan contoh karena memerlukan waktu beberapa hari dan peralatan yang tidak mungkin tersedia di tempat tersebut. Oleh karena itu, pengujian ini memerlukan laboratorium, paling tidak laboratorium lapangan. Pengujian Coliform tidak menggunakan 'water test kit' seperti pengujian pH, Nitrat, Fosfat, DO, BOD dan tahapan yang harus dilalui juga lebih rumit. Adapun tahapannya adalah sebagai berikut:

a. Alat dan bahan

- * Media pengujian Coliform yang biasanya tersedia di toko peralatan laboratorium
- * Cawan petri
- * Lemari pendingin
- * Plastik 'tape'
- * Kertas label
- * Styrofoam untuk menyimpan cawan petri
- * Lampu 5 watt
- * Pipet minimum 1 mililiter
- * Es batu
- * Inkubator

b. Persiapan

- * Siapkan media untuk pengujian Coliform
- * Masukkan media dalam lemari pendingin
- * Keluarkan botol berisi media dari lemari pendingin sebelum pelaksanaan pengambilan contoh, atau sehari sebelum pengujian untuk memastikan media tersebut telah mencapai suhu kamar
- * Letakkan cawan petri dan penutupnya dengan menggunakan isolasi dua sisi yang tebal sehingga akan terlihat seperti engsel. Fungsinya agar mudah dibuka-tutup untuk mencegah kontaminasi dari bakteri lain
- * Beri label pada penutup berupa tanggal dan lokasi pengambilan contoh
- * Siapkan inkubator berupa styrofoam dengan lampu 5 watt. Pada prinsipnya inkubator digunakan agar bakteri berkembang biak pada suhu yang sesuai dan stabil yaitu sekitar 29-37°C (85-99°F)
- * Siapkan pipet steril berukuran minimum 1 ml dan bungkus rapat

c. Pengambilan contoh

- * Apabila telah sampai di lokasi pengambilan contoh, buka bungkus pipet mulai dari bagian pegangannya
- * Hindari menyentuh ujung pipet dengan tangan atau benda lain
- * Ambil air dengan pipet pada 5-8 cm sebanyak 1 ml untuk pengujian air sungai, atau 5 ml untuk pengujian air sumur
- * Jangan memasukkan tangan ke dalam air contoh
- * Masukkan contoh air ke dalam botol berisi media. Botol dan pipet diposisikan miring agar air yang masuk ke dalam botol tidak tumpah
- * Tutup dan aduk botol perlahan-lahan untuk mencampurkan media dan contoh air

- * Lakukan tiga kali pengulangan
- * Simpan botol media yang telah dicampur air contoh di dalam wadah yang diberi es batu.

d. Memindahkan campuran media dengan contoh air ke dalam cawan petri

- * Pindahkan media uji yang telah dicampur air contoh ke cawan petri dalam waktu tidak lebih dari 2 jam sejak pengambilan contoh
- * Buka tutup cawan petri secukupnya agar media dalam botol bisa dituangkan. Usahakan agar media yang dituangkan tidak terkena tutup cawan petri ataupun menyebar ke sisi-sisi luar
- * Tutup secara perlahan, goyangkan cawan petri seperti membentuk gerak melingkar
- * Tempatkan cawan petri pada permukaan yang datar, dan hindari cahaya matahari langsung, biarkan media mengeras sekitar 30 menit sampai satu jam
- * Bila media telah membeku, balikkan cawan petri agar air yang menguap dari penutup tidak jatuh ke bawah
- * Letakkan di dalam inkubator
- * Simpan dalam inkubator sekitar 24-48 jam pada suhu 29-37°C (85-99°F). Cawan Petri tidak boleh diinkubasi lebih dan 48 jam.

e. Pengamatan koloni

- * Setelah diinkubasikan selama 24-48 jam, hitung semua koloni yang tumbuh pada cawan petri. Koloni E. coli berwarna biru tua hingga ungu. Jenis coliform lainnya berwarna merah muda hingga merah gelap. Warna biru cerah termasuk ke dalam Enterobacteriaceae tetapi bukan coliform. Koloni Enterobacteriaceae yang ada kemungkinan berasal dari kelompok Salmonella dan Shigella, yang merupakan bakteri penyebab penyakit, catat juga bila ditemukan
- * Hitung koloni yang terlihat dengan mata telanjang, jangan gunakan lensa pembesar. Koloni yang berupa titik kecil tidak perlu dihitung
- * Jika jumlah E. coli lebih dari 200 catat sebagai jumlah terlalu banyak (JTB)
- * Untuk melihat jumlah E. coli dalam 100 ml, bagi jumlah E. coli pada cawan petri dengan volume air contoh yang digunakan, lalu kalikan dengan 100.

IV. MONITORING KUALITAS AIR SUNGAI SECARA BIOLOGI DENGAN MAKROINVERTEBRATA

4.1. Pengertian monitoring secara biologi (biomonitoring)

Biomonitoring adalah monitoring kualitas air secara biologi yang dilakukan dengan melihat keberadaan kelompok organisme petunjuk (indikator) yang hidup di dalam air. Kelompok organisme petunjuk yang umum digunakan dalam pendugaan kualitas air adalah:

- * Plankton: mikroorganisme yang hidup melayang-layang di dalam air
- * Periphyton: alga, cyanobacter, mikroba dan detritus yang hidup di dalam air
- * Mikrobentos: mikroorganisme yang hidup di dalam atau di permukaan air
- * Makrobentos: makroinvertebrata yang hidup di dalam atau di permukaan air
- * Makrophyton: tumbuhan air
- * Nekton: ikan

Kelompok tersebut digunakan dalam pendugaan kualitas air karena dapat mencerminkan pengaruh perubahan kondisi fisik dan kimia yang terjadi di perairan dalam selang waktu tertentu. Namun, metode ini memiliki beberapa kelemahan antara lain:

- * Tidak dapat mengidentifikasi penyebab perubahan yang terjadi
- * Hasil pendugaan menunjukkan kualitas air secara ekologi tetapi tidak dapat menunjukkan adanya bahan patogen atau organisme berbahaya lainnya
- * Hanya dapat dilakukan oleh orang yang mengerti tentang biologi perairan ataupun orang yang telah dilatih, karena harus mengidentifikasi secara taksonomi kelompok-kelompok organisme petunjuk.

Oleh karena itu, untuk mendapatkan informasi kualitas air yang lebih akurat, sebaiknya dilakukan penggabungan antara pemantauan kualitas air secara fisik-kimia dan biologi.



4.2. Mengapa Menggunakan Makroinvertebrata?

Makroinvertebrata adalah hewan tidak bertulang belakang yang dapat dilihat dengan mata telanjang. Makroinvertebrata air merupakan komponen biotik pada ekosistem perairan yang dapat memberikan gambaran mengenai kondisi fisik, kimia dan biologi suatu perairan, sehingga digunakan sebagai indikator kualitas air sungai. Selain itu, makroinvertebrata air memiliki sifat-sifat sebagai berikut:

- * Sangat peka terhadap perubahan kualitas air tempat hidupnya, sehingga akan mempengaruhi komposisi dan kelimpahannya
- * Ditemukan hampir di semua perairan
- * Jenisnya cukup banyak dan memberikan respon yang berbeda akibat gangguan yang berbeda
- * Pergerakannya terbatas, sehingga dapat sebagai penunjuk keadaan lingkungan setempat
- * Tubuhnya dapat mengakumulasi racun, sehingga dapat sebagai petunjuk pencemaran
- * Mudah dikumpulkan dan diidentifikasi paling tidak sampai tingkat famili
- * Pengambilan contoh mudah dilakukan, karena memerlukan peralatan sederhana, murah dan tidak berpengaruh terhadap makhluk hidup lainnya.

Meskipun demikian, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam biomonitoring dengan makroinvertebrata yaitu:

- * Keberadaannya sangat dipengaruhi musim, sehingga pengambilan contoh harus dilakukan pada tiap-tiap musim
- * Makroinvertebrata hanya memberikan respon terhadap pengaruh perubahan kondisi lingkungan tertentu
- * Kondisi fisik dan kimia sungai seperti kecepatan aliran air, substrat dasar sungai, keberadaan pusaran dan genangan air, lebar sungai, kemiringan, tutupan vegetasi pada tebing sungai, kandungan unsur hara dan konsentrasi oksigen terlarut dapat mempengaruhi keberadaan makroinvertebrata. Oleh karena, perlu dilakukan pengambilan contoh pada lokasi yang telah terpolusi dan belum terpolusi dengan kondisi fisik yang sama untuk digunakan sebagai data acuan
- * Pada beberapa kelompok, identifikasi sampai tingkat spesies sangat sulit dilakukan

4.3. Prosedur Pengambilan Contoh

4.3.1. Persiapan pengambilan contoh

1. Pemilihan lokasi pengambilan contoh

Pemilihan lokasi pengambilan contoh tergantung pada tujuan pemantauan. Pada buku ini pemantauan dilakukan untuk mengetahui perubahan penggunaan lahan terhadap kualitas air. Oleh karena itu, pemilihan lokasi dilakukan pada berbagai tipe penggunaan lahan yang akan diduga pengaruhnya terhadap kualitas air. Apabila pemantauan dilakukan untuk tujuan lain, maka pemilihan lokasi disesuaikan dengan tujuannya.

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan lokasi pengambilan contoh adalah:

- ✱ Sistem penggunaan lahan
 - Pilih lokasi pada semua tipe penggunaan lahan yang ada dalam satu aliran sungai misalnya hutan, belukar, kebun, sawah dan lain-lain
 - Hindari lokasi yang berada pada peralihan antara dua tipe penggunaan lahan (misalnya antara sawah dan kebun)
 - Hindari pengambilan contoh pada saluran pembuangan/siring (aliran air seperti selokan)
 - Pilih lokasi pada jarak sekitar 5 meter sebelum siring untuk menghindari pengaruh air yang berasal dari siring
- ✱ Jenis substrat seperti pasir, batu, lumpur dan sebagainya (Gambar 4.1).
 - Ambil contoh pada semua jenis substrat
 - Pada satu plot contoh, pilih lokasi yang substratnya seragam (tidak ada campuran substrat)
 - Hindari pemilihan lokasi contoh pada peralihan antara jenis substrat
- ✱ Kecepatan aliran air (aliran cepat atau lambat)
 - Ambil contoh pada semua jenis kecepatan aliran



Gambar 4.1. Contoh jenis-jenis substrat (A) batu; (B) pasir dan Lumpur
(Foto: Indra Suryadi)

- Buat plot contoh pada lokasi yang memiliki kecepatan aliran seragam
- Hindari lokasi yang berada pada peralihan antara aliran cepat dan aliran lambat

2. Data pendukung

Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa biomonitoring dengan makroinvertebrata dapat mencerminkan kondisi kualitas air pada lokasi pengambilan contoh, tetapi tidak dapat digunakan untuk mengetahui faktor penyebab berubahnya komunitas makroinvertebrata. Oleh karena itu, informasi pendukung sangat diperlukan dalam biomonitoring, antara lain:

- * Peubah fisika dan kimia seperti kekeruhan, pH, suhu, DO, kandungan Nitrat, Fosfat dan konduktivitas
- * Penggunaan lahan saat dilaksanakan monitoring
- * Sejarah penggunaan lahan
- * Waktu pemupukan dan penggunaan obat kimia apabila dilakukan, jenis tanaman pangan yang dibudidayakan di sekitarnya, jenis hewan yang dipelihara bila ada, ada tidaknya pemukiman atau pabrik
- * Informasi lain seperti keadaan cuaca, kegiatan pemancingan, keberadaan sampah plastik, busa sabun, bau yang tidak sedap dan lain-lain

3. Alat dan bahan

a. Alat dan bahan untuk pengambilan contoh di lapangan

- * Karung plastik untuk membawa peralatan dan contoh dari lapangan
- * Tali sepanjang 10 m
- * Pinset
- * Plastik berkapasitas 1 kg
- * Spidol anti air
- * Karet gelang
- * Papan dada
- * Pensil



Gambar 4.2. Jaringan untuk mengambil contoh makroinvertebrata; (A) Drift net sampler untuk melakukan 'kick sampling' dan (B) Drift net sampler untuk di pasang di dasar sungai; (C) Surber sampler net (Foto: Andy Dedecker dan Ans Mouton (gambar A); www.pearce-environment.co.uk/acatalog/Pond_Eq... (gambar B dan C))

- * GPS
- * Jaring (dengan ukuran mesh 500 μm seperti Gambar 4.2.)

Jenis jaring yang digunakan untuk mengambil contoh makroinvertebrata berbeda-beda tergantung pada jenis substrat dasar sungai. Berdasarkan kondisi substrat dasar sungai, jaring yang digunakan dibedakan menjadi:

- * Driftnet sampler. Jaring ini digunakan untuk mengambil contoh makroinvertebrata pada sungai yang dasar sungainya berupa lumpur dan pada lokasi yang kemiringannya rendah
- * Surber sampler net. Jaring ini digunakan untuk mengambil contoh makroinvertebrata pada sungai yang dasar sungainya berbatu, berkerikil dan alirannya deras. Pengambilan contoh dilakukan dengan menempatkan jaring pada dasar sungai. Tempat di sekitar kerangka jaring diaduk agar makroinvertebrata yang ada di antara bebatuan terhanyut oleh air dan menyangkut di jaring. Cara tersebut dapat diulang paling sedikit 4 kali per lokasi contoh.

b. Alat dan bahan untuk pemisahan dan identifikasi

- * Baki atau nampan
- * Saringan (dengan ukuran mesh 500 μm)
- * Pinset
- * Label
- * Pensil
- * Cairan pengawet (alkohol 70% atau formalin 4%)
- * Botol plastik
- * Mikroskop binokuler dan monokuler

4.3.2. Pengambilan contoh

1. Membuat plot contoh

Setelah menentukan lokasi pengambilan contoh dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti sistem penggunaan lahan, keberadaan saluran pembuangan, jenis substrat dan pola aliran sungai, maka pada masing-masing lokasi dibuat plot contoh. Dalam kondisi lokasi yang sama minimal dilakukan tiga ulangan, namun semakin banyak ulangan semakin baik. Tahapan dalam pembuatan plot contoh adalah:

- * Pilih lokasi pembuatan contoh sesuai dengan tujuan monitoring
- * Rentangkan tali sepanjang 10 m pada pinggir sungai searah alur sungai (Gambar 4.3).
- * Ukur lebar sungai

2. Mengambil contoh air

Sebelum mengambil contoh makroinvertebra, ambillah contoh air untuk uji fisika – kimia. Hasil analisa uji fisik – kimia ini selanjutnya dijadikan sebagai data pendukung/pelengkap.

a. Alat

- * Kantong plastik berkapasitas 1 kg sesuai dengan kebutuhan jumlah contoh
- * Karet gelang
- * Spidol permanen
- * Cooler box dan ice pack atau es batu



Gambar 4.3. Plot contoh (Foto: Indra Suryadi)

b. Pengambilan contoh

- * Ambilah contoh air sebelum ada orang masuk ke dalam sungai yang ada di atas plot contoh, untuk menghindari kekeruhan air dan berpindahnya makroinvertebrata
- * Ambil contoh air dengan kantong plastik atau wadah lain yang bersih. Perkirakan volume air yang diambil agar tidak kekurangan pada saat pengujian
- * Ikat dengan karet gelang
- * Simpan air contoh disimpan di dalam 'cooler box' (kotak pendingin) yang telah berisi 'ice-pack' atau es batu
- * Beri label berisi waktu (jam, tanggal, bulan, tahun) dan tempat pengambilan contoh
- * Lakukan uji kimia yang dapat dilakukan langsung di lapangan seperti DO, suhu dan pH

3. Mengambil contoh makroinvertebrata

Pengambilan contoh makroinvertebrata dilakukan sebelum ada orang masuk ke dalam sungai yang ada di atas plot contoh dan dilakukan berlawanan arah dengan aliran sungai (dimulai dari hilir dan diakhiri di hulu).

