

BAB III

DASAR TEORI

3.1. Tinjauan Umum

Sejumlah model prediksi erosi lahan maupun yil sedimen sudah banyak dikembangkan, sebagaimana telah dibahas di berbagai literatur, seperti Bogardi, et.al. (1986), Morgan (1988), Kothayari et.al. (1994), Taley and Dalvi (1995), dan Sukla (1997). Model-model kebanyakan adalah empiris (parametrik) yang dikembangkan berdasarkan proses hidrologi dan fisis yang terjadi selama peristiwa erosi dan pengangkutannya dari DAS ke titik yang ditinjau.

Idealnya, metode prediksi harus memenuhi persyaratan-persyaratan yang nampaknya bertentangan, yaitu model harus dapat diandalkan, dapat digunakan secara umum (berlaku secara universal), mudah dipergunakan dengan data yang minimum, komprehensif dalam hal faktor-faktor yang dipergunakan, dan dapat mengikuti (peka) terhadap perubahan-perubahan yang terjadi di DAS, seperti tindakan konservasi lahan (Morgan, 1986). Namun mengingat begitu rumitnya proses erosi lahan dan yil sedimen, yang merupakan interaksi berbagai faktor, sejauh ini belum ada model yang mampu menerangkan fenomena ini dengan suatu hubungan sederhana dan mudah dalam penggunaannya. Sehingga masih terbuka peluang yang sangat lebar untuk melakukan penelitian-penelitian dalam bidang ini. Pendekatan yang paling memberikan harapan dalam pengembangan metode dan prosedur prediksi adalah dengan merumuskan model konseptual proses erosi (Arsyad, 1989).

Secara umum Gregory and Walling (1973) mengelompokkan model menjadi tiga tipe utama, yaitu model fisik, model analog, dan model digital. Model digital terdiri atas model deterministik, model stokastik, dan model empiris (parametrik). Selanjutnya model parametrik harus dikelompokkan lagi menjadi model kotak hitam, model kotak kelabu, dan model kotak putih. Untuk prediksi erosi dan yil sedimen, model yang umum dipakai adalah model empiris, terutama model-model kotak kelabu. Model ini didasarkan pada pendefinisian faktor-faktor penting dari hasil observasi, pengukuran, percobaan, dan teknik statistik,

kemudian mengaitkannya dengan erosi atau yil sedimen. Belakangan ditemukan bahwa pendekatan ini kurang memuaskan dalam memenuhi tujuan-tujuan penting lainnya dalam pembuatan model, yaitu meningkatkan pemahaman bagaimana sistem erosi bekerja dan responnya terhadap perubahan-perubahan faktor yang berpengaruh. Menghadapi permasalahan ini, maka pengembangan model selanjutnya lebih ditekankan pada model kotak putih dan model deterministik.

3.2. Analisa Hidrologi

3.2.1. Hujan Tunggal (*Single storm event*)

Faktor – faktor hidrologi yang sangat berpengaruh terhadap terjadinya erosi lahan adalah curah hujan dan intensitasnya. Semakin besar curah hujan mengakibatkan semakin besar pula jumlah sedimen yang hanyut dalam aliran air akibat proses erosi. Dengan diketahui besarnya curah hujan pada suatu daerah maka dapat diketahui pula besarnya intensitas hujan pada daerah tersebut, yang dapat digunakan untuk menghitung besarnya erosivitas hujan pada daerah tersebut.

Dalam penentuan erosi untuk kejadian hujan tunggal , erosi oleh air hujan disebabkan karena tenaga kinetik air yang jatuh diatas permukaan tanah. Besarnya tenaga kinetik (KE) adalah:

$$Ek = \frac{1}{2}mv^2$$

m = massa air dan v = kecepatan air jatuh. Semua benda yang bergerak diudara mengalami gesekan dengan udara yang memperlambat gerak benda tersebut. Semakin tinggi kecepatan geraknya semakin besar pula gesekannya. Demikian pula tetesan air hujan yang jatuh di udara akan mengalami gesekan dengan udara. Air yang jatuh tesebut, karena adanya percepatan, gesekannya semakin lama semakin besar pula.

Erosivitas (Lee, 1980)

$$KE = 210,1 + 89 (\log i)$$

KE = energi kinetik (joules/m²); i = intensitas hujan (cm/jam).

Dalam menghitung besarnya energi hujan, dapat juga digunakan dengan cara membagi menjadi beberapa interval berdasarkan itensitasnya.

$$E_i = (11,89 + 8,73 \log I_t) \times N_i \cdot 10^{-3} \quad \text{untuk } 0,05 < I_t < 76,2$$

$$E_i = 0 \quad \text{untuk } I_t < 0,05$$

$$E_i = 28,33 \times N_i \cdot 10^{-3} \quad \text{untuk } I_t > 76,2$$

Penjumlahan E_i untuk semua interval dikalikan dengan intensitas 30 menit (I_{30}) menghasilkan persamaan untuk mendapatkan E (erosivitas) untuk kejadian hujan tunggal

$$E = \sum_{i=1}^n [(11,89 + 8,73 \cdot \log I_i) \times N_i \cdot 10^{-3}] \times I_{30}$$

Untuk mendapatkan besarnya erosivitas hujan digunakan hubungan antara EI_{30} (R) dengan besarnya curah hujan tahunan (P) yang dikemukakan oleh Utomo dan Mahmud 1984:

$$R = 237,4 + 2,61P$$

3.2.2. Curah Hujan Rata – rata

Dalam perhitungan hujan areal ini ada beberapa rumus yang dapat digunakan untuk menghitungnya. Metode tersebut diantaranya adalah metode rata-rata aljabar, metode Thiessen dan metode Isohyet. Metode tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. Metode Rata – rata Aljabar

Metode rata – rata aljabar ditentukan dengan cara menjumlahkan tinggi hujan dari suatu tempat pengukuran selama jangka waktu tertentu, dibagi dengan jumlah pos pengukuran hujan. Penggunaan metode ini mendapatkan hasil yang memuaskan apabila dipakai pada daerah datar, serta curah hujan yang tidak bervariasi banyak dari harga tengahnya dan penempatan alat ukur yang tersebar merata.

$$\text{rumus :} \quad R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$$

dimana :

R = Curah hujan rata-rata (mm)

R_i = Curah hujan pada pos yang diamati (mm)

N = Banyaknya pos hujan

2. Metode Polygon Thiessen

Metode Thiessen ditentukan dengan cara membuat polygon antar pos hujan pada suatu wilayah DAS kemudian tinggi hujan rata-rata dihitung dari jumlah perkalian antara tiap-tiap luas polygon dan tinggi hujannya dibagi dengan luas seluruh DAS. Luas masing - masing polygon tersebut diperoleh dengan cara sebagai berikut :

- Semua stasiun yang terdapat di dalam atau di luar DAS yang berpengaruh dihubungkan dengan garis sehingga terbentuk jarring-jaring segitiga.
- Pada masing-masing segitiga ditarik garis sumbu tegak lurus, dan semua garis sumbu tersebut membentuk polygon.
- Luas daerah yang hujannya dianggap mewakili oleh salah satu stasiun yang bersangkutan adalah daerah yang dibatasi oleh polygon tersebut.

Metode ini cocok untuk menentukan tinggi hujan rata-rata, apabila pos hujannya tidak banyak dan tinggi hujannya tidak merata.

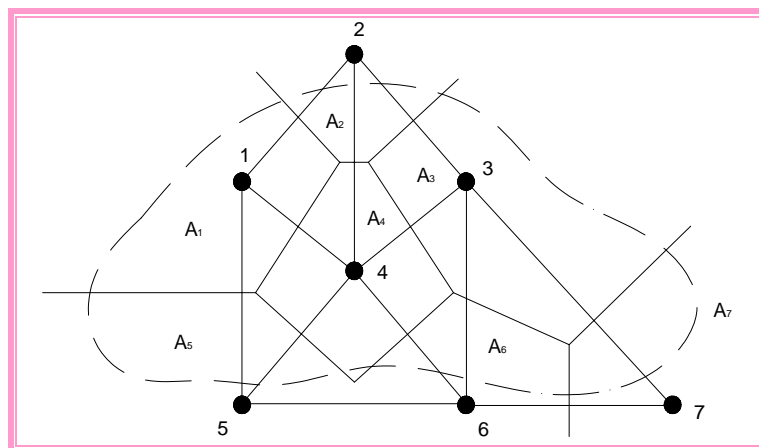
rumus :
$$R = \frac{\sum A_i \cdot R_i}{\sum A}$$

dimana :

R = Curah hujan rata-rata (mm)

R_i = Curah hujan pada pos yang diamati (mm)

A_i = Luas yang dibatasi garis polygon (Km^2)



Gambar 3. 1. Mengukur tinggi hujan dengan cara polygon Thiessen

3. Metode Rata-Rata Isohyet

Metode isohyet ditentukan dengan cara menggunakan kontur tinggi hujan suatu daerah dan tinggi hujan rata-rata DAS dihitung dari jumlah perkalian tinggi hujan rata-rata diantara garis isohyet tersebut dibagi luas seluruh DAS. Metode ini cocok untuk daerah pegunungan dan yang berbukit-bukit.

rumus:

$$R = \frac{\frac{A_1}{2}(R_1 + R_2) + \frac{A_2}{2}(R_2 + R_3) + \frac{A_3}{2}(R_3 + R_4) + \frac{A_{N-1}}{2}(R_N + R_{N+1})}{A_t}$$

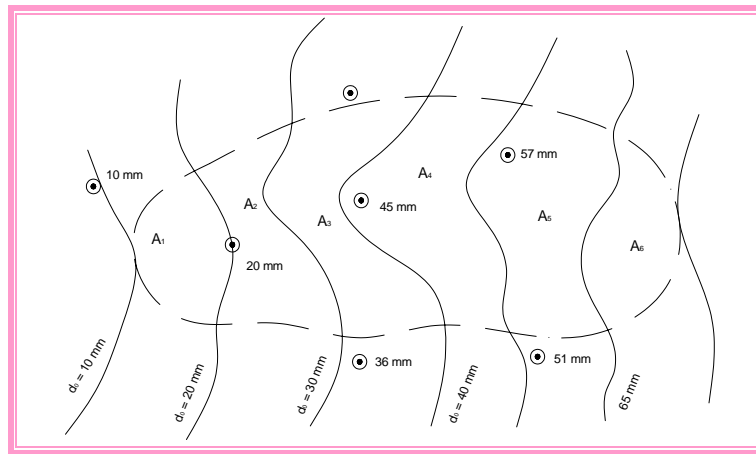
dimana :

R = Curah hujan rata-rata (mm)

A_1 - A_n = Luas daerah yang dibatasi oleh garis isohyet (km^2)

R_1 - R_n = Tinggi curah hujan pada setiap garis isohyet (mm)

A_t = Luas total DAS (km^2)



Gambar 3.2. Mengukur tinggi hujan dengan metode Isohyet

3.2.3. Prediksi Curah Hujan Mendatang

a. Identifikasi

Dalam meramalkan hujan beberapa tahun kemudian, dapat digunakan Model ARMA (*Auto Regressive, Moving Average*) deret berkala tahunan dan metode *box-jenkins* dengan model ARIMA (*Auto Regressive, Integrated, Moving Average*) untuk menghitungnya.

b. Formulasi matematik

Dengan menganggap bahwa seri hidrologi yang dimodelkan dengan proses ARMA stasioner dan kira-kira normal. Apabila tidak, maka diperlukan transformasi dari variabel aslinya. Misalnya variabel deret berkala hidrologi $y_t, y_{t+1}, y_{t+2}, \dots$ dengan interval waktu yang sama $t, t+1, t+2, \dots$ dengan deviasi rata-rata adalah :

$$z_t = y_t - \mu$$

Model ARMA merupakan campuran antara model Autoregresif (AR) dan Moving Average (MA). Sebelum mempelajari model ARMA, perlu diketahui model MA yang untuk order q dapat ditulis :

$$z_t = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}$$

Model MA (q) dari persamaan diatas dapat juga ditulis :

$$z_t = \varepsilon_t - \sum_{j=0}^q \theta_j \varepsilon_{t-j}$$

atau

$$z_t = - \sum_{j=0}^q \theta_j \varepsilon_{t-j}$$

dengan $\theta_0 = -1$

Parameter model adalah rata-rata μ , varians σ_ε^2 dari variabel bebas ε_t dan koefisien $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$.

Proses Autoregresif (AR) order p dapat ditulis sebagai berikut :

$$z_t = \theta_1 z_{t-1} + \theta_2 z_{t-2} + \dots + \theta_p z_{t-p} + \varepsilon_t$$

atau

$$z_t = \sum_{j=1}^p \theta_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t$$

Parameter model AR (p) adalah rata-rata μ , varians σ_ε^2 dari variabel random ε_t dan koefisien $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ yang harus diestimasi dari data.

Gabungan model Autoregresif (AR) order p dan model Moving Average (MA) order q adalah model "Autoregresif Moving Average" (ARMA) order (p, q).

$$z_t = \theta_1 z_{t-1} + \dots + \theta_p z_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \dots \dots \dots (3.5)$$

yang juga dapat ditulis :

$$z_t = \sum_{j=1}^p \theta_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j}$$

atau

$$z_t = \sum_{j=1}^p \theta_j \varepsilon_{t-j} - \sum_{j=0}^q \theta_j \varepsilon_{t-j}$$

dengan $\theta_0 = -1$

c. Model ARMA deret berkala tahunan

Misalkan suatu deret berkala hidrologi dipresentasikan oleh x_t . Apabila deret tersebut tidak normal, maka transformasi yang digunakan untuk membuat deret x_t menjadi normal adalah y_t .

Deret berkala z_t dapat dibuat dalam bentuk berikut :

$$y_t = \mu + z_t$$

dimana z_t adalah model ARMA (p,q)

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} + \phi_2 z_{t-2} + \dots + \phi_p z_{t-p} - \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}$$

Parameter model ARMA (p,q) untuk y_t ($\mu, \phi_1, \dots, \phi_p, \theta_1, \dots, \theta_p, \sigma_\varepsilon^2$) diestimasi dari data erosivitas tahunan.

