

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1. Umum

Secara umum bendungan dibangun untuk menampung air yang dapat dimanfaatkan untuk memenuhi berbagai keperluan antara lain kebutuhan irigasi, air baku, air minum, pembangkit tenaga listrik, pengendali banjir, obyek pariwisata dan lain sebagainya. Berdasarkan Permen PUPR nomor 27/PRT/M/2015 tanggal 20 Mei 2015 tentang bendungan, bahwa pembangunan bendungan dan pengelolaan bendungan beserta waduknya bertujuan untuk meningkatkan kemanfaatan fungsi sumber daya air, pengawetan air, pengendalian daya rusak air, dan fungsi pengamanan tampungan limbah atau tampungan lumpur.

Keberadaan bendungan sangat penting dalam menciptakan keseimbangan ekologi dan tata air. Dari sudut ekologi, bendungan merupakan ekosistem yang terdiri dari unsur air, kehidupan akuatik, dan daratan yang dipengaruhi oleh tinggi rendahnya muka air. Ditinjau dari sudut tata air, bendungan berperan sebagai *reservoir* yang dapat dimanfaatkan airnya untuk keperluan sistem irigasi dan perikanan, sebagai sumber air baku, sebagai tangkapan air untuk pengendalian banjir, serta penyuplai air tanah. Untuk menjamin fungsi bendungan agar tetap optimal dan berkelanjutan perlu diperhatikan juga operasi dan pemeliharaan waduk agar fungsi waduk dapat berjalan seperti rencana yaitu salah satunya dengan cara mengetahui nilai laju sedimentasi waduk setiap tahunnya.

3.2. Tanah

Dalam pandangan teknik sipil, tanah adalah himpunan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*), yang terletak di atas batuan dasar (*bedrock*) (Hardiyatmo, 2006). Sebagai sumber daya alam untuk pertanian, tanah mempunyai dua fungsi utama, yang pertama sebagai sumber unsur hara bagi tanaman dan yang kedua sebagai tempat akar tanaman berjangkar

dan air tanah tersimpan. Fungsi-fungsi tersebut dapat mengalami penurunan bahkan hilang. Keadaan tanah seperti ini disebut sebagai kerusakan tanah atau degradasi tanah. Kerusakan tanah sebagai sumber unsur hara bagi tanaman dapat diperbarui dengan pemupukan. Namun, kerusakan fungsi tanah sebagai tempat akar tanaman berjangkar dan air tanah tersimpan memerlukan waktu yang lama untuk memperbaiki tanah. Kerusakan tanah atau degradasi tanah terjadi karena empat sebab. Pertama, kehilangan unsur hara dan bahan organik dari daerah perakaran. Kedua, terkumpulnya garam di daerah perakaran, terkumpulnya unsur atau senyawa yang merupakan racun bagi tanaman. Ketiga, penjumlahan tanah oleh air. Keempat, erosi lahan.