Berdasarkan kondisi kedalaman sungai, pengambilan contoh dibedakan menjadi: (a) sungai dangkal dan (b) sungai dalam.

a. Sungai dangkal

Pengambilan contoh pada sungai dangkal relatif lebih mudah dilakukan karena bisa langsung masuk ke dalam badan sungai (Gambar 4.4). Tahap-tahap yang dilakukan adalah:

- * Ambil contoh pada plot yang telah dibuat
- * Aduk badan sungai dan dinding sungai yang menjorok ke dalam dengan cara menginjak-injak dan menggoyang-goyangkan
- * Goyangkan batu-batu besar yang ada di badan sungai, ranting-ranting dan akar tumbuhan yang menggantung di tebing sungai
- * Tempatkan jaring dan tampung aliran air yang telah diaduk (bercampur bahan terlarut)
- * Pada substrat bebatuan, tempatkan jaring pada tempat yang mudah dijangkau dan ambil contoh lebih banyak
- * Pada substrat pasir, tempatkan jaring sedikit di atas dasar sungai agar tidak banyak pasir yang terbawa
- * Masukkan contoh yang diambil dari jaring ke dalam kantong plastik
- * Periksa keberadaan makroinvertebrata pada dinding sungai yang menjorok ke dalam, batu-batuan, ranting-ranting dan akar-akar yang ada di dinding sungai serta makroinvertebrata yang bergerak di atas permukaan air
- * Kembalikan ke sungai apabila ditemukan jenis hewan lain masuk ke jaring seperti ikan dan kepiting, karena hewan yang diamati hanya kelompok makroinvertebrata
- * Periksa terlebih dahulu sebelum dikembalikan ke sungai dan pastikan bahwa tidak ada makroinvertebrata yang menempel di tubuhnya



Gambar 4. Mengambil contoh makroinvertebrata (A) mengaduk badan sungai; (B) mengambil makroinvertebrata yang ada di kayu mati dan (C) di batu-batuan (Foto: Indra Suryadi)

- * Masukkan contoh air ke dalam wadah (plastik atau botol)
- * Beri label berupa kode, waktu dan tempat pengambilan contoh pada wadah (lakukan double coding untuk memastikan label tidak hilang karena luntur oleh air atau lumpur)
- * Lakukan pengambilan contoh berikutnya dengan bergerak zig-zag dari tepi sungai satu ke tepi lainnya (Gambar 4.5)
- * Usahakan pengambilan contoh selesai dalam waktu lima (5) menit untuk satu plot sepanjang 10 m.

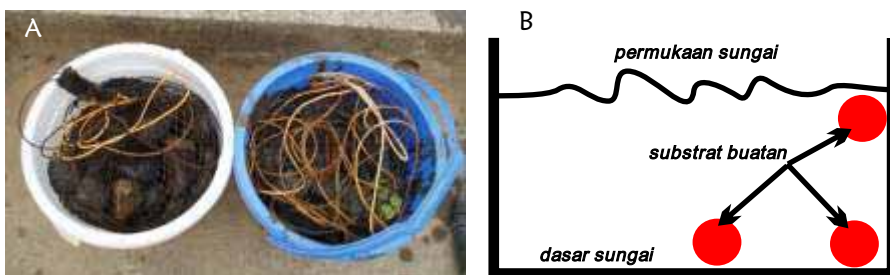


Gambar 4.5. Cara pengambilan contoh (Foto: Indra Suryadi)

b. Sungai dalam

Pengambilan contoh pada sungai dalam agak sulit dilakukan terutama untuk jenis-jenis makroinvertebrata yang hidup menempel pada substrat, karena kita tidak bisa langsung masuk ke dalam badan air. Oleh karena itu dapat di atasi dengan dua tahap yaitu:

- * Mengambil contoh pada bagian dangkal yang masih dapat dijangkau oleh jaring, misalnya pinggir sungai
 - Lakukan pengambilan contoh seperti di sungai dangkal
- * Membuat substrat buatan
 - Siapkan 3 buah jaring dan isi dengan batu-batuan (Gambar 4.6A)



Gambar 4.6. (A) Substrat buatan berupa batu-batuan; (B) Penempatan substrat buatan di dalam badan sungai (Foto: Andy Dedecker dan Ans Mouton)

- Tempatkan jaring berisi batu-batuan (substrat buatan) di badan sungai seperti Gambar 4.6B selama beberapa minggu (2-3 minggu) pada tiap-tiap plot contoh
- * Keluarkan substrat buatan dari badan sungai ketika akan diamati
- * Keluarkan batu-batuan dari dalam jaring perlahan-lahan agar makroinvertebrata tidak keluar dari jaring
- * Ambil dan letakkan makroinvertebrata yang ditemukan dalam wadah plastik
- * Ikat dengan karet gelang
- * Beri label berupa waktu dan tempat pengambilan contoh

4.3.3. Pemisahan dan identifikasi contoh

1. Pemisahan contoh

Untuk memudahkan identifikasi jenis-jenis makroinvertebrata yang telah dikumpulkan, maka dilakukan pemisahan contoh terlebih dahulu.

- * Pisahkan contoh dari lumpur, ranting maupun batu-batu yang terbawa pada saat pengambilan contoh
- * Lakukan segera untuk menghindari kerusakan pada tubuh makroinvertebrata, jangan menunda proses pemisahan sampai lebih dari dua hari
- * Ambil makroinvertebrata dari kantong contoh sedikit demi sedikit
- * Letakkan pada saringan
- * Siram dengan air bersih untuk menghilangkan lumpur
- * Ambil bagian yang tertinggal pada saringan
- * Pindahkan ke dalam wadah nampan/baki plastik (Gambar 7A)
- * Tambahkan sedikit air
- * Pisahkan untuk tiap-tiap jenis yang berbeda (Gambar 7B)
- * Masukkan ke dalam botol plastik yang telah diisi alkohol 70%
- * Hitung jumlah yang ditemukan pada masing-masing jenis
- * Beri label berisi waktu dan tempat pengambilan contoh



Gambar 4.7. (A) Contoh makroinvertebrata yang akan dipisahkan; (B) makroinvertebrata yang telah dipisahkan berdasarkan jenisnya (Foto: Indra Suryadi)

2. Identifikasi

Setelah contoh makroinvertebrata dipisahkan berdasarkan jenisnya, tahap selanjutnya adalah mengidentifikasi.

- * Ambil makroinvertebrata yang sudah dipisahkan
- * Letakkan pada cawan petri
- * Amati dan lakukan indentifikasi sampai tingkat famili bila memungkinkan, dengan mencocokkan gambar pada Lampiran 3
- * Beri label berupa nama hewan, famili, waktu dan tempat pengambilan contoh

3. Tabulasi data

Data pengamatan dibuat berdasarkan hasil indentifikasi dan jumlah individu yang ditemukan serta data fisik kimia sebagai data pendukung (Tabel 4.1).

Tabel 4.1. Lembar pengambilan contoh makroinvertebrata

Nama Plot: Nama lokasi: Tipe penggunaan lahan:	Tanggal Pengamatan: Jam: Pengamat:
1. Pengamatan Biologi	
Makroinvertebrata yang ditemukan	Jumlah individu
2. Pengamatan kimia	
pH: Oksigen terlarut:	Amonium: Nitrat:
3. Pengamatan Fisik	
Suhu (permukaan air): Suhu di dalam air (kedalaman > 1 cm): Jenis 'kelokan sungai':	Persen penutupan kanopi: Persen substrat:

4.4. Analisa data dan pendugaan kualitas air

Tahap terakhir dalam monitoring kualitas air adalah menganalisa data yang telah dikumpulkan untuk mendapatkan suatu nilai kuantitatif atau indeks. Indeks penunjuk kualitas air dapat dihitung dengan beberapa cara, mulai dari cara yang sederhana hingga yang rumit. Cara yang lebih rumit tentunya memberikan pendugaan yang lebih akurat.

4.4.1. BISEL Biotik Indeks (BBI)

Penghitungan indeks biotik BISEL didasarkan pada frekuensi ditemukan dan jumlah taksa dari tujuh kelompok makroinvertebrata indikator seperti tercantum pada Tabel 4.2. Contoh perhitungan BISEL Biotik Indeks dicantumkan pada Box 1.

Tabel 4.2. Tabel Standar BISEL Biotik Indeks

Kelompok makroinvertebrata indikator (I)	Skor (II)	Frekuensi ditemukan (III)	Jumlah taksa (IV)				
			0-1	2-5	6-10	11-15	≥16
Plecoptera (Heptagenidae)	1	≥ 2	-	7	8	9	10
		1	5	6	7	8	9
Trichoptera berkantung	2	≥ 2	-	6	7	8	9
		1	5	5	6	7	8
Ancyliidae (Gastropoda), Ephemeroptera (kecuali Ecdyonuridae)	3	≥ 2	-	5	6	7	8
		1-2	3	4	5	6	7
Aphelenterius (Hemiptera), Odonata, Gammaridae (Crustacea: Amphipoda), Mollusca (kecuali Sphaeriidae)	4	≥ 1	3	4	5	6	7
Asellidae (Crustacea: Isopoda), Hirudinea, Sphaeriidae (Mollusca), Hemiptera kecuali Aphelenterius	5	≥ 1	2	3	4	5	-
Tubificidae, Chironomus thummi-plumosus (Chironomidae)	6	≥ 1	1	2	3	-	-
Syrphidae - Eristalinae	7	≥ 1	0	1	1	-	-

Sumber: Biotic Index Manual for Secondary School, University Gent, Belgium (1999)

Keterangan:

- * Kolom I: berisi kelompok makroinvertebrata indikator yang diklasifikasikan berdasarkan tingkat sensitifitasnya terhadap polutan

- * Kolom II: berisi angka (skor) yang menunjukkan nilai sensitifitas suatu kelompok makroinvertebrata indikator terhadap polutan Semakin tinggi nilainya berarti semakin tidak sensitif
- * Kolom III: berisi frekuensi ditemukannya kelompok makroinvertebrata indikator ketika pengamatan dilakukan
- * Kolom IV: berisi nilai biotik indeks dari tiap-tiap kelompok makroinvertebrata indikator berdasarkan jumlah taksa yang ditemukan.

Berdasarkan tabel standar BBI, kualitas air diklasifikasikan menjadi 6 kelas seperti tercantum dalam Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Klasifikasi kualitas air berdasarkan BISEL Biotik Indeks

Kelas	Biotik Indeks	Kode Warna	Tingkat pencemaran
I	10-9	Biru	Terpolusi ringan atau tidak terpolusi
II	8-7	Hijau	Sedikit terpolusi
III	6-5	Kuning	Terpolusi dalam jumlah sedang
IV	4-3	Jingga	Terpolusi berat
V	2-1	Merah	Terpolusi sangat berat
	0	Hitam	Mati secara biologi

Sumber: Biotic Index Manual for Secondary School, University Gent, Belgium (1999)

4.4.2. Famili Biotik Indeks (FBI)

FBI adalah penghitungan indeks kualitas air yang dikembangkan oleh Hilsenhoff (1988) berdasarkan nilai toleransi (ketahanan terhadap perubahan lingkungan) dari tiap-tiap famili, seperti contoh pada Box 2 yang dihitung dengan rumus:

$$FBI = \frac{(x_i * t_i)}{n}$$

dimana:

x_i = jumlah individu yang ditemukan pada tiap famili

t_i = nilai toleransi dari famili

n = jumlah organisme yang ditemukan pada satu plot

Berdasarkan nilai FBI, kualitas air diklasifikasikan menjadi 7 kelas seperti tercantum pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Klasifikasi kualitas air berdasarkan Famili Biotik Indeks (Hilsenhoff, 1988)

Famili Biotik Indeks	Kualitas air	Tingkat pencemaran
0.00-3.75	Sangat baik	Tidak terpolusi bahan organik
3.75-4.25	Baik sekali	Sedikit terpolusi bahan organik
4.26-5.00	Baik	Terpolusi beberapa bahan organik
5.01-5.75	Cukup	Terpolusi agak banyak
5.76-6.50	Agak buruk	Terpolusi banyak
6.51-7.25	Buruk	Terpolusi sangat banyak
7.26-10.00	Buruk sekali	Terpolusi berat bahan organik

Contoh pendugaan kualitas air dengan metode FBI disajikan pada Box 4.3. Kedua metode pendugaan kualitas air dengan makroinvertebrata telah dilakukan oleh ICRAF di DAS Way Besai, Sumberjaya, Lampung baik dengan BBI maupun dengan FBI.

Box 1.

Contoh Penghitungan Kualitas Air Berdasarkan BISEL Biotik Indeks

Tahap penghitungan BBI

- ∞ Identifikasi taksa dan hitung jumlah individu masing-masing taksa dari satu plot contoh
- ∞ Sajikan dalam tabel seperti Tabel Box 1.1

Tabel Box 1.1. Hasil pengambilan contoh makroinvertebrata

Kode Plot: 1			
Nama Sungai: Way Petai			
Posisi geografi: 0443642; 9442914			
Tanggal Pengambilan: 3 Agustus 2005			
Tipe penggunaan lahan sekitar: hutan			
Nomor	Nama Genus	Nama Famili	Jumlah individu
1	Coleoptera	Dryopidae	1
2	Coleoptera	Haliplidae	1
3	Coleoptera	Simuliidae	10
4	Crustacea	Perlidae	17
5	Diptera	Caenidae	3
6	Diptera	Hydropsychidae	16
7	Ephemeroptera	Psephenidae	8
8	Hemiptera	Gerridae	2
9	Hemiptera	Naucoridae	2
10	Hemiptera	Veliidae	2
11	Odonata	Lestidae	2
12	Odonata	Cordulegastridae	2
13	Plecoptera	Nemouridae	2
14	Plecoptera	Palaemonidae	10
15	Plecoptera	Heptageniidae	22
16	Trichoptera	Limnephilidae	1
17	Trichoptera	Hydroptilidae	2
18	Trichoptera	Baetidae	23
Jumlah taksa = 18			Jumlah individu = 126

- ∞ Kelompokkan makroinvertebrata yang ditemukan berdasarkan kelompok indikatorsepert Tabel 4.2
- ∞ Tulis angka pada kolom skor sesuai kelompoknya
- ∞ Hitung berapa frekuensi ditemukannya
- ∞ Hitung jumlah taksa yang berbeda pada tiap-tiap kelompok
- ∞ Masukkan nilai indeks biotik berdasarkan frekuensi ditemukannya dan jumlah taksa seperti pada Tabel 4.2

Berdasarkan hasil pengamatan jenis makroinvertebrata dan nilai index biotik dari kelompok indikator, maka dapat dibuat tabel pendugaan kualitas air (Tabel Box 1.2)

Tabel Box 1.2. Nilai Biotik Indeks dari kelompok makroinvertebrata indikator yang ditemukan pada plot contoh

Kelompok makroinvertebrata indikator	Skor	Jumlah taksa	Frekuensi ditemukan	Nilai biotik indeks	Keterangan
Plecoptera	1	3	>2	7	Ditemukan 3 taksa famili Plecoptera lebih dari 2 kali selama pengamatan. Berarti Plecoptera memiliki nilai indek 7
Trichoptera	2	3	>1	6	Ditemukan 3 taksa famili Trichoptera lebih dari 1 kali selama pengamatan. Berarti Trichoptera memiliki nilai indek 6
Ephemeroptera	3	1	1	5	Ditemukan 1 taksa famili Ephemeroptera sekali selama pengamatan. Berarti Ephemeroptera memiliki nilai indek 4
Odonata	4	2	>1	3	Ditemukan 2 taksa famili Odonata lebih dari sekali selama pengamatan. Berarti Odonata memiliki nilai indeks 3
Hemiptera	5	3	>1	3	Ditemukan 3 taksa famili Hemiptera lebih dari sekali selama pengamatan. Berarti Hemiptera memiliki nilai indek 3
Tubificidae/ Chironomidae	6	-		-	Tidak ditemukan kelompok ini ketika pengamatan
Syrphidae	7	-		-	Tidak ditemukan kelompok ini ketika pengamatan

Dari Tabel Box 1.2 terlihat bahwa nilai biotik indek yang didapatkan dari hasil pengamatan berkisar antara 3-7. Kemudian diambil nilai maksimum, yaitu 7. Berdasarkan Tabel 4.3. nilai 7 berada pada kelas II yaitu sedikit terpolusi. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa kondisi air pada plot contoh tersebut dalam kondisi sedikit terpolusi.