Estimasi parameter model ARMA (p,q) tidak bisa dilakukan secara langsung. Untuk memudahkan penjelasan, estimasi parameter dilakukan untuk model ARMA (1,1). Model ARMA (1,1) dapat ditulis :

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1}$$

Estimasi awal $\bar{\phi}_1$ dari ϕ_1 diperoleh dari r_2/r_1 (dimana r_1 dan r_2 adalah koefisien korelasi lag 1 dan lag 2 dengan rumus:

$$\rho_k = \phi_1 \rho_{k-1} ; k \geq 2$$

Substitusi $\bar{\phi}_1$ dan r_1 ke dalam persamaan:

$$\rho_1 = \frac{J_1}{J_0} = \frac{(1 - \phi_1 \theta_1) - (\phi_1 - \theta_1)}{1 + \theta_1^2 - 2\phi_1 \theta_1}$$

akan diperoleh estimasi awal $\bar{\theta}_1$ dari θ_1 .

$$r_1 = \frac{(1 - \bar{\phi}_1 \bar{\theta}_1) - (\bar{\phi}_1 - \bar{\theta}_1)}{1 + \bar{\theta}_1^2 - 2\bar{\phi}_1 \bar{\theta}_1} = \frac{(\bar{\phi}_1 - \bar{\phi}_1^2 \bar{\theta}_1 + \bar{\phi}_1 \bar{\theta}_1^2 - \bar{\theta}_1)}{1 + \bar{\theta}_1^2 - 2\bar{\phi}_1 \bar{\theta}_1}$$

$$r_1(1 + \theta_1^2 - 2\phi_1\theta_1) = \phi_1 - \phi_1^2\theta_1 + \phi_1\theta_1^2 - \theta_1$$

$$(r_1 + \phi_1)\theta_1^2 = (1 - \phi_1^2 - 2r_1\phi_1)\theta_1 + (r_1 - \phi_1) = 0$$

Setelah estimasi awal dari parameter $\bar{\phi}_1$ dan $\bar{\theta}_1$ diperoleh, kemudian dilakukan lagi estimasi yang lebih baik dengan menggunakan estimasi kuadrat terkecil dari residu ε .

$$S(\phi, \theta) = \sum_{t=1}^N (\varepsilon_t)^2$$

dimana :

$$\varepsilon_t = z_t - \phi_1 z_{t-1} + \theta_1 \varepsilon_{t-1}$$

jumlah dari kuadrat residu adalah :

$$S(\phi, \theta) = \sum_{t=1}^N (z_t - \phi_1 z_{t-1} + \theta_1 \varepsilon_{t-1})^2$$

Jumlah dari kuadrat residu tergantung pada parameter ϕ , θ , deret z_t dan harga awal ε . Harga awal dari ε_0 dan z_0 diambil nol, yaitu harga rata-ratanya, sehingga :

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= z_1 \\ \varepsilon_2 &= z_2 - \phi_1 z_1 \\ \varepsilon_3 &= z_3 - \phi_1 z_2 + \theta_1 \varepsilon_2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \varepsilon_N &= z_N - \phi_1 z_{N-1} + \theta_1 \varepsilon_{N-1} + \end{aligned}$$

$$S(\phi, \theta) = \dots\dots\dots$$

Dengan demikian didapat harga $S(\phi, \theta)$ yang didasarkan dari data. Kemudian dihitung harga $S(\phi, \theta)$ untuk beberapa interval dari harga parameter ϕ dan θ . Harga $S(\phi, \theta)$ yang diperoleh digunakan untuk menentukan parameter $\bar{\phi}_1$ dan $\bar{\theta}_1$ yang memberikan harga $S(\phi, \theta)$ minimum.

Dengan demikian didapat harga $S(\phi, \theta)$ yang didasarkan dari data. Kemudian dihitung harga $S(\phi, \theta)$ untuk beberapa interval dari harga parameter ϕ dan θ . Harga $S(\phi, \theta)$ yang diperoleh digunakan untuk menentukan parameter $\bar{\phi}_1$ dan $\bar{\theta}_1$ (kondisi optimum) yang memberikan harga $S(\phi, \theta)$ minimum.

e. Metode *Box-Jenkins*

Model-model *Autoregressive/Integrated/Moving Average* (ARIMA) oleh George Box dan Gwilym Jenkins (1976) diterapkan untuk analisis deret berkala, peramalan dan pengendalian. Pendekatan metode ini meliputi 3 aspek:

1. Notasi akan ditetapkan untuk model ARIMA (p, d, q) yang umum, dan berbagai kasus khusus dari model umum akan diperlakukan didalam kerangka notasi yang sama.
2. Akan dipakai suatu program simulasi (disebut ARIMA) untuk membangkitkan data deret berkala, menurut beberapa model ARIMA yang dikehendaki.
3. Data yang disimulasikan dari model ARIMA yang khusus akan dianalisis untuk melihat sejauh mana sifat-sifat *empiris* suatu deret berkala berkaitan dengan sifat-sifat *teoritis* yang telah diketahui.

Dalam menganalisis kita perlu memiliki notasi yang berlainan untuk deret berkala non-stasioner yang asli dengan pasangan stasionernya, sesudah adanya pembedaan (*differencing*). Metode ini dijelaskan sebagai berikut:

Notasi yang sangat bermanfaat adalah operator shift mundur (*backward shift*), B , yang penggunaannya sebagai berikut:

$$BX_t = X_{t-1}$$

Dengan kata lain, notasi B yang dipasang pada X_t , mempunyai pengaruh menggeser data 1 periode kebelakang, sebagai berikut:

$$B(BX_t) = B^2 X_t = X_{t-2}$$

Operator shift mundur tersebut sangat tepat untuk menggambarkan proses pembedaan (*differencing*). Sebagai contoh, apabila suatu deret berkala tidak stasioner, maka data tersebut dapat mendekati lebih stasioner dengan melakukan pembedaan pertama dari deret data dan memberi batasan mengenai apa yang dimaksud dengan pembedaan pertama.

PEMBEDAAN PERTAMA

$$X'_t = X_t - BX_t = (1 - B)X_t$$

Pembedaan pertama dinyatakan oleh $(1-B)$, sama halnya apabila perbedaan orde kedua (yaitu perbedaan pertama dari perbedaan pertama sebelumnya) harus dihitung, maka:

PEMBEDAAN ORDE KEDUA

$$\begin{aligned}
X_t'' &= X_t' - X_{t-1}' \\
&= (X_t - X_{t-1}) - (X_{t-1} - X_{t-2}) \\
&= X_t - 2X_{t-1} + X_{t-2} \\
&= (1 - 2B + B^2)X_t \\
&= (1 - B)^2 X_t
\end{aligned}$$

Pembedaan orde kedua diberi notasi $(1 - B)^2$ ini merupakan hal yang penting untuk memperlihatkan bahwa *pembedaan orde kedua* adalah tidak sama dengan *pembedaan kedua* yang diberi notasi $1 - B^2$.

Tujuan menghitung pembedaan adalah untuk mencapai stasioneritas, dan secara umum apabila terdapat pembedaan orde ke- d untuk mencapai stasioneritas akan ditulis:

$$\text{pembedaan orde ke-}d = (1 - B)^d X_t$$

sebagai deret yang stasioner, dan model umum ARIMA (0, d , 0) akan menjadi:

ARIMA (0, d , 0)

$$\begin{array}{c}
(1 - B)^d X_t = e_t \\
\uparrow \quad \uparrow
\end{array}$$

(pembedaan orde ke- d) (nilai galat)

ARIMA (0, d , 0) mempunyai arti dimana data tidak mengandung aspek auto regressive (AR), tidak mempunyai aspek rata-rata bergerak (MA) dan mengalami pembedaan orde ke- d .

Untuk membuat data stasioner, kita akan melakukan pembedaan pertama terhadap deret data. Untuk proses ARIMA (0, 1, 0) pembedaan pertama akan membuat deret menjadi stasioner seluruh autokorelasi akan nol.

b. Model ARIMA dan faktor musim

Kerumitan terakhir yang dapat ditambahkan pada model ARIMA adalah faktor musim. Dengan cara yang sama, titik-titik data yang berurutan tersebut mungkin memperlihatkan sifat-sifat AR, MA, campuran ARMA atau campuran ARIMA, sehingga data yang dipisahkan dapat memperlihatkan sifat-sifat yang sama. Maka pembedaan n tahun dapat dihitung sebagai:

$$X_t' = X_t - X_{t-n} = (1 - B^n)X_t$$

Notasi ARIMA dapat diperluas untuk menangani aspek musiman, notasi umum yang singkat adalah:

$$\text{ARIMA}(p, d, q)(P, D, Q)^S$$

dimana:

- (p, d, q) : bagian yang tidak musiman dari model
 (P, D, Q) : bagian yang musiman dari model
 S : jumlah periode

3.3. Erosi

Erosi adalah peristiwa pindahnya tanah dari suatu tempat ketempat lain oleh media alamiah yang dapat berupa angin, air atau aliran gletser (es). Di Indonesia erosi yang paling membahayakan lahan-lahan pertanian adalah erosi air. Erosi yang disebabkan oleh air dapat berupa :

- a. *Erosi lempeng (sheet erosion)*, yaitu butir-butir tanah diangkut lewat permukaan atas tanah oleh selapis tipis limpasan permukaan yang dihasilkan oleh intensitas hujan yang merupakan kelebihan dari daya infiltrasi.
- b. *Pembentukan polongan (gully)*, yaitu erosi lempeng terpusat pada polongan tersebut. Kecepatan airnya jauh lebih besar dibandingkan dengan kecepatan limpasan permukaan tersebut diatas. Polongan tersebut cenderung menjadi lebih dalam, yang menyebabkan terjadinya longsoran-longsoran. Polongan tersebut tumbuh kearah hulu, ini dinamakan erosi ke arah belakang (*backward erosion*).
- c. *Longsoran masa tanah* yang terletak diatas batuan keras atau lapisan tanah liat; longsoran ini terjadi setelah adanya curah hujan yang panjang, yang lapisan tanahnya menjadi jenuh oleh lapisan air tanah.
- d. *Erosi tebing sungai*, terutama yang terjadi pada saat banjir, yaitu tebing tersebut mengalami penggerusan air yang dapat menyebabkan longsornya tebing-tebing pada belokan-belokan sungai.

Kebanyakan model-model yang digunakan dalam perhitungan erosi adalah empiris seperti dalam tabel 3.2 ini berdasarkan dari faktor-faktor penting yang di

dapat melalui observasi, pengukuran, penelitian, dan statistik yang berhubungan dengan kehilangan tanah. Sebelum menentukan model apa yang digunakan, objek terlebih dahulu harus dispesifikasikan apakah akan diprediksi atau hanya sebagai penjelasan.

Tabel 3.1. Tipe-tipe permodelan

Tipe	Deskripsi
FISIK	Membuat suatu permodelan skalatis di laboratorium; yang dapat merepresentasikan antara model dengan keadaan sebenarnya
ANALOGI	Menggunakan analogi sistem listrik dan mesin dalam penelitian, contoh aliran listrik yang digunakan untuk mensimulasikan aliran air
DIGITAL	Didasarkan pada pendigitasian oleh komputer untuk menganalisa sejumlah data yang sangat banyak
<i>(a) Physically-Base</i>	Berdasarkan persamaan matematika untuk menjelaskan proses yang terliput dalam suatu model, kemudian dihitung dengan rumus konservasi masa dan energi
<i>(b) Stochastic</i>	Didasarkan pada pembuatan urutan data tiruan dari karakter statistik suatu sample data, ini berguna untuk membuat urutan input sebagai fisik dasar dan model empiris dimana data hanya tersedia untuk observasi periode pendek
<i>(c) Empirical</i>	<p>Berdasarkan identifikasi statistik dari hubungan antara jumlah variabel penting dari suatu data yang ada.</p> <p>Ada 3 tipe analisis yang dikenal :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>model kotak hitam</i> : dimana yang dikerjakan hanya data input dan output yang utama saja 2. <i>model kotak kelabu</i> : apabila beberapa detail dari bagaimana sistem bekerja dikenali. 3. <i>model kotak putih</i> : apabila semua detail dari bagaimana sistem beroperasi diketahui

Sumber After Gregory and Walling (1973) dalam Soil Conservation

3.3.1. Faktor-faktor yang berpengaruh dalam erosi

Secara garis besar, erosi yang terjadi disebabkan oleh hal-hal sebagai berikut :

1. Pengaruh geologi

Proses geologis dalam pembentukan lapisan-lapisan kulit bumi dengan cara pengendapan sedimen ternyata memungkinkan terbentuknya suatu lapisan yang potensial mengalami erosi, sebagai contoh adalah pembentukan lapisan tanah sebagai berikut : Sungai yang mengalirkan air ke laut membawa partikel-partikel halus yang jumlahnya tergantung dari volume dan kecepatan alirannya, kemudian partikel-partikel tersebut mengendap di dasar laut membentuk lapisan tanah, dimana penyebaran pengendapannya bisa merata tergantung arus air laut, biasanya membentuk sudut kemiringan 5° - 10° . Karena pembentukan tiap lapisan terjadi di air maka dasar tiap lapisan adalah air yang bisa dilihat seringkali sebagai lapisan tipis (*thin film*) pada zona pemisah antara lapisan lempung dan lanau kepasiran atau sebagai aliran laminar pada lapisan pasir yang lebih permeabel. Dengan keadaan sedemikian bila banyak air memasuki lapisan pasir tipis, sedangkan pengeluaran air sedikit, sehingga keadaan lapisan menjadi jenuh maka tekanan air akan bertambah dan tekanan air inilah yang seringkali menyebabkan erosi. Lain halnya bila air memasuki lapisan pasir tebal sehingga keadaan lapisan tidak sepenuhnya jenuh air, maka lapisan tersebut bahkan bisa berfungsi sebagai drainase alamiah

2. Pengaruh morfologi

Variasi bentuk permukaan bumi yang meliputi daerah pegunungan dan lembah dengan sudut kemiringan permukaan yang cenderung besar, maupun daerah dataran rendah yang permukaannya cenderung datar, ternyata memiliki peranan penting dalam menentukan kestabilan tersebut sehubungan dengan proses kelongsoran.

Secara logis daerah dengan kemiringan besar lebih potensial mengalami erosi dibanding daerah datar, sehingga kasus erosi seringkali ditemui di daerah pegunungan atau perbukitan. dan pada daerah galian atau timbunan yang memiliki sudut kemiringan lereng besar, kestabilan lereng terganggu akibat lereng yang terlalu terjal, perlemahan pada kaki lereng, dan tekanan beban yang berlebihan di

kepala lereng. Hal tersebut bisa terjadi karena energi air pada kaki lereng dan kegiatan penimbunan atau pemotongan lereng yang dilakukan manusia

3. Pengaruh proses fisika

Perubahan temperatur, fluktuasi muka air tanah musiman, gaya gravitasi, dan gaya relaksasi tegangan sejajar permukaan, ditambah dengan proses oksidasi dan dekomposisi akan mengakibatkan suatu lapisan tanah kohesif secara lambat laun mereduksi kekuatan gesernya, terutama nilai kohesif c dan sudut geser dalamnya ϕ .

