

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Daerah Aliran Sungai

Daerah aliran sungai (DAS) adalah suatu wilayah daratan yang secara topografi dibatasi oleh punggung- punggung gunung yang menampung dan menyimpan air hujan kemudian menyalurkannya ke laut melalui sungai utama. Wilayah daratan tersebut dinamakan daerah tangkapan air (DTA atau *catchment area*) yang merupakan suatu ekosistem dengan unsur utamanya terdiri atas sumber daya alam (tanah, air dan vegetasi) dan sumber daya manusia sebagai pemanfaatan sumber daya alam (Asdak, 2007,p.4)

Daerah aliran sungai dapat dianggap sebagai suatu ekosistem, dimana di dalamnya terjadi interaksi antara faktor-faktor biotik, non biotik dan manusia. Sebagai suatu ekosistem maka setiap ada masukan (input) kedalamnya, proses yang terjadi dan berlangsung di dalamnya dapat dievaluasi berdasarkan keluaran (output) dari ekosistem tersebut. Komponen masukan dalam ekosistem DAS adalah curah hujan, sedangkan komponen keluaran terdiri dari debit air muatan sedimen, sehingga DAS menjadi dasar dari semua perencanaan hidrologi.



Gambar 2.1 Daerah Aliran Sungai (DAS)
Sumber : Elnino (2009,p.130)

2.1.1 Pengelolaan Daerah Aliran Sungai

Pengelolaan DAS adalah suatu proses formulasi dan implementasi kegiatan atau program yang bersifat manipulasi sumber daya alam dan amnesia yang terdapat di daerah aliran sungai untuk memperoleh manfaat produksi dan jasa tanpa menyebabkan terjadinya kerusakan sumber daya air dan tanah. Pengelolaan DAS mempunyai arti sebagai pengelolaan dan alokasi sumber daya alam di daerah aliran sungai termasuk pencegahan banjir dan erosi, serta perlindungan nilai keindahan yang berkaitan dengan sumber daya (Asdak,2007, p. 5)

Karena DAS dianggap sebagai suatu sistem, maka pengembangannya pun, DAS harus diperlakukan sebagai suatu sistem. Dengan diperlakukan sebagai suatu sistem dan pengembangannya bertujuan untuk memenuhi tujuan pembangunan berkelanjutan, maka sasaran pengembangan DAS akan menciptakan ciri –ciri yang baik sebagai berikut:

1. Mampu memberikan produktivitas lahan yang tinggi. Setiap bidang lahan yang harus memberikan produktivitas yang cukup tinggi sehingga dapat mendukung kehidupan yang layak bagi petani yang mengusahakannya.
2. Mampu mewujudkan, pemerataan produktivitas di seluruh DAS.
3. Dapat menjamin kelestarian sumber daya air

Menurut (Asdak,2007,p.548), ada tiga sasaran umum yang ingin dicapai dalam pengelolaan DAS, yaitu :

1. Rehabilitasi lahan terlantar atau lahan yang masih produktif tetapi dikerjakan dengan cara yang tidak mengindahkan prinsip – prinsip konservasi tanah dan air.
2. Perlindungan terhadap lahan – lahan yang umumnya sensitif terhadap terjadinya erosi dan tanah longsor atau lahan – lahan yang memerlukan tindakan rehabilitasi di kemudian hari.
3. Peningkatan atau pengembangan sumber daya, terutama sumber daya air.

Ketiga sasaran diatas hanyalah alat yang digunakan untuk mencapai tujuan pengelolaan DAS yaitu :

1. Terjaminnya pemanfaatan sumber daya alam skala DAS secara berkelanjutan
2. Tercapainya keseimbangan ekologi sebagai penyangga kehidupan.
3. Terjaminnya kuantitas dan kualitas air sepanjang tahun.

4. Pengendalian aliran permukaan dan banjir.

5. Pengendalian erosi tanah dan proses degradasi lahan lainnya

2.2 Hidrologi

Hidrologi adalah ilmu yang mempelajari air dalam segala bentuknya (cairan, gas, padat) pada, dalam, dan di atas permukaan tanah. Termasuk didalamnya adalah penyebaran daur dan perilakunya, sifat-sifat fisika dan kimianya, serta hubungannya dengan unsur-unsur hidup dalam air itu sendiri (Asdak, 2002, p. 4).

2.2.1 Daur Hidrologi

Daur atau siklus hidrologi adalah gerakan air laut ke udara, yang kemudian jatuh ke permukaan tanah lagi sebagai hujan atau bentuk presipitasi lain, dan akhirnya mengalir ke laut kembali (Soemarto, 1987, p. 17).

Dalam daur hidrologi energi panas matahari dan faktor-faktor iklim lainnya menyebabkan terjadinya proses evaporasi pada permukaan vegetasi dan tanah, di laut, di sungai, atau di danau. Uap air sebagai hasil proses evaporasi akan terbawa oleh angin melintasi daratan yang bergunung maupun datar, dan apabila keadaan atmosfer memungkinkan, sebagian dari uap air tersebut akan terkondensasi dan turun sebagai air hujan.

Air hujan yang dapat mencapai permukaan tanah, sebagian akan masuk (terserap) ke dalam tanah (*infiltration*). Sedangkan air hujan yang tidak terserap ke dalam tanah akan tertampung sementara dalam cekungan-cekungan permukaan tanah (*surface detention*) kemudian mengalir ke atas permukaan tanah yang lebih rendah (*run off*) dan akhirnya masuk ke sungai. Air infiltrasi akan tertahan di dalam tanah oleh gaya kapiler yang kemudian akan membentuk kelembaban tanah.

Tidak semua air infiltrasi (air tanah) mengalir ke sungai atau tampungan air lainnya, melainkan ada sebagian air infiltrasi yang tetap tinggal dalam lapisan tanah bagian atas (*top soil*) untuk kemudian diuapkan kembali ke atmosfer melalui permukaan tanah (*soil evaporation*) dan melalui permukaan tajuk vegetasi (*transpiration*).

2.3 Analisis Hidrologi

2.3.1. Uji Konsistensi Data Curah Hujan

Dalam penelitian ini uji konsistensi yang akan dipakai adalah uji konsistensi lengkung massa ganda (*double mass curve*) hal ini dikarenakan jumlah stasiun hujan di

DAS Comal ada 9 stasiun hujan. Data hujan yang diambil dari berbagai stasiun hujan diuji untuk mengetahui apakah data tersebut konsisten atau tidak. Data yang tidak konsisten dapat disebabkan oleh berbagai faktor antara lain:

- Perubahan mendadak pada sistem lingkungan hidrologis, antara lain adanya pembangunan gedung - gedung baru, tumbuhnya pohon - pohon, gempa bumi, gunung meletus dan lain-lain.
- Pemindahan alat pengukur hujan.
- Perubahan cara pengukuran, misalnya berhubungan dengan adanya alat baru atau metode baru.

Uji konsistensi dapat dilakukan dengan menggunakan kurva massa ganda (*double mass curve*). Dengan metode ini dapat dilakukan dengan koreksi untuk data hujan yang tidak konsisten. Langkah yang dilakukan adalah membandingkan harga akumulasi curah hujan tahunan pada stasiun yang diuji dengan akumulasi curah hujan tahunan rerata dari suatu jaringan dasar stasiun hujan yang berkesesuaian, kemudian diplotkan pada kurva. Jaringan ini dipilih dari stasiun-stasiun hujan yang berdekatan dengan stasiun yang diuji dan memiliki kondisi meteorologi yang sama dengan stasiun yang diuji (Subarkah, 1980, p. 28).

Gambar 2.2 Lengkung massa ganda (*double mass curve*).
 Sumber: Harto (1993,p.46)

Dari gambar diatas akan diperoleh garis ABC bila tidak ada perubahan terhadap lingkungan. Tetapi bila pada tahun tertentu terjadi perubahan lingkungan maka didapat garis patah ABC'. Penyimpangan tiba – tiba dari garis semula menunjukkan adanya perubahan tiba – tiba dalam pengamatan. Jadi perubahan tersebut bukan disebabkan oleh perubahan iklim atau keadaan hidrologis yang dapat menyebabkan adanya perubahan trend. Apabila terjadi penyimpangan (ABC') maka dikoreksi dengan rumus (Nemec, 1973,p.179)

$$Tg\alpha = \quad (2-1)$$

$$Tg\alpha_0 = \dots\dots\dots (2-2)$$

$$Hz = \dots\dots\dots (2-3)$$

dengan :

Hz = Data curah hujan yang telah di koreksi

H0 = Data curah hujan tahunan hasil pengamatan

$Tg \alpha$ = Kemiringan setelah dikoreksi

$Tg \alpha_0$ = Kemiringan awal

A = sudut yang dibentuk oleh garis data hujan yang membelok dengan garis sejajar absis. Absis merupakan jumlah rata stasiun yang ada.

2.3.2. Uji Ketidak-adaan Trend

Data hujan yang nilainya menunjukkan gerakan yang berjangka panjang dan mempunyai kecenderungan menuju kesatu arah, arah menaik atau menurun disebut pola atau trend (*trend*). Umumnya meliputi gerakan yang lamanya lebih dari 10 tahun. Apabila dalam deret berkala menunjukkan adanya trend maka datanya tidak disarankan untuk digunakan dalam analisa hidrologi, misalnya analisis peluang dan simulasi. Apabila deret berkala itu menunjukkan adanya trend, maka analisis hidrologi harus mengikuti garis trend yang dihasilkan, missal analisis regresi. Ketidak-adaan trend dapat diuji dengan banyak cara. Beberapa metode statistic yang dapat digunakan untuk menguji ketidakadaan trend dalam deret berkala:

- Korelasi peringkat metode *Spearman*
- *Mann* dan *Withney*
- Tanda dari *Cox* dan *Stuart*

Dalam penelitian ini, diambil Uji korelasi peringkat metode Spearman. Dalam metode spearman trend dapat dipandang sebagai koreksi antar waktu dengan variat dari suatu variable hidrologi. Oleh karena itu koefisien korelasinya dapat digunakan untuk menentukan ketidakadaan trend dari suatu deret berkala. Rumus koefisien korelasi peringkat metode spearman:

$$\dots\dots\dots (2-4)$$

$$\dots\dots\dots (2-5)$$

dengan:

- KP : Koefisien korelasi peringkat dari Spearman
- n : jumlah data
- dt : $R_t - T_t$ (Selisih RT dengan Tt)
- Tt : peringkat dari waktu

Rt : peringkat dari variable hidrologi dalam deret berkala
t : nilai distribusi t

2.3.3. Uji Stasioner

Setelah dilakukan pengujian ketidak-adaan trend, apabila deret berkala tersebut tidak menunjukkan adanya trend sebelum data deret berkala digunakan untuk analisis lanjutan harus dilakukan uji stasioner. Uji stasioner dimaksudkan untuk menguji kestabilan varian dan rata – rata deret berkala. Pengujian nilai varian deret berkala dapat dilakukan dengan uji F. Data deret berkala dibagi menjadi dua kelompok atau lebih, setiap dua kelompok uji menggunakan Uji-F. Apabila hasil pengujian ternyata hipotesis nol ditolak, berarti nilai varian tidak stabil atau tidak homogen.

Deret berkala yang nilai variannya tidak homogen berarti deret tersebut tidak stasioner, dan tidak perlu melakukan pengujian lanjutan. Akan tetapi bila hipotesis nol untuk varian tersebut menunjukkan stasioner, maka pengujian selanjutnya adalah menguji kestabilan nilai rata – ratanya (Uji T). seperti dalam pengujian kestabilan nilai varian, maka dalam pengujian nilai rata – rata, data deret berkala dibagi menjadi dua kelompok atau lebih. Setiap pasangan 2 kelompok diuji. Apabila dalam pengujian ternyata hipotesis nol ditolak, berarti nilai rata-rata setiap dua kelompok tidak homogen dan deret berkala tersebut tidak stasioner pada derajat kepercayaan tertentu. Setiap kelompok diuji dengan menggunakan Distribusi *F*. Apabila nilai varian stabil, maka dilanjutkan dengan menguji kestabilan nilai rata-ratanya. Sedangkan apabila nilai varian tidak stabil, maka tidak perlu menguji kestabilan nilai rata-rata. Langkah – langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut.

a. Kestabilan Varian (Uji-*F*)

1. H_0 : varian data stabil
 H_1 : varian data tidak stabil
2. Menentukan taraf signifikansi
3. Statistik uji.....:

.....(2-6)

dengan :

F = nilai hitung uji F

N_1 = jumlah data kelompok 1

N_2 = jumlah data kelompok 2

S_1 = standar deviasi data kelompok 1

S_2 = standar deviasi data kelompok 2

dengan derajat bebas (df):

$df_1 = N_1 - 1$

$df_2 = N_2 - 1$

4. Menentukan F kritis yang diperoleh dari tabel uji F dengan derajat kebebasan $df = N_1 + N_2 - 2$ (tabel dapat dilihat pada lampiran)

5. Pengambilan keputusan:

- F hitung $< F$ kritis maka H_0 diterima

- F hitung $> F$ kritis maka H_0 ditolak

b. Uji stabilitas rata - rata (Uji- t)

a.i.1. H_0 = rata-rata data stabil

H_1 = rata-rata data tidak stabil

a.i.2. Menentukan taraf signifikansi

a.i.3. Statistik uji :

.....(2-7)

.....(2-8)

dengan :

t = nilai hitung uji t

N_1 = jumlah data kelompok 1

N_2 = jumlah data kelompok 2

= nilai rata-rata data kelompok 1

= nilai rata-rata data kelompok 2

S_1 = standar deviasi data kelompok 1

S_2 = standar deviasi data kelompok 2

a.i.4. Menentukan t kritis yang diperoleh dari tabel uji t dengan derajat kebebasan $df = N_1 + N_2 - 2$ (tabel dapat dilihat pada lampiran).

Pengujian dilakukan dua sisi.

a.i.5. Pengambilan keputusan:

- t hitung $< t$ kritis maka H_0 diterima

- t hitung $> t$ kritis maka H_0 ditolak

2.3.4. Analisis Curah Hujan Rerata Daerah

Hujan yang turun ke bumi dapat merata di seluruh kawasan yang luas atau bisa terjadi hanya bersifat setempat. Hujan yang bersifat setempat adalah curah hujan yang diukur dari suatu pos hujan belum tentu dapat mewakili hujan untuk kawasan yang lebih luas, kecuali untuk lokasi di sekitar pos hujan tersebut. Curah hujan yang diukur dari suatu pos hujan dapat mewakili karakteristik hujan untuk daerah yang luas, dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu:

- a. Jarak pos hujan sampai titik tengah kawasan yang dihitung curah hujannya
- b. Luas daerah
- c. Topografi
- d. Sifat hujan

Beberapa metode pendekatan yang dianggap dapat digunakan untuk menentukan tinggi curah hujan rata-rata adalah (1) Metode Rata-rata Aritmatik, (2) Metode Poligon Thiessen, dan (3) Metode Isohiet. Pada studi digunakan metode poligon thiessen.

2.3.4.1. Metode Rata-rata Aritmatik

Metode ini adalah yang paling sederhana untuk menghitung hujan rerata pada suatu daerah. Pengukuran yang dilakukan di beberapa stasiun dalam waktu yang bersamaan dijumlahkan dan kemudian dibagi dengan jumlah stasiun. Stasiun hujan yang digunakan dalam hitungan biasanya adalah yang berada di dalam DAS, tetapi stasiun di luar DAS yang masih berdekatan juga bisa diperhitungkan. Persamaan yang digunakan pada metode Aritmatik adalah sebagai berikut : (Triatmodjo, 2008,p.31)

.....(2-9)
dengan :

P = Curah hujan daerah (mm)

n = Jumlah titik-titik (stasiun-stasiun) pengamat hujan

P_1, P_2, \dots, P_n = Curah hujan di tiap titik pengamatan

2.3.4.2. Metode Poligon Thiessen

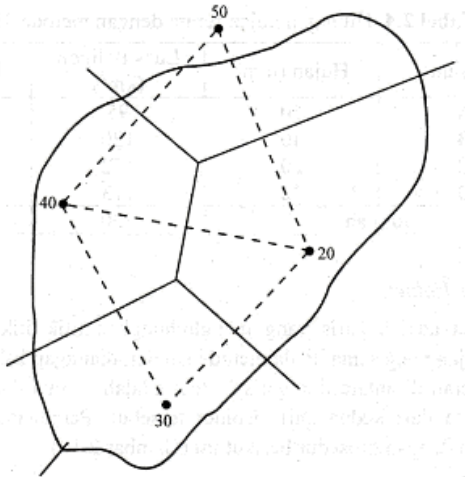
Metode ini memperhitungkan bobot dari masing-masing stasiun yang mewakili luasan di sekitarnya. Pada suatu luasan di dalam DAS dianggap bahwa hujan adalah sama dengan yang terjadi pada stasiun yang terdekat, sehingga hujan yang tercatat

pada suatu stasiun mewakili luasan tersebut. Metode ini digunakan apabila penyebaran stasiun hujan di daerah yang ditinjau tidak merata, pada metode ini stasiun hujan minimal yang digunakan untuk perhitungan adalah tiga stasiun hujan. Hitungan curah hujan rata-rata dilakukan dengan memperhitungkan daerah pengaruh dari tiap stasiun. (Triatmodjo, 2008,p.33). Pada gambar 2.3. merupakan contoh penggambaran poligon thiessen. Pembentukan poligon thiessen adalah sebagai berikut:

- a. Stasiun pencatat hujan digambarkan pada peta DAS yang ditinjau, termasuk stasiun hujan di luar DAS yang berdekatan.
- b. Stasiun-stasiun tersebut dihubungkan dengan garis lurus sehingga membentuk segitiga-segitiga, yang sebaiknya mempunyai sisi dengan panjang yang kira-kira sama.
- c. Dibuat garis berat pada sisi-sisi segitiga seperti ditunjukkan dengan garis penuh pada Gambar 2.3.
- d. Garis-garis berat tersebut membentuk poligon yang mengelilingi tiap stasiun. Tiap stasiun mewakili luasan yang dibentuk oleh poligon. Untuk stasiun yang berada di dekat batas DAS, garis batas DAS membentuk batas tertutup dari poligon.
- e. Luas tiap poligon diukur dan kemudian dikalikan dengan kedalaman hujan di stasiun yang berada di dalam poligon
- f. Jumlah dari hitungan pada langkah e untuk semua stasiun dibagi dengan luas daerah yang ditinjau menghasilkan hujan rerata daerah tersebut.