Box 2.

Contoh Penghitungan Kualitas Air Berdasarkan Famili Biotik Indeks

Tahap penghitungan FBI:

- ∞ Identifikasi dan hitung jumlah individu pada masing-masing taksa dari satu plot contoh (Tabel Box 2.1)
- ∞ Tulis nilai toleransi masing-masing taksa berdasarkan kriteria Hilsenhoff (1998) seperti pada Lampiran 3
- ∞ Hitung FBI dengan menjumlahkan hasil perkalian jumlah individu dan nilai toleransi, kemudian dibagi dengan total individu yang ditemukan pada satu plot contoh

Tabel Box 2.1. Hasil pengamatan yang ditemukan pada plot contoh dan nilai toleransinya

Kode Plot: 1 Nama Sungai: Way Petai Posisi geografi: 0443642; 9442914 Tanggal Pengambilan: 3 Agustus 2005 Tipe penggunaan lahan sekitar: hutan				
Ordo	Famili	Jumlah individu (x_i)	Nilai toleransi (t_i)	$x_i * t_i$
Coleoptera	Dryopidae	1	5	5
Coleoptera	Haliplidae	1	7	7
Coleoptera	Simuliidae	10	6	60
Crustacea	Perlidae	17	1	17
Diptera	Caenidae	3	7	21
Diptera	Hydropsychidae	16	4	64
Ephemeroptera	Psephenidae	8	4	32
Hemiptera	Gerridae	2	5	10
Hemiptera	Naucoridae	2	5	10
Hemiptera	Veliidae	2	6	12
Odonata	Lestidae	2	9	18
Odonata	Cordulegastridae	2	3	6
Plecoptera	Nemouridae	2	2	4
Plecoptera	Palaemonidae	10	4	40
Plecoptera	Heptageniidae	22	4	88
Trichoptera	Limnephilidae	1	4	4
Trichoptera	Hydroptilidae	2	4	8
Trichoptera	Baetidae	23	3	69
Jumlah		126		475
$FBI = \frac{475}{126} = 3.77$				

Dari Tabel Box 2.1. terlihat bahwa nilai FBI = 3.77. Berdasarkan Tabel 4.4 nilai ini termasuk dalam kelas 'baik sekali' (terpolusi sedikit bahan organik). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa kualitas air pada plot ini adalah terpolusi sedikit bahan organik.

Catatan:

Pada metode ini, nilai toleransi dari famili makroinvertebrata merupakan salah satu peubah yang digunakan. Sementara itu, nilai toleransi ini ada kemungkinan berbeda antar lokasi. Oleh karena itu, penelitian mengenai nilai toleransi perlu dikembangkan lebih lanjut untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat. Berhubung hingga saat ini belum ada pustaka lain, maka penghitungan indeks untuk kualitas air pada buku ini menggunakan nilai toleransi menurut Hilsenhoff (1988) seperti tercantum dalam Lampiran 3.

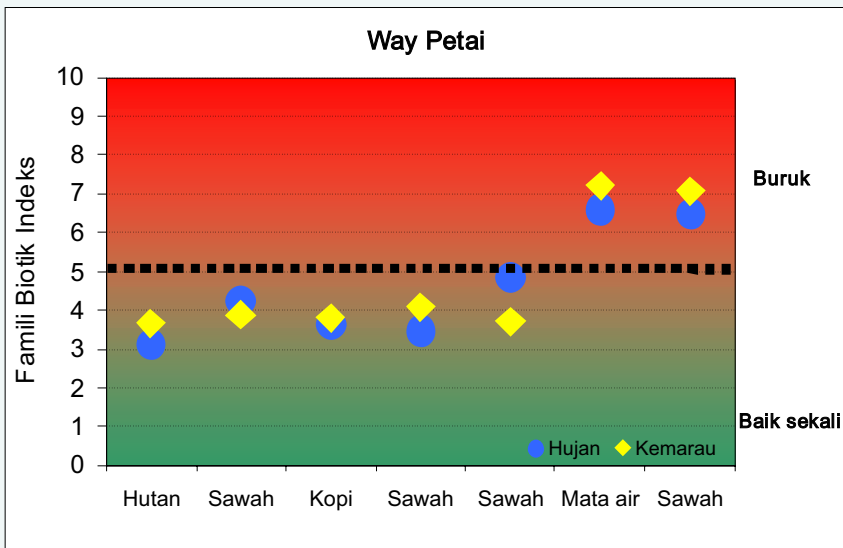
Dari kedua cara pendugaan kualitas air di atas, yaitu dengan BBI dan FBI ternyata memberikan hasil yang sama dan diperoleh kesimpulan bahwa kualitas air pada plot tersebut telah sedikit terpolusi.

Box 3.

Contoh Hasil Biomonitoring Kualitas Air di Way Petai Sumberjaya, Lampung

Alih guna lahan hutan menjadi belukar, kebun kopi, dan sawah telah terjadi di sepanjang Daerah Aliran Sungai (DAS) Way Besai, Sumberjaya, Lampung yang mengakibatkan menurunnya kualitas air sungai. Biomonitoring dengan makroinvertebrata dilakukan di hulu Sungai Way Petai yang merupakan salah satu anak Sungai Way Besai, untuk mengetahui dampak alih guna lahan terhadap kualitas air.

Enam plot contoh yang berada di hutan, belukar, kebun kopi dan sawah diambil di sepanjang Sungai Way Petai pada musim hujan dan musim kemarau tahun 2005. Hasil pengamatan dan analisa data berdasarkan Famili Biotik Indeks disajikan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8. Kualitas air di hulu Sungai Way Besai berdasarkan Famili Biotik Indeks

Sumber: Andy Dedecker dan Ans Mouton (data musim kemarau 2005);
Indra Suryadi (data musim hujan 2005)

Gambar 4.8. menunjukkan bahwa kualitas air sungai di sekitar hutan masih lebih baik bila dibandingkan dengan sawah dan kebun kopi. Sementara itu, pada lokasi mata air, kualitas air tergolong buruk. Hal ini disebabkan karena aktivitas masyarakat yang memanfaatkan mata air sebagai sumber air untuk mencuci dan mandi. Selain itu, mata air ini juga berada di dekat pasar dan sawah, sehingga sampah-sampah dari pasar dan residu pestisida dari sawah masuk ke sungai yang ada di dekat mata air. Buruknya kualitas air di sekitar mata air mempengaruhi kualitas air di sawah yang berada di hilir mata air tersebut. Kualitas air pada musim penghujan hampir sama dengan musim kemarau.

V. INDIKATOR KUANTITATIF FUNGSI DAS

5.1. Mengapa indikator fungsi DAS diperlukan?

Kegiatan rehabilitasi DAS yang terpadu memerlukan biaya dan waktu tidak sedikit. Oleh karena itu, perlu menentukan DAS mana yang memperoleh prioritas dalam kegiatan rehabilitasi. Dalam menentukan prioritas tersebut diperlukan suatu indikator kuantitatif dari fungsi DAS secara objektif. Melalui indikator ini, maka penilaian terhadap kualitas air serta respon hidrologis DAS terhadap 'rehabilitasi' yang bersifat kuantitatif dan lebih empiris dapat dilakukan.

Rasio aliran (debit) air maksimum-minimum (Q_{\max}/Q_{\min}) sampai saat ini masih digunakan sebagai indikator fungsi DAS, meskipun memiliki beberapa kelemahan, antara lain:

- * Q_{\max} dan Q_{\min} merupakan dua nilai ekstrim (terendah dan tertinggi) dari suatu sebaran data debit air. Secara statistik kedua nilai ini mempunyai sifat-sifat yang 'kurang baik', yaitu memiliki 'selang kepercayaan yang lebar', apalagi bila kedua nilai tersebut dijadikan rasio. Data ini tidak akan mewakili kondisi sebenarnya apabila diambil dari hasil pengamatan beberapa tahun di DAS yang relatif stabil
- * Ketika Q_{\min} mencapai nilai nol, rasio tidak dapat didefinisikan, sehingga penggunaan rasio terbatas pada anak sungai yang tetap memiliki aliran; selain itu, pada sebagian besar sistem, nilai Q_{\min} mencerminkan periode terpanjang tanpa hujan yang akan bervariasi dari tahun ke tahun dan secara spasial dipengaruhi oleh variabilitas hujan tanpa ada kaitannya dengan kondisi DAS, baik secara langsung maupun tidak langsung
- * Demikian pula, nilai Q_{\max} berkaitan erat dengan curah hujan maksimum, tanpa ada kaitannya dengan kondisi DAS
- * Dengan demikian rasio Q_{\max}/Q_{\min} merupakan suatu nilai/besaran yang mencerminkan variabilitas/keragaman hujan. Oleh karena itu, besaran Q_{\max}/Q_{\min} memiliki ketidakpastian dan variasi antar tahun yang tinggi. Pada akhirnya, ada kecenderungan untuk melakukan seleksi data agar mendapatkan besaran Q_{\max}/Q_{\min} yang 'realistis',



sebagian dari seri data dianggap sebagai 'pencilan' yang tidak mewakili. Hal Ini menyebabkan hasil Q_{\max}/Q_{\min} sangat subyektif

- * Rasio Q_{\max}/Q_{\min} sangat tergantung pada iklim dimana DAS itu berada (seperti durasi dan frekuensi periode kemarau/perubahan musim, curah hujan ekstrim) dan posisi sungai. Aliran air maksimum (secara rata-rata) sebanding dengan luas DAS dipangkatkan 0.7 (Rodriguez-Iturbe dan Rinaldo, 1998) dan rata-rata aliran air sebanding dengan luas DAS. Sementara itu untuk aliran minimum, aliran nol, skala perbandingan ini tidak dapat dihitung sehingga diabaikan. Geologi dari DAS mempengaruhi dinamika laju aliran. Pada daerah kapur aliran air bersifat stabil sehingga daerah ini memiliki nilai Q_{\min} yang relatif tinggi. Sedangkan pengaruh penggunaan lahan dan penutupan lahan terhadap (Q_{\max}/Q_{\min}) di suatu DAS cenderung kecil dibandingkan pengaruh iklim dan geologi yang sifatnya lebih permanen.

Meskipun besaran Q_{\max}/Q_{\min} memiliki banyak kelemahan seperti tersebut di atas, namun besaran ini masih digunakan sebagai dasar dalam menjelaskan kondisi fungsi DAS dan layak tidaknya dilakukan investasi berupa proyek 'rehabilitasi DAS'. Kenyataan di lapang menunjukkan bahwa pemanfaatan besaran Q_{\max}/Q_{\min} lebih banyak bersifat 'politis'.

Penggunaan Q_{\max}/Q_{\min} yang cukup luas menunjukkan bahwa ada kebutuhan akan indikator numerik yang mudah dipahami. Idealnya, suatu indikator fungsi DAS harus secara eksplisit memasukkan unsur curah hujan dan variasi temporalnya, sehingga mampu memisahkan pengaruh kondisi lanskap dan tutupan lahan terhadap fungsi DAS.

'Fungsi DAS' disini didefinisikan sebagai suatu keadaan bagaimana kondisi suatu lanskap mempengaruhi kualitas, kuantitas dan periode waktu suatu aliran sungai (atau air tanah), yang secara rinci dapat dijabarkan bagaimana suatu lanskap mempengaruhi: (1) transmisi/proses aliran sungai, (2) kemampuan menyangga dan (3) pelepasan secara perlahan-lahan curah hujan yang disimpan di tanah, (4) kualitas air dan (5) menjaga keutuhan tanah pada DAS. Kelima 'kriteria' tersebut terangkum dalam indikator-indikator kuantitatif berikut, yang dapat diterapkan dalam menilai DAS pada skala yang berbeda.

W1: Aliran air (total air yang terkumpul setiap kali hujan)

W2: Penyangga (debit air sungai di atas rata-rata per unit curah hujan di atas rata-rata)

- W3: Pelepasan air yang tersimpan secara perlahan-lahan sehingga berfungsi dalam menyediakan aliran pada musim kemarau
 W4: Menjaga kualitas air (relatif terhadap curah hujan)
 W5: Stabilitas lereng, tidak adanya kejadian longsor dan keseimbangan sedimentasi serta erosi

Tiap-tiap faktor tersebut tergantung pada interaksi antara curah hujan aktual, sifat DAS alami dan permanen (W_p) serta sifat-sifat DAS yang dapat dipengaruhi langsung oleh manusia (W_h), seperti disajikan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1. Penetapan fungsi DAS dengan memisahkan curah hujan dan menggabungkan ciri-ciri debit air = curah hujan * ($W_p + W_h$)

Aspek aliran sungai	Aspek curah hujan	W		
		Fungsi DAS	W_p , faktor penentu permanen dalam lansekap	W_h , faktor penentu yang dipengaruhi manusia
Total debit	Curah hujan rata-rata	Mengalirkan air (total air yang tertampung per unit curah hujan)	Cahaya matahari, aliran udara basah dan kering, geologi substrat dan perairan	Bagian DAS dengan vegetasi hijau sepanjang tahun dan vegetasi yang menggugurkan daun, fraksi lahan terlanjar, jumlah air yang diekstrak
Aliran puncak (resiko banjir)	Pola tempat-waktu curah hujan	Penyangga (aliran sungai di atas rata-rata per unit curah hujan di atas rata-rata)	Pembentukan tanah, lereng, kedalaman tanah	Perubahan permukaan tanah yang memodifikasi infiltrasi; perubahan dalam 'pengaliran' dan aliran cepat
Aliran musim kemarau	Curah hujan musiman	Air tersimpan yang dialirkan secara perlahan-lahan	Pembentukan tanah, geologi substrat	Infiltrasi dan sedikitnya vegetasi untuk menyimpan air
Kualitas air (meliputi muatan sedimen, kelayakan sebagai air minum)	Pola tempat-waktu curah hujan	Mempertahankan kualitas air (relatif terhadap curah hujan)	Cekungan sungai, penumpukan alluvial, stabilitas tanah karena adanya vegetasi alami, keberadaan hara dan bahan pencemar pada profil tanah	Perubahan dalam penutupan tanah yang memodifikasi erosi dan fungsi penyaring; sumber logam, pencemar organik, pestisida, unsur hara; perubahan vegetasi penyangga dalam riparian; perubahan dalam keseimbangan unsur hara; perubahan dalam keseimbangan air yang memodifikasi pergerakan garam dalam air tanah
Perubahan cekungan sungai	Kejadian puncak curah hujan	Stabilitas lereng dan tidak adanya kejadian longsor	Lereng, ciri mekanis profil tanah	Infiltrasi Peran perakaran pohon hidup yang masih utuh seperti jangkar dari tanah bagian atas ke bagian bawahnya. Guratan jalan pada lereng

Gambaran sederhana dari unsur-unsur W_p dan W_h yang memiliki peranan dalam berbagai fungsi DAS memperlihatkan bahwa kelima fungsi tersebut tidak selamanya memberikan respon yang sama terhadap suatu perubahan penggunaan/penutupan lahan. Indikator-indikator ini juga bervariasi

nilainya tergantung pada kondisi iklim, geologi lanskap dan perubahan sistem drainase karena terbentuknya saluran (jalan setapak, jalan), penerapan teknologi penyimpanan air sementara serta sifat tanah di badan sungai/sedimen sungai sebagai hasil interaksi sungai dengan tutupan lahan. Indikator-indikator tersebut kami sajikan sebagai 'toolbox' (perangkat peralatan), dan penelitian selanjutnya diperlukan untuk menetapkan perangkat yang tepat digunakan pada situasi tertentu.