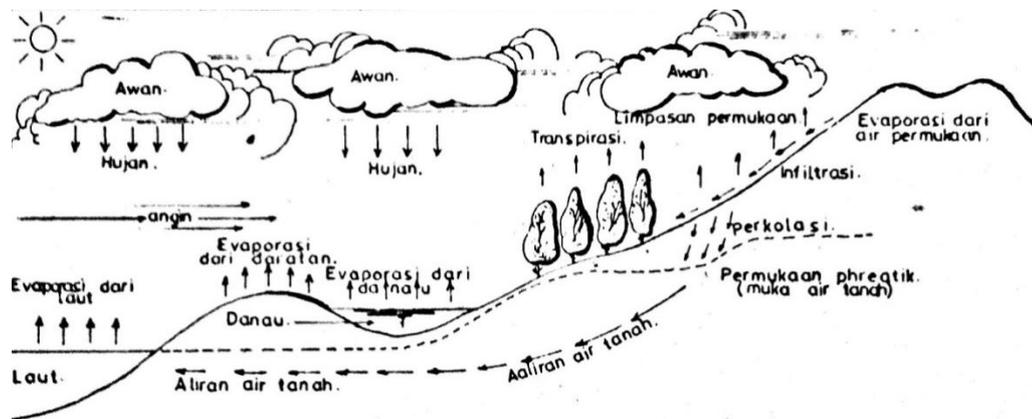
3.3. Hidrologi

3.3.1. Pengertian Umum

Hidrologi adalah suatu ilmu yang menjelaskan tentang kehadiran dan gerakan air di alam (Soemarto, 1986). Sedangkan menurut Asdak, (2010) “hidrologi adalah ilmu yang berkaitan dengan air di bumi, baik mengenai terjadinya, peredaran dan penyebarannya, sifat-sifatnya dan hubungan dengan lingkungannya terutama dengan makhluk hidup. Ilmu hidrologi diterapkan pada beberapa kegiatan seperti perencanaan dan operasi bangunan air, penyediaan air untuk berbagai keperluan (air bersih, irigasi, perikanan, peternakan), pembangkit listrik tenaga air, pengendalian banjir, pengendalian erosi dan sedimentasi, transportasi air, drainasi, pengendalian polusi, air limbah, dan lain sebagainya”.

Siklus hidrologi adalah proses Bergeraknya air dari bumi ke atmosfer dan kembali ke bumi secara berkelanjutan. Air di permukaan tanah, sungai, danau dan laut menguap ke udara. Uap air tersebut bergerak naik ke atmosfer yang kemudian mengalami kondensasi dan berubah menjadi titik-titik air berbentuk awan. Kemudian titik-titik air tersebut jatuh sebagai hujan baik di permukaan laut ataupun daratan. Hujan yang jatuh sebagian ditahan oleh tumbuhan dan sisanya jatuh ke permukaan tanah yang kemudian meresap ke dalam tanah dan sebagian yang lain mengalir di atas permukaan tanah. Aliran permukaan mengisi cekungan tanah, danau, dan masuk ke sungai dan akhirnya mengalir ke laut. Air yang

meresap ke dalam tanah sebagian mengalir di dalam tanah dan mengisi air tanah yang kemudian keluar sebagai mata air yang mengalir di sungai, untuk lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 3.1.



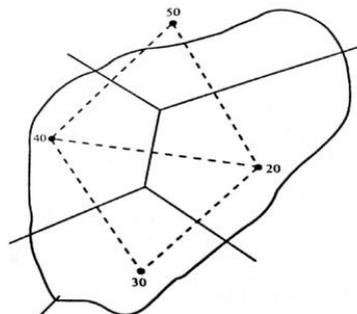
Gambar 2.1 Siklus Hidologi

(Sumber : Soemarto, 1986)

3.3.2. Analisis Hujan Kawasan Metode Thiessen

Metode Thiessen 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 terdekat, sehingga hujan yang tercatat pada suatu stasiun mewakili luasan tersebut.

Metode Thiessen digunakan jika penyebaran stasiun hujan di daerah yang ditinjau tidak merata. Perhitungan curah hujan rata-rata dilakukan dengan memperhitungkan daerah pengaruh dari setiap stasiun hujan.



Gambar 2.2 Poligon Thiessen

(Sumber : Bambang Triatmodjo, 2008)

Pembuatan poligon Thiessen dijelaskan berikut ini.

- 1 Stasiun pencatat hujan digambarkan pada peta DAS baik stasiun hujan di dalam atau di luar DAS.
- 2 Antara stasiun hujan yang satu dan yang lain dihubungkan dengan garis lurus sehingga membentuk segitiga-segitiga, yang sebaiknya memiliki sisi dengan panjang kira-kira sama.
- 3 Dibuat garis berat (garis yang membagi sama besar garis hubung antar stasiun) pada sisi-sisi segitiga seperti yang ada pada Gambar 3.3.
- 4 Setiap stasiun hujan mewakili luasan yang dibentuk oleh poligon. Garis-garis berat membentuk poligon yang mengelilingi tiap stasiun hujan dengan garis batas DAS membentuk batas tertutup dari poligon.
- 5 Luas tiap poligon dihitung kemudian dikalikan dengan kedalaman hujan di stasiun yang berada dalam poligon. Hasilnya dibagi dengan luas daerah yang ditinjau menghasilkan hujan rerata daerah. Secara lebih jelas dapat dilihat pada persamaan 3.1.