.....(2-10)
 dengan:

- = hujan rerata kawasan
- P_1, P_2, \dots, P_n = hujan pada stasiun 1, 2, 3, ..., n
- A_1, A_2, \dots, A_n = luas daerah yang mewakili stasiun 1, 2, 3, ..., n



Gambar 2.3. Poligon Thiessen
 Sumber: Triatmodjo, (2008,p.34)

2.3.4.3. Metode Isohiet

Isohyet adalah garis yang menghubungkan titik-titik dengan kedalaman hujan yang sama. Pada metode isohyet, dianggap bahwa hujan pada suatu daerah di antara dua garis isohiet adalah merata dan sama dengan nilai rerata dari kedua garis isohiet tersebut. Metode Isohiet merupakan cara yang paling teliti untuk menghitung kedalaman hujan rata-rata di suatu daerah. Pada metode ini stasiun hujan harus banyak dan tersebar merata. (Triatmodjo, 2008,p.35)

$$\dots\dots\dots(2-11)$$

dengan:

P = Rata rata curah hujan wilayah (mm)

$P_1, P_2, \dots P_n$ = Curah hujan masing masing isohiet (mm)

$A_1, A_2, \dots A_n$ = Luas wilayah antara 2 isohiet (km²)

2.4. Erosi dan Sedimentasi

2.4.1. Erosi

Erosi adalah suatu peristiwa hilang atau terkikisnya tanah atau bagian tanah dari suatu tempat yang terangkut ke tempat lain, baik disebabkan oleh pergerakan air atau angin (Arsyad,1983,P.94).

2.4.1.2. Proses terjadinya erosi

Dua penyebab utama terjadinya erosi adalah karena sebab alamiah dan karena aktivitas manusia. Erosi alamiah dapat terjadi karena proses pembentukan tanah dan proses erosi yang terjadi untuk mempertahankan keseimbangan tanah secara alami. Erosi karena factor alamiah umumnya masih memberikan media yang memadai untuk berlangsungnya pertumbuhan kebanyakan tanaman. Sedang erosi karena kegiatan manusia kebanyakan disebabkan oleh terkelupasnya lapisan tanah bagian atas akibat cara bercocok tanam yang tidak mengindahkan kaidah kaidah konservasi tanah atau kegiatan pembangunan yang bersifat merusak keadaan fisik tanah, antara lain, pembuatan jalan di daerah dengan kemiringan lereng besar. Proses erosi terdiri atas tiga bagian yang berurutan : pengelupasan (*detachment*), pengangkutan (*transportation*), dan pengendapan (*sedimentation*). Dalam uraian ini, erosi permukaan tanah yang akan dibicarakan adalah erosi yang disebabkan oleh air hujan. selain disebabkan oleh air hujan, erosi juga dapat terjadi karena tenaga angin dan salju.

2.4.2. Sedimentasi

Sedimen adalah hasil proses erosi, baik berupa erosi permukaan, erosi parit, atau jenis erosi tanah lainnya. Sedimen umumnya mengendap di bagian bawah kaki bukit, di daerah genangan banjir, di saluran air, sungai, dan waduk.

Hasil sedimen (*sediment yield*) adalah besarnya sedimen yang berasal dari erosi yang terjadi di daerah tangkapan air yang diukur pada periode waktu dan tempat tertentu. Hasil sedimen biasanya diperoleh dari pengukuran sedimen terlarut dalam sungai (*suspended sediment*) atau dengan pengukuran langsung dalam waduk. Bentuk hubungan antara erosi yang berlangsung di daerah tangkapan dan besarnya sedimen terukur di daerah hilir mempunyai mekanisme kusalitas yang rumit dan belum banyak dimengerti. Uraian berikut ini merupakan kajian tentang proses interaksi terjadinya erosi di daerah hulu dan terbentuknya sedimen daerah hilir.

2.4.2.1. Sedimen dan Transpor sedimen

Sedimen yang sering kita jumpai di dalam sungai, baik terlarut atau tidak terlarut, adalah merupakan produk dari pelapukan batuan induk yang dipengaruhi oleh factor lingkungan, terutama perubahan iklim. Hasil pelapukan batuan induk tersebut kita kenal sebagai partikel-partikel tanah. Partikel tanah tersebut dapat terkelupas dan terangkut

ke tempat yang lebih rendah untuk kemudian masuk ke dalam sungai dan dikenal sebagai sedimen. Oleh adanya transport sedimen dari tempat yang lebih tinggi ke daerah hilir dapat menyebabkan pendangkalan waduk, sungai, saluran irigasi, dan terbentuknya tanah-tanah baru di pinggir-pinggir dan di delta-delta sungai. Dengan demikian, proses sedimentasi dapat memberikan dampak yang menguntungkan dan merugikan. Dikatakan menguntungkan karena pada tingkat tertentu adanya aliran sedimen ke daerah hilir dapat menambah kesuburan tanah serta terbentuknya tanah garapan di daerah hilir. Tetapi, pada saat bersamaan aliran sedimen juga dapat menurunkan kualitas perairan dan pendangkalan pada badan perairan seperti tersebut diatas. Dalam konteks pengelolaan DAS, kegiatan pengelolaan yang dilakukan umumnya bertujuan mengendalikan atau menurunkan laju sedimentasi karena kerugian yang ditimbulkan oleh adanya proses sedimentasi jauh lebih besar daripada manfaat yang diperoleh.

Berdasarkan pada jenis sedimen dan ukuran partikel-partikel tanah serta komposisi mineral dari bahan induk yang menyusunnya, dikenal berbagai macam jenis sedimen seperti pasir, liat, dan lain sebagainya. Tergantung dari ukuran partikelnya, sedimen ditemukan terlarut dalam sungai atau disebut muatan sedimen (*suspended sediment*) dan merayap di dasar sungai atau dikenal sebagai sedimen merayap (*bed load*). Menurut ukurannya, sedimen dibedakan menjadi :

Tabel 2.1
Sedimen berdasarkan ukurannya

Jenis Sedimen	Ukuran Partikel
Liat	< 0.0039
Debu	0.0039 - 0.0625
Pasir	0.0625 - 2.0
Pasir besar	2.0 - 64.0

Sumber : Asdak(2004,p.394)

2.4.2.2. Transpor Sedimen

Telah dikemukakan bahwa kecepatan aliran sungai lebih besar di badan aliran sungai dibandingkan di tempat – tempat dekat dengan permukaan tebing atau dasar sungai. Dalam pola aliran sungai yang tidak menentu atau berputar-putar (*turbulence flow*) tenaga momentum yang diakibatkan oleh kecepatan aliran yang tak menentu tersebut akan dipindahkan ke arah aliran air yang lebih lambat oleh gulungan-gulungan air yang berawal dan berakhir secara tidak menentu pula. Gulungan-gulungan aliran air ini akan mengakibatkan terjadinya bentuk perubahan dari tenaga kinetis yang dihasilkan oleh adanya gerakan aliran air sungai tersebut menjadi tenaga panas, artinya ada tenaga yang

hilang oleh adanya gulungan-gulungan air tersebut. Namun demikian, ada sebagian tenaga kinetis yang bergerak ke dasar sungai yang memungkinkan terjadinya gerakan partikel gerkan partikel-partikel besar sedimen yang tinggal di dasar sungai dan dikenal sebagai sedimen merayap. Dengan demikian tampak bahwa perbedaan antara muatan sedimen dan sedimen merayap terletak pada cara partikel-partikel sedimen sedimen tersebut bergerak yang ditentukan oleh besar kecilnya ukuran partikel. Lebih terinci lagi, muatan sedimen adalah gerakan partikel-partikel tanah yang karena kecil ukurannya dapat terlarut dalam air. Sementara jenis partikel yang lebih besar, tidak dapat larut dalam aliran air, dan oleh karenanya mengendap di atas permukaan tanah untuk kemudian bergerak merayap apabila tenaga pendorong dari luar (energi kinetis) yang bekerja pada partikel tanah berukuran besar tersebut lebih besar daripada tenaga resisten yang bekerja pada benda tersebut. Hasil penelitian tentang tranpor sedimen yang telah banyak dilakukan menunjukkan bahwa secara statistic tenaga penggerak partikel-partikel sedimen di dasar sungai dapat dijelaskan sebagai berikut (Bagnold,1973)

Kecepatan taranspor sedimen adalah hasil perkalian antara berat partikel suatu benda (dalam hal ini adalah partikel sedimen) dengan kecepatan rata-rata partikel tersebut. Telah diketahui bahwa perkalian antara gaya yang bekerja pada suatu benda dengan jarak adalah tenaga penggerak (*work*). Sementara kecepatan gerak suatu benda adalah jarak dibagi lama waktu yang diperlukan benda tersebut bergerak. Tenaga (penggerak) dibagi lama waktu yang diperlukan benda tersebut bergerak dari satu titik ke titik lainnya adalah kekuatan (*power*). Dengan demikian, kekuatan yang diperlukan untuk menggerakkan suatu benda adalah $(\text{berat} \times \text{jarak})/\text{waktu}$. Laju transport sedimen, oleh karenanya ditentukan besarnya kekuatan (penggerak) tersebut di atas. Dalam memprakirakan besarnya kekuatan untuk transport sedimen ini besarnya koefisien gesekan juga perlu diperhitungkan.

Kekuatan yang tersedia di dalam aliran sungai berasal dari gerakan massa air dari tempat yang lebih tinggi ke tempat yang lebih rendah. Energi potensial yang ditentukan oleh ketinggian dari titik datum atau tinggi permukaan air laut pada dasarnya adalah energy yang berasal dari tenaga matahari. Energy matahari ini yang akan menyebabkan berlangsungnya proses evaporasi air dari tempat yang lebih rendah ke tempat yang lebih tinggi dan oleh adanya proses kondensasi sebagian air di tempat tersebut, air kemudian akan jatuh sebagai hujan di daerah yang lebih tinggi dari permukaan air laut. Oleh karena kecepatan aliran air sungai ke arah hilir relative konstan, penurunan ketinggian permukaan sungai, terutama yang terjadi secara tiba-tiba karena adanya beda tinggi dasar sungai, dapat mengakibatkan perubahan energy potensial menjadi energi kinetic yang dalam konteks

transport sedimen energy tersebut akan hilang. Hilangnya energy ini sebagian besar karena terjadinya perubahan energy kinetic menjadi tenaga panas (dan hilang oleh proses radiasi) oleh adanya gesekan akibat perubahan kecepatan aliran air dan sebagian lagi dimanfaatkan untuk transport sedimen atau pengikisan tebing sungai.

2.5. ArcSWAT

2.5.1. Pengertian ArcSWAT

ArcSWAT merupakan perkembangan dari versi sebelumnya yaitu AVSWAT 2000. ArcSWAT merupakan software yang berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) sebagai ekstensi tambahan perangkat lunak ArcMap dengan menggunakan model SWAT (Soil and Water Assessment Tool). SWAT merupakan model kejadian kontinyu untuk skala DAS (Daerah Aliran Sungai) yang beroperasi secara harian dan dirancang untuk memprediksi dampak pengelolaan terhadap air, sedimen, dan kimia pertanian pada DAS yang tidak memiliki alat pengukuran. Modelnya berbasis fisik dan efisien menggunakan masukan yang tersedia dan memungkinkan pengguna untuk mensimulasikan untuk jangka waktu yang panjang, model ini diperkenalkan pertama kali oleh Departemen Pertanian di Amerika Serikat dan sekarang sudah banyak digunakan di berbagai dunia. Model ini SWAT ini dijalankan dalam software ArcGIS yang harus ditambahkan ekstensi software ArcSWAT. ArcSWAT dapat diunduh melalui situs *swat.tamu.edu*. SWAT dapat digunakan untuk mensimulasikan DAS tunggal atau sistem DAS ganda yang terhubung secara hidrologis. Setiap DAS pertama dibagi menjadi subbasin dan kemudian dibagi menjadi HRU (Hydrology Response Unit) berdasarkan penggunaan lahan, jenis tanah dan kemiringan lereng. Berikut ini merupakan prosedur utama dalam ArcSWAT :

-Load or select the ArcSWAT extension (pilih ekstensi ArcSWAT)

- Delineate the watershed and define the HRUs (Delinasi DAS dan penentuan HRU)
- (optional) Edit SWAT databases
- Define the weather data (Penentuan data cuaca)
- Apply the default input files writer (masukan input file sesuai dengan database ArcSWAT)
- (optional) Edit the default input files (edit input data sesuai dengan database)
- Set up (requires specification of simulation period, PET calculation method, etc.) and run SWAT (mengatur periode simulasi, perhitungan PET dan selanjutnya running SWAT)
- (Optional) Apply a calibration tool (masukan nilai kalibrasi)
- (Optional) Analyze, plot and graph SWAT output (menganalisis, dan menggambarkan hasil SWAT)

ArcSWAT user Support :

ArcSWAT merupakan perangkat lunak domain public. Dukungannya disediakan melalui situs pengguna SWAT dan beberapa kelompok pengguna dan forum diskusi. Berikut ini adalah link beberapa situs dukungan SWAT :

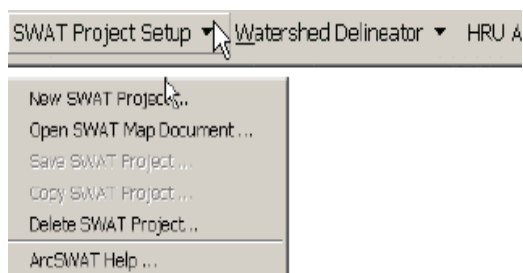
- Situs web pengguna SWAT <http://www.brc.tamus.edu/swat/>
- Forum SWAT dan kelompok pengguna <http://www.brs.tamus.edu/swat/userforums.html>
- Situs web pengguna ArcSWAT <http://www.brc.tamus.edu/swat/ArcSWAT.html>
- Kelompok pengguna ArcSWAT <http://groups.google.com/group/ArcSWAT>

2.5.2. Item toolbar di ArcSWAT

Bagian ini menjelaskan tentang fungsi dari berbagai menu yang tersedia pada ArcSWAT toolbar.

2.5.2.1 Menu SWAT Project Setup

Menu ini berisi item yang mengatur pengaturan dan pengelolaan proyek SWAT. Proyek SWAT terdiri dari sebuah direktori proyek yang berisi dokumen ArcMap, dua geodatabases, dan subdirektori struktur untuk menyimpan dataset GIS sementara, dan file masukan SWAT 2012. Gambar 2.4. Menunjukkan item pada menu SWAT project setup.



Gambar 2.4. Menu SWAT project setup

Sumber : ArcSWAT, 2017

2.5.2.2. Watershed Delineator menu

Menu watershed delineator berisi semua perintah yang dibutuhkan untuk mendelineasi subbasin dan evaluasi hasilnya. Gambar 2.5 Menampilkan Watershed Delineator menu.