5.2. Fungsi Transmisi

5.2.1. Neraca air pada tingkat plot

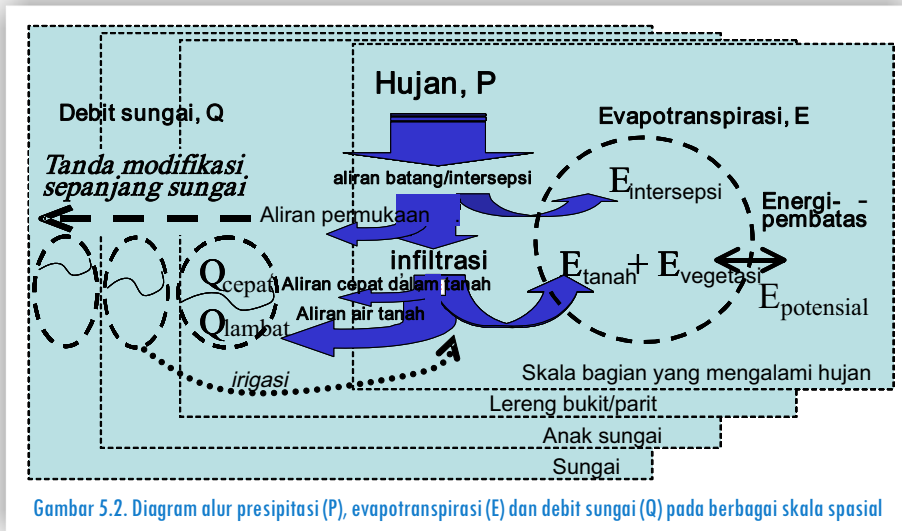
Curah hujan yang turun di suatu lokasi, dapat mencapai atmosfer atau danau/laut dengan melalui satu dari lima cara berikut (Gambar 5.1).



Lima jalur yang dapat dilalui titik hujan: dua jalur mengantarkan kembali ke atmosfer (evaporasi dari tajuk tanaman yang mengintersepsi curah hujan dan evapotranspirasi dari dalam tanah), dan tiga jalur akan mengantarkan ke jaringan sungai dalam waktu yang berbeda (aliran permukaan tanah- 'quick flow', aliran cepat di bawah permukaan tanah – 'sub surface flow' dan air tanah yang dialirkan secara perlahan-lahan – 'low flow')

Secara sederhana ada tiga jalur hidrologis yang dapat dilalui air untuk mencapai sungai: secara langsung melalui aliran permukaan tanah (dalam waktu kurang lebih satu jam setelah turun hujan, tergantung pada jarak ke

sungai), melalui lapisan dalam tanah ('aliran dalam tanah' atau 'aliran cepat dalam tanah' – dalam waktu kurang lebih satu hari) atau aliran dalam tanah (air tanah) (dalam hitungan waktu mingguan atau bulanan) (Gambar 5.2)



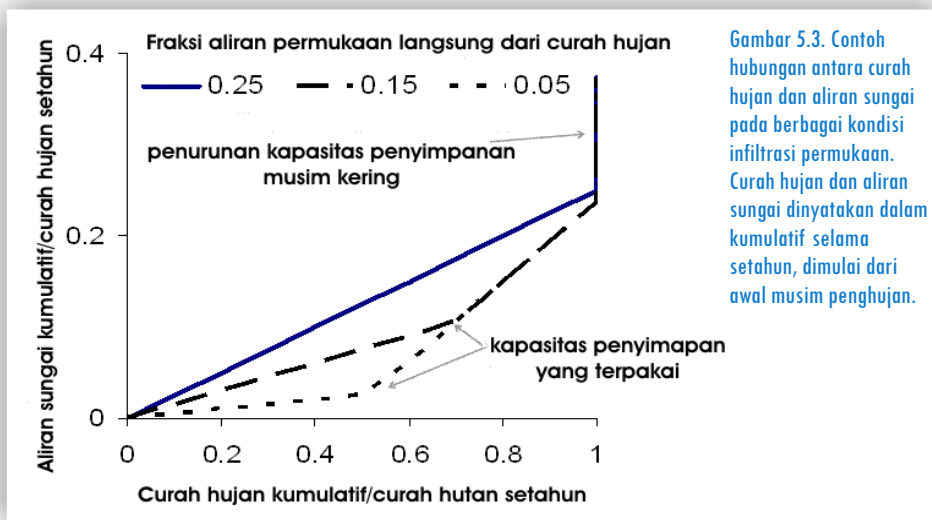
Penutupan/penggunaan lahan dapat mempengaruhi besarnya perbandingan antara berbagai aliran air, yakni dengan melalui:

- * pemadatan tanah, yang khususnya akan mempengaruhi makroporositas tanah. Makroporositas berkaitan dengan perbedaan antara 'kejenuhan' dan 'kapasitas lapang', (atau volume air yang akan hilang dari tanah selama 24 jam, seperti digunakan dalam definisi kapasitas lapang), kerapatan isi tanah yang memiliki hubungan kuantitatif dengan makroporositas, fungsi pedotransfer (yang menghitung pengaruh tekstur tanah dan bahan organik tanah berdasarkan kerapatan isi tanah 'acuan'). Proses pemadatan tanah tidak dapat dipulihkan dengan mudah
- * pembentukan kerak permukaan tanah ('surface sealing'), berhubungan langsung dengan hilangnya mineral permukaan tanah karena sinar matahari dan curah hujan langsung setelah hilangnya atau rusaknya lapisan seresah; pembentukan kerak tanah dapat dipulihkan dengan mudah, dengan memadukan dan memanfaatkan pengaruh penutup tanah dan biota tanah.

Jika pemadatan tanah terjadi karena proses 'degradasi', pengaruh pemadatan tanah ini relatif lebih kecil selama periode awal musim hujan, karena tanah masih mampu menyimpan air. Pada akhir musim penghujan, ketika tanah

hampir jenuh, mulai terjadi perbedaan yang nyata pada kemampuan penyimpanan air pada tanah. sehingga terjadi pergeseran dari aliran dalam tanah – ‘sub surface flow’ menjadi aliran permukaan tanah – ‘quick flow’ dan mengakibatkan puncak aliran yang lebih tajam bila digambarkan dengan hidrograf.

Jika pembentukan kerak permukaan merupakan isu utama, berarti kerusakan dapat diperbaiki. Pada situasi seperti ini umumnya aliran permukaan akan tinggi selama musim hujan.



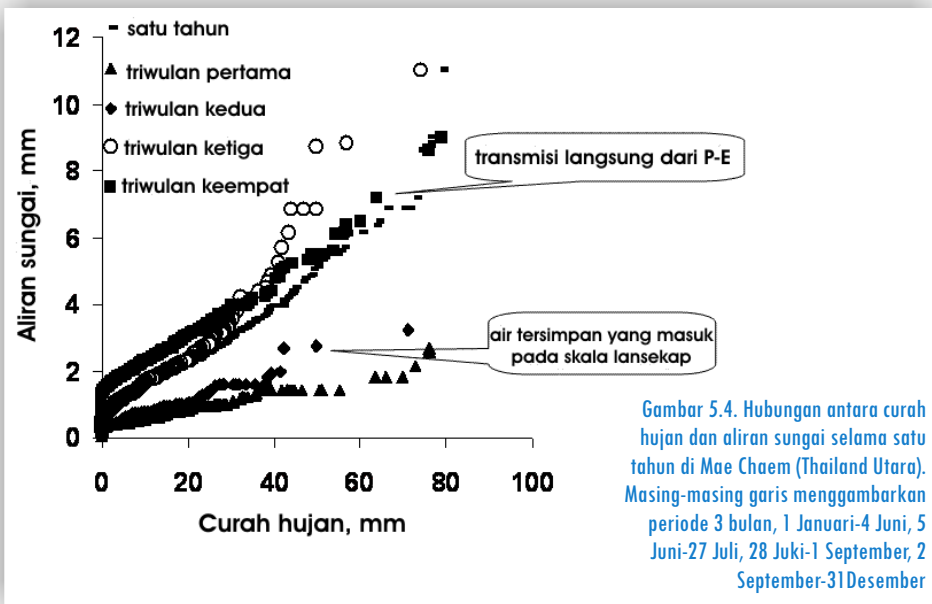
Gambar 5.3. Contoh hubungan antara curah hujan dan aliran sungai pada berbagai kondisi infiltrasi permukaan. Curah hujan dan aliran sungai dinyatakan dalam kumulatif selama setahun, dimulai dari awal musim penghujan.

Grafik antara aliran sungai kumulatif dengan curah hujan kumulatif dapat memberikan gambaran mengenai pengaruh musim terhadap pola aliran sungai pada suatu DAS, terutama dalam hal menyimpan air dan mengalirkannya secara perlahan-lahan. Grafik berdasarkan rasio dari data kumulatif seperti ini masih dapat dimanfaatkan meskipun data curah hujan yang ada tidak merepresentasikan variabilitas spasial yang umumnya tinggi. Data curah hujan yang tidak representatif, apabila dianalisa secara harian, tidak akan mampu menunjukkan hubungan antara puncak curah hujan dengan puncak aliran sungai. Namun, dengan memanfaatkan data kumulatif, kekurangan data tersebut dapat diatasi.

Berdasarkan pengalaman kami dalam menganalisa pola musiman aliran sungai di beberapa DAS, kami mendapatkan satu indikator baru, yaitu kumulatif aliran sungai relatif pada kondisi 25% dan 75% curah hujan kumulatif, dihitung selama periode satu tahun. Rasio ini dapat digunakan sebagai indikator penyebab utama terjadinya 'aliran cepat': apakah berkaitan

dengan kondisi permukaan tanah atau karena keterbatasan kemampuan penyimpanan air dalam tanah. Apabila 'aliran cepat' terjadi karena kondisi permukaan tanah, maka proyek 'rehabilitasi lahan' dengan penanaman pohon mempunyai peluang untuk berhasil dan efektif dalam memperbaiki fungsi hidrologis DAS. Keberhasilan ini dapat dicapai dengan catatan bahwa penambahan penggunaan air oleh pohon yang ditanam (transpirasi) harus dapat diimbangi oleh infiltrasi curah hujan tambahan, sehingga dapat terjadi pengaruh positif (penambahan) terhadap jumlah aliran dasar. Apabila aliran cepat terjadi karena kejenuhan tanah di DAS dan kurangnya kapasitas penyimpanan air, maka proyek 'rehabilitasi lahan' tidak akan banyak memberikan pengaruh, meskipun telah mampu mengkondisi penutupan tanah/lahan.

Curah hujan tahunan pada triwulan pertama dan kedua dalam Gambar 5.4 jelas berbeda dengan triwulan ketiga dan keempat. Pada grafik ini dapat dilihat bahwa kontribusi curah hujan terhadap aliran sungai terbesar terjadi pada triwulan ketiga (yang berlangsung selama kurang lebih satu bulan). Pola ini menggambarkan kondisi kekurangan air (pada triwulan pertama), proses pengisian/penyimpanan air dalam tanah (triwulan kedua) dan peningkatan aliran cepat pada triwulan ketiga ketika kondisi tanah hampir mendekati kapasitas lapang.



5.3. Fungsi Penyangga

Proses kondensasi menyebabkan perubahan wujud dari uap air menjadi air. Ketika suhu udara di atmosfer menurun, uap air terkondensasi pada partikel-partikel debu kecil di udara yang kemudian mengumpul menjadi awan dan selanjutnya menjadi hujan. Air dapat berubah kembali menjadi uap, melalui proses evaporasi. Berlawanan dengan proses kondensasi, evaporasi membutuhkan peningkatan suhu udara. Radiasi matahari akan meningkatkan suhu air sehingga permukaan molekul-molekul air memiliki energi yang kuat untuk melepaskan ikatan molekulnya dan terlepas menjadi uap air yang tidak terlihat.

Dari dua kejadian tersebut, dapat disimpulkan bahwa perubahan bentuk air sangat berkaitan dengan kesetimbangan energi di bumi. Radiasi matahari memanaskan permukaan bumi dan menyebabkan perbedaan tekanan udara. Pada bagian bumi yang mendapatkan paling banyak energi matahari, yaitu daerah tropik, memiliki tekanan udara yang lebih rendah. Sementara itu, udara bergerak dari tempat yang memiliki tekanan tinggi ke tempat yang memiliki tekanan rendah. Dengan demikian terjadi aliran udara besar di daerah tropik. Kondisi inilah yang menerangkan dasar penyebaran iklim pada daerah tropik dan sub tropik.

Evaporasi dari permukaan basah ke udara yang hampir jenuh dapat terjadi pada jaringan tanaman, yang dikendalikan oleh penutupan dan pembukaan stomata (lubang kecil pada permukaan batang dan daun tumbuhan). Istilah evapotranspirasi digunakan pada evaporasi air dari permukaan yang basah disertai dengan proses 'transpirasi' yaitu evaporasi air dari jaringan tanaman. Sifat-sifat air lainnya mudah dipahami, yakni air mengalir dari tempat yang lebih tinggi ke tempat yang lebih rendah, dan mengikuti hukum kesetimbangan massa: jumlah aliran air yang masuk dalam suatu sistem sama dengan jumlah aliran air yang keluar. Dengan catatan, perhitungan dilakukan selama periode dimana komponen 'penyimpanan air dalam tanah' mempunyai nilai nol.

Hukum kesetimbangan massa ini tidak berlaku ketika komponen penyimpanan air mendekati jenuh. Pada periode ini, jumlah aliran air yang keluar dari sub-sistem dapat berbeda dengan jumlah aliran air yang masuk. Biasanya, aliran air yang keluar akan lebih lambat dan merata dibandingkan dengan aliran air yang masuk. Dengan sifat seperti ini, maka kemampuan sistem dalam mengubah variasi aliran air antar waktu disebut sebagai fungsi 'penyangga'. Lanskap yang ditumbuhi vegetasi dapat mengubah pola sementara curah hujan yang masuk, dalam pengertian aliran air keluar yang

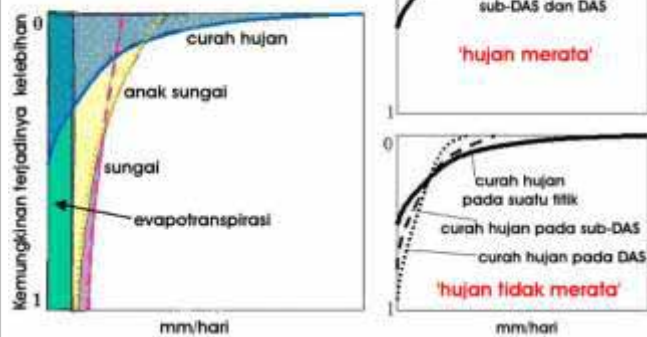
berbentuk aliran permukaan dan aliran tanah akan berbeda dengan jumlah presipitasi yang masuk. Secara total, jumlah air dalam sistem akan sama dengan jumlah presipitasi dikurangi evaporasi.²

Presipitasi berupa hujan, secara parsial akan mampu disangga oleh tanah, hingga kondisi DAS melebihi kapasitas penyimpanan dan jumlah air yang disangga menjadi nol. Kesetimbangan ini berimplikasi

bahwa aliran puncak berkurang, dan aliran lambat relatif meningkat bila dibandingkan dengan aliran air yang masuk.