$$P_{\text{rerata}} = \frac{A_1 \cdot p_1 + A_2 \cdot p_2 + A_3 \cdot p_3 + \dots + A_n \cdot p_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} \quad (3.1)$$

Dengan :

P_{rerata} = hujan rerata kawasan

$p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ = hujan pada stasiun 1, 2, 3, ..., n

$A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ = luas daerah yang mewakili stasiun 1, 2, 3, ..., n

3.4. Waduk

Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Nomor 27/PRT/M/2015, tentang Bendungan, menyatakan “bendungan adalah bangunan yang berupa urugan tanah, urugan batu, beton dan pasangan batu yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah tambang (*tailing*), atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk”.

Sebuah waduk berfungsi sebagai penangkap air dan menyimpannya di musim hujan waktu air sungai mengalir dalam jumlah besar dan melebihi kebutuhan baik untuk keperluan irigasi, air minum, industri atau yang lainnya. Dengan memiliki daya tampungan yang besar, air sungai yang melebihi kebutuhan dapat disimpan dalam waduk dan baru dilepas mengalir ke dalam sungai lagi di hilirnya sesuai dengan kebutuhan saja pada waktu yang diperlukan

Aliran air sungai yang masuk ke dalam waduk melebihi air yang dialirkan ke luar waduk sesuai dengan kebutuhan, maka isi waduk makin lama makin penuh dan dapat melampaui batas daya tampung rencana. Permukaan air dalam waduk akan naik terus dan akhirnya melimpas. Untuk mencegah terjadinya limpasan air pada sebuah waduk perlu dilakukan lokalisir limpasan pada bangunan pelimpah yang lokasinya dipilih menurut kondisi topografi terbaik. Jadi fungsi utama sebuah waduk adalah untuk menstabilkan atau menciptakan pemerataan aliran air sungai baik dengan cara menampung persediaan air sungai yang berubah sepanjang tahun maupun dengan melepas air tampungan itu secara terprogram melalui saluran air yang dibuat khusus di dalam tubuh bendungan sesuai kebutuhan (Hadihardaja, 1997).

3.5. Erosi

Proses-proses hidrologi langsung atau tidak langsung akan mempunyai kaitan dengan terjadinya erosi, selain itu perubahan tata guna lahan dan praktek pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) juga mempengaruhi terjadinya erosi. Proses erosi terdiri dari tiga bagian yang berurutan: pengelupasan (*detachment*), pengangkutan (*transportation*), dan pengendapan (*sedimentation*) (Asdak, C., 2010). Dalam Sub Bab ini akan disajikan tentang pengertian erosi, penyebab terjadinya erosi, tipe erosi, faktor penentu erosi dan cara perkiraan besar erosi.

3.5.1. Pengertian Erosi

Menurut beberapa ahli ada berbagai macam pengertian erosi seperti, erosi tanah adalah suatu proses hilangnya lapisan permukaan tanah atas, baik disebabkan oleh pergerakan air maupun angin (Sarief, 1985). Selain itu Soetoto

(2013) menyatakan “erosi adalah berpindahnya materi penyusun permukaan bumi (tanah dan batuan) karena terangkut oleh air, angin atau es yang mengalir atau bergerak di permukaan bumi”. Berdasarkan kedua pendapat tersebut dapat diartikan bahwa erosi adalah perpindahan lapisan permukaan bumi bagian atas yang dapat disebabkan oleh air, angin ataupun es.

3.5.2. Penyebab Terjadinya Erosi

Ada dua penyebab utama terjadinya erosi yaitu erosi karena sebab alamiah dan erosi karena aktivitas manusia. Erosi alamiah dapat terjadi karena proses pembentukan tanah dan proses erosi yang terjadi untuk mempertahankan keseimbangan tanah secara alami. Erosi karena faktor alamiah umumnya masih memberikan media yang memadai untuk berlangsungnya pertumbuhan tanaman. Sedangkan 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 kemiringan lereng besar.

Di daerah-daerah tropis yang lembab seperti di Indonesia dengan rata-rata curah hujan melebihi 1500 mm per tahun maka air merupakan penyebab utama terjadinya erosi, sedangkan di daerah-daerah panas dan kering maka angin merupakan faktor penyebab utamanya (Sarief, 1985).