Gambar 2.5. Watershed Delineator menu

Sumber : ArcSWAT, 2017

- Watershed delineator menu : automatic watershed delination

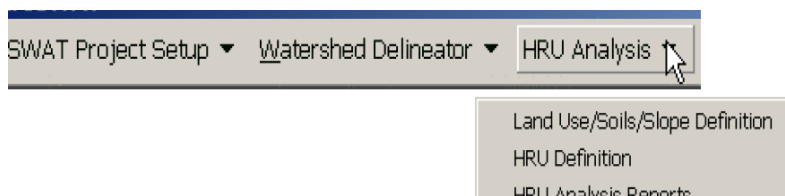
Perintah delinasi otomatis mengakses kotak dialog yang akan digunakan untuk mengimpor peta topografi dan selanjutnya adalah mendelineasi daerah aliran sungai.

- Watershed delineator menu : Watershed reports

Watershed report merupakan laporan yang berisi hasil delinasi DAS

2.5.2.3. HRU Analysis menu

Menu HRU analisis berisi semua perintah seperti penggunaan lahan, jenis tanah, dan analisis kemiringan lereng yang digunakan untuk menghasilkan SWAT HRUs pada suatu DAS. Gambar 2.6 Menampilkan menu tataguna lahan dan jenis tanah



Gambar 2.6. Menu HRU Analysis

Sumber : ArcSWAT, 2017

- HRU Analysis menu : Land use/soils/slope definition

Digunakan untuk mengimpor peta tataguna lahan, jenis tanah dan kemiringan lereng. Dan selanjutnya dilakukan overlay berdasarkan ketiga peta tersebut untuk membentuk suatu HRU pada DAS tertentu.

- HRU Analysis menu : HRU Definition

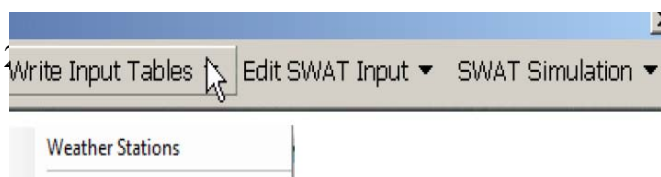
Merupakan kotak dialog yang digunakan untuk mendefinisikan jumlah HRU yang dibuat di setiap subbasin pada suatu DAS.

- HRU Analysis menu : HRU Analysis reports

Berisi laporan hasil dari HRU, Laporan dari HRU distribution akan ditampilkan dalam editor teks.

2.5.2.4. Write input tables menu

Write input tables menu merupakan menu input berisi perintah yang menghasilkan file geodatabase yang digunakan untuk menyimpan nilai input data SWAT model. Gambar



Gambar 2.7. Menu Write input tables

Sumber : ArcSWAT, 2017

- Write input menu : weather stasions

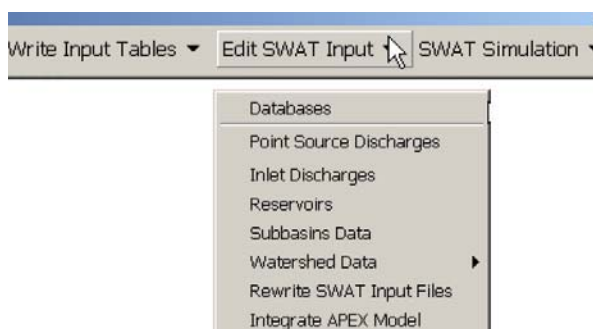
Merupakan menu untuk memasukan lokasi dan data stasiun cuaca pada DAS yang diteliti.

- Write input menu : Write SWAT Input Tables

Merupakan menu masukan SWAT, untuk membuat tabel geodatabase pada ArcSWAT yang menyimpan nilai parameter input SWAT.

2.5.2.5. Edit SWAT input

Menu edit SWAT input memungkinkan pengguna untuk mengedit database model SWAT dan file database watershed berisi input data yang sesuai dengan kondisi daerah yang diteliti. Gambar 2.8 Berikut merupakan tampilan dari Edit SWAT Input.



Gambar 2.8. Menu Edit SWAT input

Sumber : ArcSWAT, 2017

- Edit SWAT Input menu : Databases

Database merupakan sebuah database untuk memungkinkan pengguna mengakses model SWAT database dari dalam sebuah project SWAT, dan dapat diedit pada sembarang waktu selama pengembangan project SWAT. Database SWAT harus diedit ke konten yang diinginkan sebelum menulis masukan SWAT. Mengedit database SWAT akan memodifikasi isi SWAT2012.mdb.

- Edit SWAT Input menu : Point Source Discharges

Merupakan menu yang memungkinkan pengguna untuk menentukan titik outlet pada pembentukan subbasin.

- Edit SWAT input menu : Inlet Discharges

Perintah inlet discharges memungkinkan pengguna mengakses/mendefinisikan inlet dibagian hulu DAS tidak secara langsung dimodelkan dalam suatu project SWAT.

-Edit SWAT input menu : Reservoir

Perintah reservoir mengijinkan pengguna untuk mengakses/mengedit parameter masukan untuk reservoir yang ditempatkan dimanapun di dalam DAS.

-Edit SWAT input menu : Subbasins Data

Perintah subbasins data mengijinkan pengguna untuk mengakses/mengedit parameter masukan untuk area lahan, saluran, ponds/wetlands, dan system groundwater di dalam watershed.

-Edit SWAT input menu : Watershed Data

Perintah watershed data memungkinkan pengguna mengakses/mengedit masukan parameter yang diterpkan oleh DAS secara keseluruhan.

-Edit SWAT input menu : Re-Write SWAT input files

Perintah Re-Write SWAT input files memungkinkan pengguna untuk menulis ulang file masukan SWAT (.sub, .mgt, .hru, dll) setelah geodatabase SWAT telah diedit.

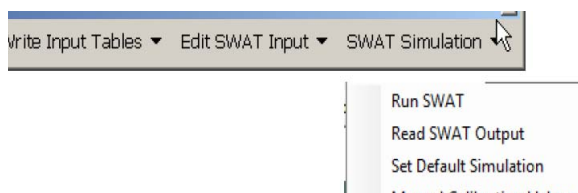
-Edit SWAT input menu : Integrate APEX Model

Perintah model APEX memungkinkan pengguna untuk menentukan subbasin dalam model SWAT saat ini yang ingin disimulasikan penggunanya.

2.5.2.6. SWAT Simulation menu

Menu swat simulation merupakan menu yang memungkinkan pengguna menjalankan model SWAT dan melakukan analisis sensitivitas dan kalibrasi. Gambar 2.9

Berikut merupakan tampilan dari menu SWAT simulation



Gambar 2.9. SWAT simulation menu

Sumber : ArcSWAT, 2017

- SWAT simulation menu : RUN SWAT

Perintah RUN SWAT memungkinkan pengguna untuk mengubah parameter menjadi tiga file masukan SWAT, Seperti kode kontrol masukan (.cod), file masukan basin (.bsn), dan file masukan kualitas air pada watershed (.wwq).

- SWAT Simulation menu : Read SWAT Output

Perintah read SWAT Output memungkinkan pengguna untuk mengimpor file output yang utama menjadi database pada Microsoft acces. Selain itu, dialog yang dibuka dengan perintah ini memungkinkan pengguna untuk menyimpan simulasi SWAT ke dalam folder yang permanen.

- SWAT simulation menu : Set default simulation

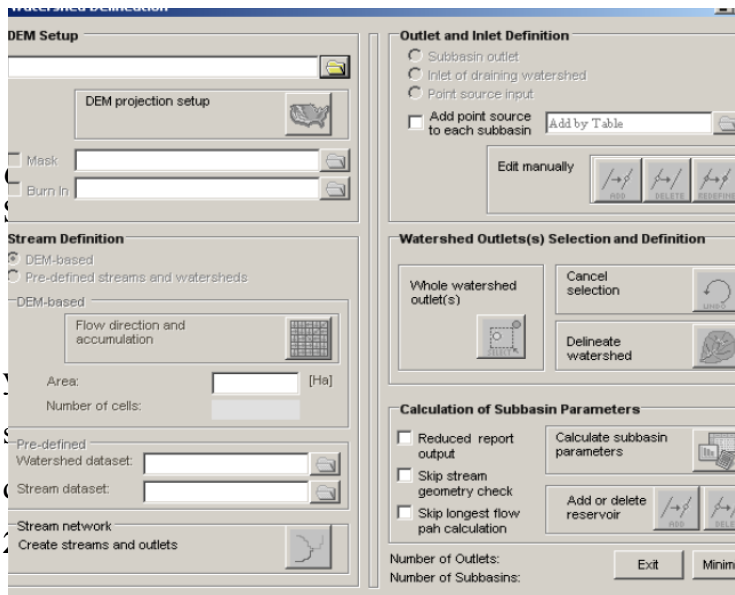
Perintah set default simulation memungkinkan pengguna untuk mengatur ulang masukan simulasi dalam SWAT untuk digunakan sebagai simulasi default aktif.

- SWAT simulation menu : Manual calibration helper

Perintah manual calibration helper ini merupakan sebuah dialog yang menyediakan alat untuk memungkinkan pengguna membuat perubahan parameter pada HRU tertentu selama kalibrasi manual.

2.6. Penggambaran Watershed

Ketika suatu project baru diciptakan, maka watershed delineation dialog box akan secara otomatis ditampilkan. Jika kotak dialog tidak ditampilkan pada menu ArcSWAT, klik automatic delination. Gambar 2.10 Merupakan tampilan dari menu kotak Watershed delination.



sungai sintesis dan definisi outlet menjadi lima bagian: DEM Setup, watershed outlet selection and

Untuk membuat dataset SWAT perlu mengakses ArcGUS raster (GRIDs) dan dataset vector yang kompatibel (.shp dan feature class) dan file database yang menyediakan beberapa jenis informasi tentang DAS. Kumpulan data spasial dan file database ini perlu dipersiapkan sebelum melakukan simulasi.

2.7.1 ArcSWAT spasial data

1. Digital Elevation Model (DEM) : ESRI GRID format

Penggunaan DEM memakai bilangan bulat atau bilangan real untuk menilai elevasi. Unit yang digunakan untuk menentukan resolusi GRID dan elevasi tidak diperlkan identic. Misalnya, resolusi GRID mungkin berada dalam meter sementara ketinggiannya beradar di yard. Resolusi GRID harus didefinisikan di salah satu unit berikut: meter, kilometer, kaki, yard, mil, derajat decimal. Sedangkan elevasi harus di definisikan di salah satu unit berikut ini : meter, sentimeter, yard, kaki, inci.

2. Land Cover/ Land Use: ESRI GRID, Shapefile, or Feature Class Format

Peta tata guna lahan perlu di reklasifikasi berdasarkan kategorinya ke dalam tutupan lahan/jenis tanamannya. Pengguna memiliki tiga opsi untuk mereklasifikasi ulang kategori tersebut. Pilihan pertama menggunakan tabel pencarian tutupan lahan yang dibangun pada ArcSWAT berisi tabel USGS LULC dan NLCD dalam database SWAT2012.mdb yang mengidentifikasi luas tutupan lahan/tanaman yang berbeda jenis yang digunakan untuk memodelkan berbagai penggunaan lahan. Pilihan kedua adalah mengetikan kode tutupan/jenis tanah pada database SWAT yang

dibatasi menjadi 4 huruf untuk masing masing kategori penutupan lahan. Pilihan ketiga adalah membuat user look up table yang mengidentifikasi kode SWAT 4 huruf tersebut untuk berbagai kategori penutupan lahan pada peta yang sudah ada.

3. Soil : ESRI GRID, Shapefile, or Feature Class Format

Database tanah juga diperlukan dalam permodelan SWAT ini, karena database tanah yang ada dalam model hanya data tanah Amerika Serikat saja. Database tanah dapat dirancang oleh pengguna, pengguna memiliki empat opsi untuk menghubungkan peta ke database tanah A.S

Kumpulan data spasial ArcSWAT dapat dibuat dalam proyeksi apapun (proyeksi yang sama harus digunakan untuk semua peta). Pengguna akan mengidentifikasi jenisnya dari proyeksi dan pengaturan proyeksi di saat membuat proyek baru.

2.7.2. ArcSWAT tabel dan text file data

ArcSWAT membutuhkan informasi mengenai komponen dari suatu DAS, antar lain huja harian, tataguna lahan, kandungan air tanah, dsb. Informasi – informasi itu dihimpun dalam basis data masukan yang dinamakan input data.

2.7.2.1. Land Use Look Up Table (dBase or ASCII)

Tabel tampilan penggunaan lahan digunakan untuk menentukan kode tutupan lahan/tanaman pada ArcSWAT. Kode jenis lahan perkotaan dimodelkan untuk setiap kategori di grid penggunaan lahan. Karena informasi ini bisa dimasukan secara manual, tabel ini tidak diperlukan untuk menjalankan simulasi. Tabel ini dapat diformat sebagai tabel dalam satabase atau sebagai tabel teks yang dibatasi koma dalam format .txt. baris pertama dari tampilan tabel penggunaan lahan harus berisi nama field. Baris yang tersisa akan menyimpan data yang dibutuhkan, contohnya land use look up table dapat ditemukan di dalam database. Tabel 2.2 Dan Tabel 2.3 merupakan format tabel yang sesuai dengan program ArcSWAT.

Tabel 2.2.

Format dBase tabel land use (.dbf)

Field Name	Field Format	Definition
Value	String	Jumlah Kategori dalam peta
Landuse	String 4 Karakter	Sesuaiakan dengan penggunaan lahan SWAT, Yaitu perkotaan/tanaman

Sumber : ArcSWAT Documentary(2012.p.15)

Tabel 2.3.
Format land use ASCII (.txt)

"value", "landuse"
1,RNGE
2,PAST
3,FRSD
4,WATR
5,AGRL
6,URBN

Sumber : ArcSWAT Documentary(2012.p.21)

2.7.2.2. Soil Look Up Table (dBase or ASCII)

Soil look up table merupakan tabel yang digunakan untuk menentukan jenis tanah yang akan dimodelkan untuk masing-masing kategori di grid peta tanah. Format tabel akan bervariasi tergantung pada pilihan yang dipilih. Tabel 2.4. Dan tabel 2.5. Merupakan format tabel jenis tanah yang sesuai dengan program ArcSWAT.

Tabel 2.4.
Format dBase tabel soil Stmuid

Field Name	Field Format	Definisi
Value	String	Jumlah Kategori dalam peta
STMUID	String 5 Karakter	5 digit, digit 1-2 nomor kode Negara; digit 3-5 nomor polygon STATSGO

Sumber : ArcSWAT Documentary(2012.p.25)

Tabel 2.5.
Format dBase tabel soil S5id

Field Name	Field Format	Definisi
Value	String	Jumlah Kategori dalam peta
S5ID	String 6 Karakter	6 karakter alpha numeric kode untuk SOILS-5 data jenis tanah

Sumber : ArcSWAT Documentary(2012.p.27)

Tabel 2.6.
Format dBase tabel soil Name

Field Name	Field Format	Definisi
Value	String	Jumlah Kategori dalam peta
Name	String 30 Karakter	Nama dari jenis tanah. Nama yang dituliskan harus sesuai dengan nama yang sudah dimasukkan dalam database User Soils. Catatannama tidak boleh berisi underscore (“ ”).

Sumber : ArcSWAT Documentary(2012,p.27)

2.7.2.3. Data Curah Hujan

ArcSWAT memerlukan data hujan harian. Nilai nilai untuk hujan didaoat dari data pengamatan atau mungkin dihasilkan. Bab ini menguraikan format file yang digunakan untuk membaca data hujan terukur. Data hujan akan menafsirkan atau menyimpulkan model di dalam kenaikan waktu daily atau sub-daily. Data hujan dibutuhkan dalam program *ArcSWAT* untuk memperoleh nilai presipitasi, evaporasi, transpirasi, aliran permukaan, aliran lateral, aliran sungai, dan sebagainya yang berhubungan dengan air dalam permodelan siklus hidrologi.

Pembuatan precipitation Gage Location Table (ASCII only) digunakan untuk men-data lokasi stasiun hujan di DAS tersebut. Catatan : tabel stasiun curah hujan harus sama dengan format yang diinginkan program *ArcSWAT* terbaru, format database yang menggunakan versi sebelumnya dari *ArcSWAT* tidak lagi didukung. Tabel 2.7. Merupakan contoh format precipitation gage location table yang sudah sesuai dengan *ArcSWAT*.

Tabel 2.7.

Precipitation gage location table (.txt)

Name	Format	Definisi
------	--------	----------

ID	Bilangan bulat	ID stasiun hujan, contoh : 1
NAME	Maksimal 8 karakter	Nama stasiun hujan
LAT	latitude point	Garis lintang stasiun hujan
LONGV	lonitude point	Garis bujur stasiun hujan
ELEVATION	Bilangan bulat	Elevasi stasiun hujan

Sumber : ArcSWAT Documentary(2012.p.30)

Tabel data hujan harian digunakan untuk menyimpan data curah hujan harian. Tabel ini diperlukan jika opsi raingage dipilih untuk curah hujan pada kotak dialog weather generator data. Nama tabel data hujan adalah “name.txt” dimana nama tersebut harus sama dengan nama yang sudah ada pada tabel precipitation gage location. Tabel 2.8. Merupakan format tabel data hujan harian yang sudah sesuai dengan format database *ArcSWAT*.