Berdasarkan persepsi umum, fungsi penyangga DAS berkaitan erat dengan keberadaan 'hutan' meskipun pada kenyataannya sebagian besar air akan tersimpan di dalam tanah bukan di vegetasi pohon. Jenis penutupan lahan yang mampu meningkatkan penyerapan air hujan secara cepat oleh tanah mempunyai kontribusi terhadap fungsi penyangga lanskap, dalam pengertian berkurangnya proposi aliran permukaan dibandingkan dengan jumlah curah hujan. Struktur fisik yang dapat menyimpan air di permukaan, seperti sawah, dapat juga mengurangi aliran air permukaan relatif terhadap air hujan. Secara prinsip, kemampuan sawah ini sebanding dengan hutan dari sisi kemampuannya menyangga air secara temporer. Untuk membandingkan secara lebih tepat bagaimana suatu sistem, baik itu berupa sawah, hutan maupun sistem 'penyangga' air lainnya, kita perlu memiliki indikator yang dapat mengukur fungsi penyangga secara kuantitatif. Indikator ini akan

Evapotranspirasi



Gambar 5.5. Perbandingan kemungkinan terjadinya kelebihan curah hujan, evapotranspirasi, debit anak sungai dan sungai (daerah bagian kiri kurva debit anak sungai dan sungai sebanding dengan daerah bagian kiri dari kurva curah hujan dikurangi dengan daerah sebelah kiri kurva evapotranspirasi bila perubahan pada penyimpanan air dapat diabaikan); bentuk kurva curah hujan pada tingkat titik pengamatan, anak sungai dan sungai menunjukkan peningkatan dalam 'menyangga'; gambar sebelah kanan menunjukkan derajat ketergantungan dari 'ketidakmerataan' curah hujan, jumlah air yang masuk per hari dapat berubah dari titik pengamatan tunggal di bagian atas sub-DAS dan DAS yang membentuk 'penyangga' ditunjukkan pada gambar sebelah kiri)

² Kecuali jika presipitasi berupa salju dan salju terus menumpuk sehingga air akan tersimpan dalam bentuk padat. Dalam hal ini, jumlah air yang terbentuk pada saat mencair mungkin lebih kecil dibandingkan jumlah presipitasi awal.

dapat memberikan pengertian yang lebih mendalam mengenai faktor-faktor yang dapat meningkatkan atau menurunkan fungsi 'penyangga'. Indikator kuantitatif fungsi penyangga dapat kita manfaatkan untuk dinamika kemampuan menyangga DAS dan keterkaitannya dengan vegetasi, tanah dan curah hujan (atau 'presipitasi', termasuk di dalamnya hujan salju). Indikator ini dapat didasarkan pada perbandingan langsung antara pola aliran masuk dan keluar dari waktu ke waktu dan pada berbagai skala spasial. Perbandingan ini dapat didasarkan pada suatu kejadian tunggal (seperti yang umum dilakukan dalam hidrologi ketika debit sungai diukur dan dibandingkan dengan curah hujan saat itu), atau berdasarkan frekuensi sebaran kejadian, misalnya pola tahunan aliran sungai dibandingkan dengan pola tahunan curah hujan. Dalam satuan waktu satu tahun, neraca air dapat dijabarkan dalam rumus sederhana berikut:

$$P = Q + E + \Delta S = \sum p_i = \sum q_i + \sum e_i + \sum \Delta s_i \quad (5.1)$$

dimana:

P dan p_i = total presipitasi tahunan dan presipitasi waktu ke-i, dalam liter per m² atau mm,

Q dan q_i = total aliran sungai tahunan atau aliran sungai waktu ke-i, dalam liter per m² atau mm,

E dan e_i = total evapotranspirasi tahunan atau evapotranspirasi waktu ke-i, dalam liter per m² atau mm,

ΔS dan Δs_i = perubahan (plus atau minus) kapasitas penyimpanan total tahunan atau perubahan (plus atau minus) dalam kapasitas penyimpanan pada waktu ke-i, dalam liter per m² atau mm.

Untuk setiap komponen dalam rumus neraca air, kita dapat mengurangi dengan rata-ratanya. Selanjutnya kita dapat memisahkan masing-masing hasilnya menjadi bagian yang positif (di atas rata-rata) dan negatif (di bawah rata-rata). Nilai mutlak dari masing-masing kedua bagian ini akan sama.

$$\begin{aligned} \left| p_i - \frac{P}{n} \right| > 0 &= - \left| p_i - \frac{P}{n} \right| < 0 \\ \left| q_i - \frac{Q}{n} \right| > 0 &= - \left| q_i - \frac{Q}{n} \right| < 0 \\ \left| e_i - \frac{E}{n} \right| > 0 &= - \left| e_i - \frac{E}{n} \right| < 0 \\ (\Delta s_i - \Delta S) > 0 &= - (\Delta s_i - \Delta S) < 0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Melalui proses manipulasi matematis yang sederhana dari persamaan 5.1 dapat kita peroleh persamaan:

$$q_i - \frac{Q}{n} > 0 + e_i - \frac{E}{n} > 0 + \Delta s_i - \frac{\Delta S}{n} > 0 = p_i - \frac{P}{n} > 0 \quad (5.3)$$

Dari persamaan di atas kita dapat mendefinisikan enam indikator baru, dimana tiga diantaranya berkaitan dengan fungsi penyangga:

$$U_q = \frac{q_i - \frac{Q}{n} > 0}{p_i - \frac{P}{n} > 0} \quad U_q = \text{indikator ketidakmerataan aliran sungai relatif terhadap curah hujan}$$

$$U_e = \frac{e_i - \frac{E}{n} > 0}{p_i - \frac{P}{n} > 0} \quad U_e = \text{indikator ketidakmerataan evapotranspirasi relatif terhadap curah hujan}$$

$$U_{\Delta s} = \frac{\Delta s_i - \frac{\Delta S}{n} > 0}{p_i - \frac{P}{n} > 0} \quad U_{\Delta s} = \text{indikator ketidakmerataan perubahan kemampuan penyimpanan relatif terhadap curah hujan}$$

$$B_q = 1 - U_q \quad B_q = \text{indikator penyangga aliran sungai terhadap presipitasi}$$

$$B_e = 1 - U_e \quad B_e = \text{indikator penyangga aliran evapotranspirasi relatif terhadap presipitasi}$$

$$B_{\Delta s} = 1 - U_{\Delta s} \quad B_{\Delta s} = \text{indikator penyangga perubahan dalam kemampuan penyimpanan air pada DAS relatif terhadap presipitasi}$$

Dan persamaan terakhir adalah:

$$B_q = U_e + U_{\Delta s} \quad (5.4)$$

Persamaan 5.4. menyatakan bahwa fungsi penyangga aliran sungai relatif terhadap curah hujan dapat ditingkatkan dengan meningkatkan 'ketidakmerataan' evapotranspirasi (misalnya dengan menanam vegetasi yang secara aktif hanya melakukan transpirasi pada musim hujan) atau dengan meningkatkan kemampuan kapasitas penyimpanan air yang berfluktuasi tergantung pada kondisi DAS harian. Hal yang menarik di sini, yang penting bagi kemampuan fungsi penyangga bukanlah kapasitas total penyimpanan dalam DAS, melainkan kemampuan untuk menanggapi fluktuasi curah hujan harian. Umumnya nilai U_e akan kecil, karena tumbuhan memiliki kemampuan yang baik dalam mencari dan memanfaatkan air tersimpan di dalam tanah untuk mempertahankan laju evapotranspirasi harian yang konstan (besarnya kurang lebih mendekati laju 'potensial' pada kondisi kanopi daun telah menutup sempurna). Dengan demikian, fungsi penyangga aliran sungai sangat tergantung pada perubahan kemampuan penyimpanan air pada DAS³ setiap harinya.

Contoh di atas menggunakan data harian untuk menghitung p_i , q_i , e_i , s_i dan indikator yang dihasilkan berlaku untuk skala waktu tersebut. Kita dapat pula menghitung indikator yang sama dengan skala waktu yang berbeda, misalnya jam, minggu, bulan atau tahun), sehingga kita memperoleh suatu seri dari indikator-indikator penyangga tadi. Selanjutnya kita dapat mengkaji hubungan antara indikator-indikator ini dengan skala temporal. Kajian yang berkaitan dengan skala bukanlah hal yang sepele, dan perlu adanya kejelasan mengenai skala waktu yang digunakan dalam menghitung indikator penyangga ini.

Pada suatu DAS, lokasi penyimpanan air sementara dapat terjadi di beberapa lokasi, dengan kapasitas total dan laju penurunan yang berbeda-beda. Secara keseluruhan, fungsi penyangga aliran sungai tergantung pada karakteristik curah hujan, tanah, vegetasi dan sistem penyimpanan air di permukaan (maupun bawah permukaan) baik yang bersifat alami maupun buatan manusia (Table 5.2).

³ Curah hujan tinggi pada akhir musim penghujan cenderung menyebabkan banjir di daerah hilir, karena pengelola dam umumnya pada saat menginginkan DAM penuh terisi air agar air tersedia di musim kemarau. Mengurangi resiko banjir berarti menurunkan kapasitas penyimpanan air di dam dibawah titik maksimum. Pengelola DAS perlu membuat aturan yang jelas berkaitan dengan untung ruginya kebijakan ini.

Tabel 5.2. Komponen-komponen neraca air dan penyimpanan sementara pada skala DAS yang berperan sebagai penyangga aliran sungai relatif terhadap curah hujan pada berbagai skala ruang dan waktu; '+' atau '-' menunjukkan pengaruh yang diharapkan

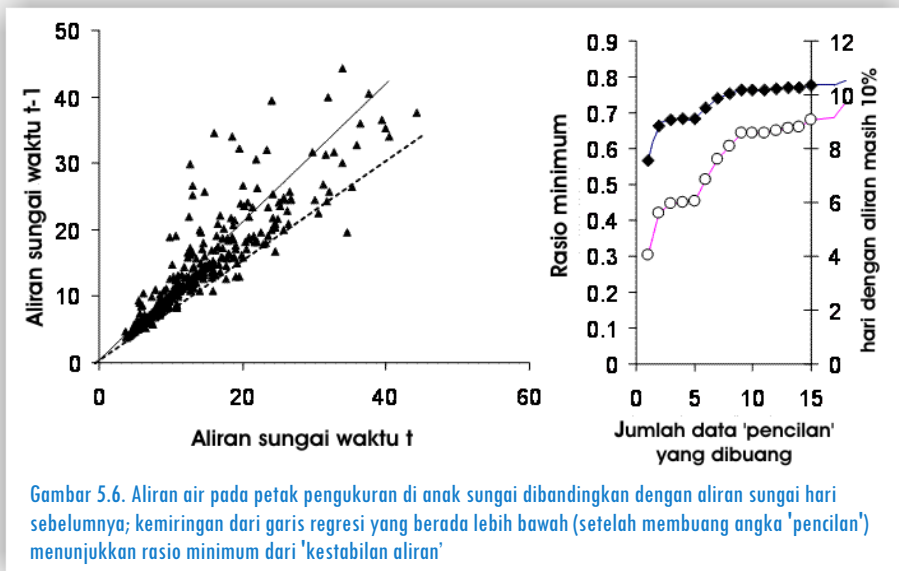
Proses kontribusi 'penyangga' pada aliran sungai relatif terhadap curah hujan	Pengaruh waktu aliran relatif terhadap curah hujan pada berbagai skala						
	Pengaruh terhadap debit tahunan	Penunjuk skala waktu	Patch (m ²), Lapangan (ha)	Lereng bukit (km ²)	Parit/ subDAS (10 km ²)	Sungai/ DAS (100- 1000 km ²)	Basin (1000- 10,000 km ²)
Tidak sinkron antara ruang dan curah hujan	-	hari/ bulan	- , -	0	+	++	+++
Intersepsi tajuk: penyimpanan => evaporasi	++	hari	++ , +	+	+	+	+
Intersepsi tajuk: tertundanya aliran batang	-	< jam	+ , 0	-	-	-	-
Infiltrasi ke dalam tanah: pengisian kapasitas lapang, penggantian air tanah yang diserap tumbuhan	+++	hari/ minggu	++ , ++	++	++	++	++
Penyimpanan air permukaan pada tempat yang rendah	-	jam/ hari	+ , +	0	-	-	-
Aliran dalam tanah ke parit melalui lapisan tanah bagian atas	-	jam	0 , +	+	0	-	-
Aliran dalam tanah ke parit melalui lapisan tanah bagian bawah	-	jam/ hari	0 , +	++	+	0	-
Aliran ke parit melalui air tanah	-	hari/ minggu	0 , +	++	++	+	0
Hambatan aliran pada parit	-	jam/ hari	0 , 0	0	+	+	0
Parit yang berhubungan dengan lahan basah	-	hari/ minggu	0 , 0	0	++	+	+
Penyimpanan sementara air yang mengalir di atas tanah	-	hari/ minggu	0 , 0	0	++	++	+
Dam kecil untuk irigasi lokal	-	minggu/ bulan	0 , 0	+	+	+	+
Waduk	+	bulan	0 , 0	0	0	+	+
Dam untuk penyimpanan antar tahun	+	tahun	0 , 0	0	0	0	+
Ringkasan per group:							
Vegetasi	++	hari	++ , +	+	+	+	+
Pengelolaan tanah	-	jam/ hari	0 , +	++	+	0	-
Teknik	-	minggu/ bulan	0 , 0	+	++	++	++
Iklim	-	hari/ bulan	- , -	0	+	++	+++

Berdasarkan pengalaman dalam melakukan penilaian fungsi DAS di berbagai lokasi, indikasi sementara menunjukkan bahwa vegetasi (termasuk pepohonan) berpengaruh besar terhadap fungsi penyimpanan pada skala plot atau lapangan, pengelolaan tanah pada skala lereng bukit, teknik konstruksi pada skala sub-DAS dan iklim pada skala DAS.

5.4. Fungsi pelepasan air secara bertahap

Aliran sungai selama periode kering atau aliran dasar sangat diinginkan oleh para pemangku kepentingan/pengguna air di daerah hilir, karena aliran air tersebut dapat menjaga kestabilan sarana pengangkutan dan ketersediaan air. Untuk menunjukkan kestabilan aliran sungai, dapat disusun suatu plot sederhana antara aliran air hari ini dengan aliran air kemarin, yang disebut juga plot persistence (Gambar 5.6). Plot ini dapat digunakan untuk memprediksi berapa besar aliran air hari ini berdasarkan aliran air hari sebelumnya. Tanpa adanya hujan, aliran sungai dapat dipastikan menurun. Kondisi yang baik bagi pengguna air sungai adalah jika penurunan ini berlangsung perlahan.

Secara umum, plot ini akan menunjukkan pola menyebar dengan bagian segitiga bawah yang nyaris kosong. Suatu garis melalui titik (0,0) dan mencakup semua titik yang berada di atasnya, mencerminkan prediksi aliran minimum yang mungkin terjadi. Bagaimana rasio minimum ini meningkat apabila satu persatu pencilan (N_{outliers}) dihilangkan, menyatakan fraksi kestabilan aliran sungai (q_p), yang dinyatakan dalam $100 * (1 - N_{\text{outliers}}/N_{\text{total}})$ persen dari total jumlah hari (Persamaan 5.6).



Kestabilan aliran dapat juga dinyatakan dalam jumlah hari yang diperlukan hingga aliran sungai mencapai tingkat Y% dari aliran saat ini: $N_{\text{daytoY\%}} = (\log(Y)/\log(100))/q_p$.

Dengan memperhatikan dan memeriksa secara visual grafik kestabilan aliran, kita dapat mengetahui jika ada 'patahan' atau aliran terputus pada titik-titik tertentu. Contoh pada Gambar 5.6 menunjukkan pola aliran sungai yang relatif stabil.

'Adanya data 'pencilan' pada grafik kestabilan aliran sungai mungkin mencerminkan terjadinya kesalahan pengukuran – meskipun demikian kondisi ini sebenarnya mungkin saja terjadi dan dapat dijelaskan dengan konsep hidrologi. Jika sebagian aliran air di sungai terjadi akibat adanya aliran permukaan (overland flow) sebelum tanah mencapai titik jenuh, maka kemungkinan besar aliran air sungai keesokan harinya akan menurun. Tetapi jika aliran permukaan terjadi pada saat tanah telah mencapai kondisi jenuh, maka aliran air pada keesokan harinya akan tetap tinggi. Dengan demikian, tingginya frekuensi 'data pencilan' dapat diinterpretasikan sebagai indikator adanya 'aliran cepat' (banjir banding) dan degradasi lahan.