Pada tanah non kohesif misalnya pasir, bila terjadi getaran oleh gempa, mesin, atau sumber getaran lainnya sehingga mengakibatkan lapisan tersebut ikut bergetar, maka pori-pori lapisan akan terisi oleh air atau udara yang akan mengikat tekanan dalam pori. Tekanan pori yang mengikat dengan spontan dan sangat besar ini menyebabkan terjadinya likuifaksi atau pencairan lapisan pasir sehingga kekuatan gesernya berkurang.

4. Pengaruh air dalam tanah

Keberadaan air dalam tanah dapat dikatakan sebagai faktor dominan penyebab terjadinya erosi karena hampir sebagian besar kasus erosi melibatkan air didalamnya.

- Tekanan air pori memiliki nilai besar sebagai tenaga pendorong terjadinya erosi, semakin besar tekanan air pori semakin besar pula tenaga pendorongnya.
- Penyerapan maupun konsentrasi air dalam lapisan tanah kohesif dapat melunakkan lapisan tanah yang pada akhirnya mereduksi nilai kohesi dan sudut geser dalam sehingga kekuatan gesernya berkurang.

5. Iklim

Faktor iklim yang mempengaruhi terjadinya erosi adalah hujan, suhu udara dan kecepatan angin. Curah hujan merupakan faktor iklim yang paling besar pengaruhnya (Bever 1956). Suhu udara mempengaruhi limpasan permukaan dengan jalan mengubah kandungan air tanah, sehingga menyebabkan perubahan kapasitas peresapan air oleh tanah (infiltrasi). Kelembaban udara dan radiasi ikut berperan dalam mempengaruhi suhu udara dan kecepatan angin ikut menentukan kecepatan dan arah jatuh butirnya hujan.

Kemampuan hujan dalam menghancurkan agregat tanah ditentukan oleh energi kinetiknya. Energi kinetik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Hudson, 1976; Kohnke and Bertrandt, 1959) :

$$\text{rumus : } Ek = \frac{1}{2}mv^2$$

dimana :

- Ek = energi kinetik hujan
- m = masa butir hujan
- v = kecepatan butir hujan

selanjutnya besarnya energi kinetik secara kuantitatif dihitung berdasarkan persamaan oleh Wischmeier 1959 dalam *Soil Conservation* yaitu :

$$\text{rumus : } KE = 210,1 + 89 (\log i)$$

dimana :

- KE = energi kinetik hujan dalam ton/ha/cm
- I = intensitas hujan (cm/jam)

Selanjutnya Wischmeier 1959 mengusulkan penggunaan EI_{30} sebagai indeks erosivitas hujan.

6. Tanah

Interaksi sifat fisik dan kimia tanah menentukan kepekaan tanah terhadap terjadinya erosi. Sifat-sifat tanah yang mempengaruhi kepekaan erosi adalah :

- a. Sifat-sifat tanah yang mempengaruhi laju peresapan (infiltrasi), permeabilitas, dan kapasitas tanah menahan air.
- b. Sifat-sifat tanah yang mempengaruhi ketahanan struktur tanah terhadap dispersi dalam pengikisan oleh butir-butir hujan dan limpasan permukaan.

Dengan demikian, sifat-sifat tanah yang mempengaruhi erosi adalah tekstur, struktur, kandungan bahan organik, kedalaman tanah, sifat lapisan bawah, dan tingkat kesuburan tanah. Sedangkan kandungan bahan organik berpengaruh terhadap stabilitas struktur tanah (Arsyad, 1979).

Tanah dengan kandungan debu dengan tinggi liat yang rendah dan bahan organik sedikit, mempunyai kepekaan erosi yang tinggi. Kepekaan erosi yang tinggi ini disebut *erodibilitas tanah* (K), yaitu mudah tidaknya tanah tererosi.

Semakin tinggi nilai erodabilitas tanah semakin mudah tanah tersebut tererosi atau sebaliknya.

Kepekaan erosi tanah menunjukkan keseluruhan sifat-sifat tanah dan bebas dari faktor-faktor penyebab erosi lainnya. Untuk memberikan penilaian kepekaan erosi tanah yang mempunyai syarat di atas sehingga dapat dipergunakan dalam pelaksanaan usaha pengawetan tanah, maka telah dikembangkan konsep faktor kepekaan erosi tanah.

Faktor kepekaan erosi tanah didefinisikan sebagai erosi per satuan indeks erosivitas suatu tanah dalam keadaan standar. Tanah dalam keadaan standar adalah tanah yang terbuka yang tidak ada vegetasi sama sekali pada lereng 9 % dengan bentuk lereng yang seragam dan panjang lereng 22,13 m.

7. Vegetasi

Vegetasi mengintersepsi curah hujan yang jatuh dengan daun, batang yang akan mengurangi kecepatan jatuh serta memecah butiran hujan menjadi lebih kecil. Curah hujan yang mengenai daun akan menguap kembali ke udara dan inilah yang disebut dengan kehilangan intersepsi tanaman (Weirsum, 1979).

Batang, akar, dan tumbuhan bawah mengurangi kecepatan limpasan permukaan yang mengakibatkan pengurangan daya erosi dan aliran tersebut. Akar tanaman dan serasah juga dapat menahan sebagian sedimen yang melewatinya dan membuat tanah menjadi sarang sehingga air dapat meresap.

Demikian juga menurut Kohnke dan Bertrandt (1959), bahwa vegetasi mengurangi pukulan butir-butir hujan pada permukaan tanah. Tanaman juga berpengaruh dalam menurunkan kecepatan limpasan permukaan dan mengurangi kandungan air melalui transpirasi. Berkurangnya kandungan air tanah menyebabkan tanah mampu mengabsorpsi air lebih banyak sehingga jumlah limpasan berkurang.

Menurut Arsyad (1979), pengaruh vegetasi terhadap limpasan permukaan erosi dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu :

- a. Intersepsi hujan oleh tajuk tanaman
- b. Mengurangi kecepatan limpasan permukaan dan kekuatan perusak

- c. Pengaruh akar dan kegiatan biologi yang berhubungan dengan pertumbuhan vegetatif dan pengaruhnya terhadap porositas tanah dan transpirasi yang mengakibatkan keringnya tanah.

Pengaruh positif dari vegetasi hutan akan berkurang oleh adanya kebakaran hutan atau penggembalaan ternak. Menurut Manan (1976), kebakaran hutan berpengaruh langsung terhadap terjadinya erosi pada beberapa tempat dengan jalan :

- a. Melonggarkan ikatan-ikatan pada permukaan tanah dan bantuan sehingga menyebabkan longsor
- b. Menghilangkan lapisan serasah dan humus yang melindungi tanah terhadap pukulan air hujan
- c. Menyebabkan lapisan-lapisan permukaan tanah untuk sementara sukar dibasahi
- d. Menutup dan menyumbat pori-pori tanah di permukaan dengan abu percikan

8. Manusia

Manusia merupakan faktor penentu bagi terjadinya erosi, karena manusia dapat mengatur keseimbangan faktor-faktor lain. Dengan cara pengelolaan dan penggunaan tanah yang disesuaikan dengan tindakan pengawetan tanah, erosi dapat dikurangi. Namun demikian, dari manusia itu sendiri banyak faktor yang menyebabkan manusia mempergunakan tanahnya secara bijaksana atau sebaliknya (Arsyad, 1979). Faktor-faktor itu antara lain :

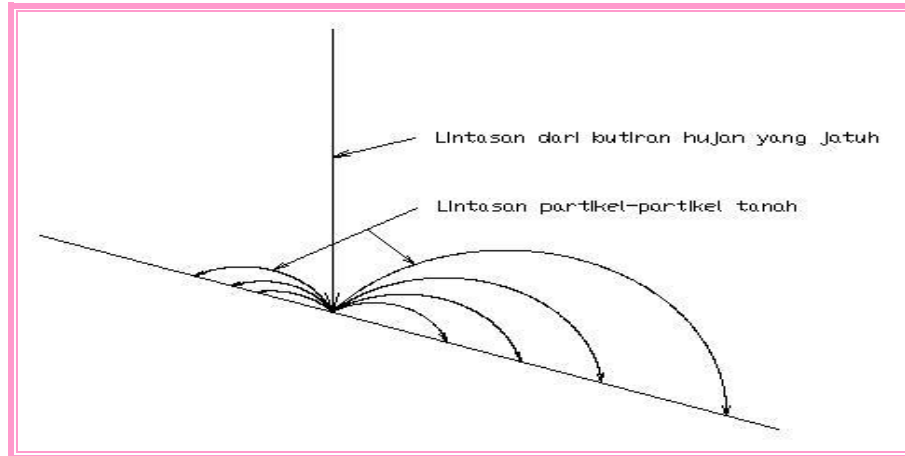
- a. Luas tanah pertanian yang diusahakan.
- b. Tingkat pengetahuan dan penguasaan teknologi.
- c. Harga hasil usaha tani di pasar.
- d. Perpajakan dan ikatan hutan.
- e. Infrastruktur dan fasilitas kesejahteraan.

Dengan mengetahui faktor-faktor diatas kiranya pihak pemerintah atau yang berwenang akan lebih mudah dalam mengatasi masalah keseimbangan alami ini.

3.3.2. Proses erosi

Erosi tanah terjadi melalui tiga tahap, yaitu tahap pelepasan partikel tunggal dari masa tanah dan tahap pengangkutan oleh media yang erosif seperti aliran air dan angin. Pada kondisi dimana energi yang tersedia tidak lagi cukup untuk mengangkut partikel, maka akan terjadi tahap yang ketiga, yaitu pengendapan.

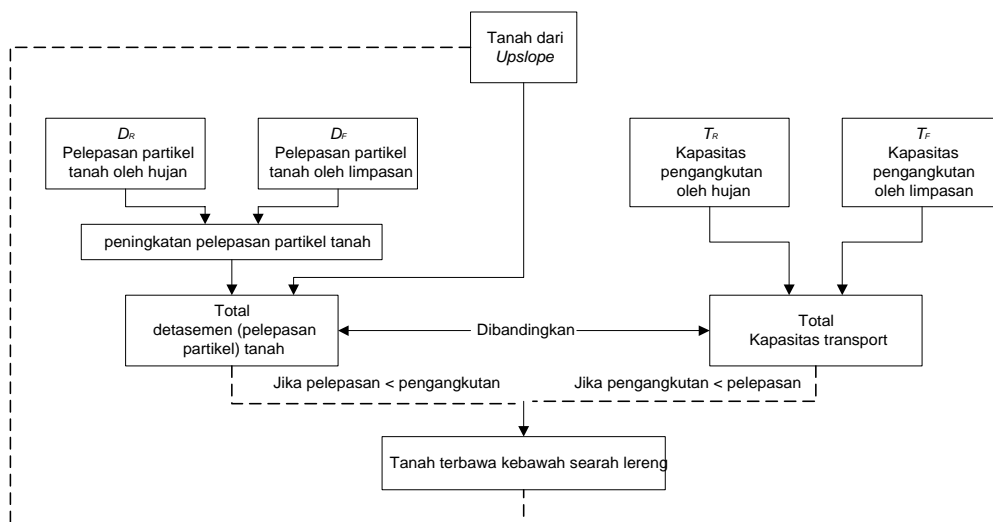
Erosi oleh air dapat dipandang dengan dimulainya pelepasan partikel-partikel tanah oleh dampak air hujan yang turun. Percikan air hujan merupakan media utama pelepasan partikel tanah karena energi kinetik butiran air yang jatuh dapat memercikkan tanah ke udara. Pada tanah yang datar, partikel-partikel tersebut disebarkan lebih kurang secara merata ke segala jurusan, tapi pada tanah yang miring, terjadi pengangkutan ke bawah searah lereng (Gambar 3.2). Pada saat butiran air hujan mengenai permukaan tanah yang gundul, partikel tanah dapat terlepas dan terlempar beberapa centimeter ke udara. Pada dasarnya partikel-partikel tanah tersebar lebih kurang merata ke segala arah, tapi untuk lahan miring terjadi dominasi ke arah bawah searah lereng. Partikel-partikel tanah ini akan menyumbat pori-pori tanah sehingga akan menurunkan kapasitas dan laju infiltrasi, maka akan terjadi genangan air di permukaan tanah, yang kemudian akan menjadi aliran permukaan. Aliran permukaan ini menyediakan energi untuk mengangkut partikel-partikel yang terlepas, baik oleh percikan air hujan maupun oleh adanya aliran permukaan itu sendiri. Pada saat energi atau aliran permukaan menurun dan tidak lagi mengangkut partikel tanah yang terlepas, maka partikel tanah tersebut akan diendapkan. Proses-proses percikan dan aliran di atas tanah itulah yang menyebabkan erosi lapisan (*sheet erosion*), yakni degradasi permukaan tanah yang relatif merata. Erosi lapisan sulit untuk mendeteksinya, kecuali apabila permukaan tanahnya lebih rendah dibawah tanda-tanda tanah lama pada tiang-tiang pagar, akar-akar pohon yang terlihat, atau pilar-pilar kecil dari tanah yang tertutup oleh batu-batu, masih ada.



Gambar 3.3. pemindahan partikel-partikel tanah oleh percikan ke bawah searah lereng

Diameter air hujan yang jatuh (d) bervariasi dari 0,5 sampai 6 mm (0,02 sampai 0,25 in) dan batas kecepatan v bervariasi dengan diameter kira-kira 2 sampai 9 m/s

Lahan terbuka yang terhantam hujan deras terus-menerus akan menyebabkan tanah menjadi keras. Tanah juga mengalami penghancuran oleh proses pelapukan, baik secara mekanis maupun biokimia. Disamping itu tanah juga mengalami gangguan oleh pengolahan lahan dan injakan kaki manusia dan binatang. Lebih lanjut, aliran air dan angin juga berperan terhadap pelepasan partikel tanah. Semua proses tersebut menyebabkan tanah menjadi gembur (*loss*) sehingga mudah terangkut oleh media pengangkut.



Gambar 3.4. Bagan alir proses erosi tanah oleh air (after Meyer and Wisheimer, 1969).

Berat ringannya erosi tergantung pada kuantitas suplai material yang terlepas dan kapasitas media pengangkut. Ruang media pengangkut mempunyai kapasitas lebih besar dari suplai material yang terlepas, maka proses erosi dibatasi oleh pelepasan (*detachment limited*). Sebaliknya jika kuantitas suplai material melebihi kapasitas, maka proses erosi dibatasi oleh kapasitas (*capacity limited*) seperti tampak pada gambar 3.4.