Tabel 2.8.

Format data hujan (.txt)

Baris	Format	Definisi
Pertama	Tahun, bulan, hari	Hari dimulainya hujan
Selanjutnya	curah hujan harian, format random	Jumlah hujan harian (mm)

Sumber : ArcSWAT Documentary(2012.p.32)

2.7.2.4. Weather Generator

ArcSWAT membutuhkan data presipitasi harian, temperature maksimum dan minimum, radiasi sinar matahari, kelembaban relative, dan kecepatan angin untuk simulasi program. Data-data ini didapatkan dari data pengamatan pada stasiun-stasiun meteorology dan stasiun hujan. *ArcSWAT* juga mampu membangkitkan data-data yang hilang dari pengukuran. Untuk hal ini *ArcSWAT* menggunakan model pembangkit cuaca WXGEN (Sharpley & Williams, 1990)

Kejadian hujan pada suatu hari berhubungan langsung dengan kelembaban relative, temperature dan radiasi sinar matahari. Data hujan terlebih dahulu dibangkitkan untuk memperoleh nilai-nilai pembangkitan data kelembaban relative, temperature, dan radiasi sinar matahari. Sehingga data kecepatan angina dapat dibangkitkan.

File input weather generator berisi data statistic yang diperlukan untuk menghasilkan wakil data iklim harian untuk subbasins. Idealnya, sedikitnya 20 tahun records digunakan untuk mengkalkulasi parameter di dalam .wgn file. Data iklim akan menghasilkan dua kejadian. Dimana digunakan dalam simulasi dan untuk menelusuri data yang salah.

Pembangkitan data presipitasi dalam *ArcSWAT* menggunakan model Markov Chain-Skewed (Nicks, 1974) dan model Markov Chain Exponential (Williams, 1995). Dalam studi ini digunakan data presipitasi model Markov Chain-skewed (Nicks, 1974). Ketika hari basah (hujan) dibangkitkan, distribusi kepengcengan hujan digunakan untuk membangkitkan jumlah presipitasi yang terjadi. Dalam model Markov Chain-Exponential, peluang hujan pada suatu hari hujan dikondisikan pada hari basah (hujan) ditentukan dengan angka hujan 0,1 atau lebih. Peluang kejadian hujan dan tidak hujan dalam model ini dibagi menjadi dua data masukan dengan rumus seperti berikut ini :

Probabilita hari basah pada hari i hari basah pada hari sebelum i ,

$$P1 (D/W)=1-P1 (W/W)..... (2-12)$$

a.i.2. Probabilita hari basah pada hari i hari kering pada hari sebelum i ,

$$P1 (D/D)=1-P1 (W/D)..... (2-13)$$

dengan :

$P1 (D/W)$ = peluang hari kering pada hari i hari basah pada hari $i - 1$

$P1 (D/D)$ = peluang hari kering pada hari i hari kering pada hari $i - 1$

Untuk menghitung jumlah presipitasi yang terjadi pada suatu hari, *ArcSWAT* menggunakan model distribusi kepengcengan (*skewed distribution*) (Nicks, 1974) dengan rumus sebagai berikut :

$$1. \quad R_{day} = (2-14)$$

dengan :

R_{day} = Jumlah hujan pada suatu hari (mm H₂O)

μ_{mon} = Rata-rata hujan harian bulanan (mm H₂O)

σ_{mon} = Standar deviasi hujan harian bulanan (mm H₂O)

SDN_{day} = Standar normal deviasi terhitung untuk hari hujan

g_{mon} = Koefisien kepengcengan untuk hujan harian bulanan

2. Standar normal deviasi dihitung dengan rumus :

$$SDN_{day} = \cos (6,283 \cdot rnd_2) \cdot (2-15)$$

dimana :

SDN_{day} = Standar normal deviasi terhitung untuk hari hujan

rnd_1 dan rnd_2 adalah bilangan acak antara 0,0 dan 1,0

Untuk input data-data pembangkit cuaca, data-data disusun dalam susunan data statistik dengan rumus-rumus sebagai berikut :

1. TMPMX adalah rata-rata temperatur udara maksimum dalam bulanan. Dihitung dengan menjumlahkan temperatur udara maksimum untuk tiap hari di dalam bulan untuk record dan pembagian oleh banyaknya hari yang dijumlahkan.

$$\mu mx_{mon} = \dots\dots\dots (2-16)$$

dengan :

- μmx_{mon} = Rata-rata temperatur maksimum harian untuk bulan *mon* (°C)
- $T_{mx, mon}$ = Temperatur maksimum harian pada hari ke-*d* bulan *mon* (°C)
- N* = Jumlah temperatur maksimum pada bulan *mon*

2. TMPMN adalah rata-rata temperatur udara minimum dalam bulanan. Nilai ini dihitung dengan menjumlahkan suhu udara minimum untuk tiap hari di dalam bulan untuk semua tahun record dan pembagian oleh banyaknya hari yang dijumlahkan.

$$\mu mn_{mon} = \dots\dots\dots (2-17)$$

dengan :

- μmn_{mon} = Rata-rata temperatur minimum harian untuk bulan *mon* (°C)
- $T_{mn, mon}$ = Temperatur minimum harian pada hari ke-*d* bulan *mon* (°C)
- N* = Jumlah temperatur minimum pada bulan *mon*

3. TMPSTDMX adalah standar deviasi temperatur harian maksimum dalam bulanan. Simpangan baku untuk suhu udara maksimum harian di dalam bulan. parameter ini mengukur variabilitas pada suhu maksimum untuk masing-masing untuk masing-masing bulan. simpangan baku dapat dihitung:

$$\sigma mx_{mon} = \dots\dots\dots (2-18)$$

dengan :

- σmx_{mon} = Standar deviasi temperatur harian maksimum bulan *mon* (°C)
- $T_{mx, mon}$ = Temperatur maksimum harian pada hari ke-*d* bulan *mon* (°C)
- μmx_{mon} = Rata-rata temperatur maksimum harian untuk bulan *mon* (°C)
- N* = Jumlah temperatur maksimum pada bulan *mon*

4. TMPSTDMN adalah standar deviasi temperatur harian minimum dalam bulanan. Simpangan

baku untuk suhu udara minimum harian di dalam bulan. Parameter ini mengukur variabilitas untuk masing-masing bulan.

$$\sigma_{mn_{mon}} = \dots\dots\dots (2-19)$$

dengan :

- $\sigma_{mn_{mon}}$ = Standar deviasi temperatur harian minimum bulan *mon* (°C)
- $T_{mn, mon}$ = Temperatur minimum harian pada hari ke-*d* bulan *mon* (°C)
- $\mu_{mn_{mon}}$ = Rata-rata temperatur minimum harian untuk bulan *mon* (°C)
- N = Jumlah temperatur minimum pada bulan *mon*

5. PCPMM adalah rata-rata total presipitasi dalam bulanan.
 = $\dots\dots\dots (2-20)$

dimana :

- $\mu_{mn_{mon}}$ = Rata-rata presipitasi bulan *mon* (mm H₂O)
- $R_{day, mon}$ = Presipitasi harian untuk hari ke-*d* pada bulan *mon* (mm H₂O)
- N = Jumlah presipitasi harian pada bulan *mon*
- yrs = Jumlah tahun presipitasi harian

6. PCPSTD adalah standar deviasi presipitasi harian dalam bulanan. Parameter ini mengukur variabilitas hujan untuk masing-masing bulan.

$$\sigma_{mon} = \dots\dots\dots (2-21)$$

dengan :

- σ_{mon} = Standar deviasi presipitasi harian bulan *mon* (mm H₂O)
- $R_{day, mon}$ = Jumlah presipitasi harian untuk hari ke-*d* pada bulan *mon* (mm H₂O)
- $\mu_{mn_{mon}}$ = Rata-rata presipitasi harian dalam bulan *mon* (mm H₂O)
- N = Jumlah presipitasi harian pada bulan *mon*

7. PCPSKW adalah koefisien kepengcengan presipitasi harian bulanan.

$$g_{mon} = \dots\dots\dots (2-22)$$

dengan :

- g_{mon} = Koefisien kepengcengan presipitasi harian bulan *mon*
- N = Jumlah presipitasi harian pada bulan *mon*
- $R_{day, mon}$ = Jumlah presipitasi harian untuk hari ke-*d* pada bulan *mon* (mm H₂O)
- $\mu_{mn_{mon}}$ = Rata-rata presipitasi bulanan (mm H₂O)
- σ_{mon} = Standar deviasi presipitasi harian bulan *mon* (mm H₂O)

8. PR_W(1, *mon*) adalah probabilitas hari hujan/hari basah (*wet day*) yang mengikuti hari tidak hujan/hari kering (*dry day*), artinya apabila hari ini hujan

maka kemarin tidak hujan. Kemungkinan suatu hari basah mengikuti hari kering di dalam bulan itu dapat dihitung:

$$P_1(W/D) = \dots\dots\dots (2-23)$$

dengan :

- $P_1(W/D)$ = Probabilitas hari basah yang mengikuti hari kering di bulan i
- $days_{W/D, i}$ = Jumlah hari basah yang mengikuti hari kering
- $days_{dry, i}$ = Jumlah hari kering selama periode pengukuran

9. $PR_W(2, mon)$ adalah probabilitas hari hujan/hari basah (*wet day*) yang mengikuti hari hujan/hari basah (*wet day*), artinya apabila hari ini hujan maka kemarin juga hujan. Kemungkinan ini dapat dihitung dengan :

$$P_1(W/W) = \dots\dots\dots (2-24)$$

dengan :

- $P_1(W/W)$ = Probabilitas hari basah yang mengikuti hari basah di bulan i
- $days_{W/W, i}$ = Jumlah hari basah yang mengikuti hari basah
- $days_{wet, i}$ = Jumlah hari basah selama periode pengukuran

10. $PCPD(mon)$ adalah jumlah rata-rata hari terjadinya presipitasi dalam bulanan. Parameter ini dapat dihitung:

$$= \dots\dots\dots (2-25)$$

dengan :

- $\dots\dots\dots$ = Rata-rata jumlah hari terjadinya presipitasi dalam bulan i
- $days_{wet, i}$ = Jumlah hari basah selama periode pengukuran
- yrs = jumlah tahun pengukuran

11. $SOLARAV(mon)$ adalah rata-rata radiasi sinar matahari harian dalam bulanan. Nilai ini dihitung dengan menjumlahkan total radiasi matahari untuk tiap hari di dalam bulan untuk semua tahun record dan pembagian oleh banyaknya hari yang dijumlahkan.

$$\mu rad_{mon} = \dots\dots\dots (2-26)$$

dengan :

- μrad_{mon} = Rata-rata radiasi sinar matahari harian untuk bulan mon (MJ/M²/day)
- $H_{day, mon}$ = Jumlah radiasi sinar matahari pada permukaan bumi pada hari ke- d dalam bulan mon (MJ/M²/day)
- N = Jumlah angka radiasi sinar matahari untuk bulan mon

12. $WND_{AV}(mon)$ adalah rata-rata kecepatan angin dalam bulanan. Kecepatan angin harian rerata di dalam bulan. Nilai ini dihitung dengan menjumlahkan nilai kecepatan angin rerata untuk tiap hari di dalam bulan untuk semua tahun record dan pembagian oleh banyaknya hari yang dijumlahkan.

$$\mu_{wnd_{mon}} = \dots\dots\dots (2-27)$$

dengan :

$\mu_{wnd_{mon}}$ = Rata-rata kecepatan angin harian untuk bulan *mon* (m/s)

$H_{wdn, mon}$ = Jumlah kecepatan angin pada hari ke-*d* bulan *mon* (m/s)

N = Jumlah angka kecepatan angin harian untuk bulan *mon*

2.8. **Metode Perhitungan dalam ArcSWAT**

2.8.1. Metode perhitungan limpasan

Untuk menentukan besarnya volume limpasan permukaan dengan model SWAT, metode yang digunakan adalah metode SCS (*Soil Conservation Service*) Curve Number (SCS, 1972). *The soil Conservation Service* (1972) atau metode SCS adalah salah satu metode yang dapat digunakan untuk menentukan nilai abstraksi dari curah hujan. metode ini berasumsi bahwa rasio dari abstraksi langsung dengan simpanan air permukaan (retention) sama dengan rasio nilai limpasan permukaan langsung (direct runoff) dengan nilai potensial limpasan (potensial runoff) (Chow, 1988:147)

Metode SCS berusaha mengaitkan karakteristik DAS seperti tanah, vegetasi, dan tataguna lahan dengan bilangan kurva air larian CN (runoff curve number) yang menunjukkan potensi air larian untuk curah hujan tertentu (Chay Asdak, 2002:182). Secara terinci perumusan dari metode ini adalah sebagai berikut :

$$Q_{surf} = \dots\dots\dots (2-28)$$

dengan :

Q_{surf} = Kedalaman hujan berlebih (*accumulated runoff/rainfall excess*) (mm)

I_a = Abstraksi awal (*initial abstraction*)

R_{day} = Kedalaman hujan harian (mm)

S = Volume dari total simpanan permukaan (*retention parameter*) (mm)

Dimana persamaan (2-72) merupakan persamaan yang dipakai untuk menentukan kedalaman dari curah hujan berlebih (*depth excess rainfall*) atau limpasan permukaan. Korelasi antara nilai I_a dengan S adalah (Chow, 1988:148) :

$$I_a = 0,2 S \dots\dots\dots (2-29)$$

Untuk memudahkan perhitungan kelembaban awal (*antecedent moisture condition*), tata guna lahan, dan konservasi tanah, Dinas Konservasi Tanah Amerika menentukan besarnya S sebagai berikut :

$$S = 25.4 \dots\dots\dots (2-30)$$

dimana :

CN = Bilangan kurva air larian, bervariasi dari hingga 100

Dengan mengplotkan nilai dari R_{day} dan Q_{surf} pada kurva SCS maka nilai CN dapat ditentukan. Metode SCS mengelompokkan jenis tanah dalam 4 (empat) jenis yaitu berdasar tipe tanah dan tata guna lahannya (*hydrology soil group*).

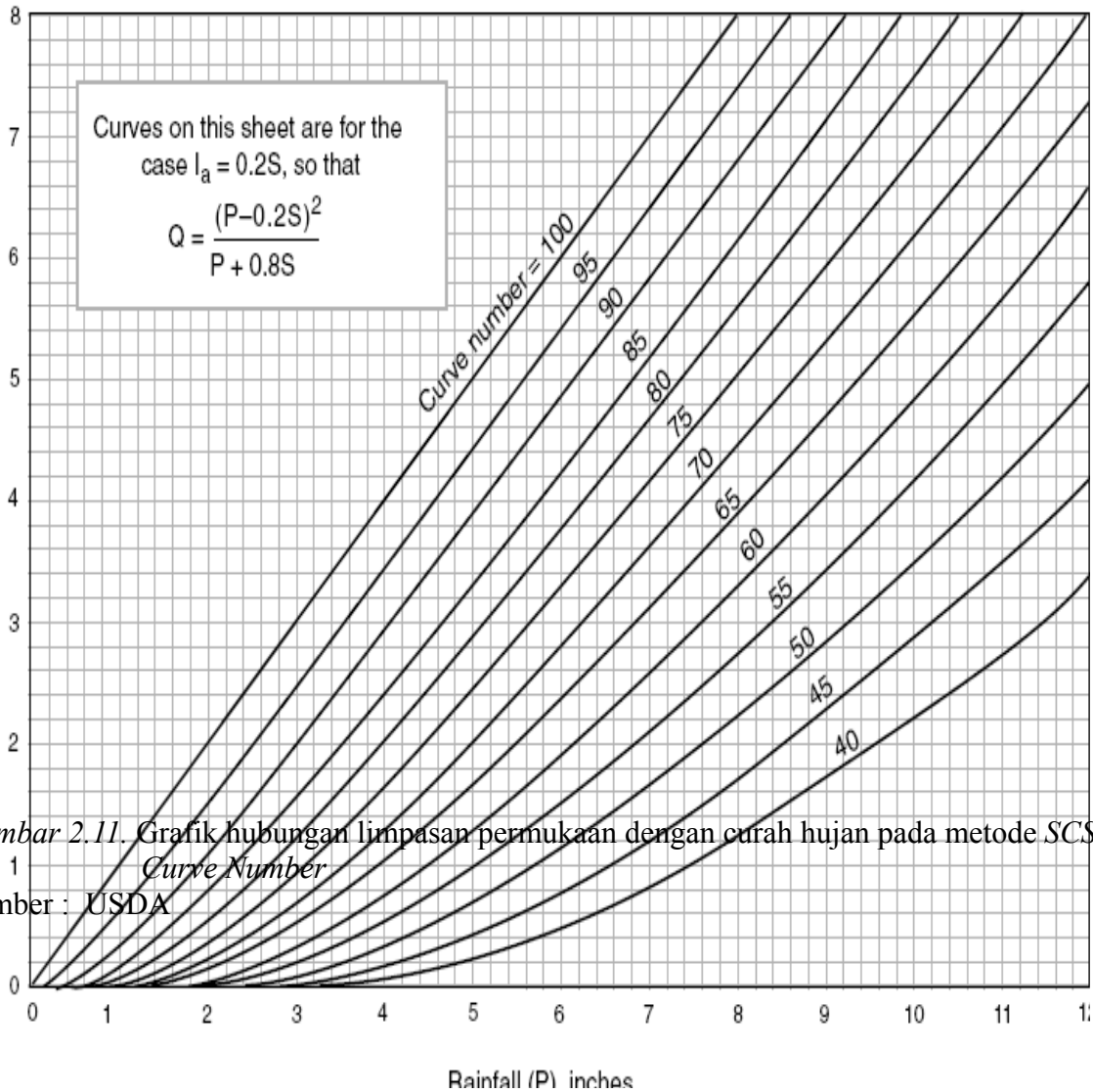
Pada abstraksi awal, I_a biasanya menggunakan pendekatan $0.2 S$ sehingga persamaan (2-30) menjadi :

$$Q_{surf} = \dots\dots\dots (2-31)$$

Limpasan permukaan akan terjadi bila $R_{day} > I_a$. Grafik penyelesaian dari rumus (2-31) untuk nilai CN yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 2.11.