3.5.3. Tipe Erosi

Indonesia merupakan daerah tropis yang erosi lahannya diakibatkan oleh air. Berikut ini adalah tipe erosi lahan yang sering dijumpai di Indonesia menurut Asdak, (2010).

1. Erosi percikan (*splash erosion*) adalah proses terkelupasnya partikel-partikel tanah bagian atas oleh tenaga kinetik air hujan bebas atau sebagai air lolos. Arah dan jarak terkelupasnya partikel-partikel tanah ditentukan oleh kemiringan lereng, kecepatan dan arah angin, keadaan kekasaran permukaan

tanah, dan penutupan tanah. Apabila air hujan jatuh di atas seresah atau tumbuhan bawah, energi kinetik air hujan tersebut akan tertahan oleh penutup tanah, dan dengan demikian, menurunkan jumlah partikel tanah yang terkelupas.

2. Erosi kulit (*sheet erosion*) adalah erosi yang terjadi ketika lapisan tipis permukaan tanah di daerah berlereng terkikis oleh kombinasi air hujan dan air larian (*runoff*). Tenaga kinetik air hujan menyebabkan lepasnya partikel-partikel tanah dan bersama-sama dengan pengendapan sedimen (hasil erosi) di atas permukaan tanah, menyebabkan turunnya laju infiltrasi karena pori-pori tanah tertutup oleh kikisan partikel tanah. Besar-kecilnya tenaga penggerak terjadinya erosi kulit ditentukan oleh kecepatan dan kedalaman air larian.
3. Erosi alur (*rill erosion*) adalah pengelupasan yang diikuti dengan pengangkutan partikel-partikel tanah oleh aliran air larian yang terkonsentrasi di dalam saluran-saluran air. Hal ini terjadi ketika air larian masuk ke dalam cekungan permukaan tanah, kecepatan air larian meningkat, dan akhirnya terjadilah transpor sedimen. Tipe erosi alur umumnya dijumpai pada lahan-lahan garapan dan dapat diatasi dengan cara pengerjaan/pencangkulan tanah.
4. Erosi parit (*gully erosion*) membentuk jaringan parit yang lebih dalam dan lebar dan merupakan tingkat lanjut dari erosi alur. Erosi parit dapat diklasifikasikan sebagai parit bersambungan dan parit terputus-putus. Erosi parit terputus dapat dijumpai di daerah yang bergunung. Erosi tipe ini biasanya diawali oleh adanya gerusan yang melebar dibagian atas hamparan tanah miring yang berlangsung relatif singkat akibat adanya air larian yang besar. Kedalaman erosi parit ini menjadi berkurang pada daerah yang kurang terjal. Erosi parit bersambungan berawal dari terbentuknya gerusan-gerusan permukaan tanah oleh air larian ke arah tempat yang lebih tinggi dan cenderung berbentuk jari-jari tangan. Erosi parit dibedakan menjadi dua berdasarkan bentuk penampang melintangnya, yaitu parit bentuk V dan parit bentuk U. Erosi parit bentuk V terjadi pada tanah yang relatif dangkal

dengan tingkat erodibilitas (tingkat kerapuhan tanah) seragam. Untuk mencegah meluasnya erosi parit bentuk V, pencegahan dengan cara vegetasi dianggap paling memadai mengingat penyebab utama terjadinya erosi adalah air hujan. Sedangkan erosi parit bentuk U umum terjadi pada tanah dengan erodibilitas rendah terletak di atas lapisan tanah dengan erodibilitas yang lebih tinggi. Aliran air di bawah permukaan akan mengikis lapisan tanah bagian bawah sampai pada saatnya seluruh bangunan tanah tersebut runtuh dan terbentuk parit berbentuk U. Untuk menanggulangi tipe erosi parit diperlukan kombinasi bangunan pencegah erosi dan penanaman vegetasi.