3.4. Sedimentasi

Sedimentasi dapat didefinisikan sebagai pengangkutan, melayangnya (suspensi) atau mengendapnya material fragmentasi oleh air. Sedimentasi merupakan akibat adanya erosi dan memberi banyak dampak yaitu :

- a. *Di sungai*, pengendapan sedimen di dasar sungai yang menyebabkan naiknya dasar sungai, kemudian menyebabkan tingginya permukaan air sehingga dapat mengakibatkan banjir yang menimpa lahan-lahan yang tidak dilindungi (*unprotected land*). Hal tersebut diatas dapat pula menyebabkan aliran mengering dan mencari alur baru.
- b. *Di saluran*, jika saluran irigasi atau saluran pelayaran dialiri oleh air yang penuh sedimen akan terjadi pengendapan sedimen di dasar saluran. Sudah barang tentu akan diperlukan biaya yang cukup besar untuk pengerukan sedimen tersebut. Pada keadaan tertentu pengerukan sedimen menyebabkan terhentinya operasi saluran.
- c. *Di waduk-waduk*, pengendapan sedimen di waduk-waduk akan mengurangi volume efektifnya. Sebagian besar jumlah sedimen yang dialirkan oleh waduk adalah sedimen yang dialirkan oleh sungai-sungai yang mengalir kedalam waduk; hanya sebagian kecil saja yang berasal dari longoran tebing-tebing waduk atau yang berasal dari gerusan tebing-tebing waduk oleh limpasan permukaan. Butir-butir yang kasar akan diendapkan di bagian hulu waduk, sedangkan yang halus diendapkan di dekat bendungan. Jadi, sebagian besar sedimen akan diendapkan di bagian volume aktif waduk, dan sebagian dapat dibilas kebawah, jika terjadi banjir pada saat permukaan air waduk masih rendah.

- d. *Di bendungan atau pintu-pintu air*, yang menyebabkan kesulitan dalam mengoperasikan pintu-pintu tersebut. Juga karena pembentukan pulau-pulau pasir (*sand bars*) di sebelah hulu bendungan atau pintu air akan mengganggu aliran air yang melalui bendungan atau pintu air. Di sisi lain akan terjadi bahaya penggerusan terhadap bagian hilir bangunan, jika beban sedimen di sungai tersebut berkurang karena pengendapan di bagian hulu bendungan, maka aliran dapat mengangkut material alas sungai.
- e. *Di daerah sepanjang sungai*, sebagaimana telah diuraikan diatas, banjir akan lebih sering terjadi di daerah yang tidak dilindungi. Daerah yang dilindungi oleh tanggul akan aman, selama tanggulnya selalu dipertinggi sesuai dengan kenaikan dasar sungai, dan permukaan airnya akan mempengaruhi drainase daerah sekitarnya. Lama kelamaan drainase dengan cara gravitasi tidak dimungkinkan lagi.

Bahan erosi yang dapat mencapai sungai atau saluran drainase besar hanyalah sebagian, yang disebabkan adanya pengendapan di daerah-daerah rendah, daerah-daerah yang ada tumbuh-tumbuhannya didataran banjir atau pada lereng lahan yang berubah secara mendadak. Sejumlah bahan erosi yang dapat menjalani lintas dari sumbernya hingga mencapai titik kontrol secara penuh dinamakan *hasil sedimen (sediment yield)*. Hasil sedimen tersebut dinyatakan dalam satuan berat (ton) atau satuan volume (mpk atau acree-feet) dan tentunya merupakan fungsi luas daerah pengalirannya. Perbandingan data hasil sedimen pada umumnya didasarkan atas hasil per satuan luas daerah pengaliran yang dinamakan *laju produksi sedimen (sediment production rate)* yang dinyatakan dalam ton/ha, ton/km² atau acre-feet/sq. mile.

Hasil sedimen dan hasil erosi kotor (*gross erosion*) yang dihasilkan oleh erosi lempeng ditambah erosi alur atau oleh sebab lain adalah saling bergantung. Hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai rasio hasil sedimen terhadap erosi kotor; rasio ini dinamakan *ratio pengangkutan sedimen (sediment delivery ratio)*.

Hasil sedimen dari suatu daerah pengaliran tertentu dapat ditentukan dengan pengukuran pengangkutan sedimen pada titik kontrol alur sungai, atau dengan menggunakan rumus-rumus empiris atau semi empiris. Kebanyakan

rumus-rumus untuk menentukan besarnya pengangkutan sedimen dalam suatu alur sungai telah dikembangkan, baik dengan mengkorelasikan besarnya pengangkutan hasil sedimen yang diukur dengan curah hujan dan sifat-sifat topografi, maupun melalui analisis semi teoritis yang menghubungkan sifat-sifat aliran sungai dengan hasil sedimen yang diukur.

Proses pengangkutan sedimen dalam alur sungai merupakan hal yang agak kompleks, sehingga pengukuran laju pengangkutan sedimen masih merupakan perkiraan terbaik terhadap besarnya hasil sedimen. Namun demikian, beberapa rumus pengangkutan sedimen yang didasarkan atas analisis teoritis akan berguna jika tersedia data yang cukup. Ketelitian perkiraan hasil sedimen akan bertambah besar, jika periode pengumpulan data yang cukup panjang.

3.5. Universal Soil Lost Equation (USLE)

USLE dikembangkan di USDA-SCS (*United State Department of Agriculture-Soil Conversation Services*) bekerjasama dengan Universitas Purdue oleh Wischmeier and Smith, 1965 (dalam Williams and Berndt, 1972; Morgan, 1988; Selbe, 1993; dan Renard et.al, 1996). Berdasarkan analisis statistik terhadap lebih dari 10 tahun data erosi dan aliran permukaan, parameter fisik dan pengelolaan dikelompokkan menjadi lima variabel utama yang nilainya untuk setiap tempat dapat dinyatakan secara numeris. Kombinasi enam variabel ini dikenal dengan sebutan USLE adalah sebagai berikut :

Rumus : $E_a = R.K.LS.C.P$

dimana :

E_a = banyaknya tanah tererosi per satuan luas per satuan waktu, yang dinyatakan sesuai dengan satuan K dan periode R yang dipilih, dalam praktek dipakai satuan ton/ha/tahun.

R = merupakan faktor erosivitas hujan dan aliran permukaan, yaitu jumlah satuan indeks erosi hujan, yang merupakan perkalian antara energi hujan total (E) dengan intensitas hujan maksimum 30 menit (I_{30}) untuk suatu tempat dibagi 100, biasanya diambil energi hujan tahunan rata-rata sehingga diperoleh perkiraan

tanah tahunan dalam KJ/ha dengan menggunakan rumus bowles sebagai berikut :

$$R = \sum_{i=1}^n EI_{30}$$

$$EI_{30} = E(I_{30} 10^{-2})$$

K = faktor erodibilitas tanah, yaitu laju erosi per indeks erosi hujan (R) untuk suatu jenis tanah tertentu dalam kondisi dibajak dan ditanami terus menerus, yang diperoleh dari petak percobaan yang panjangnya 22,13 m dengan kemiringan seragam sebesar 9% tanpa tanaman, satuan ton/KJ.

$$K = \left\{ 2.713 \times 10^{-4} (12 - O) M^{1.14} + 3.25(S - 2) + 2.5 \frac{(P - 3)}{100} \right\}$$

LS = faktor panjang kemiringan lereng (*length of slope factor*), yaitu nisbah antara besarnya erosi per indeks erosi dari suatu lahan dengan panjang dan kemiringan lahan tertentu terhadap besarnya erosi dari plot lahan dengan panjang 22,13 m dan kemiringan 9% dibawah keadaan yang identik, tidak berdimensi.

$$LS = \sqrt{\frac{L}{22,13}} (0,065 + 0,045S + 0,00065S^2)$$

C = faktor tanaman penutup lahan dan manajemen tanaman, yaitu nisbah antara besarnya erosi lahan dengan penutup tanaman dan manajemen tanaman tertentu terhadap lahan yang identik tanpa tanaman, tidak berdimensi.

$$C_{gabungan} = \sum A_i C_i$$

A_i = prosentase (%) luasan dari grid

C_i = koefisien limpasan dari masing-masing tata guna lahan

P = faktor pengendalian erosi (tindakan konservasi praktis), yaitu ratio kehilangan tanah antara besarnya dari lahan dengan tindakan konservasi praktis dengan besarnya erosi dari tanah yang diolah searah lereng dalam keadaan yang identik, tidak berdimensi.

3.5.1. Indeks Erosivitas Hujan (R)

Sifat-sifat curah hujan yang mempengaruhi erosivitas adalah besarnya butir-butir hujan, dan kecepatan tumbukannya. Jika dikalikan akan diperoleh :

rumus : $M = m v$

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

dimana :

M = momentum (kg.m/s)

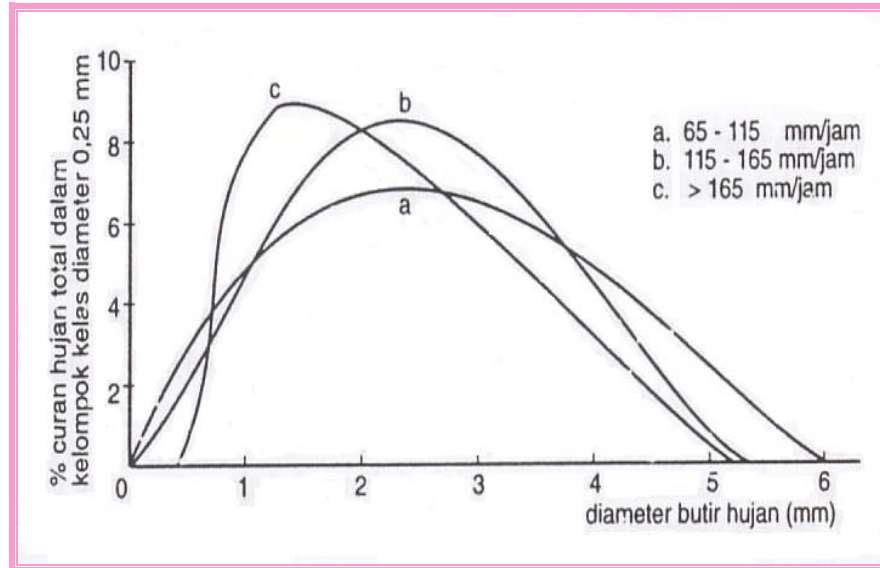
m = massa butir hujan (kg)

v = kecepatan butir hujan, yang diambil biasanya kecepatan pada saat terjadi tumbukan, atau dinamakan kecepatan terminal (m/s)

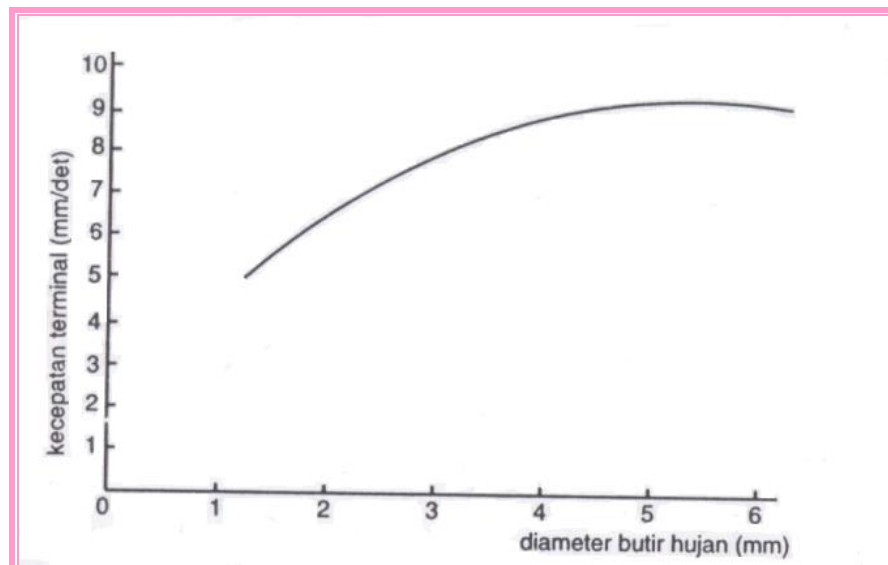
E = energi kinetik (joule/m²)

Momentum dan energi kinetik, keduanya dapat dihubungkan dengan tumbukan butir-butir air hujan terhadap tanah, tetapi kebanyakan orang lebih menyukai menggunakan energi kinetik untuk dihubungkan dengan erosivitas.

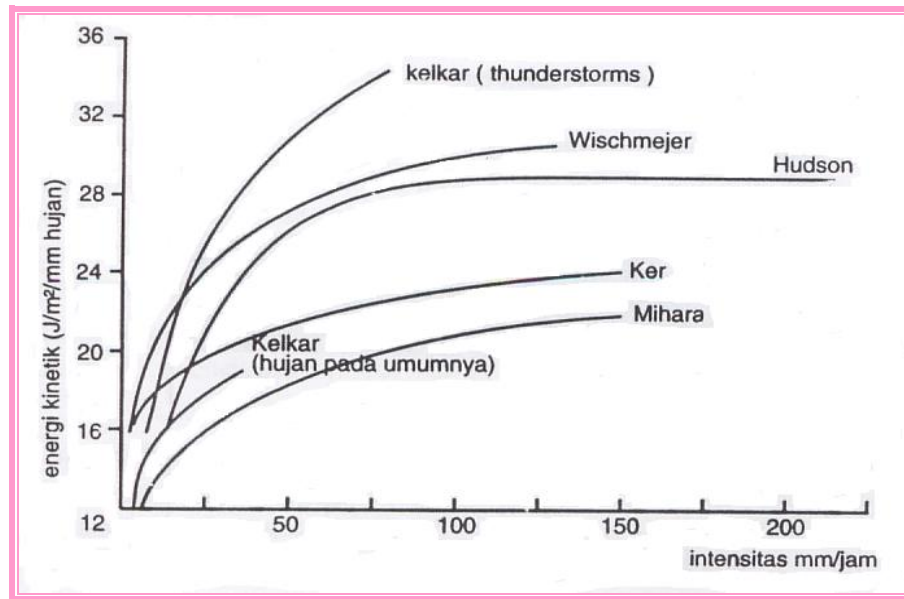
Energi kinetik curah hujan dapat diperoleh pertama-tama dengan menganalisis grafik hubungan intensitas curah hujan dengan waktu (*pluviograph*). Grafik tersebut harus dipotong-potong menjadi blok-blok yang intensitas hujannya hampir konstan selama selang waktu. Besarnya butir-butir air rata-rata didapat dari grafik 3.5 yang diambil dari bukunya HUDSON, *Soil Conservation* (1971) yang menunjukkan distribusi statistik butir-butir air yang jatuh, ketika hujan dengan intensitas hujan yang berbeda-beda. Kecepatan butir-butir tersebut didapat dari gambar 3.6. energi kinetiknya diperoleh dari blok-blok hujan tertentu seperti tersebut diatas. Gambar 3.7. memperlihatkan hasil studi dalam mencari hubungan antara energi kinetik butir dengan percikan butir air hujan tersebut pada saat menumbuk permukaan tanah, dan kemudian mencari hubungan antara energi kinetik butir air hujan dengan tanah yang dipisahkan atau diangkat dari permukaan tanah oleh butir-butir air hujan tersebut.