2.8.2. *SCS Curve Number*

Nilai CN pada Tabel 2.9. dan Tabel 2.10. berasal dari daerah beriklim sedang, namun demikian tabel tersebut cukup memadai untuk digunakan sebagai pengganti apabila nilai CN untuk daerah setempat belum tersedia (Asdak, 2002,p.183). Nilai CN pada tabel tersebut hanya berlaku untuk keadaan kelembaban awal II, yaitu nilai rata-rata untuk banjir tahunan. Faktor korelasi untuk keadaan kelembaban awal yang lain dapat diperoleh antara lain dalam Schwab et al. (1982).



Gambar 2.11. Grafik hubungan limpasan permukaan dengan curah hujan pada metode SCS

Tabel 2.9. Bilangan Kurva Air Larian (CN) untuk Kondisi Hujan Awal II pada Tanah Pertanian yang ditanami (SCS Engineering Division, 1986)

Tata Guna Lahan	Cara bercocok tanam	Keadaan Hidrologi	Kelompok tanah			
			A	B	C	D
Tidak dikerjakan	Gundul/Kosong	-	77	86	91	94
	Tanah kosong bekas dikerjakan	Buruk	76	85	90	93
		Baik	74	83	88	90
Tanaman Berjajar	Larikan Lurus	Buruk	72	81	88	91
		Baik	67	78	85	89
	Larikan lurus ada bekas ditanami	Buruk	71	80	87	90
		Baik	64	75	82	85
	Kontur	Buruk	70	79	84	88
		Baik	65	75	82	86
	Kontur ada bekas ditanami	Buruk	69	78	83	87
		Baik	64	74	81	85

	Kontur dan teras	Buruk	66	74	80	82
		Baik	62	71	78	81
	Kontur dan teras ada bekas ditanami	Buruk	65	73	79	81
		Baik	61	70	77	80
	Larikan Lurus	Buruk	65	76	84	88
		Baik	63	75	83	87
	Larikan lurus ada bekas ditanami	Buruk	64	75	83	86
		Baik	60	72	80	84
Padi, Gandum	Kontur	Buruk	63	74	82	85
		Baik	61	73	81	84
	Kontur ada bekas ditanami	Buruk	62	73	81	84
		Baik	60	72	80	83
	Kontur dan teras	Buruk	61	72	79	82
		Baik	59	70	78	81
	Kontur dan teras ada bekas ditanami	Buruk	60	71	78	81
		Baik	58	69	77	80
Tanaman Legum	Larikan lurus	Buruk	66	77	85	89
		Baik	58	72	81	85
	Kontur	Buruk	64	75	83	85
		Baik	55	69	78	83
	Kontur dan teras	Buruk	63	73	80	83
		Baik	51	67	76	80

Sumber : ArcSWAT Documentary(2012.p.39)

Tabel 2.10.
Bilangan kurva air larian (CN) untuk kondisi hujan awal II pada tanah pertanian yang lain
(SCS Engineering Division, 1986)

Tata guna lahan	Keadaan Hidrologi	Kelompok tanah			
		A	B	C	D
Padang rumput terus-menerus untuk tempat penggembalaan ternak	Buruk	68	79	86	89
	Cukup	49	69	79	84
	Baik	39	61	74	80
Padang rumput terlindung dari ternak, untuk dipanen		30	58	71	78
Semak-semak rerumputan dengan tumbuhan semak-semaknya yang dominan	Buruk	48	67	77	83
	Cukup	35	56	70	77
	Baik	30	48	65	73
Tanaman kayu kombinasi rumput dan perkebunan	Buruk	57	73	82	86
	Cukup	43	65	76	82
	Baik	32	58	72	79
Tegakan hutan tidak rapat	Buruk	45	66	77	83
	Cukup	36	60	73	79
	Baik	30	55	70	77
Tanah Pertanian		59	74	82	86

Sumber : ArcSWAT Documentary(2012.p.98)

2.8.3. Soil Hydrologic Groups

U.S Natural Resource Conservation Service (NRCS) mengklasifikasikan tanah menjadi empat kelompok hidrologi berdasarkan pada karakteristik infiltrasi tanah tersebut. *NRCS Soil Survey Staff (1996)* mendefinisikan setiap kelompok tanah tersebut dengan melihat kesamaan terhadap potensi limpasan permukaan pada kondisi cuaca dan tata guna lahan yang sama, sehingga tanah tersebut bisa berada pada salah satu dari kelompok A, B, C, D atau ketiga kelompok dobel A/D, B/D, dan C/D (*ArcSWAT Documentation 2012*). Kelompok tanah rangkap diberikan untuk lahan basah tertentu yang mendapatkan cukup aliran, initial pertama merupakan kondisi adanya aliran air, sedangkan yang kedua merupakan kondisi tanpa aliran.

Tabel 2.11.
Kelompok tanah menurut *NRCS*

Kelompok Tanah	Keterangan	Laju Infiltrasi (mm/jam)
A	Potensi air larian paling kecil, termasuk tanah pasir dalam dengan unsur debu dan liat. Laju infiltrasi tinggi	8 – 12
B	Potensi air larian kecil, tanah berpasir lebih dangkal dari A. Tekstur halus sampai sedang. Laju infiltrasi sedang.	4 – 8
C	Potensi air larian sedang, tanah dangkal dan mengandung cukup liat. Tekstur sedang sampai halus. Laju infiltrasi rendah	1 – 4
D	Potensi air larian tinggi, kebanyakan tanah liat, dangkal dengan lapisan kedap air dekat permukaan tanah. Infiltrasi paling rendah	0 - 1

Sumber : Asdak (2002,p.184)

2.8.4. Debit Puncak Limpasan (*Peak Runoff Rate*)

Debit puncak limpasan adalah aliran limpasan maksimum yang terjadi pada saat terjadinya hujan. Debit puncak limpasan merupakan indikator dari kekuatan hujan yang digunakan untuk memprediksi besarnya sedimentasi yang terjadi. Perhitungan debit limpasan puncak menggunakan modifikasi dari metode rasional.

Metode rasional erdasarkan pada asumsi bahwa intensitas curah hujan (i) dimulai pada saat $t = 0$ dan berlangsung erus sampai dengan jangka waktu yang tidak terbatas, sehingga debit limpasan puncak akan terus meningkat sampai pada waktu kosentrasinya $t = t_{conc}$ dimana luas wilayah sub DAS akan mempengaruhi aliran sampai pada titik keluaran sub DAS (*outlet*). Persamaan rasional tersebut adalah sebagai berikut:

$$q_{peak} = \dots\dots\dots (2-32)$$

dimana :

q_{peak} = Debit puncak limpasan (*Peak Runoff Rate*) (m^3/dt)

i = Intensitas hujan (mm/jam)

$Area$ = Luas wilayah sub DAS (km^2)

C = Koefisien aliran

3.6 = Faktor konversi

2.8.4.1. Waktu Konsentrasi (*Time of Consentration*)

Waktu kosentras adalah waktu yang dihitung dari mulai jatuhnya hujan pada suatu sub DAS sampai air tersebut mengalir ke *outlet* dari sub DAS tersebut. Waktu konsentrasi adalah waktu perjalanan yang dibutuhkan oleh air dari tempat yang paling jauh (hulu sub DAS) sampai ke *outlet* sungai dari sub DAS tersebut. Waktu kosentrasi dihitung dengan menjumlahkan lamanya waktu yang dilalui oleh air hujan yang jatuh pada suatu titik kemudian mengalir di lahan sampai ke sungai dan akhirnya mengalir di sungai sampai ke *outlet* sungai dari sub DAS tersebut. Persamaannya sebagai berikut :

$$t = t_{ov} + t_{ch} \dots\dots\dots (2-33)$$

dimana :

t_{conc} = Waktu konsentrasi di sub DAS jam (jam)

t_{ov} = Waktu konsentrasi untuk aliran di lahan (jam)

t_{ch} = Waktu konsentrasi untuk aliran di sungai (jam)

1. Waktu konsentrasi di lahan (*overland flow time of concentration*)

$$t_{ov} = \dots\dots\dots (2-34)$$

dimana :

t_{ov} = Waktu konsentrasi untuk aliran di lahan (jam)

L_{slp} = Panjang lereng di sub DAS (m)

V_{ov} = Kecepatan aliran di lahan (*overland flow velocity*) (m/dt)

3600 = Faktor konservasi (*unit conversion factor*)

Kecepatan aliran di lahan dapat dihitung dengan menggunakan rumus *Manning* untuk setiap 1 meter panjang sepanjang garis miring permukaan lahan :

$$V_{ov} = \dots\dots\dots (2-35)$$

dimana :

V_{ov} = Kecepatan aliran di lahan (*overland flow velocity*) (m/dt)

q_{ov} = Debit aliran rata-rata di lahan (*average overland flow rate*) (m³/dtk)

slp = Kemiringan rata-rata di sub DAS (m/m)

n = Angka kekasaran *manning*

2. Waktu konsentrasi aliran di sungai/saluran (*channel flow time of concentration*)

$$T_{ch} = \dots\dots\dots (2-36)$$

dimana :

t_{ch} = Waktu konsentrasi untuk aliran di sungai (jam)

L_c = Panjang rata-rata di sub DAS (km)

V_c = Kecepatan aliran di sungai (*channel flow velocity*) (m/dt)

3,6 = Faktor konservasi (*unit conversion faktor*)

Tabel 2.12.
Angka kekasaran *Manning* (n) untuk aliran di lahan (*Engman,1983*)

Karakteristik Permukaan Lahan	Median	Range
Tanah kosong, gundul-tanpa sisa tanaman	0.010	0.008-0.012
Pengolahan tanah konvensional-tanpa sisa tanaman	0.090	0.060-0.120
Pengolahan tanah konvensional-ada sisa tanaman	0.190	0.160-0.220
Pengolahan tanah dengan dibajak-tanpa sisa tanaman	0.090	0.060-0.120

Pengolahan tanah dengan dibajak-ada sisa tanaman	0.130	0.100-0.160
Tanaman musiman-ada sisa tanaman	0.400	0.300-0.500
Tanah tidak dikerjakan-tanpa sisa tanaman	0.070	0.040-0.100
Tanah tidak dikerjakan-ada sisa tanaman 0.5-1 ton/ha	0.120	0.070-0.170
Tanah tidak dikerjakan-ada sisa tanaman 2-9 ton/ha	0.300	0.170-0.470
Tanah berteras, 20 % ditanami	0.600	
Padang rumput pendek yang luas	0.150	0.100-0.200
Rumput tebal	0.240	0.170-0.300
Rumput bermuda	0.410	0.300-0.480

Sumber : Engman dalam *SWAT Theoretical Documentation 2009* (2009,p.111)

Panjang rata-rata saluran dihitung dengan persamaan :

$$L_c = \dots\dots\dots (2-37)$$

dimana :

L_c = Panjang rata-rata saluran di sub DAS (km)

L = Panjang saluran dari titik terjauh sampau ke *outlet* sub DAS (km)

L_{cen} = Jarak antara sepanjang saluran dengan titik tengah sub DAS (km)

Diasumsikan $L_{cen} = 0,5 L$, maka panjang rata-rata saluran di sub DAS adalah :

$$L_c = 0,71 \cdot L \dots\dots\dots (2-38)$$

Kecepatan rata-rata dapat dihitung dengan rumus *manning*, dengan asumsi penampang melintang saluran terbentuk trapesium, kemiringan tebing saluran 2:1, dan rasio perbandingan lebar dasar saluran dengan tinggi saluran adalah 10:1, sehingga akan di dapatkan persamaan :

$$V_c = \dots\dots\dots (2-39)$$

dimana :

V_c = Kecepatan rata-rata aliran saluran (*average channel velocity*) (m/dt)

q_{ch} = Debit rata-rata di saluran (*average channel rate*) (m³/dt)

slp_{ch} = Kemiringan saluran (m/m)

n = Koefisien kekasaran *manning* di saluran

Untuk menghitung debit rata-rata aliran di saluran menggunakan rumus :

$$q_{ch} = \dots\dots\dots (2-40)$$

dimana :

$Area$ = Luas sub DAS (km²)

q_{ch} = Debit rata-rata di saluran (mm/jam)

q_{ch} merupakan debit yang terjadi pada unit satuan luas (unit satuan luas = 1 ha),dihitung dengan persamaan :

$$q_{ch} = q_0 \cdot (100 \cdot Area)^{-0,5} \dots\dots\dots (2-41)$$

dimana :

- q_0 = Debit pada satu unit satuan luas (mm/jam)
- 100 = Faktor konversi

2.8.4.2. Koefisien Aliran

Angka koefisien aliran (C) merupakan bilangan perbandingan laju debit puncak dengan intensitas hujan dan merupakan bilangan tanpa satuan. Dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$C = \dots\dots\dots (2-42)$$

dimana :

- Q_{surf} = Kedalaman hujan berlebih (*accumulated runoff/rainfall excess*) (mm)
- R_{day} = Jumlah hujan pada suatu hari (mm H₂O)

2.8.4.3. Intensitas Hujan

Intensitas hujan adalah jumlah hujan persatuan waktu, dihitung dengan rumus :

$$i = \dots\dots\dots (2-43)$$

dimana :

- i = Intensitas hujan (mm/jam)
- R_{tc} = Tinggi hujan selama waktu konsentrasi (mm)
- t_{conc} = Waktu konsentrasi di sub DAS (jam)

Suatu analisa data curah hujan yang dikumpulkan oleh *Hershfield* (1961) dalam jangka waktu dan frekwensi yang berbeda-beda menunjukkan bahwa jumlah hujan yang jatuh sepanjang waktu konsentrasinya sebanding dengan hujan yang jatuh selama periode 24 jam.

$$R_{tc} = \alpha_{tc} \cdot R_{day} \dots\dots\dots (2-44)$$

dimana :

- α_{tc} = Fraksi curah hujan harian yang terjadi selama waktu konsentrasinya
- R_{day} = Jumlah hujan yang terjadi dalam 1 hari (mm)

Untuk durasi hujan pendek, semua hujan yang jatuh sepanjang waktu konsentrasinya menyebabkan α_{tc} mendekati batas atasnya 1. Nilai minimum α_{tc} terjadi jika intensitas hujan yang terjadi seragam ($i_{24} = i$). Nilai minimum ini dapat

didefinisikan dengan mensubstitusikan persamaan (2-83) dan $i_{24} = i$ ke dalam persamaan (2-85) :

$$\alpha_{tc, min} = = = \dots\dots\dots (2-45)$$

dimana besarnya α_{tc} adalah $t_{conc} / 24 \leq \alpha_{tc} \leq 1,0$

AVSWAT memperkirakan fraksi dari curah hujan yang terjadi dalam waktu konsentrasi tertentu sebagai fungsi fraksi dari curah hujan harian dengan waktu setengah jam dari intensitas hujan maksimumnya :

$$\alpha_{tc} = 1 - \exp[2 \cdot t_{conc} \cdot \ln(1 - \alpha_{0,5})] \dots\dots\dots (2-46)$$

dimana :

t_{conc} = Fraksi curah hujan harian selama waktu setengah jam dari intensitas hujan tertingginya.