5. Erosi tebing sungai (*streambank erosion*) adalah pengikisan tanah pada tebing-tebing sungai dan penggerusan dasar sungai oleh aliran air sungai. Dua proses berlangsungnya erosi tebing sungai adalah oleh adanya gerusan aliran sungai dan oleh adanya longsoran tanah pada tebing sungai. Semakin cepat laju aliran sungai (debit puncak atau banjir) semakin besar kemungkinan terjadinya erosi tebing. Erosi tebing sungai dalam bentuk gerusan dapat berubah menjadi tanah longsor ketika permukaan sungai surut (meningkatkan gaya tarik ke bawah) sementara pada saat bersamaan tanah tebing sungai telah jenuh. Dengan demikian, longsor tebing sungai terjadi setelah debit aliran berakhir atau surut. Proses terjadinya erosi tebing yang kedua lebih ditentukan oleh keadaan kelembaban tanah di tebing sungai menjelang terjadinya erosi. Dengan kata lain, erosi tebing sungai dalam bentuk longsoran tanah terjadi karena beban meningkat oleh adanya kelembaban tanah di tebing sungai menjelang terjadinya erosi. Erosi tebing sungai dipengaruhi, antara lain, oleh kecepatan aliran, kondisi vegetasi di sepanjang tebing sungai, kedalaman dan lebar sungai, bentuk alur sungai, dan tekstur tanah. Alur sungai yang tidak teratur dengan banyak rintangan seperti tanggul pencegah tanah longsor, dapat mempertajam kelokan sungai dan menjadi penyebab utama erosi sepanjang tebing sungai. Bagian tebing sungai yang mempunyai potensi besar untuk terjadinya erosi adalah pada tikungan-tikungan sungai karena gaya benturan aliran sungai dapat

dikurangi dengan cara penanaman vegetasi sepanjang tepi sungai. Vegetasi ini, melalui sistem perakaran, tidak saja menurunkan laju erosi, tetapi juga mencegah tanah longsor di daerah tersebut karena mengurangi kelembaban tanah oleh adanya proses transpirasi.

3.5.4. Faktor Penentu Erosi

Berkurangnya lapisan tanah bagian atas bervariasi tergantung pada tipe erosi dan besarnya variabel yang terlibat dalam proses erosi. Secara keseluruhan terdapat empat faktor yang menyebabkan dan mempengaruhi besarnya laju erosi, yaitu iklim, tanah, topografi atau bentuk wilayah dan vegetasi penutup tanah (Asdak, 2010). Keempat faktor yang menentukan besarnya erosi diuraikan berikut ini.

1. Iklim

Pengaruh iklim terhadap erosi dapat bersifat langsung atau tidak langsung. Faktor iklim yang paling menentukan dalam hal ini adalah hujan yang dinyatakan dalam nilai indeks erosivitas hujan. Pengaruh langsung melalui tenaga kinetis air hujan, terutama ukuran diameter butiran dan intensitas hujan. Pada hujan dengan intensitas besar dan berlangsung singkat erosi terjadi biasanya lebih besar daripada saat hujan berlangsung lama dengan intensitas kecil, sedangkan pengaruh iklim secara tidak langsung berhubungan dengan pertumbuhan vegetasi. Kondisi iklim dengan perubahan suhu kecil dan curah hujan merata menyebabkan vegetasi dapat tumbuh secara optimal. Sebaliknya, pada daerah dengan perubahan iklim besar seperti daerah kering, pertumbuhan vegetasi terhambat karena kekurangan air tetapi sekali hujan turun umumnya dengan intensitas yang tinggi.

2. Tanah

Besar kecilnya laju erosi banyak tergantung juga kepada sifat-sifat tanah itu sendiri yang dinyatakan sebagai faktor erodibilitas tanah, yaitu kepekaan

tanah terhadap erosi. Empat sifat tanah yang penting dalam menentukan erodibilitas tanah seperti yang diuraikan berikut ini.