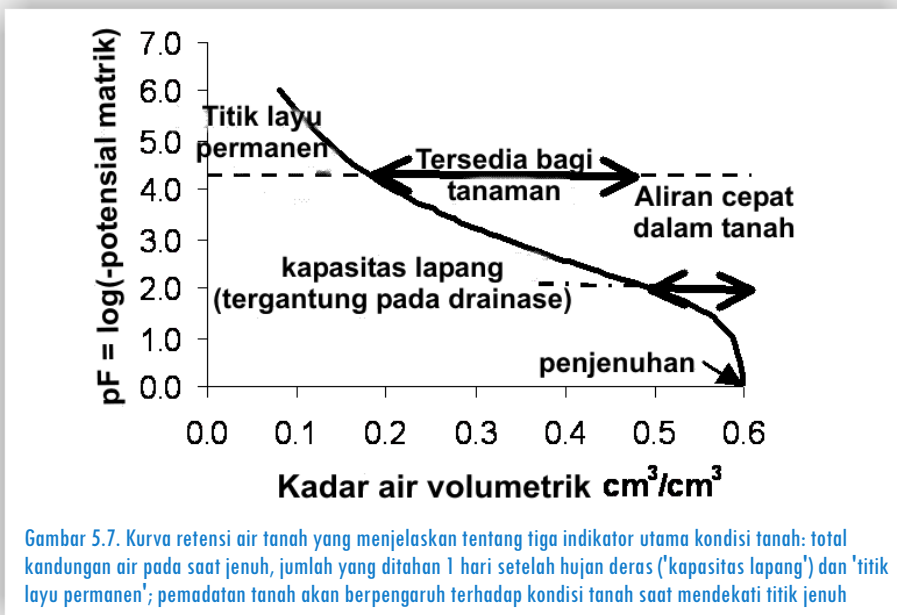
5.5. Fungsi mempertahankan kualitas air

Apabila kita berbicara mengenai fungsi DAS yang berkaitan dengan kualitas air, seringkali yang menjadi topik hangat adalah masalah erosi dan sedimentasi partikel tanah. Padahal, secara ekologis kerusakan kualitas air yang utama berkaitan erat dengan pencemaran karena unsur hara, pestisida, dan bahan-bahan organik yang mengurangi ketersediaan oksigen di air, seperti yang telah dijelaskan pada Bab III.

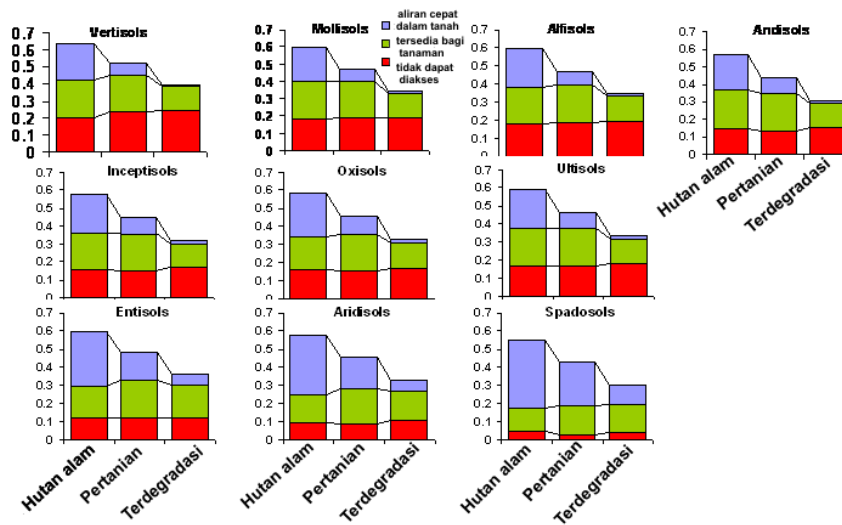
Unsur-unsur yang dapat mencemari air antara lain unsur hara, logam berat seperti merkuri (Hg) yang biasanya digunakan dalam penambangan emas, arsenik (As) yang bersumber dari tanah dan terlarut dalam air tanah, kemudian bergerak dari sumber-sumber air tanah), bahan organik yang dapat terurai pada aliran air serta bahan-bahan biologi aktif (pestisida, obat-obatan). Untuk mengetahui ada tidaknya bahan pencemar di aliran sungai/danau, diperlukan pengukuran khusus dan penelusuran yang rinci jenis dan asal sumber pencemaran tersebut. Sebenarnya mencegah pencemaran sebelum terjadi jauh lebih baik daripada melakukan penanggulangan setelah ada kejadian. Namun, pengambil kebijakan biasanya membutuhkan bukti nyata sebelum mereka tergerak hatinya dan terbuka matanya akan adanya resiko pencemaran. Untuk dapat melihat terjadinya pencemaran secara nyata, dibutuhkan waktu yang lama dan sangat tergantung pada curah hujan, kondisi hidrologi dan seberapa baik 'filter' alami yang ada di DAS. Sayangnya, apabila pencemaran sungai telah terlihat dengan jelas, maka akan dibutuhkan waktu yang lebih lama lagi untuk mengatasinya.

5.6. Fungsi mempertahankan kondisi tanah yang baik

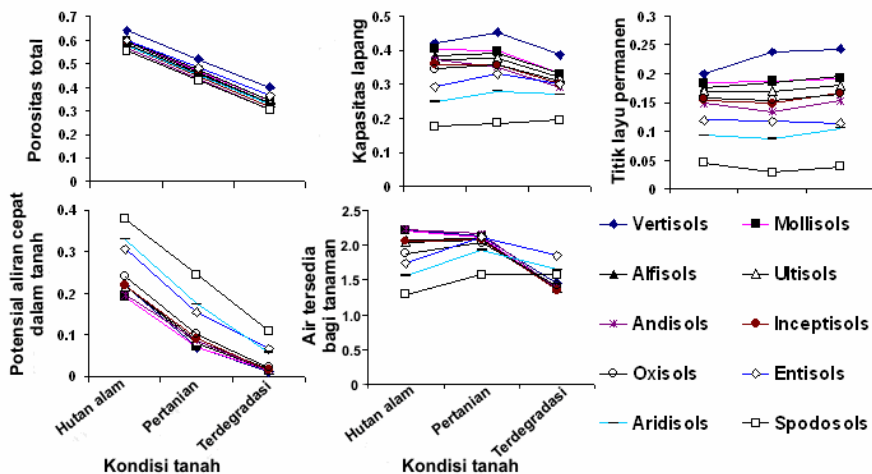
Tanah di hutan tua sering dijadikan sebagai acuan dalam menilai terdegradasi tidaknya tanah. Degradasi tanah melibatkan hilangnya bahan organik, penurunan ketersediaan unsur hara, perubahan biota tanah dan jaring makanan di dalam tanah, pemadatan tanah serta perubahan retensi air. Perubahan retensi tanah berkaitan dengan kapasitas tanah dalam menyerap air selama kejadian hujan, melepaskan air setelah kejadian hujan hingga tanah mencapai 'kapasitas lapang' dan mempertahankan air pada tekanan yang sesuai bagi tanaman untuk menyerap dan mengambil air tersebut (Gambar 5.7).



Pengaruh pemadatan tanah bervariasi tergantung pada tipe tanah, namun secara umum dapat diperkirakan dengan menghubungkan kerapatan isi aktual (masa per unit isi) dengan suatu nilai 'acuan' yang dapat dihitung berdasarkan tekstur tanah (pasir, debu, liat dan kandungan bahan organik tanah), seperti yang dilakukan Wösten et al. (1998) pada sejumlah besar data tanah-tanah pertanian. Dengan menggunakan pendekatan perhitungan seperti ini, kita dapat memperkirakan bahwa umumnya tanah bagian atas (topsoil) pada hutan alami memiliki kerapatan isi sekitar 70% dari nilai acuan, sementara pada tanah yang mengalami pemadatan cukup berat, kerapatan isinya mencapai 1,3 kali dari nilai acuan.



Gambar 5.8. Batas atas pengaruh pemadatan tanah terhadap kurva retensi air yang diduga menggunakan fungsi pedotransfer dari Wösten et al. (1998) berdasarkan data tanah di daerah tropik (Suprayogo et al., 2003), dengan mengasumsikan bahwa tanah hutan alam memiliki berat isi 0,7 kali tanah pertanian, sementara tanah yang terdegradasi meningkat kerapatannya hingga mencapai 1,3 kali.



Gambar 5.9. Batas atas pengaruh pemadatan tanah terhadap kurva retensi air yang diduga menggunakan fungsi pedotransfer dari Wösten et al. (1998) berdasarkan data tanah di daerah tropik (Suprayogo et al., 2003), dengan mengasumsikan bahwa tanah hutan alam memiliki berat isi 0,7 kali tanah pertanian, sementara tanah yang terdegradasi meningkat kerapatannya hingga mencapai 1,3 kali dan bagaimana pengaruhnya terhadap kelompok tanah yang berbeda.

Berdasarkan data 10 kelompok tanah yang dikompilasi oleh Suprayogo et al. (2003), secara rata-rata perubahan 'hutan' ke 'lahan pertanian yang telah dikelola dalam jangka waktu yang panjang' akan mengalami penurunan kapasitas penyimpanan air sebesar $0.136 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, setara dengan kemampuan menyimpan air hujan sebesar 25 mm pada tanah dengan lapisan atas sedalam 20 cm. Pada kejadian hujan di hari berikutnya tanah akan tetap mampu menyimpan/menampung air kembali, karena pada saat ini air telah dialirkan ke sungai atau disimpan di lapisan bawah tanah apabila belum mengalami kejenuhan. Jika lahan pertanian ini berlanjut berubah menjadi 'lahan terdegradasi', maka akan terjadi lagi penurunan kapasitas penyimpanan sebesar $0.081 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (setara dengan kemampuan menyerap air sebesar 15 mm air hujan). Hilangnya kapasitas penyimpanan sebesar ini kemungkinan akan menyebabkan terjadinya 'aliran permukaan' yang dapat memicu banjir bandang dan erosi.

Dampak degradasi tanah terhadap hilangnya air yang tersedia untuk tanaman relatif lebih kecil jika dibandingkan dampak terhadap hilangnya kapasitas penyimpanan air yang berkaitan dengan aliran permukaan. Bahkan, perubahan hutan menjadi lahan pertanian dapat meningkatkan ketersediaan air bagi tanaman sebesar $0.01 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, sementara pemadatan tanah lebih lanjut akan menyebabkan hilangnya ketersediaan air bagi tanaman sebesar $0.055 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Dengan demikian, dampak pemadatan tanah karena adanya jalan setapak akan jauh lebih berpengaruh terhadap meningkatnya aliran air (aliran permukaan, aliran di bawah permukaan dan aliran dalam) dibandingkan dengan dampaknya terhadap ketersediaan air bagi tanaman. Dampak buruk lain dari pemadatan tanah adalah terganggunya sistem aerasi perakaran tanaman dan porositas tanah sebesar 0.1 pada kapasitas lapang dan dianggap sebagai nilai ambang, khususnya bagi tanaman pangan.

Pemadatan tanah dapat terjadi dengan cepat, apalagi dengan adanya jejak bulldozer, mobil, binatang dan manusia yang dapat memadatkan tanah terutama pada kondisi tanah basah seperti di musim penghujan. Tanpa adanya penutup tanah, pelepasan partikel-partikel halus tanah dapat memberikan pengaruh yang sama seperti pemadatan tanah. Proses pemulihan tanah berupa pembentukan makroporositas bersifat lambat dan sangat tergantung pada aktivitas cacing tanah dan organisme 'pembangun' serta dekomposisi perakaran pohon. Jika tanah sudah sangat padat, proses pemulihan mungkin akan memerlukan puluhan tahun atau bahkan mencapai satu abad. Pengolahan tanah dengan membalikkan tanah tidak dapat menggantikan proses pembentukan struktur tanah secara biologi:

pengaruhnya bersifat jangka pendek dan juga dapat merusak struktur biologi tanah yang memperburuk keadaan karena harus terus menerus diulang. Namun demikian, strategi pengolahan tanah lainnya, seperti membuat lubang tanam atau memecahkan lapisan tanah kering, dapat menjadi awal proses pemulihan tanah secara biologi.

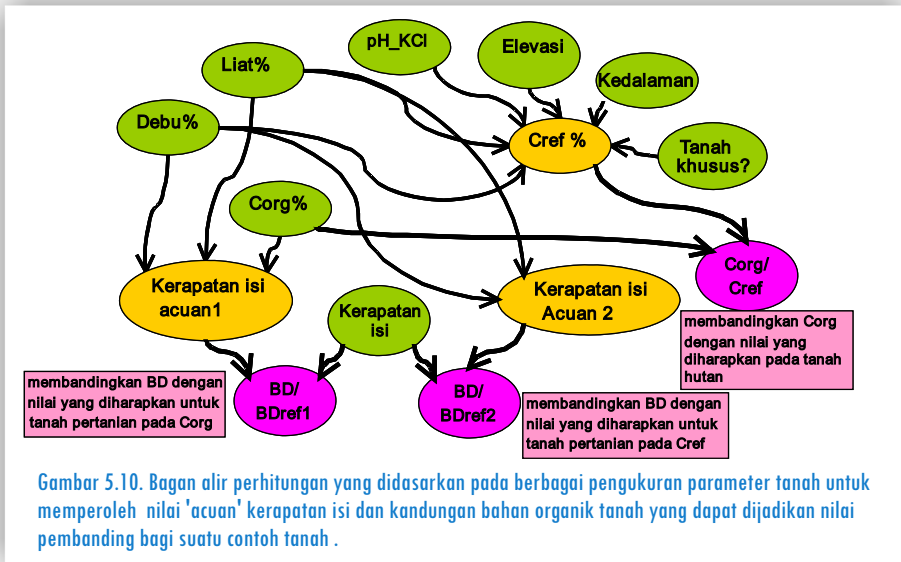
Degradasi fisik tanah dapat membentuk lapisan 'kerak' (crusting) pada permukaan tanah yang akan menurunkan laju infiltrasi permukaan potensial. Pada daerah yang beriklim kering, kondisi ini akan memicu terjadinya aliran permukaan meskipun tanah masih jauh dari kondisi jenuh.

Dengan demikian, kemampuan mendiagnosa faktor utama penyebab degradasi tanah di suatu DAS sangatlah penting, karena ini menyangkut jangka waktu yang diperlukan dalam proses pemulihannya. Menghindari pemadatan tanah di daerah yang memiliki kondisi tanah seperti 'hutan alam' jauh lebih efektif daripada merehabilitasi tempat yang sudah terdegradasi. Namun pada kondisi tanah yang mengalami kerusakan pada permukaan, maka rehabilitasi lahan dengan kegiatan yang berbasis penambahan mulsa di permukaan tanah akan dapat memulihakan kondisi tanah dengan cepat.

5.6.1. Pengukuran

Buku pelajaran fisika tanah umumnya menjelaskan bagaimana mengukur berat isi (BI) tanah, tetapi jarang atau hampir tidak pernah menjelaskan bagaimana data hasil pengukuran tersebut dapat diinterpretasikan. Berat isi sangat berkaitan erat dengan tekstur tanah dan kandungan bahan organik tanah (kandungan bahan organik tanah ini juga tergantung pada tekstur tanah), jadi untuk dapat menginterpretasikan proses pemadatan dengan benar kita perlu mendapatkan nilai acuan dari tanah dengan tekstur yang sama. Skema sederhana mengenai proses perhitungan kerapatan tanah dalam kaitannya dengan pemadatan tanah, dapat diperoleh dan diunduh dengan cuma-cuma di: www.worldagroforestrycentre.org/sea/products/pedotransfer.

BD adalah kerapatan isi, BDref1 adalah kerapatan isi acuan 1 yang dihitung berdasarkan C_{org} data lapangan, dan BDref2 adalah kerapatan isi acuan 2 yang dihitung berdasarkan C_{ref} dimana C_{ref} adalah C_{org} acuan hasil pendugaan berdasarkan tekstur tanah. Penjelasan lebih lanjut dapat dilihat ICRAF website.