$\alpha_{0,5}$ = Waktu konsentrasi di sub DAS (jam)

2.8.4.4. Modifikasi Rumus Rasional

Modifikasi rumus rasional digunakan untuk memperkirakan besarnya debit puncak limpasan, didapatkan dengan menggunakan rumus :

$$q_{peak} = \dots\dots\dots (2-47)$$

dimana :

q_{peak} = Debit puncak limpasan (*peak runoff rate*) (m³/dt)

α_{tc} = Fraksi curah hujan harian yang terjadi selama waktu konsentrasinya

Area = Luas wilayah sub DAS (km²)

t_{conc} = Waktu konsentrasi di sub DAS (jam)

3.6 = Faktor konversi

Q_{surf} = Kedalaman hujan berlebih (*accumulated runoff/rainfall excess*) (mm)

2.8.5. Metode perhitungan besarnya erosi

Untuk memperhitungkan besarnya erosi menggunakan metode MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation). Metode MUSLE merupakan modifikasi dari USLE (Universal Soil Loss Equation) yang dikembangkan oleh Williams (1995)

Modified Universal Soil Loss Equation (Williams, 1995) adalah sebagai berikut (*SWAT Theoretical Documentation 2009, 2012 : 252*) :

$$(2-48)$$

dimana :

sed	= hasil sedimen per hari (ton)
Q_{surf}	= volume aliran limpasan permukaan (mm/ha)
q_{peak}	= debit puncak limpasan (<i>peak runoff rate</i>) (m^3/dtk)
$area_{hru}$	= luas <i>hru</i> (<i>hydrologic response unit</i>) (ha)
K_{USLE}	= faktor erodibilitas tanah <i>USLE</i>
C_{USLE}	= faktor (pengelolaan) cara bercocok tanam <i>USLE</i>
P_{USLE}	= faktor praktek konservasi tanah (cara mekanik) <i>USLE</i>
LS_{USLE}	= faktor topografi <i>USLE</i>
$CFRG$	= faktor pecahan batuan kasar

2.8.5.1. Faktor Erodibilitas Tanah

K adalah faktor erodibilitas tanah untuk horizon tanah tertentu, dan merupakan kehilangan tanah per satuan luas untuk indeks erosivitas tertentu. Faktor erodibilitas tanah (K) menunjukkan resistensi partikel tanah terhadap pengelupasan dan transportasi partikel-partikel tanah tersebut oleh adanya energi kinetik air hujan. Meskipun besarnya resistensi tersebut tergantung pada topografi, kemiringan lereng, dan besarnya gangguan oleh manusia, besarnya erodibilitas atau resistensi tanah juga ditentukan oleh karakteristik tanah seperti tekstur tanah, stabilitas agregat tanah, kapasitas infiltrasi, dan kandungan organik dan kimia tanah. Karakteristik tanah tersebut bersifat dinamis, selalu berubah, oleh karenanya, karakteristik tanah dapat berubah seiring dengan perubahan waktu dan tata guna lahan atau sistem pertanaman. Dengan demikian, angka erodibilitas tanah juga akan berubah. Perubahan erodibilitas tanah yang signifikan berlangsung ketika terjadi hujan karena pada waktu tersebut partikel-partikel tanah tersebut mengalami perubahan orientasi dan karakteristik bahan kimia dan fisika tanah (Asdak, 2004.p.360).

Beberapa usaha telah dilaksanakan untuk membuat model hubungan fungsional sederhana antara besarnya erodibilitas suatu jenis tanah dengan karakteristik tanah yang bersangkutan. Wischmeier et al. (1971) mengembangkan persamaan matematis yang menghubungkan karakteristik tanah dengan tingkat erodibilitas tanah sebagai berikut (*SWAT Theoretical Documentation 2000, 2002* : 217 dalam Suhartanto, 2008,p.41) :

dimana :

K_{USLE} = faktor erodibilitas tanah *USLE*

M = persentase ukuran partikel (% debu + pasir sangat halus) (100% liat)

OM = persen unsur organik

$c_{soilstr}$ = kode klasifikasi struktur tanah (*granular, platy, massive*, dll)

c_{perm} = kelas permeabilitas tanah

Perhitungan M dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\dots\dots\dots (2-50)$$

dimana :

m_{silt} = persentase debu (*silt*) (diameter partikel 0.002-0.05 mm)

m_{vfs} = persentase pasir sangat halus (*very fine sand*)
(diameter partikel 0.05-0.10 mm)

m_c = persentase liat (*clay*) (diameter partikel < 0.002 mm)

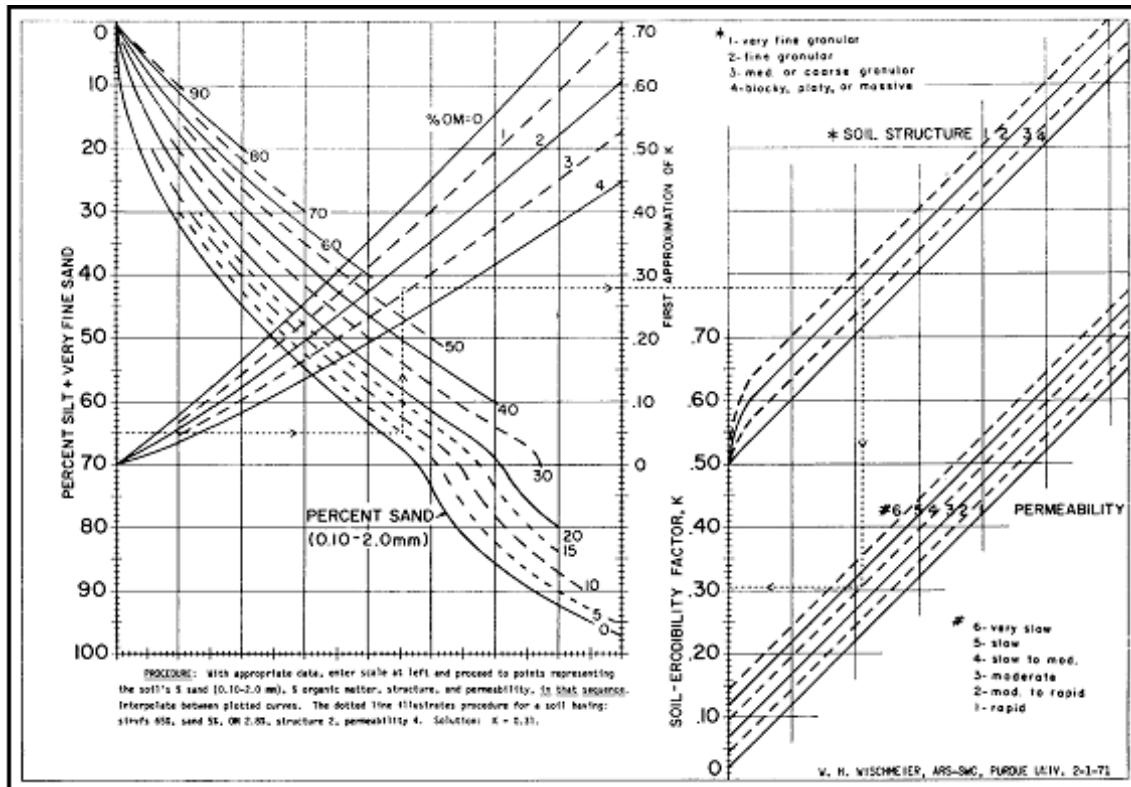
OM dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\dots\dots\dots (2-51)$$

dimana :

$orgC$ = persentase karbon organik

Selanjutnya dengan data sifat tanah tersebut, Wischmeier (1971) mengembangkan nomograph erodibilitas seperti pada Gambar 2.12. untuk menduga indeks erodibilitas tanah. Untuk dapat menggunakan nomograph erodibilitas tanah, maka diperlukan pengamatan struktur dan sifat fisik tanah yang lain. Untuk keperluan ini struktur tanah diamati di lapang berdasarkan bentuk dan ukurannya, kemudian dibedakan menjadi 4 kelas.



Gambar 2.12. Nomograph untuk pendugaan erodibilitas tanah, K.

Sumber : Utomo (1994,p.51)

Pembagian kelas tanah berdasarkan kriteria ukuran partikel tanahnya dapat berbeda-beda sesuai dengan struktur tanahnya, ringkasannya dapat dilihat pada Tabel 2.13. Sifat tanah yang lain, dalam hal ini presentase debu, pasir halus, pasir kasar serta kandungan bahan organik dan permeabilitas ditentukan di laboratorium. Selanjutnya permeabilitas digolongkan menjadi enam kelas, mulai dari sangat lambat sampai cepat, seperti yang dicantumkan pada Tabel 2.14.

Tabel 2.13.

Klasifikasi Struktur Tanah

Kelas	Keterangan
1	Granuler sangat halus (<i>very fine granular</i>)
2	Granuler halus (<i>fine granular</i>)
3	Granuler sedang-kasar (<i>medium or coarse granular</i>)
4	Massif kubus, lempeng (<i>blocky, platy, prismatic or massive</i>)

Sumber : Utomo (1994,p.50)

Tabel 2.14.

Klasifikasi Ukuran Partikel Struktur Tanah

Klasifikasi Ukuran	Bentuk Struktur			
	Platy	Prismatic dan Columnar	Blocky	Granular
Very fine	< 1 mm	< 10 mm	< 5 mm	< 1 mm
Fine	1-2 mm	10-20 mm	5-10 mm	1-2 mm

Medium	2-5 mm	20-50 mm	10-20 mm	2-5 mm
Coarse	5-10 mm	50-100 mm	20-50 mm	5-10 mm
Very coarse	> 10 mm	> 100 mm	> 50 mm	> 10 mm

Sumber : *SWAT Theoretical Documentation 2009(2002,p.215)*

Tabel 2.15.

Klasifikasi Permeabilitas

Kelas	Keterangan	Permeabilitas (cm/jam) (Utomo, 1987)	Permeabilitas (mm/jam) (<i>SWAT 2000, 2003</i>)
1	Cepat	> 12,5	> 150
2	Agak cepat	6,25 – 12,5	50-150
3	Sedang	2,00 – 6,25	15-50
4	Agak lambat	0,50 – 2,00	5-15
5	Lambat	0,125 – 0,50	1-5
6	Sangat lambat	< 0,125	< 1

Sumber : Utomo, 1987: 76 (*SWAT Theoretical Documentation 2000, (2002,p.219)* dalam Suhartanto, (2008,p.43))

Di Indonesia, beberapa peneliti juga telah mencoba untuk menggunakan nomograph erodibilitas untuk menduga indeks erodibilitas tanah (a.l. Ambar dan Syarifuddin, 1979; Utomo dan Mahmud, 1983). Bols (1979) dan Utomo (1985) mengadakan pengukuran indeks erodibilitas tanah di DAS Brantas dengan percobaan lapang dan kemudian membandingkannya dengan hasil pendugaan nomograph erodibilitas. Hasil yang diperoleh seperti yang dicantumkan pada Tabel 2.16., menunjukkan bahwa hasil yang diperoleh dengan kedua metode tersebut tidak banyak berbeda. Ambar dan Wiresum (1980) telah mencoba menghubungkan beberapa nilai indeks erodibilitas yang diperoleh dari beberapa metode. Ambar dan Wiresum mengukur erodibilitas dengan tes dinamik pada infiltrasi dan stabilitas agregat dan faktor erodibilitas K.

Utomo mengemukakan bahwa dengan erosivitas yang tinggi, seperti halnya di Indonesia, maka dengan klasifikasi yang dibuat Dangler dan El-Swaifi (1976) akan diperoleh erosi nyata yang sangat besar variasinya di dalam satu kelas erodibilitas. Disamping itu Utomo (1985) juga mengamati hasil pengukuran erodibilitas tanah yang dilakukan oleh peneliti-peneliti di Indonesia yang pada umumnya nilai indeks erodibilitas, K, tertinggi masih dibawah K = 0,4 dengan sebagian besar K= 0,2-0,3 (Tabel 2.7.). Oleh karena itu Utomo (1985) mengusulkan klasifikasi erodibilitas tanah di Indonesia.

Tabel 2.16.

Hasil Pengamatan Indeks Erodibilitas Tanah di Beberapa Daerah di Indonesia dengan Percobaan Lapang dan Nomograph Erodibilitas

Jenis Tanah	Nilai K	Sumber
-------------	---------	--------

	Percobaan Lapang	Nomograph	
Andosol, Lembang	0.16	0.14	Bols, 1979
Latosol, Dramaga	0.02 - 0.04	0.04	
Latosol, Citaman	0.135	0.12	
Podsolik, Jonggol	0.13	0.15	
Mediteran merah, Punung	0.17	0.14	
Mediteran merah, Putat	0.25	0.15	
Grumosol, Jegu	0.24 - 0.31	0.24	
Litosol, Sentolo	0.18 - 0.19	0.19	
Regosol, Wajak	0.29	0.26	Utomo, 1985
Latosol, Dampit	0.16	0.19	
Andosol, Batu	0.07	0.12	
Mediteran, Pajaran	0.32	0.31	
Kambisol, Ngantang	0.13	0.16	

Sumber : Utomo dalam Erosi dan Konservasi Tanah (1994,p.52)

2.8.5.2. Faktor Pengelolaan Tanaman (*Cover and Management Factor*) (C)

Faktor *C* menunjukkan keseluruhan pengaruh dari vegetasi, seresah, kondisi permukaan tanah, dan pengelolaan lahan terhadap besarnya tanah yang hilang (erosi). Oleh karenanya, besarnya angka *C* tidak selalu sama dalam kurun waktu satu tahun. Meskipun kedudukan *C* dalam persamaan *USLE* ditentukan sebagai faktor independen, nilai sebenarnya dari faktor *C* ini kemungkinan besar tergantung pada faktor-faktor lain yang termasuk dalam persamaan *USLE*.

Tabel 2.17.

Perkiraan Besarnya Nilai K pada Beberapa Tanah di Jawa

Tanah	Nilai K	Sumber
Regosol, Jatiluhur	0.23 - 0.31	Ambar dan Syarifuddin, 1979
Litosol, Jatiluhur	0.16 - 0.29	
Latosol merah, Jatiluhur	0.12	
Latosol merah kuning	0.26 - 0.31	
Latosol coklat	0.31	
Grumosol, Jatiluhur	0.21	
Gley Humic, Jatiluhur	0.2	
Hidromorf kelabu	0.2	
Mediteran, Yogyakarta	0.26	Kurnia dan Sujarwo, 1977
Litosol, Yogyakarta	0.19	Bols, 1979

Grumosol, Yogyakarta	0.24 - 0.31	
Mediteran, Caruban	0.21 - 0.32	PSLH_Unibraw, 1984
Grumosol, Caruban	0.26	
Andosol, Batu	0.08 - 0.1	
Andosol, Pujon	0.04 - 0.1	
Cambisol, Pujon	0.12 - 0.16	
Mediteran, Ngantang	0.20 - 0.30	
Litosol, Malang selatan	0.26 - 0.30	
Regosol, Malang selatan	0.16 - 0.28	
Cambisol, Malang Selatan	0.17 - 0.3	
Mediteran, Dampit	0.21 - 0.3	
Latosol, Malang Selatan	0.14 - 0.20	

Sumber : Utomo dalam Erosi dan Konservasi Tanah (1994,p.54)

Faktor C yang merupakan salah satu parameter dalam rumus USLE saat ini telah dimodifikasi untuk dapat dimanfaatkan untuk menentukan besarnya erosi di daerah berhutan atau lahan dengan dominasi vegetasi berkayu. Sembilan parameter telah ditentukan sebagai faktor yang berpengaruh dalam menentukan besarnya erosi di daerah bervegetasi kayu tersebut. Kesembilan unsur tersebut adalah konsolidasi tanah, sisa-sisa tanaman, tajuk vegetasi, sistem perakaran, efek sisa perakaran dari kegiatan pengelolaan lahan, faktor kontur, kekasaran permukaan tanah, gulma dan rumput-rumputan (Asdak, 2004,p.372).

Vegetasi yang tumbuh pada suatu lahan dapat bervariasi sesuai dengan pola tata tanam dan masa pertumbuhan tanaman, sehingga *SWAT* merubah C_{USLE} dengan persamaan sebagai berikut (Suhartanto, 2008,p.44) :

$$\dots\dots\dots(2-52)$$

dengan :

= nilai minimum faktor pengelolaan tanaman

= jumlah *residue* (mulsa, sisa-sisa tanaman) di permukaan tanah (kg/ha)

Nilai minimum faktor pengelolaan tanaman dapat dihitung dari nilai rata-rata tahunan faktor C dengan menggunakan persamaan (Arnold and Williams, 1995) :

$$\dots\dots\dots(2-53)$$

dimana :

= nilai rata-rata tahunan faktor C

Pada Tabel 2.18. di bawah ini ditunjukkan beberapa nilai C yang diperoleh dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Wischmeier dan Arnoldus yang dimodifikasi oleh Boediono (1982) dan disarankan oleh Soelistyari (1986) untuk digunakan pada keseluruhan pola tanam.