Gambar 3.5. Grafik distribusi statistik butir air hujan dengan intensitas
(Hudson, 1971 dalam Sumarto, 1999)



Gambar 3.6. Grafik kecepatan vertikal butir hujan di udara terbuka
(Hudson, 1971 dalam Sumarto, 1999)



Gambar 3.7. Grafik hubungan energi kinetik butir dengan percikan butir air hujan (Hudson, 1971 dalam Sumarto, 1999)

Untuk memperoleh energi kinetik total, angka energi kinetik per kejadian hujan dikalikan dengan ketebalan hujan (mm) yang jatuh selama periode pengamatan. Selanjutnya, hasil perkalian ini dijumlahkan. Untuk mendapatkan angka R , energi kinetik total tersebut diatas dikalikan dengan dua kali intensitas hujan maksimum 30 menit (I_{30}), yaitu merubah satuan intensitas hujan maksimum per 30 menit menjadi intensitas hujan maksimum per jam, kemudian dibagi dengan 100. Periode intensitas curah hujan dan intensitas hujan maksimum 30 menit dapat diperoleh dari hasil pencatatan curah hujan di lapangan.

Pada metode USLE, prakiraan besarnya erosi dalam kurun waktu per tahun (tahunan), dan dengan demikian, angka rata-rata faktor R dihitung dari data curah hujan tahunan sebanyak mungkin dengan menggunakan persamaan :

$$R = \sum_{i=1}^n \left(\frac{EI}{100X} \right)$$

dimana :

R = erosivitas hujan rata-rata tahunan

n = jumlah kejadian hujan dalam kurun waktu satu tahun (musim hujan)

X = jumlah tahun atau musim hujan yang digunakan sebagai dasar perhitungan

Besarnya EI proporsional dengan curah hujan total untuk kejadian hujan dikalikan dengan intensitas hujan maksimum 30 menit.

Dalam penelitian Utomo dan Mahmud, hubungan erosivitas (R) dengan besarnya curah hujan tahunan (P) sebagai berikut:

$$R = 237,4 + 2,61P$$

Sementara, Bols (1978) dengan menggunakan data curah hujan bulanan di 47 stasiun penakar hujan di pulau Jawa yang dikumpulkan selama 38 tahun menentukan bahwa besarnya erosivitas hujan tahunan rata-rata adalah sebagai berikut :

$$\text{rumus : } EI_{30} = 6,12(RAIN)^{1,21} (DAYS)^{-0,47} (MAXP)^{0,53}$$

dimana :

EI_{30} = erosivitas hujan rata-rata tahunan

RAIN = curah hujan rata-rata tahunan (cm)

DAYS = jumlah hari hujan rata-rata per tahun (hari)

MAXP = curah hujan maksimum rata-rata dalam 24 jam per bulan untuk kurun waktu satu tahun (cm)

Cara menentukan besarnya indeks erosivitas hujan yang lain adalah seperti dikemukakan oleh Lenvain (DHV, 1989). Rumus matematis yang digunakan oleh Lenvain untuk menentukan faktor R tersebut didasarkan pada kajian erosivitas hujan dengan menggunakan data curah hujan beberapa tempat di Jawa.

$$\text{rumus : } R = 2,21P^{1,36}$$

dimana :

R = indeks erosivitas

P = curah hujan bulanan (cm)

Cara menentukan besarnya indeks erosivitas hujan yang terakhir ini lebih sederhana karena hanya memanfaatkan data curah hujan bulanan.

Tabel 3.2. Energi kinetik hujan dalam metrik ton-meter per hektar per cm hujan

Intensitas (cm/jam)	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0	121	148	163	175	184	191	197	202	206
1	210	214	217	220	223	226	228	231	233	235
2	237	239	241	242	244	246	247	249	250	251
3	253	254	255	256	258	259	260	261	262	263
4	264	265	266	267	268	268	269	270	271	272
5	273	273	274	275	275	276	277	278	278	279
6	280	280	281	281	282	283	283	284	284	285
7	286	286	287	287	288	288	289			

Sumber (Asdak, 2002)

Angka-angka energi kinetik seperti dalam tabel diatas tersebut dihitung dari persamaan $KE = 210 + \log i$. Untuk intensitas hujan lebih besar dari 7,6 cm/jam nilai energi kinetis tetap 289 metrik ton-meter per ha per cm hujan.

3.5.2. Faktor Erodibilitas

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 di atas akan 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 mengalami perubahan orientasi dan karakteristik bahan kimia dan fisika tanah.

Tanah yang mempunyai erodibilitas tinggi akan tererosi lebih cepat dibandingkan dengan tanah yang mempunyai erodibilitas rendah, dengan intensitas hujan yang sama. Juga tanah yang mudah dipisahkan (*dispersive*) akan tererosi lebih cepat daripada tanah yang terikat (*flocculated*). Jadi, sifat-sifat fisik, kimia, dan biologi tanah juga mempengaruhi besarnya *erodibility*. Pengaruh

usaha-usaha pengelolaan tanah sukar diukur, meskipun lebih penting dari sifat-sifat tanah seperti tersebut diatas. Misalnya usaha-usaha pengelolaan tanah dengan pembakaran jerami, dibandingkan dengan jerami tersebut ikut dibajak dan tertimbun dibawah tanah; terasering sawah-sawah dibandingkan dengan pembajakan tegalan yang sejajar dengan kemiringan medannya; tanaman yang kurang dipupuk dibandingkan dengan tanaman yang cukup mendapat makanan; dan tanaman yang penanamannya dengan menyebar bijinya, dibandingkan dengan tanaman yang ditanam dengan cara berbaris. Sebagai tambahan terhadap sifat-sifat tanah dan usaha-usaha pengelolaan tersebut diatas, erodibilitas juga dipengaruhi oleh kemiringan permukaan tanah dan kecepatan penggerusan (*scour velocity*).

Contoh suatu kasus perhitungan energi kinetik total

Tabel 3.3. Perhitungan Energi Kinetik Total

Intensitas (mm/jam)	Besarnya (mm)	Energi (joule/mm)	Total (joule/m)
1	2	3	4
-25	37,5	21	788
26 - 50	25	25	625
50 - 75	18,5	27	500
> 76	6,5	28	182
		Jumlah	2095

Sumber : Soemarto (1999)

Sebagai kelanjutan terhadap erosivitasnya, Wischmeier bersama kelompoknya telah mengembangkan dasar-dasar untuk mencantumkan aspek erodibilitas yang digunakan untuk perencanaan tataguna tanah yang aman, meskipun beberapa parameternya tidak dapat diberlakukan secara *universal* begitu saja (misalnya dalam penentuan I_{30} , yaitu intensitas hujan maksimum selama periode 30 menit dalam daerah beriklim dingin dan tropik sangat berbeda). Oleh karena itu lebih tepat kalau rumus tersebut dinamakan rumus peramalan kehilangan tanah (*a predictive soil lost equation*) dimana persamaan matematis yang menghubungkan karakteristik tanah dengan tingkat erodibilitas tanah seperti dibawah ini :

$$\text{rumus : } K = \left\{ 2.713 \times 10^{-4} (12 - O) M^{1.14} + 3.25(S - 2) + 2.5 \frac{(P - 3)}{100} \right\}$$

dimana :

K = erodibilitas tanah

OM = persen unsur organik

S = kode klasifikasi struktur tanah (*granular, platy, massive*, dll)

P = permeabilitas tanah

M = prosentase ukuran partikel (% debu + pasir sangat halus) \times (100-% liat)

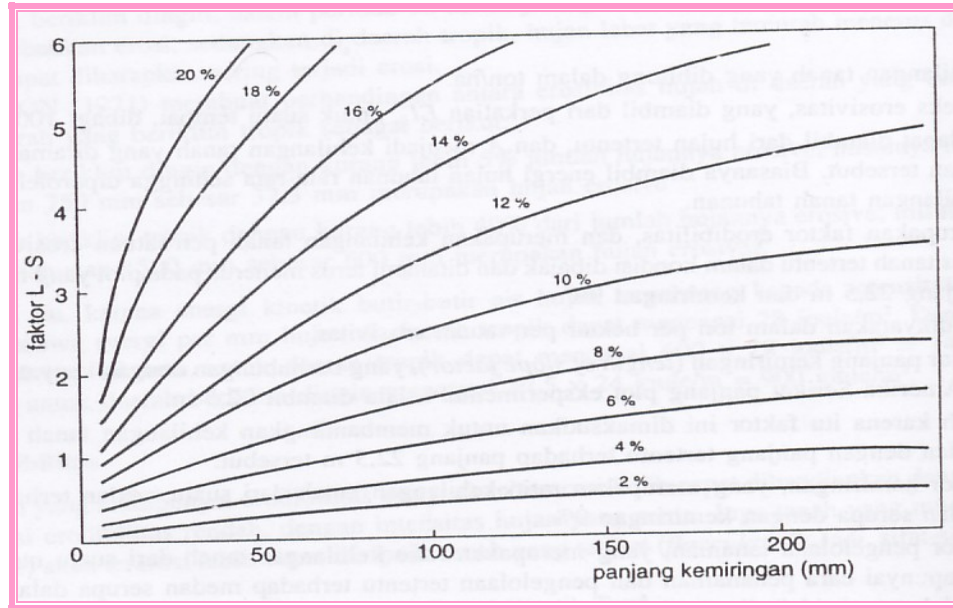
Tabel 3.4. Nilai M untuk beberapa kelas tekstur tanah

Kelas tekstur tanah	Nilai M	Kelas tekstur tanah	Nilai M
Lempung berat	210	Pasir	3035
Lempung sedang	750	Pasir geluhan	1245
Lempung pasiran	1213	Geluh berlempung	3770
Lempung ringan	1685	Geluh pasiran	4005
Geluh lempug	2160	Geluh	4390
Pasir lempung debuan	2830	Geluh debuan	6330
Geluh lempungan	2830	Debu	8245
Campuran merata	4000		

Sumber : RLKT DAS Citarum 1987 (dalam Asdak, 2002)

3.5.3. Faktor panjang kemiringan lereng (LS)

Pada prakteknya, variabel S dan L dapat disatukan, karena erosi akan bertambah besar dengan bertambah besarnya kemiringan permukaan medan (lebih banyak percikan air yang membawa butir-butir tanah, limpasan bertambah besar dengan kecepatan yang lebih tinggi), dan dengan bertambah panjangnya kemiringan (lebih banyak limpasan menyebabkan lebih besarnya kedalaman aliran permukaan oleh karena itu kecepatannya menjadi lebih tinggi). Gambar 3.8. berikut menunjukkan diagram untuk memperoleh nilai kombinasi $L S$, dengan nilai $LS = 1$ jika $L = 22,13$ m dan $S = 9\%$



Gambar 3.8. Diagram untuk memperoleh nilai kombinasi LS

Faktor panjang lereng (L) didefinisikan secara matematik sebagai berikut (Schwab et al., 1981) :

rumus : $L = (l/22,1)^m$

dimana :

l = panjang kemiringan lereng (m)

m = angka eksponen yang dipengaruhi oleh interaksi antara panjang lereng dan kemiringan lereng dan dapat juga oleh karakteristik tanah, tipe vegetasi. Angka eksponen tersebut bervariasi dari 0,3 untuk lereng yang panjang dengan kemiringan lereng kurang dari 0,5 % sampai 0,6 untuk lereng lebih pendek dengan kemiringan lereng lebih dari 10 %. Angka eksponen rata-rata yang umumnya dipakai adalah 0,5

Faktor kemiringan lereng S didefinisikan secara matematis sebagai berikut (Schwab et al., 1981):

rumus : $S = (0,43 + 0,30s + 0,04s^2) / 6,61$

dimana :

s = kemiringan lereng aktual (%)

Seringkali dalam prakiraan erosi menggunakan persamaan *USLE* komponen panjang dan kemiringan lereng (L dan S) diintegrasikan menjadi faktor LS dan dihitung dengan rumus :

$$LS = L^{1/2} (0,00138S^2 + 0,00965S + 0,0138)$$

dimana :

- L = panjang lereng (m)
 S = kemiringan lereng (%)

Rumus diatas diperoleh dari percobaan dengan menggunakan plot erosi pada lereng 3 - 18 %, sehingga kurang memadai untuk topografi dengan kemiringan lereng yang terjal. Harper (1988) menunjukkan bahwa pada lahan dengan kemiringan lereng lebih besar dari 20 %, pemakaian persamaan $LS = L^{1/2} (0,00138S^2 + 0,00965S + 0,0138)$ akan diperoleh hasil yang *over estimate*. Untuk lahan berlereng terjal disarankan untuk menggunakan rumus berikut ini (Foster and Wischmeier, 1973).

$$\text{rumus : } LS = (l / 22)^m C (\cos \alpha)^{1,50} [0,5(\sin \alpha)^{1,25} + (\sin \alpha)^{2,25}]$$

dimana :

- m = 0,5 untuk lereng 5 % atau lebih
 = 0,4 untuk lereng 3,5 – 4,9 %
 = 0,3 untuk lereng 3,5 %
 C = 34,71
 α = sudut lereng
 l = panjang lereng (m)

3.5.4. Faktor pengelolaan tanaman (C)

Penentuan yang paling sulit adalah faktor C , karena banyaknya ragam cara bercocok tanam untuk suatu jenis tanaman tertentu dalam lokasi tertentu. Berhubung berbagai lokasi tersebut mempunyai iklim yang berbeda-beda, dengan berbagai ragam cara bercocok tanam, maka menentukan faktor C guna diterapkan pada suatu lahan tertentu, diperlukan banyak data.