5.6.2. Pemodelan degradasi fisik dan proses rehabilitasi

Telah cukup banyak pemodelan mengenai air, unsur hara dan keseimbangan karbon tanah berikut proses-proses penting didalamnya dengan cukup baik serta memberikan hasil pendugaan yang cukup akurat. Namun, model mengenai dinamika struktur tanah berikut kerusakan dan proses pemulihan struktur tanah masih cukup langka. Masih banyak yang belum diketahui mengenai proses-proses yang terjadi yang berkaitan dengan dinamika struktur tanah, yang menyebabkan kurang akuratnya pendugaan neraca air. Model WaNuLCAS (Water, Nutrient and Light Capture in Agroforestry Systems) menggunakan nilai BDref pengamatan di lapang sebagai nilai minimum atau nilai terburuk yang mungkin dicapai tanah tersebut apabila struktur tanah telah rusak karena tidak adanya aktivitas pembentukan pori makro oleh cacing tanah (dan organisme pembangun tanah lainnya). Cacing tanah memperbaiki struktur tanah dengan memakan seresah/mulsa dan akar-akar halus, sedangkan akar-akar pohon akan membentuk pori makro secara langsung apabila mereka hancur/terdekomposisi. Secara konsep, model ini (Gambar 5.10) memperlihatkan bahwa bagian dari pohon yang berperan dalam 'rehabilitasi lahan' adalah daun-daun mati yang gugur (seresah) serta akar halus dan akar kayu. Untuk mengetahui lebih lanjut bagaimana proses pemulihan struktur tanah oleh seresah/mulsa tidaklah mudah. Salah satu kendalanya adalah karena seresah yang berada di permukaan tanah, tergantung pada ukuran dan beratnya, mudah diterbangkan angin atau

terbawa aliran air. Hal ini menyebabkan adanya perbedaan dalam hal struktur tanah meskipun masih dalam hamparan lahan yang sama. Tanah dengan seresah yang menumpuk akan mempunyai tingkat infiltrasi lebih tinggi, sedangkan daerah yang tanpa seresah kemungkinan akan mengeras dan membentuk lapisan kerak akibat tingginya aliran permukaan. Penelusuran lebih rinci mengenai jenis-jenis seresah (berdasarkan spesies pohon) untuk mengetahui kecenderungannya dalam 'berpindah' pada sebidang tanah perlu dilakukan untuk mengetahui dampak seresah terhadap pemulihan tanah.

Dalam skala luas di daerah semi-arid, proses pengangkutan –penumpukan seresah sering terlihat berpola garis seperti kulit harimau, sehingga dikenal sebagai 'tiger bush effect'. Dalam kondisi seperti ini, zona yang terdegradasi berfungsi sebagai 'penerima air' yang akan ditampung dan dimanfaatkan oleh zona yang bervegetasi. 'Rehabilitasi lahan' dapat membantu mengubah pola dan ukuran 'tiger bush effect' ini agar lebih efektif, meskipun tidak akan bisa menghilangkannya sama sekali.



Gambar 5.11. Zona rehabilitasi dan degradasi pada sistem kopi di Sumberjaya-Lampung, Indonesia dalam skala yang berbeda, skala plot (foto kiri) dan skala lanskap (foto kanan). Pada skala plot, tampak pergerakan seresah menuju ke tempat penumpukan dan pada skala lanskap terlihat pola erosi dan penumpukan saling bergantian pada lereng bukit; sawah di daerah lembah mempunyai peranan penting sebagai 'penyaring'

(Foto: Meine van Noordwijk)

Prinsip dasar dalam pemulihan tanah terdegradasi: temuan baru

- * Pengelolaan tanah yang bertujuan untuk meningkatkan infiltrasi merupakan tahap awal yang penting agar dapat terhindar dari siklus degradasi tanah – aliran permukaan – erosi. Zona-zona infiltrasi dapat menurunkan dampak negatif erosi bagi plot-plot di bagian bawah, serta memberikan umpan balik positif bagi pertumbuhan vegetasi di daerah infiltrasi dengan memicu perbaikan struktur tanah dan meningkatkan infiltrasi. Contoh-contoh pengelolaan tanah sederhana pemicu infiltrasi adalah: teras batu (seperti yang digunakan di Sahel, Afrika dan Nusa Tenggara), membuat lubang tanam untuk pepohonan (walaupun biasa dilakukan di tahap awal proyek reboisasi, tetapi umumnya tidak dianggap sebagai kegiatan yang berkaitan dengan pemulihan struktur tanah)' atau membuat jalur vegetasi alami (natural vegetative strips) seperti yang banyak diterapkan di Filipina dan Indonesia
- * Menggunakan tanah hutan sebagai acuan dasar, pemadatan tanah pada awalnya memiliki pengaruh yang lebih kuat terhadap 'aliran lateral' yang lebih mempengaruhi 'fungsi DAS' daripada produktivitas tanah di lokasi tersebut. Mempertahankan tanah hutan akan mengurangi terjadinya degradasi dan cara ini mungkin lebih efektif daripada upaya rehabilitasi lahan terdegradasi. Sayangnya, kebijakan pemerintah yang berkaitan dengan lingkungan dan sistem imbal jasa mengalami kesulitan dalam menyelesaikan masalah dengan cara 'menghindari kerusakan', sementara itu 'rehabilitasi' lebih menonjol
- * Peningkatan kandungan bahan organik tanah hanya memiliki sedikit pengaruh langsung terhadap 'ketersediaan air bagi tanaman', tetapi memiliki pengaruh tidak langsung yang kuat melalui struktur tanah, tergantung pada tekstur tanah dan rezim curah hujan
- * Bagian yang paling penting dari 'hutan' menurut sudut pandang tanah dan aliran air adalah peranannya sebagai penghasil seresah dan mengubah perakaran yang mati, memberikan daya dukung bagi biota tanah yang berperan dalam memelihara struktur tanah. Sistem penggunaan lahan setengah terbuka (agroforestry) dengan pepohonan merupakan pendekatan yang memiliki fungsi serupa, di lain pihak memberikan peluang mata pencaharian dan pendapatan yang lebih baik bagi masyarakat
- * Untuk tujuan penilaian dan pemantauan, metode baru dan model yang memberikan 'kontrol internal' dalam bentuk nilai acuan untuk karbon tanah dan berat isi dapat digunakan dalam mengatasi permasalahan berdasarkan variasi ciri tanah dan hubungannya dengan proses 'aliran lateral' pada lintas skala spasial.

5.7. Indikator-indikator kuantitatif bagi fungsi hidrologi DAS

Tabel 5.3. Kriteria dan indikator yang berhubungan dengan kuantitas dan siklus periodik debit sungai

Kriteria	Indikator	Dimensi	Keragaman
1. Transmisi air	1.1 Total debit sungai per unit hujan $TWY = \Sigma Q / (A * \Sigma P) = 1 - (\Sigma E / \Sigma P) - (\Sigma \Delta_s / \Sigma P)$ Q = debit sungai P = curah hujan A = luasan E = evapotranspirasi	[-]	a) Akumulasi selama periode pengamatan b) nilai rata-rata tahunan
	1.2 Pola musiman debit dalam kaitannya dengan curah hujan kumulatif		
2. Penyangga puncak kejadian hujan (Menghindari kerusakan akibat banjir)	2.1 Indikator penyangga untuk aliran air yang melebihi rata-rata pada kejadian hujan di atas rata-rata yang masih dapat diterima $BI = (P_{abAvg} - (Q_{abAvg} / A)) / P_{abAvg}$ $= 1 - Q_{abAvg} / (A P_{abAvg})$ dengan: $P_{abAvg} = \Sigma \max(P - P_{mean}, 0)$ $Q_{abAvg} = \Sigma \max(Q - Q_{mean}, 0)$	[-]	a) Maksimum selama periode pengamatan b) nilai rata-rata tahunan dari maksimum atau rata-rata (merubah tahun kalender menjadi tahun hidrologi)
	2.2 Indikator penyangga relatif yang disesuaikan dengan total debit relatif $RBI = 1 - (P_{mean} / Q_{mean}) * (Q_{abAvg} / P_{abAvg})$		
	2.3 Penyangga puncak kejadian $1 - \text{Max}(\text{daily_Q} - Q_{mean}) / (A * \text{Max}(\text{daily_P} - P_{mean}))$	[-]	
	2.4 Total debit sungai bulanan tertinggi relatif terhadap curah hujan bulanan rata-rata	[-]	
	2.5 Fraksi total debit sungai yang berasal dari aliran di atas permukaan tanah (pada hari yang sama dengan saat kejadian hujan)	[-]	
	2.6 Fraksi total debit yang berasal dari aliran cepat (1 hari setelah kejadian hujan)		
	2.7 Pembuatan skala faktor X dalam hubungannya dengan Q_{max} yang masuk dan peranan luasan A: $Q_{max} = A^X$ (menggunakan nilai dasar: $X=0.7$)		
3. Pelepasan air secara perlahan-lahan (Untuk mempertahankan aliran rendah)	3.1 Fraksi debit yang berasal dari aliran lambat (> 1 hari setelah kejadian hujan) $\Sigma Q_{slow} / (\Sigma Q) = (\Sigma P_{infiltr} - \Sigma ES + V) / \Sigma Q$ with Pinfiltr = jumlah hujan yang diinfiltrasi ES+V = evaporasi dari permukaan tanah dan transpirasi dari tanaman	[-]	
	3.2 Total debit bulanan terendah relatif terhadap rata-rata curah hujan bulanan		

	3.3 Persistensi rendah: grafik bagian bawah $Q(t)$ dibanding $Q(t-1)$ (setelah dibuang n% 'data pencilan')	[-]
4.	4.1 Standar waktu penumpukan sedimen	
Mempertahankan tanah	4.2 Konsentrasi sedimen relatif terhadap aliran dalam kaitannya dengan kapasitas pengangkutan	
Mengurangi muatan sedimen	4.3 Pola musiman penumpukan sedimen	
	4.4 Fraksi lahan dengan penutupan tanah efektif (misalnya pada saat awal hingga pertengahan hujan)	
	4.5 Fraksi sedimen pada aliran di atas permukaan tanah yang terintersepsi pada lahan yang memiliki penyaring	
	4.6 Fraksi sedimen yang terintersepsi pada dam	
	4.7 Aliran yang disesuaikan dengan jumlah angkutan sedimen/luasan	
	4.8 Rasio sedimen yang dibawa (kehilangan sedimen per unit luasan yang diukur pada skala DAS dibagi dengan pada skala plot)	

5.8. Pembahasan

Masalah fungsi DAS sangat penting bagi pemerintah dan para pengambil kebijakan, terutama yang berkaitan dengan dampak kerusakan fungsi hidrologis terhadap manusia dan infrastruktur secara ekonomi. Jenis dan besarnya dampak fungsi DAS bagi manusia sangat dipengaruhi oleh perubahan penutupan lahan, pembuatan infrastruktur (seperti dam, saluran irigasi) yang bisa mengubah sistem drainase dan penyimpanan air sementara pada skala lanskap, serta lokasi tempat tinggal/desa/kota (Gambar 5.9)

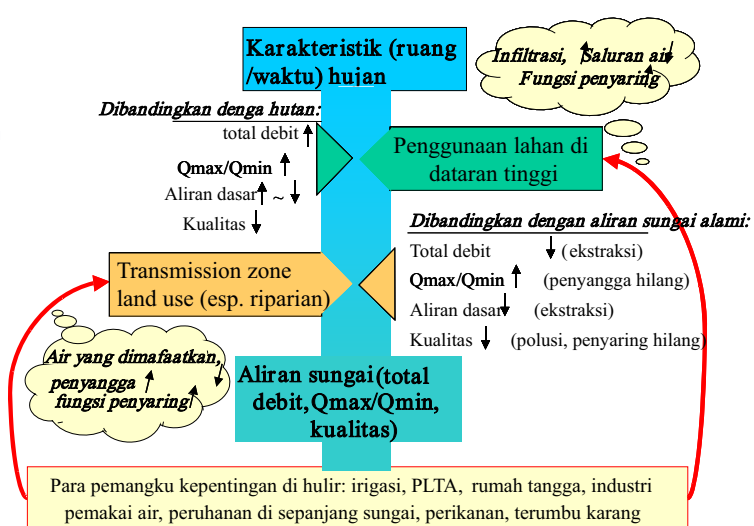
Gambar 5.9. Diagram sebab-akibat yang menghubungkan antara curah hujan dengan dampak yang mungkin ditimbulkan bagi manusia. Tahapan yang terjadi melibatkan perubahan penutupan/penggunaan lahan, penerapan teknologi yang mempengaruhi sistem drainase dan penyimpanan air (dalam lanskap) dan lokasi kegiatan manusia (perkotaan/perumahan) berlangsung.



Penyebab bencana kekeringan dan banjir dapat dibedakan atas tiga tingkatan: (i) langsung (proximate), (ii) tak langsung (intermediate) dan (iii) dasar (ultimate). Penyebab yang paling dasar adalah tidak ada/kurang baiknya langkah-langkah pencegahan dampak banjir di daerah hilir, yang mungkin disebabkan karena pengelola daerah kurang mampu dalam memprediksi besar kecilnya debit air atau karena ulah manusia yang memicu terjadinya bencana. Penyebab langsung biasanya berupa periode curah hujan yang lebih tinggi dari harapan (menyebabkan banjir) atau lebih rendah dari harapan (menyebabkan kekeringan). Penyebab tak langsung adalah hal-hal yang berkaitan dengan bagaimana kondisi DAS menangkap curah hujan dan mengalirkannya ke sungai serta bagaimana tipe tutupan/penggunaan lahan mengubah fungsi hidrologi DAS. Umumnya kombinasi dari ketiga faktor ini berkontribusi terhadap terjadinya bencana banjir maupun kekeringan. Menganggap bahwa hanya satu faktor yang menyebabkan terjadinya bencana berarti terlalu menyederhanakan masalah yang ada. Kelemahan dalam pengelolaan DAS yang umum diterapkan saat ini adalah memandang kepentingan fungsi DAS hanya dari sudut pandang hulu - hilir dan cenderung mengabaikan pentingnya 'zona transmisi' antar hulu - hilir. Sebagai contoh, perubahan badan sungai dapat berdampak besar bagi perilaku hidrologi sungai dan perubahan penggunaan lahan pada zona transmisi berdampak sama besarnya dengan perubahan penggunaan lahan pada bagian hulu DAS (Gambar 5.10).

Gambar 5.10.

Hubungan antara curah hujan dengan fungsi DAS di daerah hulu dan pemangku kepentingan di daerah hilir dipengaruhi oleh perubahan 'zona transmisi', sebagai contoh pemanfaatan air (misalnya oleh irigasi) dapat mengubah total debit air dan perubahan pada vegetasi di bantaran sungai dapat mempengaruhi karakteristik aliran dan kualitas air.



Sebagai kesimpulan, kebijakan yang berkaitan dengan fungsi DAS perlu menggabungkan tiga komponen berikut ini:

- * Mengurangi keberadaan manusia dan aktivitas ekonomi di lokasi rawan bencana (banjir, longsor)
- * Pemanfaatan teknologi yang dapat mengontrol aliran air dan kapasitas penyimpanan
- * Memelihara dan memulihkan fungsi DAS di daerah hulu sungai

- Anonim, 2008. <http://mayong.staff.ugm.ac.id> date accessed in 22/4/08
- Anonim, 2008. http://www.bpdas-inrok.net/c_program date accessed in 22/4/08
- Anonim, 2008. http://air.bappenas.go.id/modules/doc/pdf_download date accessed 22/4/08
- Anonim, 2008. Metoda konservasi lahan kering, database.deptan.go.id/%5Cimages%5C_res%5Cfile00020000000c_7.pdf
- Anonymous, 1999. Biotic Index Manual for Secondary Schools. University of Gent, Belgium, 175p.
- Bouchard RW, Jr. 2004. Guide to Aquatic macroinvertebrates of the Upper Midwest, Water Resources Centre, University of Minnesota, St. Paul, M.Nm, 208p.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 82 Tahun 2001. Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air.
- Anonim. 2008. THE SECCHI DISK - WHAT IS IT? <http://www.mlswa.org/secchi.htm> (downloaded 6 April 2008: 15:00)
- Exploring the Environment Water Quality
<http://www.cotf.edu/ete/modules/waterq3/WQassess3a.html>