- a. Tekstur tanah, biasanya berkaitan dengan ukuran dan porsi partikel-partikel tanah dan akan membentuk tipe tanah tertentu. Tiga unsur utama tanah adalah pasir (*sand*), debu (*silt*), dan liat (*clay*). Di lapangan, tanah terbentuk oleh kombinasi ketiga unsur tersebut. Tanah dengan unsur dominan liat, ikatan antar partikel-partikel tanah tergolong kuat dan dengan demikian, tidak mudah tererosi. Hal yang sama juga berlaku untuk tanah dengan unsur dominan pasir (tanah dengan tekstur kasar), kemungkinan untuk terjadinya erosi rendah sebab laju infiltrasi besar dan dapat menurunkan laju air larian. Sebaliknya pada tanah dengan unsur utama debu dan pasir lembut serta sedikit unsur organik, memberikan kemungkinan yang lebih besar untuk terjadinya erosi.
- b. Unsur organik, terdiri atas limbah tanaman dan hewan sebagai hasil proses dekomposisi. Unsur organik cenderung memperbaiki struktur tanah dan bersifat meningkatkan permeabilitas tanah, kapasitas tampungan air tanah, dan kesuburan tanah. Kumpulan unsur organik diatas permukaan tanah dapat menghambat kecepatan air larian sehingga menurunkan potensi terjadinya erosi.
- c. Struktur tanah, adalah susunan partikel-partikel tanah yang membentuk agregat. Struktur tanah mempengaruhi kemampuan tanah dalam menyerap air tanah. Misalnya, struktur tanah granuler dan lepas mempunyai kemampuan besar dalam meloloskan air larian sehingga menurunkan laju air larian dan memacu pertumbuhan tanaman.
- d. Permeabilitas tanah, menunjukkan kemampuan tanah dalam meloloskan air. Struktur dan tekstur tanah serta unsur organik lainnya ikut ambil bagian dalam menentukan permeabilitas tanah. Tanah dengan permeabilitas tinggi menaikkan laju infiltrasi sehingga menurunkan laju air larian.

3. Topografi

Kemiringan dan panjang lereng adalah dua faktor yang menentukan karakteristik topografi suatu daerah aliran sungai. Bentuk topografi berperan dalam menentukan kecepatan aliran air di permukaan yang membawa partikel-partikel tanah. Kecepatan air larian yang besar ditentukan oleh kemiringan lereng yang tidak terputus dan panjang serta berkonsentrasi pada saluran-saluran yang sempit serta mempunyai potensi besar untuk terjadinya erosi alur dan erosi parit. Kedudukan lereng juga menentukan besar-kecilnya erosi. Lereng bagian bawah lebih mudah tererosi daripada lereng bagian atas karena momentum air larian lebih besar dan kecepatan air larian lebih terkonsentrasi ketika mencapai lereng bagian bawah.

4. Vegetasi penutup tanah

Peranan vegetasi menutupi tanah adalah melindungi tanah dari pukulan langsung tetesan air hujan dan memperbaiki struktur tanah melalui penyebaran akar-akarnya. Selain itu ada empat pengaruh vegetasi penutup lahan terhadap erosi seperti berikut ini.

- a. Melindungi permukaan tanah dari tumbukan air hujan (menurunkan kecepatan terminal dan memperkecil diameter air hujan).
- b. Menurunkan kecepatan dan volume air larian.
- c. Menahan partikel-partikel tanah pada tempatnya melalui sistem perakaran dan serasah yang dihasilkan.
- d. Mempertahankan kemantapan kapasitas tanah dalam menyerap air.

Dalam meninjau pengaruh vegetasi terhadap mudah-tidaknya tanah tererosi, harus dilihat apakah vegetasi penutup tanah tersebut mempunyai struktur tajuk yang berlapis sehingga dapat menurunkan kecepatan terminal air hujan dan memperkecil diameter tetesan air hujan. Telah dikemukakan bahwa yang lebih berperan dalam menurunkan besarnya erosi adalah tumbuhan di bawah karena ia merupakan stratum vegetasi terakhir yang akan menentukan besar-kecilnya erosi percikan. Semakin rendah dan rapat tumbuhan di bawah maka semakin efektif pengaruh vegetasi dalam melindungi permukaan tanah terhadap ancaman erosi karena akan

menurunkan kecepatan terminal air hujan sehingga menurunkan besarnya tumbukan tetesan air hujan ke permukaan tanah.