Hayes dan Kimbelin telah mengusulkan prosedur tertentu untuk memperoleh faktor C , yang didasarkan atas pola tanam *corn-wheat-hay-hay-hay*

(CCWHHH). Untuk mendapatkan nilai C bagi suatu jenis tanaman, diambil lima buah periode sebagai berikut :

- Periode F : pembajakan kasar
- Periode 1 : penyebaran bibit
- Periode 2 : pemantapan (*establishment*)
- Periode 3 : pertumbuhan dan pematangan tanaman
- Periode 4 : sisa tanaman atau jerami

Kemudian nilai C tersebut dibandingkan dengan sejumlah sisa tanaman pada kondisi standar.

Faktor C menunjukkan keseluruhan pengaruh dari vegetasi, seresah, kondisi permukaan 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. Dengan demikian dalam memperkirakan besarnya erosi dengan menggunakan rumus USLE, besarnya faktor C perlu ditentukan melalui penelitian sendiri.

Faktor C yang merupakan salah satu parameter dalam rumus USLE saat ini telah dimodifikasi untuk dapat dimanfaatkan dalam menentukan besarnya erosi di daerah berhutan atau lahan dengan dominasi vegetasi berkayu. Tabel berikut menunjukkan beberapa angka C yang diperoleh dari hasil penelitian Pusat Penelitian Tanah, Bogor di beberapa daerah di Jawa. Apabila dikehendaki nilai C yang lebih akurat, maka perlu ditentukan sesuai dengan tingkat pengelolaan tanaman dan keadaan setempat

Tabel 3.5. Nilai C untuk berbagai jenis tanaman

Jenis Tanaman/tata guna lahan	Nilai C
Tanaman rumput (<i>Bracharia sp.</i>)	0,290
Tanaman kacang jogo	0,161
Tanaman gandum	0,242
Tanaman ubi kayu	0,363
Tanaman kedelai	0,399
Tanaman serai wangi	0,434
Tanaman padi lahan kering	0,560
Tanaman padi lahan basah	0,010
Tanaman jagung	0,637
Tanaman jahe, cabe	0,900
Tanaman kentang ditanam searah lereng	1,000
Tanaman kentang ditanam searah kontur	0,350
Pola tanam tumpang gilir + mulsa jerami (6 ton/ha/th)	0,079
Pola tanam berurutan + mulsa sisa tanam	0,347
Pola tanam berurutan	0,398
Pola tanam tumpang gilir + mulsa sisa tanaman	0,357
Kebun campuran	0,200
Ladang berpindah	0,400
Tanah kosong diolah	1,000
Tanah kosong tidak diolah	0,950
Hutan tidak terganggu	0,001
Semak tidak terganggu	0,010
Alang-alang permanen	0,020
Alang-alang dibakar	0,700
Sengon disertai semak	0,012
Sengon tidak disertai semak dan tanpa seresah	1,000
Pohon tanpa semak	0,320

Sumber : Abdurachman dkk.,1984 (dalam Asdak, 2002)

3.5.5. Faktor pengendali erosi (*P*)

Mengenai faktor pengendalian erosi (*P*) yang merupakan rasio kehilangan tanah dari suatu medan dimana tanamannya searah dengan kemiringan yang paling terjal nilainya dapat dilihat dari tabel yang disajikan berikut :

Tabel 3.6. Faktor Pengendali Erosi

Uraian	Kondisi	P
Contouring	Lereng < 12%	0,50 – 0,60
	Lereng 12% - 18%	0,80
	Lereng 18% - 24%	0,90
	Lereng 24%	1,00
Strip cropping dan terracing	Lereng < 12%	0,25 – 0,30
	Lereng 12% - 18%	0,30 – 0,40
	Lereng 18% - 24%	0,40 – 0,45

Sumber : Soemarto (1999)

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 dalam 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 : Asdak (2002)

Penilaian faktor P di lapangan lebih muda bila digabungkan dengan faktor C , karena dalam kenyataannya kedua faktor tersebut berkaitan erat. Beberapa nilai faktor CP telah dapat ditentukan berdasarkan penelitian di Jawa seperti tersebut pada tabel 3.7.

Tabel 3.7. Perkiraan nilai faktor CP berbagai jenis penggunaan lahan

Konservasi dan Pengelolaan Tanaman	CP
Hutan :	
a. tak terganggu	0,01
b. tanpa tumbuhan bawah, disertai seresah	0,05
c. tanpa tumbuhan bawah, tanpa seresah	0,50
Semak :	
a. tak terganggu	0,01
b. sebagian berumput	0,10
Kebun :	
a. kebun-talun	0,02
b. kebun-perkarangan	0,20
Perkebunan :	
a. penutupan tanah sempurna	0,01
b. penutupan tanah sebagian	0,07
Perumputan	
a. penutupan tanah sempurna	0,01
b. penutupan tanah sebagian; ditumbuhi alang-alang	0,02
c. alang-alang: pembakaran sekali setahun	0,06
d. serai wangi	0,65
Tanaman Pertanian :	
a. umbi-umbian	0,51
b. biji-bijian	0,51
c. kacang-kacangan	0,36
d. campuran	0,43
e. padi irigasi	0,02
Perladangan :	
a. 1 tahun tanam - 1 tahun bero	0,28
b. 1 tahun tanam - 2 tahun bero	0,19
Pertanian dengan konservasi :	
a. mulsa	0,14
b. teras bangku	0,04
c. <i>contour cropping</i>	0,14

Sumber : Asdak (2002)

Dengan variabel sebanyak yang tersebut diatas, maka tidaklah mudah memecahkannya dengan cara kuantitatif, kecuali jika terdapat banyak data. Rumus tersebut mempunyai dua buah kegunaan yaitu :

1) *Meramalkan kehilangan tanah.*

Jika medannya diketahui, cara pengelolaannya diketahui, maka kehilangan tanahnya dapat diramalkan dari pola hujan tertentu yang tercurah selama waktu tertentu (biasanya diambil curah hujan tahunan). Kehilangan tersebut merupakan nilai yang diperkirakan (*expected value*), bukannya kehilangan yang bakal terjadi, dan tidak merupakan nilai kehilangan yang bakal terjadi, misalnya tahun berikutnya, karena intensitas curah hujannya tidak dapat ditentukan sebelum terjadi.

2) *Memilih cara bertani*

Dalam penggunaan rumus tersebut, nilai A dipilih sebesar nilai yang dipandang dapat diterima, karena menghentikan erosi sama sekali tidaklah mungkin. Beberapa faktor seperti R , K , dan S untuk medan tertentu tidak dapat segera diubah. Untuk faktor-faktor lainnya mungkin dapat dilakukan dengan memilih cara bertani, sedemikian rupa sehingga misalnya kalau C diberi nilai yang tinggi, maka P harus diperkecil.

Perlu dicatat bahwa rumus USLE hanya berlaku bagi lahan yang diusahakan untuk lahan pertanian, jadi tidak termasuk erosi yang terjadi dalam jalan-jalan air (*watercourses*).

3.5.6. Keterbatasan USLE

Persamaan USLE memberikan prosedur untuk mendapatkan nilai faktor-faktor yang terkait, dengan menggunakan pendekatan praktis, sehingga dimungkinkan terjadinya kesalahan dalam pemilihan harga yang tepat. Terutama, kehati-hatian yang harus diperhatikan dalam pemilihan harga yang terkait dengan pola tanam dan pengolahan lahan. Biasanya nilai R dan K untuk suatu daerah aliran sungai (DAS) tetap atau tidak banyak variasi, namun C dan LS sangat bervariasi tergantung pada pola tanam, pengolahan lahan, dan tindakan konservasi praktis.

Disamping itu pula, ada beberapa keterbatasan USLE yang dikemukakan beberapa peneliti, sebagai berikut :

- a) **USLE adalah empiris.** Secara matematis, USLE tidak menggambarkan proses erosi tanah secara aktual. Hal ini selalu dimungkinkan adanya kesalahan dalam perhitungan, khususnya dalam pengambilan koefisien (faktor) empiris. Dalam perhitungan nilai R, beberapa peneliti telah memperkenalkan beberapa formula, eksponen, dan metode yang berbeda. Dimana kesemuanya tidak berlaku secara umum, dan sulit untuk diterapkan secara tepat pada lokasi tertentu dengan data yang tersedia.
- b) **USLE memprediksi kehilangan tanah rata-rata.** Pada dasarnya USLE memperkirakan kehilangan tanah tahunan rata-rata, sehingga penggunaannya terbatas pada perkiraan kehilangan tanah tahunan rata-rata pada kawasan tertentu. Persamaan tersebut memberikan hasil yang lebih kecil dari yang terukur, terutama untuk kejadian banjir dengan intensitas yang tinggi. Dianjurkan, tumpukan sedimen yang direncanakan berdasarkan yil sedimen supaya diperiksa setelah terjadi hujan lebat, untuk meyakinkan bahwa volume yang disediakan berada laju sedimentasi yang terjadi.
- c) **USLE tidak menghitung erosi selokan (*gully erosion*).** USLE digunakan untuk memprediksi erosi lembaran (*sheet erosion*) dan erosi parit (*rill erosion*) tetapi tidak untuk erosi selokan (*gully erosion*). Erosi selokan akibat terkonsentrasinya aliran tidak diperhitungkan dalam persamaan dan dapat menyebabkan erosi yang lebih besar.
- d) **USLE tidak memperhitungkan pengendapan sedimen.** Persamaan hanya memperkirakan kehilangan tanah, tetapi tidak memprediksi pengendapan sedimen. Pengendapan di dasar saluran lebih kecil dari total kehilangan tanah yang berasal dari seluruh DAS. Begitu limpasan permukaan dari lahan belerang mencapai ujung hilir lereng atau masuk saluran (lahan yang lebih datar), sebagian besar partikel sedimen diendapkan. Total tanah tererosi yang dibawa limpasan permukaan berkurang dengan meningkatnya panjang lintasan.

3.6. Integrasi USLE dengan Sistem Informasi Geografi (SIG)

USLE dikembangkan untuk memperkirakan kehilangan tanah pada lahan dengan ukuran kecil, sehingga dalam aplikasinya untuk memperkirakan yil sedimen (bukan kehilangan tanah) DAS, semua faktor (kecuali R) harus dihitung dengan pembobotan. Selanjutnya, jika tata guna lahan atau konservasi praktis di DAS bervariasi terhadap ruang, erosi harus dihitung secara individual untuk masing masing luasan, dan juga diperlukan modifikasi harga faktor-faktor USLE.

Cara yang paling tepat untuk mengakomodasikan karakteristik masing-masing luasan secara spasial adalah dengan aplikasi Sistem Informasi Geografi (SIG).

Penggunaan Sistem Informasi Geografis sebagai suatu system pengumpulan data yang terorganisir dewasa ini mulai berkembang pesat. Dan ini telah terbukti di beberapa instansi baik pemerintah ataupun swasta yang menggunakan Sistem Informasi Geografis sebagai suatu sistem pengumpulan dan penggabungan data terpadu

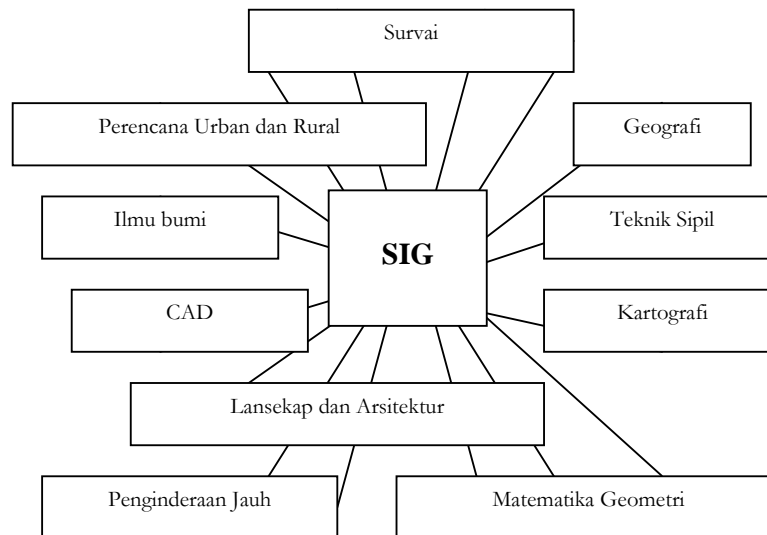
Terdapat beberapa hal yang menarik mengapa konsep SIG tersebut digunakan, bahkan di berbagai disiplin ilmu. Diantaranya ;

- Hampir semua operasi (termasuk analisisnya) yang dimiliki oleh perangkat SIG interaktif yang didukung dengan kemudahan untuk akses menu (*user friendly*).
- Kemampuannya untuk menguraikan entitas yang ada di permukaan bumi pada format layer data spasial. Dengan demikian permukaan tersebut dapat direkonstruksi kembali atau dimodelkan dalam bentuk nyata dengan menggunakan data ketinggian dan layer tematik yang diperlukan.
- Aplikasi – aplikasi SIG menyediakan fasilitas untuk di-customize dengan bantuan *script-script* bahasa program yang dimiliki software SIG atau bahkan mampu untuk berintegrasi dengan perangkat aplikasi lain yang disusun dengan bahasa pemrograman yang lebih canggih (*visual basic, Delphi, C++*).
- Software SIG menyediakan fasilitas untuk berkomunikasi dengan aplikasi – aplikasi lain hingga dapat bertukar data secara dinamis baik melalui fasilitas OLE (*Object Linking and Embedding*) ma upun ODBC (*Open Database Connectivity*) untuk mengakses *data remote*. Selain itu SIG sudah banyak

diimplementasikan dalam bentuk komponen-komponen perangkat lunak yang dapat digunakan kembali oleh user yang menginginkan tampilan peta digital (terutama format *vektor*) pada aplikasinya dengan kemampuan dan kualitas standard.

- Pada saat ini bagi user yang berada pada lokasi yang jauh dari sumber data dapat mengakses data SIG tersebut dengan mengimplementasikan *map-server* atau GIS-server yang siap melayani permintaan (*queries*) para *client* melalui intranet ataupun internet (*web based*). Sehingga beban kerja dapat dipisahkan antara *client* dan *server*. Selain itu, aplikasi –aplikasi SIG dapat dibuat di server maupun di client. Server akan mengatur dan memberikan layanan terhadap semua query yang masuk dari *user (clients)*. Dengan demikian produk aplikasi SIG juga dapat dipublikasikan secara bebas di jaringan internet hingga dapat diakses menggunakan aplikasi browser internet.