Lampiran 1. Kriteria kualitas air berdasarkan kelas menurut PP No. 82 Tahun 2001

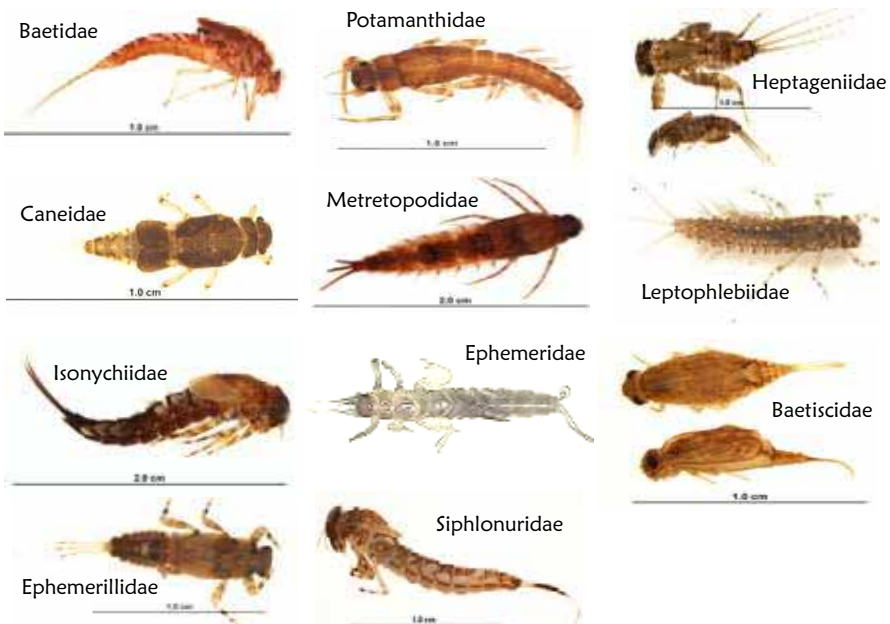
Parameter	Satuan	Kelas				Keterangan
		I	II	III	IV	
FISIKA						
Temperatur	C	Deviasi 3	Deviasi 3	Deviasi 3	Deviasi 3	Deviasi dari keadaan alamiah
Residu terlarut	mg/liter	1000	1000	1000	2000	
Residu tersuspensi	mg/liter	50	50	400	400	≤ 5000 untuk pengolahan air minum konvensional
KIMIA ANORGANIK						
pH		6-9	6-9	6-9	5-9	Bila secara alamiah di luar rentang tersebut maka ditentukan sesuai kondisi alami
BOD	mg/liter	2	3	6	12	
COD	mg/liter	10	25	50	100	
DO	mg/liter	6	4	3	0	Angka batas minimum
Total PO ₄ sebagai P	mg/liter	0.2	0.2	1	5	
NO ₃ sebagai N	mg/liter	10	10	20	20	
NH ₃ -N	mg/liter	0.5	Tidak dipersyaratkan			Bagi perikanan, kandungan ammonia bebas untuk ikan yang peka ≤ 0.02 mg/liter
Arsen	mg/liter	0.05	1	1	1	
Kobalt	mg/liter	0.2	0.2	0.2	0.2	
Barium	mg/liter	1	Tidak dipersyaratkan			
Boron	mg/liter	1	1	1	1	
Selenium	mg/liter	0.01	0.05	0.05	0.05	
Kadmium	mg/liter	0.01	0.01	0.01	0.01	
Khrom (VI)	mg/liter	0.05	0.05	0.05	0.1	
Tembaga	mg/liter	0.02	0.02	0.02	0.2	Cu ≤ 1 mg/liter untuk pengolahan air minum konvensional
Besi	mg/liter	0.3	Tidak dipersyaratkan			Fe ≤ 5 mg/liter untuk pengolahan air minum konvensional
Timbal	mg/liter	0.03	0.03	0.03	1	Pb ≤ 0.1 mg/liter untuk pengolahan air minum konvensional
Mangan	mg/liter	1	Tidak dipersyaratkan			
Air raksa	mg/liter	0.001	0.002	0.002	0.005	
Seng	mg/liter	0.05	0.05	0.05	2	Zn ≤ 5 mg/liter untuk pengolahan air minum konvensional

Parameter	Satuan	Kelas				Keterangan
		I	II	III	IV	
Khlorida	mg/liter	1	Tidak dipersyaratkan			
Sianida	mg/liter	0.02	0.02	0.02	Tidak dipersyaratkan	
Flourida	mg/liter	0.5	1.5	1.5	Tidak dipersyaratkan	
NO ₂ sebagai N	mg/liter	0.06	0.06	0.06	Tidak dipersyaratkan	NO ₂ -N ≤ 1 mg/liter untuk pengolahan air minum konvensional
Sulfat	mg/liter	400	Tidak disyaratkan			
Khlorin bebas	mg/liter	0.03	0.03	0.03	Tidak dipersyaratkan	Untuk air baku air minum tidak dipersyaratkan
Belerang sebagai H ₂ S	mg/liter	0.002	0.002	0.002	Tidak dipersyaratkan	
MIKROBIOLOGI						
Fecal coliform	Jumlah/100 ml	100	1000	2000	2000	Untuk pengolahan air minum konvensional ≤ 2000/100 ml
Total coliform	Jumlah/100 ml	1000	5000	10000	10000	Untuk pengolahan air minum konvensional ≤ 10000/100 ml
RADIOAKTIFITAS						
Gross-A	Bequerel/liter	0.1	0.1	0.1	0.1	
Gross-B	Bequerel/liter	1	1	1	1	
KIMIA ORGANIK						
Minyak dan lemak	µg/liter	1000	1000	1000	Tidak dipersyaratkan	
Detergen sebagai Methylene Blue Active Substance	µg/liter	200	200	200	Tidak dipersyaratkan	
Senyawa Fenol	µg/liter	1	1	1	Tidak dipersyaratkan	
BHC	µg/liter	210	210	210	Tidak dipersyaratkan	
Aldrin/Dieldrin	µg/liter	17	Tidak dipersyaratkan			
Chlordane	µg/liter	3	Tidak dipersyaratkan			
DDT	µg/liter	2	2	2	2	
Heptachlor dan Heptachlore epoxide	µg/liter	18	Tidak dipersyaratkan			
Lindane	µg/liter	56	Tidak dipersyaratkan			
Methoxyctor	µg/liter	35	Tidak dipersyaratkan			
Endrin	µg/liter	1	4	4	Tidak dipersyaratkan	
Toxaphan	µg/liter	5	Tidak dipersyaratkan			

Lampiran 2. Gambar Makroinvertebrata Menurut Famili

Sumber: Ephemeroptera, Coleoptera, Diptera, Megaloptera, Lepidoptera, Plecoptera, Trichoptera, Odonata: Water Action Volunteer)
(<http://watermonitoring.uwex.edu/wav/monitoring/coordinator/ecology/>)

EPHEMEROPTERA

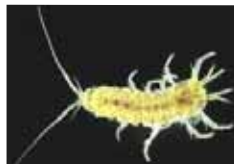


CRUSTACEA



Gammaridae

Sumber: www.forskning.no/.../1163760359.2/artikkel_print



Asellidae

Sumber: nathistoc.bio.uci.edu/.../water%20later.htm



Hirudinea

Sumber: www.lakecountyohio.org/soil/monitoring_inform...

COLEOPTERA

Elmidae



Halplidae



Dytiscidae



Elmidae



Gyrinidae



Hydroptilidae



Hydroptilidae



Dryophilidae



MEGALOPTERA

Corydalidae



Sialidae



LEPIDOPTERA

Pyralidae

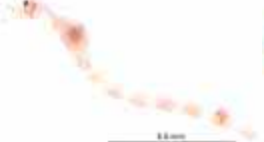


DIPTERA

Athericidae



Chaoboridae



Dolichopodidae



Dixidae



Stratiomyidae



Syrphida



Tipulidae



Chironomidae



Ceratopogonidae



Psychodidae



Empididae



Simuliidae



Sciomycidae



Blephariceridae



Ptychopteridae



Tabanidae



Ephydriidae

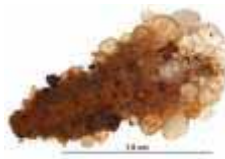


TRICHOPTERA

Brachycentridae



Molaniidae



Odontoceridae



Psychomyiidae



Hydropsychidae



Hydroptilidae



Leptoceridae



Sericostomatidae



Limnephilidae



Phryganeidae



Uenoidae



Philopotamidae



Helichopsychidae



Rhyacophilidae



Glossosomatidae



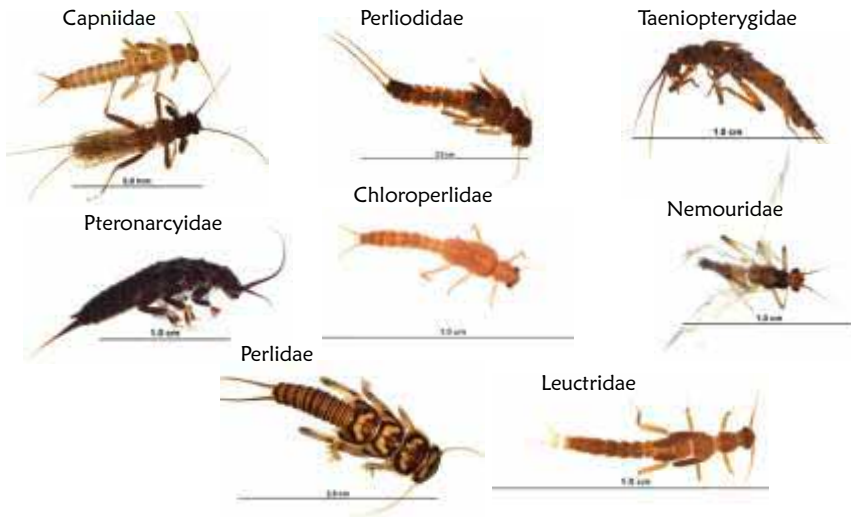
Lepidostomatidae



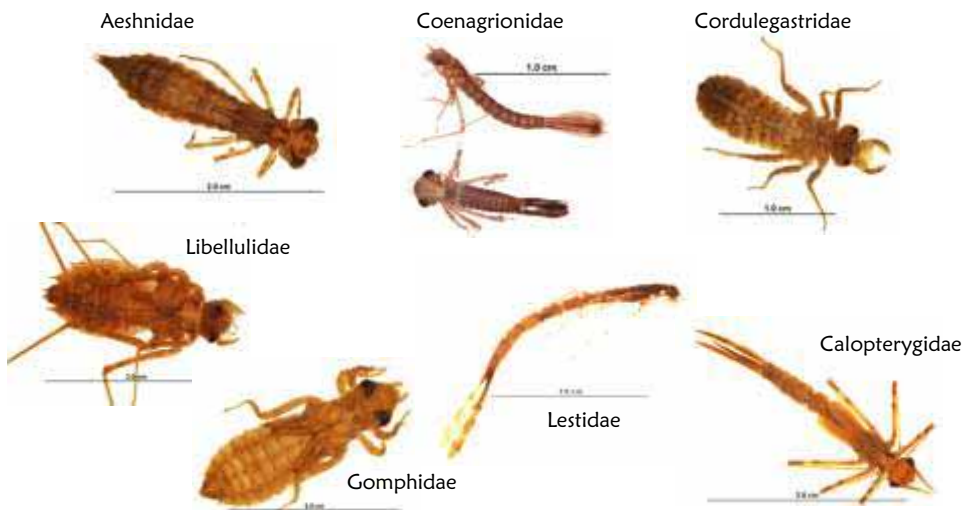
Polycentropodidae



PLECOPTERA



ODONATA



PLECOPTERA

Ancylidae



Physidae



Lymnaeidae



Planorbidae



Valvatidae



Viviparidae



Pleuroceridae



Hydrobiidae



Bithyniidae



Sphaeriidae



Turbellaria



Oligochaeta



Tubificidae



Sumber:
www.manandmollusc.net/.../Musculium-lacustre.gif

Sumber:
www.cdb.riken.jp/jp/04_news/img/planarian300.jpg

Sumber:
library.thinkquest.org/.../images/earthworm.jpg

Sumber:
www.fcps.edu/.../ecology/aquatic_worm.htm

HEMIPTERA

Corixidae



Gerridae



Hydrometridae



Aphelocheiridae



Sumber:
i.pbase.com/t1/94/339594/4/60514931.IMG_4443.jpg

Sumber:
eny3005.ifas.ufl.edu/lab1/Hemiptera/Gerrid_1.jpg

Sumber:
delta-intkey.com/britin/images/bent0321.jpg

Sumber:
guillaume.doucet.free.fr/photos/HETEROPTERE/A...

Lampiran 3. Nilai toleransi beberapa famili makroinvertebrata menurut Hilsenhoff (1988) dalam Bounchard (2004)

Klas/Ordo/Famili	Nilai Toleransi
Ordo Ephemeroptera:	
Baetidae	4
Baetiscidae	3
Caenidae	7
Ephemerilidae	1
Ephemeridae	4
Heptagenidae	4
Isonychiidae	2
Leptophlebiidae	2
Leptohyphidae	4
Metretopodidae	4
Polymitarcyidae	2
Potamanthidae	4
Siphonuridae	7
Ordo Hemiptera:	
Belostomatidae	10
Corixidae	9
Naucoridae	5
Nepidae	8
Veliidae	6
Ordo Trichoptera:	
Brachycentridae	1
Calamoceratidae	3
Dipseudopsidae	5
Glossosomatidae	0
Goeridae	3
Helicopsychidae	3
Hydropsychidae	4
Hydroptilidae	4
Lepidostomatidae	1
Leptoceridae	4
Limnephilidae	4
Molannidae	6
Odontoceridae	0
Philopotamidae	3
Phrygaenidae	4
Polycentropodidae	6
Psychomyiidae	2
Rhyacophilidae	0
Sericostomatidae	3
Ordo Decapoda	6

Klas/Ordo/Famili	Nilai Toleransi
Ordo Odonata:	
Aeshnidae	3
Calopterygidae	5
Coenagrionidae	9
Cordulegastridae	3
Corduliidae	2
Gomphidae	1
Lestidae	9
Libellulidae	7
Macromiidae	2
Ordo Cumacea	5
Ordo Plecoptera:	
Capniidae	1
Chloroperlidae	1
Leuctridae	0
Nemouridae	2
Peltoperlidae	0
Perlidae	1
Perlodidae	2
Pteronarcyidae	0
Taeniopterygidae	2
Ordo Lepidoptera:	
Arctiidae	5
Nepticulidae	5
Pyalidae	5
Ordo Coleoptera:	
Curculionidae	5
Dryopidae	5
Dytiscidae	5
Elmidae	5
Gyrinidae	4
Haliplidae	7
Hydrophilidae	5
Psephenidae	4
Ptilodactylidae	3
Scirtidae	7
Ordo Megaloptera:	
Corydalidae	0
Sialidae	4
Uenoidae	3
Ordo Polydesmida	6

Klas/Ordo/Famili	Nilai Toleransi
Ordo Isopoda	8
Ordo Diptera:	
Anthomyiidae	6
Atherceridae	2
Blephariceridae	0
Ceratopogonidae	6
Chaoboridae	8
Chironomidae (merah)	8
Chironomidae (pucat/pink)	6
Culicidae	8
Dolichopodidae	4
Dixidae	1
Empididae	6
Ephydriidae	6
Muscidae	6
Psychodidae	10
Ptychopteridae	7
Scathophagidae	6
Sciomyzidae	6
Simuliidae	6
Stratiomyidae	8
Syrphidae	10
Tabanidae	6
Tanyderidae	3
Tipulidae	3
Ordo Amphipoda:	
Gammaridae	4
Hyaellidae	8
Ordo Cladocera	8
Nematoda	5
Hydracarina	4
Palaenomidae	4
Cambaridae	6
Klas Oligochaeta	8
Lumbriculidae	5
Enchytraeidae	10

Klas/Ordo/Famili	Nilai Toleransi
Colembola	10
Tubificidae	9
Naididae	8
Haplotaxidae	5
Ordo Acariformes:	
Arrenuridae	6
Lebertiidae	6
Atractideidae	6
Mideopsidae	6
Tyrellidae	6
Limnesidae	6
Limnocharidae	6
Sperchonidae	6
Unionicolidae	6
Klas Gastropoda:	
Physidae	8
Lymnaeidae	6
Planorbidae	7
Ancylidae	6
Viviparidae	6
Pleuroceridae	6
Bithyniidae	8
Hydrobiidae	6
Valvatidae	8
Klas Bivalvia	8
Corbiculidae	6
Dreissenidae	8
Sphaeriidae	6
Pisidiidae	8
Klas Turbellaria	4
Platyhelminthidae	4
Klas Hirudinea	10
Glossiphoniidae	6-8

Keterangan:

0-3: toleransi rendah (sangat peka terhadap perubahan kondisi lingkungan)

4-6: toleransi sedang

7-10: toleransi tinggi (tahan terhadap perubahan kondisi lingkungan)

MONITORING AIR DI DAERAH ALIRAN SUNGAI