2.8.5.3. Faktor Pengelolaan dan Konservasi Tanah (*Support Practice Factor*) (P)

Pengaruh aktivitas pengelolaan dan konservasi tanah (P) terhadap besarnya erosi dianggap berbeda dari pengaruh yang ditimbulkan oleh aktivitas pengelolaan tanaman (C), oleh karenanya, dalam rumus *USLE* faktor P tersebut dipisahkan dari faktor C . Tingkat erosi yang terjadi sebagai akibat pengaruh aktivitas pengelolaan dan konservasi tanah (P) bervariasi, terutama tergantung pada kemiringan lereng.

Faktor P adalah nisbah antara tanah tererosi rata-rata dari lahan yang mendapat perlakuan konservasi tertentu terhadap tanah tererosi rata-rata dari lahan yang diolah tanpa tindakan konservasi, dengan catatan faktor-faktor penyebab erosi yang lain diasumsikan tidak berubah. Praktek bercocok tanam yang kondusif terhadap penurunan kecepatan limpasan permukaan dan yang memberikan kecenderungan bagi limpasan permukaan untuk mengalir langsung ke tempat yang lebih rendah dapat memperkecil nilai P .

Di ladang pertanian, besarnya harga faktor P menunjukkan jenis aktivitas pengolahan tanah (pencangkulan dan persiapan tanah lainnya). Dalam pemakaian di bidang konstruksi, besarnya P menunjukkan kekasaran permukaan tanah sebagai akibat cara kerja traktor dan mesin-mesin pertanian lainnya. Besarnya faktor P yang telah berhasil ditentukan berdasarkan penelitian di Pulau Jawa adalah seperti pada Tabel 2.19.

Tabel 2.18.
Nilai C untuk Berbagai Jenis Tanaman dan Pengelolaan Tanaman

No	Jenis Tanaman	Nilai C
1	Lahan tanpa tanaman	1.000
2	Hutan :	
	a. tak terganggu	0.001
	b. tanpa tanaman bawah	0.130
	c. tanpa tanaman bawah dan serasah	0.500
3	Semak :	
	a. tak terganggu	0.010
	b. sebagian berumput	0.100
4	Kebun	
	a. campuran asli	0.020

	b. kebun	0.070
	c. pekarangan	0.200
5	Perkebunan	
	a. penutupan tanah sempurna	0.100
	b. ditanami alang-alang	0.020
	c. pembakaran alang-alang setahun sekali	0.060
	d. jenis serai (citronella grass)	0.650
	e. savana dan padang rumput	0.010
	f. rumput <i>Brochioria</i>	0.002
6	Tanaman pertanian	
	a. umbian bakar	0.630
	b. biji-bijian	0.510
	c. kacang-kacangan	0.360
	d. tembakau	0.580
	e. kapas, tembakau	0.500
	f. campuran	0.430
	g. padi irigasi	0.020
7	Perladangan:	
	a. satu tahun tanam, satu tahun bero	0.280
	b. satu tahun tanam, dua tahun bero	0.190
8	Pertanian dengan pencagaran tanah	
	a. Mulsa jerami	0.06 - 0.20
	b. Mulsa kacang tanah	0.20 - 0.40
	c. strip	0.10 - 0.30
	d. strip <i>Crotalaria</i>	0.640
	e. teras	0.040
	f. teras guludan	0.140

Sumber : Utomo dalam Erosi dan Konservasi Tanah (1994,p.151)

Tabel 2.19.
Nilai faktor *P* pada Berbagai Aktivitas Konservasi Tanah di Jawa

Teknik Konservasi Tanah	Nilai P
Teras Bangku :	
a. baik	0,20
b. jelek	0,35
Teras bangku : jagung-ubi kayu/kedelai	0,06
Teras bangku : sorghum-sorghum	0,02
Teras tradisional	0,40
Teras gulud : padi-jagung	0,01
Teras gulud : ketela pohon	0,06

Teras gulud : jagung-kacang + mulsa sisa tanaman	0,01
Teras gulud : kacang kedelai	0,11
Tanaman dalam kontur :	
a. kemiringan 0-8 %	0,50
b. kemiringan 9-20 %	0,75
c. kemiringan >20 %	0,90
Tanaman dlm. jalur-jalur : jagung-kacang tanah + mulsa	0,05
Mulsa limbah jerami :	
a. 6 ton/ha/tahun	0,30
b. 3 ton/ha/tahun	0,50
c. 1 ton/ha/tahun	0,80
Tanaman perkebunan :	
a. disertai penutup tanah rapat	0,10
b. disertai penutup tanah sedang	0,50
Padang rumput :	
a. baik	0,04
b. jelek	0,40

Sumber : Abdurachman dalam Asdak (2004,p.375)

2.8.5.4. Faktor Topografi Panjang Lereng (*L*) dan Kemiringan Lereng (*S*)

Faktor indeks topografi *L* dan *S*, masing-masing mewakili pengaruh panjang dan kemiringan lereng terhadap besarnya erosi. Panjang lereng mengacu pada aliran air permukaan, yaitu lokasi berlangsungnya erosi dan kemungkinan terjadinya deposisi sedimen. Pada umumnya, kemiringan lereng diperlakukan sebagai faktor yang seragam.

Besarnya nilai *LS* (faktor topografi) dihitung dengan menggunakan rumus (*SWAT Theoretical Documentation 2000, 2002 : 222 dalam Suhartanto, 2008,p.46*) :

$$\dots\dots\dots (2-54)$$

dengan :

= panjang lereng (m)

m = syarat eksponensial

= sudut lereng

Syarat eksponensial *m* dihitung dengan :

$$\dots\dots\dots (2-55)$$

dengan :

$$slp = \text{kemiringan lereng HRU (Hydrologic Response Unit)}$$
$$=$$

2.8.5.5. **Faktor Pecahan Batu Kasar (Coarse Fragment Factor)**

Faktor pecahan batuan kasar ini dihitung dengan persamaan sebagai berikut (*SWAT Theoretical Documentation 2000, 2002:220* dalam Suhartanto, 2008:47) :

$$CFRG = \exp(-0,053 \cdot \text{rock}) \dots \dots \dots (2-56)$$

dengan :

rock = persentase batuan pada lapisan tanah.

2.8.6. **Hasil Sedimen (Sediment Yield)**

Sedimen merupakan hasil proses erosi, baik berupa erosi permukaan, erosi parit, atau jenis erosi tanah lainnya. Sedimen umumnya mengendap di bagian bawah kaki bukit, di daerah genangan banjir, di saluran air, sungai, dan waduk.

Hasil sedimen tergantung pada besarnya erosi total di DAS/sub-DAS dan tergantung pada transpor partikel-partikel tanah yang tererosi tersebut keluar dari daerah tangkapan air DAS/sub-DAS. Produksi sedimen umumnya mengacu kepada besarnya laju sedimen yang mengalir melewati satu titik pengamatan tertentu dalam suatu sistem DAS. Besarnya hasil sedimen biasanya bervariasi mengikuti karakteristik fisik DAS/sub-DAS (Asdak, 2004,p.404).

2.8.6.1. **Transportasi Sedimen**

Besarnya transpor sedimen dalam aliran sungai merupakan fungsi dari suplai sedimen dan energi aliran sungai (*stream energy*).

Williams (1980) mengembangkan sebuah metode untuk menentukan degradasi sebagai fungsi dari kemiringan saluran dan kecepatan, dimana metode tersebut didefinisikan dari metode energi aliran sungai Bagnold (1977). Dimana besarnya suplai sedimen merupakan fungsi dari kecepatan aliran puncak, dengan persamaan sebagai berikut (*SWAT Theoretical Documentation 2000, 2002 : 368* dalam Suhartanto, 2008,p.47) :

..... (2-57)

dengan :

= debit aliran puncak (m^3/dtk)

= Luas saluran (m^2)

Debit aliran puncak didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut :

..... (2-58)

dengan :

= *peak rate adjustment factor*

= debit aliran rata-rata (m^3/dtk)

Sehingga konsentrasi maksimum sedimen yang dapat diangkut dihitung dengan rumus :

..... (2-59)

dengan :

= konsentrasi maksimum sedimen yang terangkut (ton/m^3 atau kg/L)

= koefisien

= nilai eksponen (dalam kondisi normal bervariasi antara 1,0-2,0, sedangkan di dalam persamaan energi aliran sungai Bagnold bernilai 1,5)

Jika konsentrasi sedimen di dalam sungai pada suatu waktu adalah $conc_{sed,ch,i}$, dan terjadi kondisi $conc_{sed,ch,i} > conc_{sed,ch,mx}$ maka deposisi sedimen merupakan proses yang dominan terjadi pada waktu dan *section* di sungai tersebut, dan berat bersih deposisi sedimen dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

..... (2-60)

dengan :

= total sedimen yang terdeposisi di sungai (ton)

= Volume air di *section* sungai (m^3)

Jika $conc_{sed, ch, i} < conc_{sed, ch, mx}$, maka akan terjadi proses degradasi di segment sungai tersebut, dimana berat bersih total sedimen dari proses degradasi dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\dots\dots\dots (2-61)$$

dimana :

= total sedimen hasil degradasi di sungai (ton)

= faktor erodibilitas saluran (cm/jam/Pa)

= faktor1penutup saluran

Setelah memperhitungkan total deposisi dan degradasi sedimen di sungai, maka total sedimen yang ada di sungai tersebut dapat dihitung dengan persamaan :

$$\dots\dots\dots (2-62)$$

dengan :

= total sedimen melayang di sungai (ton)

= total sedimen melayang di sungai pada permulaan periode waktu (ton)

= total sedimen yang terdeposisi di setiap *section* sungai (ton)

= total sedimen hasil degradasi di setiap *section* sungai (ton)

Untuk total sedimen yang terangkut keluar dari sungai tersebut ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\dots\dots\dots (2-62)$$

dengan :

= total sedimen yang terangkut keluar sungai (ton)

= volume *outflow* selama waktu konsentrasinya (m³)

= volume air di section sungai tersebut (m³)

2.9. Pola Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah

Kegiatan konservasi tanah merupakan bagian dari program nasional yang lebih luas yaitu program penyelamatan hutan, tanah dan air yang mempunyai sasaran, antara lain yaitu memperbaiki fungsi hidrologi DAS, meningkatkan produktivitas sumberdaya alam, meningkatkan kesadaran masyarakat pemakai lahan terhadap prinsip-prinsip konservasi tanah dan air, serta meningkatkan kualitas lingkungan hidup. Program konservasi tanah tersebut dikenal sebagai program konservasi tanah pola RLKT (Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah) dan berisi aturan penggunaan lahan, arahan rehabilitasi lahan dan konservasi tanah dalam skala DAS serta penetapan prioritas penanganannya agar dapat kembali dan sesuai dengan fungsi masing-masing.

2.9.1. Arahan Penggunaan Lahan

Arahan penggunaan lahan ditetapkan berdasarkan kriteria dan tata cara penetapan hutan lindung dan hutan produksi yang berkaitan dengan karakteristik fisik DAS. Karakteristik fisik DAS, antara lain :

1. Kemiringan lereng
2. Jenis tanah menurut kepekaannya terhadap erosi
3. Curah hujan harian rata-rata

Kemiringan lereng dapat ditentukan dengan melihat garis-garis kontur pada peta topografi. Hasil interpretasi kemiringan lereng ini kemudian dipetakan menjadi peta kemiringan lereng. Jenis tanah diperoleh dari interpretasi peta tanah ditinjau dari DAS atau sub DAS yang menjadi kajian. Besarnya curah hujan ditentukan dari data hujan pada stasiun penakar hujan yang terdekat. Data lain yang dibutuhkan adalah sistem drainasi (pola aliran) dan tata guna lahan. Untuk karakteristik DAS yang terdiri dari kemiringan lereng, jenis tanah, dan curah hujan harian rata-rata pada setiap satuan lahan perlu diklasifikasikan dan diberi bobot (skor) sebagai berikut (Asdak, 2002,p.415):

Tabel 2.20.

Kemiringan Lereng

Kelas	Kemiringan Lereng	Skor
1	0-8% (datar)	20
2	8-15% (landai)	40
3	15-25% (agak curam)	60
4	25-45% (curam)	80
5	≥ 45% (sangat curam)	100

Sumber : Asdak (2002,p.415)

Tabel 2.21.

Jenis Tanah Menurut Kepekaannya Terhadap Erosi

Kelas	Jenis Tanah	Skor
1	Aluvial, Planosol, Hidromorf kelabu, Laterik (tidak peka)	15
2	Latosol (agak peka)	30
3	Tanah hutan coklat, tanah mediteran (kepekaan sedang)	45
4	Andosol Laterik, Grumosol, Podsol, Podsolik (peka)	60
5	Regosol, Litosol, Organosol, Renzina (sangat peka)	75

Sumber : Asdak (2002,p.416)

Tabel 2.22.

Intensitas Hujan Harian Rata-rata

Kelas	Hujan harian rata-rata	Skor
1	$\leq 13,6$ mm/hari (sangat rendah)	10
2	13,6-20,7 mm/hari (rendah)	20
3	20,7-27,7 mm/hari (sedang)	30
4	27,7-34,8 mm/hari (tinggi)	40

Sumber : Asdak (2002,p.416)

Penetapan penggunaan lahan setiap satuan lahan kedalam suatu kawasan fungsional dilakukan dengan menjumlahkan skor dari ketiga faktor tersebut diatas dengan mempertimbangkan keadaan setempat. Dengan demikian, dapat menentukan status kawasan yang tepat untuk suatu DAS atau sub DAS tersebut.

Menurut Balai Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah (BRLKT) Departemen Kehutanan, kriteria yang digunakan untuk menentukan status kawasan berdasarkan fungsinya, adalah sebagai berikut :

1. Kawasan Lindung

- Satuan lahan dengan jumlah skor dari ketiga faktor fisik yang sama dengan atau lebih besar dari 175 dan memenuhi salah satu atau beberapa syarat di bawah ini :
- Mempunyai kemiringan lereng $> 45\%$
- Tanah dengan klasifikasi sangat peka terhadap erosi dan mempunyai kemiringan lereng $> 15\%$
- Merupakan jalur pengaman aliran sungai, sekurang-kurangnya 100 m di kiri-kanan alur sungai
- Merupakan pelindung mata air, yaitu 200 m dari pusat mata air
- Berada pada ketinggian ≥ 2000 m dpl
- Guna kepentingan khusus dan ditetapkan oleh pemerintah sebagai kawasan lindung

2. Kawasan Penyangga

Satuan lahan dengan jumlah skor dari ketiga faktor fisik antara 125-174 serta memenuhi kriteria umum sebagai berikut :

- Keadaan fisik areal memungkinkan untuk dilakukan budidaya pertanian secara ekonomis
- Lokasinya secara ekonomis mudah dikembangkan menjadi kawasan penyangga
- Tidak merugikan dari segi ekologi atau lingkungan hidup

3. Kawasan Budidaya Tanaman Tahunan

Satuan lahan dengan jumlah skor dari ketiga faktor fisik ≤ 124 serta sesuai untuk dikembangkan usaha tani tanaman tahunan (tanaman perkebunan, tanaman industri). Selain itu areal tersebut harus memenuhi kriteria umum untuk kawasan penyangga

4. Kawasan Budidaya Tanaman Semusim.

Satuan lahan dengan kriteria seperti dalam penetapan kawasan budidaya tanaman tahunan serta terletak di tanah milik, tanah adat, dan tanah negara yang seharusnya dikembangkan sebagai usaha tani tanaman semusim. Untuk menghasilkan arahan penggunaan lahan dan menduga potensi sumber daya lahan untuk berbagai kegunaannya, maka dilakukan pengukuran/penilaian terhadap kondisi lahan. Manfaat utama evaluasi sumber daya lahan adalah menilai kesesuaian lahan bagi suatu penggunaan tertentu, karena dengan evaluasi ini diketahui hubungan-hubungan antara kondisi lahan dengan perbandingan dan alternatif penggunaan yang diharapkan berhasil.

Dalam studi analisa ini nantinya dalam penentuan penggunaan lahan yang baru akan menggabungkan antara fungsi kawasan dengan kemampuan penggunaan lahannya serta juga meninjau RTRW lokasi daerah kajian. Tujuan dari pengkombinasian ini adalah agar didapatkan suatu arahan penggunaan lahan yang efektif, efisien, serta cukup optimal dalam pengendalian erosi dan banjir, sehingga dikemudian hari dapat mengurangi resiko yang diakibatkan bencana alam yang lebih besar.