Dengan demikian untuk mengelola data yang kompleks ini, diperlukan suatu sistem informasi yang secara terintegrasi mampu mengolah baik data spasial dan data atribut untuk selanjutnya mampu menjawab pertanyaan spasial dan atribut secara simultan. Dengan demikian, diharapkan keberadaan suatu sistem informasi yang efisien dan mampu mengelola data dengan struktur yang kompleks dan jumlah yang besar ini dapat membantu dalam proses pengambilan keputusan. Salah satu sistem yang menawarkan solusi untuk masalah ini adalah Sistem Informasi Geografis (*Geographics Information System – GIS*). GIS/ SIG menjadi satu teknologi baru yang pada saat ini menjadi alat bantu yang sangat esensial dalam menyimpan, memanipulasi, menganalisis dan review kondisi-kondisi alam dengan bantuan data atribut dan spasial. SIG tersebut didukung oleh berbagai disiplin ilmu yang terkait. Sebagai ilustrasi mengenai hubungan SIG dengan bidang-bidang pendukungnya adalah sebagai berikut :



Gambar 3.9. Hubungan SIG dengan bidang-bidang pendukung

3.6.1. Konsep Sistem Informasi Geografi

Akhir-akhir ini istilah sistem menjadi sangat populer. Sistem digunakan untuk mendeskripsikan banyak hal, khususnya untuk aktivitas-aktivitas yang diperlukan untuk pemrosesan data. Pengembangan komputer dan teknologi pendukungnya sangat meningkatkan kepopuleran penggunaan sistem untuk memenuhi kebutuhan informasi suatu organisasi modern.

Sistem Informasi Geografi (*Geographic Information System*) digunakan untuk mendeskripsikan banyak hal, khususnya untuk aktivitas-aktivitas yang diperlukan dalam pemrosesan data. Pengembangan komputer dan teknologi pendukungnya sangat meningkatkan kepopuleran penggunaan sistem untuk memenuhi kebutuhan informasi suatu organisasi modern

Definisi SIG selalu berkembang, bertambah dan bervariasi. SIG juga merupakan bidang kajian ilmu dan teknologi yang relatif baru, digunakan di berbagai bidang ilmu dan berkembang cepat. Berikut ini salah satu definisi SIG yang populer yang dipublikasikan oleh ESRI (*Environmental System Research Institute*), Inc.-90 :

SIG adalah kumpulan yang terorganisir dari perangkat keras komputer, perangkat lunak, data geografi yang dirancang secara efisien untuk memperoleh,

menyimpan, mengupdate, memanipulasi, menganalisis dan menampilkan semua bentuk informasi yang berreferensi geografi.

Berikut beberapa terminology SIG [Demers97]

- Geographic Information System dari Amerika Serikat
- Geographical Information System dari Eropa
- Geomatique dari Kanada
- Georelational Information System terminology berbasis teknologi
- Natural Resources Information System terminology berbasis disiplin ilmu Lingkungan
- Geoscience/ Geological Information system terbasiskan disiplin teknik geologi
- Spatial Data Analysis System terminology berdasarkan sistemnya.

Secara fungsional definisi suatu Sistem Informasi Geografi mengandung beberapa hal berikut :

1. Mengandung beberapa jenis data baik alfa numeris, grafis berupa foto dan gambar atau informasi spasial lain dalam jumlah lain yang sangat besar.
2. Merupakan suatu kesatuan dari data yang dibentuk oleh sejumlah modul program yang saling berinteraksi.
3. Mempunyai beberapa sub-sistem yang dapat digunakan bersama untuk fungsi pengumpulan dan penyimpanan data pengambilan penampilan dan analisis informasi

Salah satu definisi yang dapat mewakili pengertian tentang Sistem Informasi Geografis (SIG) dikemukakan oleh P.A Burrough, 1986. Menurutnya Sistem Informasi Geografis (SIG) adalah seperangkat alat untuk mengkoleksi, menyimpan, memanggil kembali, transformasi dan penampilan data keruangan (*spatial*) di permukaan bumi untuk tujuan tertentu. Dari definisi di atas, maka Sistem Informasi Geografis (SIG) pada hakekatnya dapat berfungsi sebagai berikut :

1. Bank Data Terpadu

Memadukan data kartografis dengan data atribut dalam sistem manajemen basis data relasional (*relational data base management system*), hingga memungkinkan menolah bagai suatu kesatuan.

2. Sistem Modeling dan Analisa

Dapat dipergunakan sebagai sarana evolusi potensi wilayah dan perencanaan spasial (tata ruang, tata lingkungan).

3. Sistem Pemetaan Otomatis

Automatted mapping yang dapat menyajikan peta sesuai dengan kebutuhan, baik dalam arti tujuan maupun ketentuan kartografi.

4. Sistem Pengelolaan Ber-georeferensi

Untuk pengelolaan operasional dan administrasi yang merujuk pada lokasi geografis (Pranoto Asmoro, 1989).

Fungsi-fungsi di atas sebagian besar dapat berjalan Sistem Informasi Geografis memiliki kemampuan dalam mendeskripsikan data geografis. Pada dasarnya Sistem Informasi Geografis (SIG) dapat menerima tiga komponen data, yaitu :

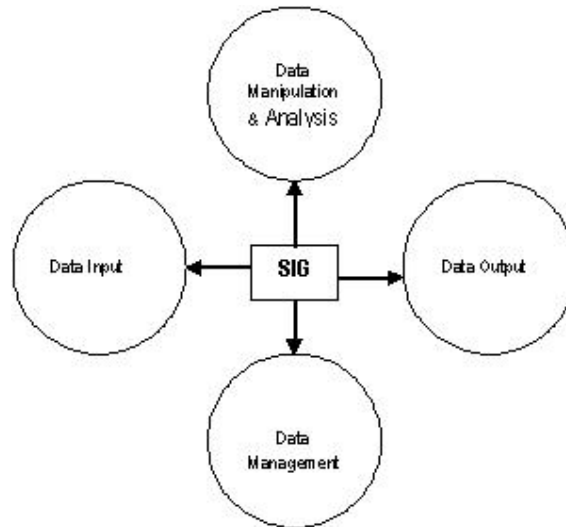
1. Data spasial/data geografis yang berhubungan dengan posisi koordinat tertentu.
2. Data non spasial (atribut) yang tidak berkaitan dengan posisi berupa tema-tema tertentu, seperti warna, tekstur, jenis lahan, dan sebagainya.
3. Hubungan antara data spasial atribut dan data waktu yang berkaitan.

3.6.2. Sub Sistem SIG

Sistem Informasi Geografis (SIG) dapat diuraikan menjadi beberapa subsistem :

- *Data Input* [modul *data capture* – Gistut94]. Bertugas untuk mengumpulkan dan mempersiapkan data spasial dan atribut dari berbagai sumber. Selain bertanggung jawab dalam mengkonversi atau mentransformasikan format data asli ke dalam format yang dapat digunakan oleh SIG.
- *Data Output* [modul *display* dan *reporting* – Gistut94]. Menampilkan output seluruh atau sebagian basis data dalam bentuk *softcopy* atau *hardcopy* (tabel, grafik, dan peta).
- *Data Management* [subsistem *storage* dan *retrieval* – Demers97]. Mengorganisasikan data spasial dan atribut ke dalam basis data sedemikian mudah untuk dipanggil, di-*update* dan di-*edit*.

- *Data Manipulation & Analysis*. Menentukan informasi yang dapat dihasilkan oleh SIG. Selain itu juga memodelkan data untuk menghasilkan informasi yang diharapkan.



Gambar 3.10. Sub system SIG

3.6.3. Digitasi Peta

Salah satu sumber data yang sangat vital diperlukan adalah data masukan dari suatu peta, sehingga komponen konversi data dari peta menjadi data digital merupakan komponen utama dalam sistem data base di SIG. Proses demikian disebut sebagai Digitasi Peta.

Digitasi adalah konversi data analog ke data digital atau pemindahan elemen-elemen peta (titik, garis, luasan) ke dalam koordinat atau seri koordinat yang dihubungkan dengan suatu kode yang menunjukkan arti dari elemen tersebut. Semua data dimasukkan pada median pita kertas (*paper tape*) atau pita magnetik (*magnetic tape*). (Aryono P., 1989). Pada saat digitasi perlu adanya kode pada tiap-tiap feature yang akan didigitasi. Pemberian kode ini dimaksudkan supaya gambar peta dalam bentuk digital dapat diubah untuk keperluan pemetaan digital melalui kegiatan editing (Benny J Hendry S, dkk, 1987).

Papan digitizer berupa meja grid yang merupakan serangkaian konduktor-konduktor listrik untuk menyatakan setiap posisi titik ke dalam koordinat X dan Y. Karena grid tersebut merupakan konduktor-konduktor listrik, maka kursor yang digunakan berupa kumparan yang berpusat pada benang silangnya. Apabila

merekam suatu koordinat suatu titik akan menimbulkan arus yang mengakibatkan terjadinya suatu medan magnetis dan menimbulkan tegangan induksi pada rangkaian kondukt listrik dalam grid. Encoder dalam digitizer akan mengubah pulsa-pulsa listrik menjadi koordinat X dan Y (Aryono P, 1989).

3.6.4. Transformasi Koordinat

Transformasi yang dimaksudkan adalah mengkonversi koordinat digitizer menjadi sistem koordinat peta digital. Penuruna persamaan transformasinya adalah sebagai berikut :

$$X_p = r \cos \delta \quad X'_p = r \cos (\delta + \beta)$$

$$Y_p = r \sin \delta \quad Y'_p = r \sin (\delta + \beta)$$

$$X'_p = r (\cos \delta \cos \beta - \sin \delta \sin \beta)$$

$$Y'_p = r (\cos \delta \sin \beta + \sin \delta \cos \beta)$$

$$X'_p = (X_p \cos \beta) - (Y_p \sin \beta)$$

$$Y'_p = (Y_p \cos \beta) + (X_p \sin \beta)$$

Pengaruh perubahan skala arah x (s) dan y (s') :

$$X'_p = s (X_p \cos \beta - Y_p \sin \beta)$$

$$Y'_p = s' (Y_p \cos \beta + X_p \sin \beta)$$

Pengaruh translasi (e,f) :

$$X'_p = s (X_p \cos \beta - Y_p \sin \beta) + e$$

$$Y'_p = s' (Y_p \cos \beta + X_p \sin \beta) + f$$

Jika $a = \cos \beta$; $b = -\sin \beta$; $c = s' \cos \beta$; dan $d = s' \sin \beta$, maka persamaan tersebut menjadi :

$$X'_p = a X_p - b Y_p + e$$

$$Y'_p = c X_p - d Y_p + f$$

Dengan menggunakan koordinat titik kontrol, maka dapat ditulis dalam bentuk matriks sebagai berikut :

$$AX = F + P$$

Untuk menentukan harga X digunakan metode hitung kuadrat terkecil (*Least Square*) sebagai berikut :

$$X(A^T A)^{-1} A^T F$$

$$V = AX - F$$

Keterangan :

A : Matriks derivatif parsial terhadap parameter

X : Parameter pengukuran

F : Harga pengamatan

V : Harga residu / error pengamatan

Pada transformasi ini ada enam parameter, yaitu a, b, c, d, e, f, maka untuk mencari harga keenam parameter diperlukan minimal tiga titik yang diketahui koordinatnya. Tingkat ketelitian hasil dari proses transformasi dapat diukur dari nilai RMS (*Root Mean Square*).

3.6.5. Konsep Overlay

Pada proses overlay akan melibatkan beberapa proses pada tipe data spasial, baik tipe data yang berbentuk vektor maupun data yang berbentuk data base. (Laurini, R & Thompson, D., 1993). Suatu feature peta baru dapat dibuat dengan meng-overolay-kan feature minimal dua lapisan peta. Dalam proses overlay terdapat tiga cara, yaitu union, intersect, dan identity. Secara prinsip tiga cara tersebut mempunyai perbedaan, yaitu :

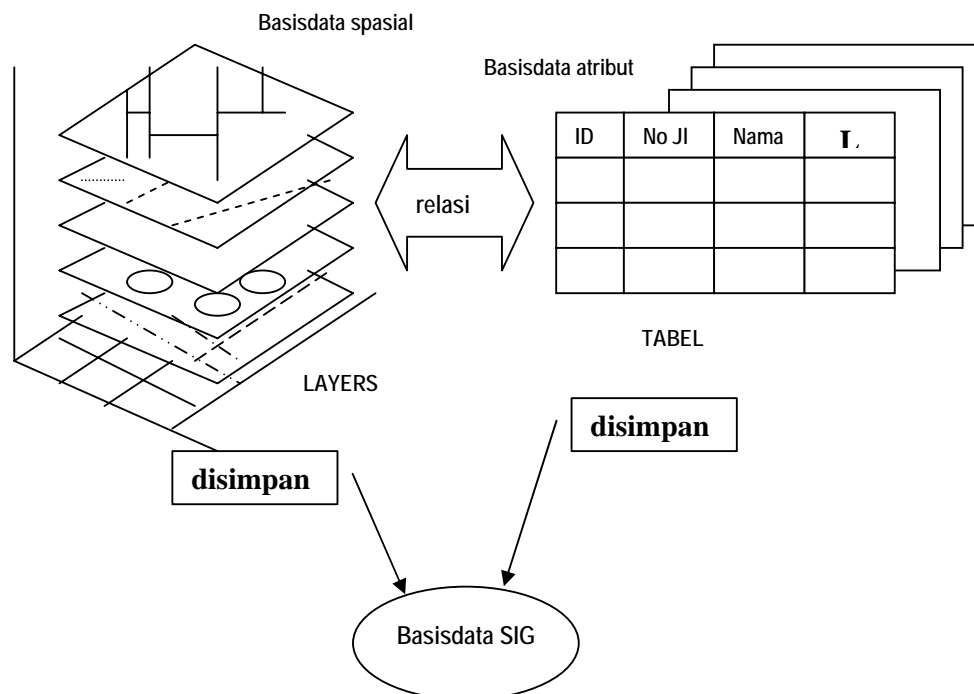
1. Union, menggabungkan semua feature dari kedua lapisan peta.
2. Intersect, menggabungkan feature dari kedua lapisan peta yang ber-overlap.
3. Identity, menggabungkan feature dari kedua lapisan peta yang dibatasi oleh peta input. Semua feature di luar lapisan peta input dihilangkan.

3.6.6. Cara Kerja SIG

SIG merepresentasikan real world pada monitor sebagaimana lembaran peta disertai map features-nya (sungai, hutan, kebun, jalan, tanah persil, dll). Skala peta menentukan ukuran dan bentuk representasi unsur-unsurnya. Makin meningkat skala peta, makin besar ukuran unsur-unsurnya.

SIG menyimpan semua informasi deskriptif unsur-unsurnya sebagai atribut di dalam basis data. Kemudian SIG membentuk dan menyimpannya dalam tabel relasional. Kemudian SIG menghubungkan unsur-unsur tersebut dengan tabel bersangkutan. Sehingga atribut-atribut ini dapat diakses melalui lokasi unsur-unsur peta, dan sebaliknya unsur-unsur peta dapat diakses dari atributnya.

SIG menghubungkan sekumpulan unsur-unsur peta dengan atributnya di dalam satuan-satuan *layer*. Sungai-sungai, bangunan-bangunan, jalan, batas administrasi merupakan contoh *layer*. Perhatikan ilustrasi berikut; Dengan demikian perancangan basis data merupakan hal yang esensial di dalam SIG. Rancangan basisdata akan menentukan efektifitas dan efisiensi proses masukan, pengelolaan dan keluaran SIG.



Gambar 3.11. Cara kerja Sistem Informasi Geografi

3.6.7. Unsur-Unsur Utama dalam SIG

Unsur-Unsur Utama dalam SIG terdiri atas :

1. AutoCAD

Peran AutoCAD dalam Sistem Informasi Geografis (SIG) lebih ditekankan dalam aspek 2 (dua) dimensinya. Aspek dua dimensi yang dimaksud disini

adalah dalam hal pembuatan dan pendigitasian peta serta pengaturan dari struktur peta yang dinyatakan dalam layer. Hal-hal yang perlu diketahui dalam lingkungan pengoperasian perangkat lunak AutoCAD untuk pendigitasian peta adalah :

a. Elemen dalam AutoCAD

Elemen dalam AutoCAD dibagi menjadi dua macam, yaitu elemen grafis dan elemen non grafis. Elemen grafis merupakan serangkaian perintah-perintah untuk membuat suatu gambar atau bentuk grafis dalam gambaran suatu obyek gambar, seperti line(l), polyline(pl), doublelin multiline (di/ml), rectangle (*rectangle*), circle (c), dll. Sedangkan elemen non grafis merupakan serangkaian perintah yang berfungsi untuk pengeditan pada gambar atau objek dalam AutoCAD, seperti pemberian angka/huruf (*dtext*), pemotongan garis (*trim*), penambahan garis (*extend*), penghapusan (*erase*), penggandaan (*array*), dll.

b. Memulai program AutoCAD

Untuk memulai program AutoCAD terlebih dahulu harus memasuki lingkungan windows karena pengopersian program ini dibawah sistem operasi windows.

Langkah-langkah yang perlu diperhatikan adalah :

- Pembuatan layer (lapisan gambar), dimaksudkan untuk mempermudah proses penggambaran dan editing gambar.
- Pengturan jenis garis, warna garis, dan pengaktifan garis yang ditampilkan

c. Menyeting Lingkungan Digitasi

Maksud dari penyetingan lingkungan digitasi disini adalah pengaturan fungsi gambar dari masing-masing jenis garis yang ada di dalam gambar peta. Perintah-perintah penyetingan yang dilakukan pada mana layer dan ditujukan untuk membedakan suatu garis dengan garis lainnya.

d. Proses Pengeditan Peta

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa proses digitasi merupakan proses pemindahan data manual (Peta Manual) ke dalam bentuk peta digital yang biasa diterjemahkan dalam sistem komputer. Dalam proses digitasi ini peta yang digunakan haruslah benar-benar mempunyai keakuratan yang tinggi (sebaiknya dari Peta Bakosurtanal) baik itu dari segi kala maupun kejelasan informasi dari peta itu sendiri.

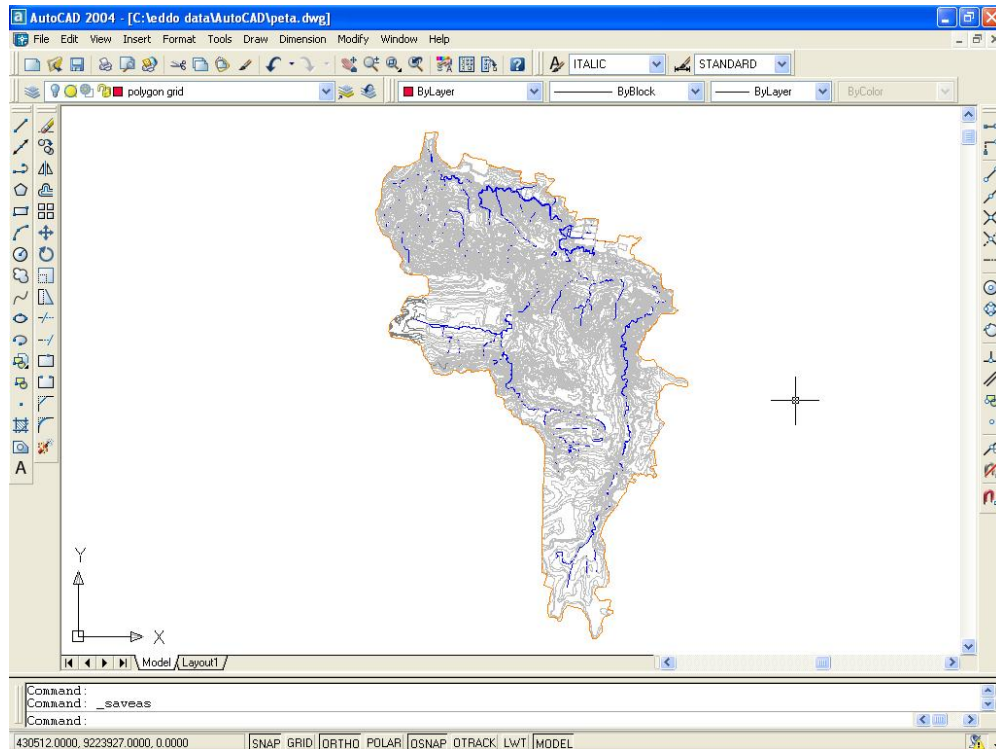
Angkah pertama dari peta digitasi adalah memindahkan koordinat peta yang akan didigitasi ke dalam koordinat yang bisa dibaca oleh komputer melalui digitizer. Untuk dapat membaca koordinat peta yang ada agar dapat ditransfer ke dalam sistem komputer, maka yang harus dilakukan adalah dengan mengaktifkan digitizer supaya bisa dibaca dalam program AutoCAD.

Apabila sistem pengkoordinat telah bisa masuk dan terbaca dalam sistem komputer, maka selanjutnya adalah memulai digitasi dengan memperhatikan pengaturan layer dari masing-masing jenis layer yang telah ditentukan sebelumnya. Untuk pendigitasian ini perintah yang sering dioperasikan adalah pembuatan garis banyak (polyline).

e. Penyimpanan Hasil Digitasi

Penyimpanan hasil digitasi dapat dilakukan pada saat proses digitasi sedang berlangsung atau pada saat yang diinginkan. Perintah yang dipakai dalam penyimpanan hasil digitasi ini adalah save atau save as. Bentuk file yang disimpan dari hasil ini adalah dengan nama *.dwg. Selanjutnya, agar hasil digitasi ini dapat dibaca dan diterjemahkan kedalam format Arc Info, maka format file *.dwg ini harus dikonversi kedalam bentuk dxf file dengan tipe ASCII.

Setelah peta terdigitasi semua, selanjutnya membuat batas DAS (gambar 3.12.) sesuai yang diinginkan. Pembuatan grid dilakukan Auto CAD ini berguna sebagai metode dalam memprediksi erosi lahan yang dilakukan.



Gambar 3.12. Proses pembuatan DAS di Auto CAD

2. Arc Info

Arc Info merupakan salah satu perangkat lunak GIS yang telah banyak digunakan oleh para ahli di bidang GIS. Pada prinsipnya Arc Info ini sangat mendukung dalam pembuatan dan pembangunan data base sebuah peta yang berdasarkan pada prinsip-prinsip informasi pemetaan yang terpadu.

a. Pengenalan Lingkungan Arc Info

Untuk memasuki lingkungan Arc Info, kita harus mengetahui letak folder programnya, maka langsung bisa diklik ArcW.

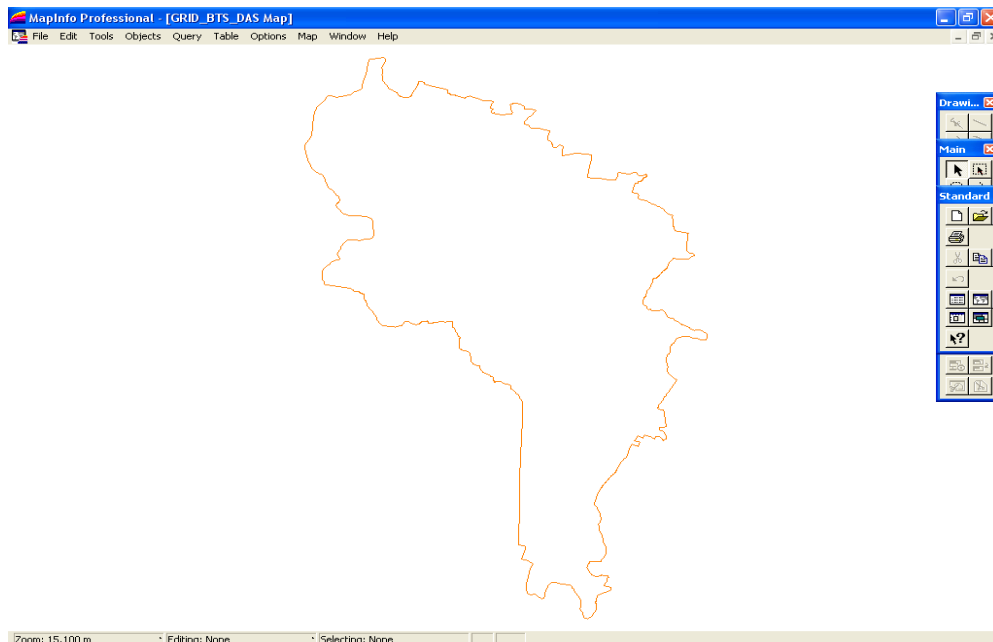
Setelah langkah-langkah tersebut, Anda telah berada dalam lingkungan program Arc Info. Dalam lingkungan ini semua perintah masih menggunakan keyboard sebagai input device. Untuk memahami perintah-perintah tersebut tidak perlu dihafalkan, cukup dengan mengetikkan perintah Commands untuk melihat rangkaian perintah yang digunakan.

b. Pengisian Atribut (Arc Plot)

Tabel yang telah dibuat di dalam Arc Edit dapat diisi dengan atribut-atribut. Pengisian data pada tabel ini dilakukan dalam lingkungan Arc Plot pada Arc Info. Arc Plot sendiri sebenarnya merupakan alat lingkungan pada Arc Info yang berfungsi untuk mengatur tampilan agar dapat dicetak (plot) ke dalam kertas. Namun demikian Arc Plot ini dapat digunakan untuk mengisi data ke dalam tabel peta. Penggunaan Arc Plot ini untuk mengisi data didasarkan pada segi kepraktisan antara data dan lokasi data tersebut.

c. Region Peta

Grid peta yang sudah dibuat di Auto CAD, sebelum diteruskan ke ArcView di region dulu di Arc Info sehingga dapat memudahkan pengisian data di ArcView nantinya



Gambar 3.13. Proses region peta di Arc Info

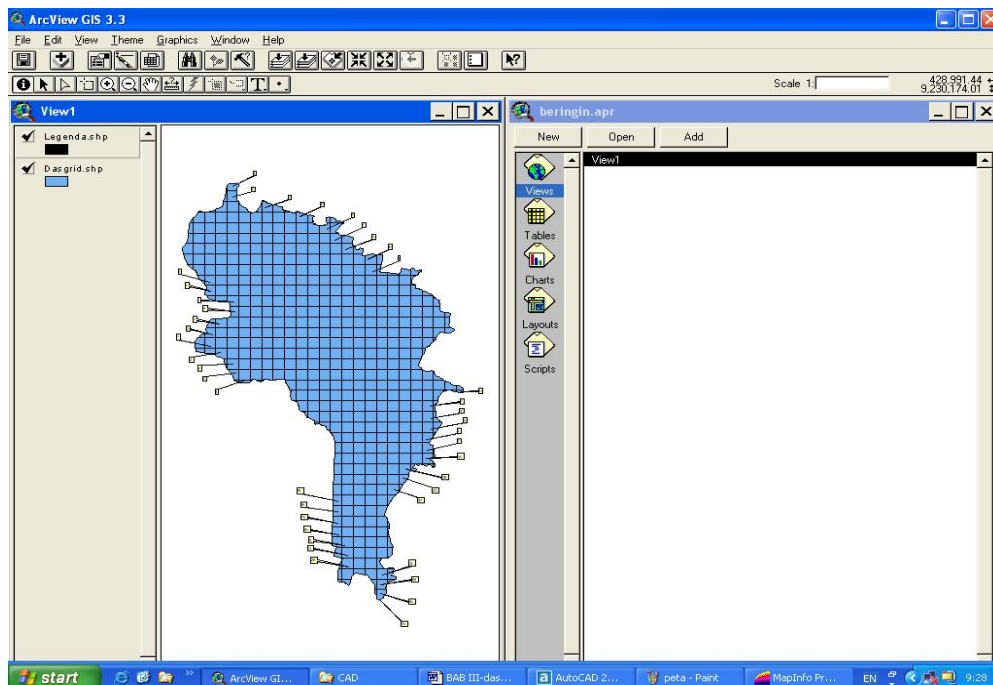
3. Arc View

Arc View merupakan salah satu perangkat lunak GIS yang berfungsi untuk mencetak peta. Arc View memiliki beberapa bagian yang saling

berhubungan. Bagian-bagian Arc View yang dimaksud adalah jendela (window) yang terdiri dari :

1. *Project Window* (Jendela Utama)
2. *View Window* (Tampilan Peta)
3. *Table Window* (Tabel Peta)
4. *Chart Window* (Grafik dari suatu Tabel)
5. *Layout Window* (Setting Peta untuk Dicetak)
6. *Script Window* (Perintah Tambahan)

Selain itu juga ada beberapa bagian lain yakni menu utama (main menu), menu button (buttons), dan menu tool (tools). Masing-masing bagian (window) memiliki menu-menu yang berlainan saat bagian tersebut diaktifkan.



Gambar 3.14. Proses ArcView