Arahan kemampuan penggunaan lahan dalam studi ini secara umum didasarkan pada Kepres No. 32 tahun 1997 dan Direktorat Jenderal Reboisasi dan Rehabilitasi Lahan (Departemen Kehutanan) yang meliputi:

- a. Hutan lindung, dengan kriteria:
 - Kawasan hutan dengan faktor-faktor lereng lapangan, jenis tanah, curah hujan yang melebihi skor 175.
 - Mempunyai lereng lapangan 40 % atau lebih.
 - Mempunyai ketinggian di atas permukaan laut 2000 m atau lebih.
- b. Cagar Alam, dengan kriteria
 - Kawasan yang ditunjuk mempunyai keanekaragaman jenis tumbuhan dan satwa serta tipe ekosistemnya.
 - Mewakili formasi biota tertentu dan/atau unit-unit penyusun.
 - Mempunyai kondisi alam, baik biota maupun fisiknya yang masih asli dan tidak atau belum diganggu manusia.
 - Mempunyai luas dan bentuk tertentu agar mempunyai pengelolaan yang efektif dengan daerah penyangga yang cukup luas.
 - Mempunyai ciri khas dan dapat merupakan satu-satunya contoh di suatu daerah serta keberadaannya memerlukan konservasi.
- c. Hutan wisata, dengan kriteria
 - Kawasan yang ditunjuk memiliki keadaan yang menarik dan indah baik secara alamiah maupun buatan manusia.
 - Memenuhi kebutuhan manusia akan rekreasi dan olah raga.
 - Mengandung satwa yang dapat dikembangkan sehingga memungkinkan perburuan secara teratur dengan mengutamakan segi rekreasi, olah raga dan kelestarian satwa.
 - Mempunyai luas yang cukup dan lapangan yang tidak membahayakan.
- d. Hutan campuran (hutan rakyat), dengan kriteria:
 - Lahan milik.
 - Sangat diutamakan pada lahan dengan kemiringan > 50 % atau lapisan tanahnya dangkal dan berbatu sehingga tidak menguntungkan untuk usaha tani tanaman semusim.
 - Lahan yang ditelantarkan.
 - Daerah perlindungan air dan jurang.
 - Dapat menghasilkan berbagai macam produksi baik berupa kayu, hijauan pakan ternak, dan sebagainya.

2.9.2. Usaha Konservasi

Konservasi tanah adalah usaha yang dilakukan untuk meningkatkan produktivitas tanah. Pada umumnya konservasi tanah dimaksudkan untuk (Hardjowigeno, 1995,p.163):

1. Melindungi tanah dari curahan langsung air hujan
2. Meningkatkan kapasitas infiltrasi tanah
3. Mengurangi limpasan permukaan
4. Meningkatkan stabilitas agregat tanah

Secara garis besar pengendalian erosi dapat dilakukan dengan tiga metode, yaitu: (a) metode vegetatif, (b) metode mekanis, dan (c) metode kimiawi. Dua metode yang pertama banyak digunakan dalam konservasi air dan lahan, sedangkan metode kimiawi belum banyak diterapkan mengingat adanya kendala teknologi dan biaya, sehingga dalam studi analisa ini yang digunakan hanya metode vegetatif dan metode mekanik saja.

2.9.2.1. Metode Vegetatif

Metode vegetatif mempunyai fungsi ganda dalam usaha konservasi tanah yaitu untuk meningkatkan ketahanan tanah juga untuk mengurangi energi yang dapat menyebabkan erosi. Metode vegetatif dalam pelaksanaannya meliputi kegiatan-kegiatan sebagai berikut:

a. Reboisasi dan Penghijauan

Reboisasi adalah penghutanan kembali tanah-tanah hutan yang gundul dengan ditanami tanaman-tanaman keras. Untuk kepentingan reboisasi, pemerintah telah menyediakan bibit tanaman pohon pinus, jati, mahoni, dan kayu putih. Sedangkan penghijauan adalah penanaman tanah-tanah rakyat dan tanah-tanah lainnya seperti tanah desa, tanah negara, tanah bekas perkebunan baik di dataran tinggi maupun daerah aliran sungai yang kesemuanya berada di luar kawasan hutan, dengan pohon-pohon terpilih atau rumput-rumputan dengan tujuan untuk pengawetan tanah. Tanaman yang dipergunakan untuk penghijauan biasanya berupa turi, cengkeh, jambu mente, kayu manis, petai, nangka, durian, dan karet.

b. Penanaman Tanaman Penutup Tanah (*vegetative cover*)

Dilakukan dengan menanam tanaman yang mempunyai sifat tumbuh rendah dan melebar dengan naungan daun yang cukup luas. Tujuan dari penanaman tanaman penutup tanah ini adalah untuk mebatasi evaporasi dan melindungi permukaan tanah

dari terpaan butir hujan. Pada lahan berlereng, tanaman penutup tanah dapat berfungsi mengurangi laju aliran permukaan serta mencegah erosi dan kehilangan tanah. Sistem akar tanaman menciptakan rongga-rongga dalam tanah yang akan meningkatkan peresapan dan penyimpanan air yang berdampak pada pengurangan aliran permukaan.

c. Penanaman Tanaman Menurut Garis Kontur (*contour cultivation*)

Penanaman secara kontur adalah penanaman tanaman yang searah atau sejajar dengan garis kontur atau menyilah lereng tanah. Metode ini sangat diperlukan dan harus diperhatikan kalau keadaan tanahnya mempunyai kemiringan. Semua tindakan pengolahan tanah juga harus searah kontur. Metode ini sangat sesuai bagi tanah-tanah yang memiliki kemiringan 3-8 % tetapi kurang efektif bagi tanah dengan kemiringan kurang dari 3 % dan lebih dari 8 % sampai 25 % (Kartasapoetra, 2000: 149). Tujuan dari *contour cultivation* ini adalah untuk mengurangi laju aliran permukaan sehingga mampu mencegah erosi dan kehilangan tanah lapisan atas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bertanam menurut kontur dapat mengurangi aliran permukaan sebesar 29 % dan kehilangan tanah sebesar 6 %.

d. Penanaman Tanaman Dalam Larikan (*Strip Cropping*)

Dilakukan dengan menanam jenis tanaman yang berbeda pada lajur yang berlainan. Satu jenis tanaman adalah yang menghasilkan komoditas lebih bernilai ekonomi seperti tanaman pangan dan hortikultura sedang jenis lainnya adalah tanaman pakan yang lebih berfungsi konservasi seperti rumput-rumputan. Pada lahan berlereng, lajur tanaman dibuat mengikuti kontur (*conour strip*) sehingga menambah dampak positif pada upaya konservasi air dan lahan. Bagian lahan dengan topografi yang rumit, bagian yang sulit tidak dibudidayakan tetapi disisihkan sebagai area penyangga (*buffer strip*). Lebar dari lajur tanaman produksi dan tanaman konservasi disesuaikan dengan jenis tanah, lereng dan tingkat bahaya erosi.

e. Pergiliran Tanaman (*crop rotation*)

Pergiliran tanaman adalah suatu sistem bercocok tanam pada sebidang tanah, terdiri dari beberapa macam tanaman yang ditanam secara berturut-turut pada waktu tertentu kemudian setelah masa panen tiba, kembali lagi pada tanaman semula. Manfaat dari metode ini antara lain mengurangi erosi, meningkatkan produksi pertanian, memperkecil resiko gagal panen, memperbaiki kesuburan tanah, mengurangi biaya pengelolaan tanah, memelihara keseimbangan biologis,

memberantas hama/penyakit tanaman atau menekan pertumbuhan tanaman pengganggu.

f. Tumpang Gilir (*relay cropping*)

Tumpang gilir adalah sistem bercocok tanam dengan menggunakan dua atau lebih jenis tanaman di sebidang tanah, dimana tanaman kedua ditanam setelah tanaman pertama berbunga. Selain untuk mencegah erosi, tumpang gilir juga bermanfaat untuk mempertinggi intensitas penggunaan tanah.

g. Pemulsaan (*mulching*)

Dilakukan dengan pemberian sisa tanaman atau seresah diatas permukaan tanah dari terpaan butir-butir hujan. Pemberian mulsa lazim dilakukan untuk tanaman yang ditanam secara individual, tetapi dapat juga diterapkan pada tanaman musiman dalam baris.

2.9.2.2. Metode Mekanik

Usaha konservasi dengan metode mekanik bertujuan untuk memperkecil laju limpasan permukaan, sehingga daya rusaknya berkurang dan untuk menampung limpasan permukaan kemudian mengalirkannya melalui bangunan atau saluran yang telah dipersiapkan. Beberapa metode yang digunakan antara lain (Utomo, 1994: 85):

Usaha konservasi dengan metode mekanik bertujuan untuk memperkecil laju limpasan permukaan, sehingga daya rusaknya berkurang dan untuk menampung limpasan permukaan kemudian mengalirkannya melalui bangunan atau saluran yang telah dipersiapkan. Beberapa metode yang digunakan antara lain (Utomo, 1994: 85):

a. Pembuatan Saluran Pemisah

Saluarn pemisah umumnya dibangun sebagai batas pemisah dengan lahan milik orang lain. Saluran ini berfungsi agar air limpasan permukaan dari lahan lain tidak masuk ke daerah proyek, yang jika dibiarkan dapat merusak bangunan yang telah dibuat. Limpasan yang masuk ke dalam saluran pemisah kemudian dialirkan melalui jalan air.

b. Saluran Pembuang Air (SPA)

Saluran pembuang air adalah saluran pembuang untuk menampung dan mengalirkan limpasan permukaan. Saluran ini dibangun searah lereng. Agar dasar saluran tidak terkikis, maka dasar saluran dilengkapi dengan atu-batuan atau dengan vegetatif *lining*.

c. Pembuatan Teras

Pembuatan teras dimaksudkan untuk mengurangi panjang dan kemiringan lereng sehingga dapat memperkecil limpasan permukaan. Berdasarkan bentuk dan fungsinya ada beberapa macam teras, yaitu (Utomo, 1989,p.81):

1. Teras Saluran (*channel terrace*)

Teras saluran dibangun untuk mengumpulkan air aliran permukaan pada saluran yang telah dipersiapkan, kemudian dialirkan ke jalan air. Teras ini dibuat searah lereng dengan membuat tanggul dengan saluran di atasnya. Tanah untuk tanggul diambil dari sisi atas atau dari kedua sisi tanggul. Ada tiga macam teras saluran:

- Teras datar: digunakan untuk tanah dengan kemiringan kurang dari 3 % dan untuk tanah yang mempunyai permeabilitas tinggi dan jenis tanah kering.
- Teras kredit: digunakan untuk tanah dengan kemiringan 3-10 % dengan jarak antar guludan bervariasi 5-12 m.
- Teras gulud: digunakan untuk tanah dengan kemiringan antara 10-40 %.

2. Teras Bangku atau Tangga (*bench terrace*)

Teras bangku dimaksudkan untuk mengurangi panjang lereng, dengan jalan memotong lereng dan meratakan tanah di bawahnya, sehingga terbentuk deretan bangku atau tangga. Teras bangku dibangun pada tanah dengan kemiringan antara 20-30 % dan mempunyai solum tanah yang cukup dalam. Ada berbagai macam

teras bangku yang dapat ditemukan di lapangan, yaitu:

1. Teras bangku datar (*level terrace*)
2. Teras bangku miring (*slope terrace*)

2.10 Kekritisan Lahan

Dalam studi ini penentuan tingkat kekritisan lahan dilihat dari Indeks Bahaya Erosi (IBE) yang terjadi dan kekritisan lahan dikelompokkan menjadi 4 (empat) yaitu : 19

1. Potensial Kritis yaitu lahan yang bebas dari erosi (masih tertutup vegetasi), atau mengalami erosi ringan, tetapi apabila kegiatan konservasi tidak dilaksanakan dan tanah dibiarkan terbuka maka erosi dapat terjadi.
2. Semi Kritis yaitu lahan yang telah mengalami erosi ringan sampai sedang, antara lain erosi permukaan dan erosi alur, tanah masih subur tetapi fungsi hidrologi telah menurun dan bila tidak ada usaha perbaikan maka dalam waktu relatif singkat akan menjadi kritis.

3. Kritis yaitu lahan yang telah mengalami erosi berat dan bila tidak ada usaha perbaikan maka dalam waktu relatif singkat akan menjadi sangat kritis.
4. Sangat Kritis yaitu yang tanah telah mengalami erosi berat – sangat berat.

2.10.1 Erosi Yang diperbolehkan

Pada dasarnya usaha konservasi tanah tidak berusaha menghentikan erosi, tetapi hanya menghentikan laju erosi ke suatu nilai tertentu yang tidak merugikan sehingga secara sederhana seharusnya erosi yang diperbolehkan (Edp) tidak boleh melebihi proses pembentukan tanah. Dengan adanya aktivitas manusia, Bannet (1939) memperkirakan bahwa untuk membentuk lapisan tanah sedalam 25 mm diperlukan waktu lebih kurang 400 tahun. Dengan dasar perhitungan ini maka batas laju erosi dapat diterima adalah 12,5 ton/ha/tahun.

Menurut Arsyad (2006,p.296) menetapkan nilai *Tolerable Soil Loss* (TSL) berdasarkan konsep ‘kedalaman ekuivalen’ dan ‘umur guna tanah’. Satuan erosi yang diperbolehkan sama dengan besar laju erosi yakni ton/ha/tahun. Kedalaman ekuivalen adalah nilai faktor kedalaman tanah dikalikan kedalaman efektif tanah. Umur guna tanah diberikan waktu 400 tahun, angka tersebut merupakan waktu yang cukup untuk memelihara kelestarian tanah (Hammer, 1981 dalam Arsyad, 2006,p.301). Nilai erosi yang diperbolehkan digunakan untuk melihat besar kemampuan erosi yang dapat ditoleransi oleh kemampuan lahan DAS. Bila laju erosi lebih rendah dibandingkan laju erosi yang diperbolehkan maka wilayah tersebut tergolong aman dari bahaya erosi atau pengikisan tanah. Nilai *Tolerable Soil Loss* (TSL) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\dots\dots\dots(64)$$

Kedalaman efektif adalah kedalaman tanah sampai sejauh mana tanah dapat ditumbuhi akar sedangkan untuk faktor kedalaman tanah Tabel 2.23 diketahui berdasarkan ordo dan sub ordo dari jenis tanah Tabel 2.24 dan bobot isi tanah untuk berbagai jenis tanah dapat dilihat pada tabel 2.25.

No	Sub Ordo	Nilai Faktor Kedalaman
		Tanah
1	Aqualf	0.9
2	Udalf	0.9
3	Ustalf	0.9
4	Aquent	0.9
5	Aren't	1
6	Fluvent	1
7	Orthent	1
8	Psamment	1
9	Andept	1
10	Aquept	0.95
11	Tropept	1
12	Alboll	0.75
13	Aquoll	0.9
14	Rendoll	0.9
15	Udoll	1
16	Ustoll	1
17	Aquox	0.9
18	Humox	1
19	Arthox	0.9
20	Usthox	0.9
21	Aquod	0.9
22	Ferrod	0.95
23	Humod	1
24	Arthod	0.95
25	Aquult	0.8
26	Humult	1
27	Udult	0.8
28	Ustult	0.8
29	Udert	1
30	Ustert	1

Sumber : Arsyad (2006,p.202)

Tabel 2.24

Tabel Ordo dan Sub Ordo Tanah

No	Ordo	Sub Ordo	Jenis Tanah
----	------	----------	-------------

1	Entisols	Psamment	Regosol
2	Alfisol	Aqualf	Mediteran
3	Oxisol	Udoll	Latosol
4	Mollisol	Rendoll	Rendzina
5	Ultisol	Aquept	Alluvial
6	Vertisol	Udert	Grumosol
7	Inceptisol	Udept	Kambisol
8	Inceptisol	Andept	Andosol
9	Entisol	Aquent	Gley Humus

Sumber : Soepardi (1993) (dalam Marantieno, 2014)

Tabel 2.25

Bobot isi tanah

No	Jenis Tanah	Bobot Isi Tanah
1	Podsoli merah kuning (ultisol)	1.10 – 1.35
2	Regosol (entisol)	1.07 – 1.48
3	Alluvial (entisol/inseptisol)	1.02 – 1.42
4	Grumosol (vertisol)	0.98 – 1.37
5	Mediteran (alfisol/inseptisol)	0.97 – 1.48
6	Latosol (oxisol)	0.93 – 1.11
7	Glei humus rendah (gleisol/entisol)	0.90 – 0.22
8	Andosol (inseptisol)	0.68 – 0.86
9	Organosol (histosol)	0.14 – 0.21

Sumber : Soepardi (1993) (dalam Marantieno, 2014)

Halaman ini sengaja dikosongkan