3.5.5. Perkiraan Besar Erosi

Dalam memperkirakan besar erosi berdasarkan faktor penentu erosi digunakan metode *Universal Soil Loss Equation* (USLE) yang dikemukakan oleh Wischmeier dan Smith tahun 1960. Metode *Universal Soil Loss Equation* (USLE) digunakan untuk memprediksi laju erosi rata-rata lahan tertentu pada sesuatu kemiringan dengan pola hujan tertentu untuk setiap macam-macam jenis tanah dan penerapan pengelolaan lahan (tindakan konservasi lahan). Berdasarkan data dan informasi yang diperoleh dibuat model penduga erosi dengan menggunakan data curah hujan, tanah, topografi dan pengelolaan lahan.

Perlu dikemukakan bahwa persamaan USLE pertama kali dikembangkan di daerah pertanian Amerika Utara dengan karakteristik iklim sedang (intensitas hujan umumnya rendah) dan topografi tidak terlalu bergunung-gunung (Asdak, 2010). Secara teknis metode USLE memiliki beberapa kekurangan seperti berikut ini.

1. USLE bersifat empiris dan secara matematik tidak mewakili proses erosi yang sebenarnya. Kesalahan dalam memperkirakan besarnya erosi dapat dikurangi dengan menggunakan angka-angka tetapan yang seharusnya juga bersifat empiris.
2. Persamaan matematik USLE dirancang untuk memperkirakan besarnya kehilangan rata-rata tahunan. Musim hujan yang lebih besar daripada biasanya, terutama hujan dengan intensitas tinggi, dapat menghasilkan lebih banyak sedimen daripada yang diperkirakan (penaksiran-kurang).
3. USLE hanya memperkirakan erosi kulit dan erosi alur, dan tidak ditujukan untuk menghitung erosi parit.
4. USLE tidak memperhitungkan endapan sedimen. Artinya, USLE hanya memperkirakan besarnya tanah yang tererosi, tetapi tidak

mempertimbangkan deposisi sedimen dalam perhitungan besarnya perkiraan erosi.

5. Petak-petak erosi yang digunakan untuk mengukur besarnya erosi mempunyai kemiringan antara 3-20% dan terletak di daerah iklim sedang. Di daerah tropis, kebanyakan daerah aliran sungai memiliki kombinasi kemiringan lereng besar (>25%) dan curah hujan tinggi, oleh karenanya pemakaian rumus USLE untuk memperkirakan besarnya erosi dapat menghasilkan nilai prakiraan yang lebih kecil daripada yang sesungguhnya terjadi (penaksiran-kurang).

Dalam perhitungan bahaya erosi sangat dipengaruhi oleh faktor curah hujan, panjang lereng, kemiringan lereng, tanah, serta penutupan lahan berikut dengan tindakan pengelolaannya dengan faktor-faktor tersebut maka besar erosi dapat ditentukan dengan rumus *Universal Soil Loss Equation* (USLE). Besarnya laju erosi berdasarkan metode USLE memenuhi persamaan 3.2 berikut ini.

$$E = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (3.2)$$

Dengan:

- E = Erosi tanah tahunan (ton/ha)
- R = *Erosivitas* hujan (MJ.cm/ha.jam)
- K = *Erodibilitas* (kepekaan) tanah (ton.ha.jam/ha.MJ.cm)
- LS = Faktor panjang dan kemiringan lereng
- P = Tindakan konservasi
- C = Faktor pengelolaan tanaman

Besarnya kehilangan tanah atau erosi terbatas pada erosi kulit dan erosi alur, tidak termasuk erosi yang berasal dari tebing sungai dan juga tidak termasuk sedimen terendapkan di bawah lahan-lahan dengan kemiringan besar. Rumus tersebut diperoleh dan dikembangkan dari kenyataan bahwa erosi adalah fungsi *erosivitas* dan *erodibilitas*. Dalam menggunakan rumus ini di satu wilayah dimana curah hujan dan jenis tanah relatif sama sedangkan yang beragam adalah faktor panjang lereng, kemiringan, serta pengelolaan lahan dan tanaman (L, S, P dan C), sedangkan R (*erosivitas* hujan) dan K (*erodibilitas*) relatif sama. Implikasinya adalah bahwa pengendalian erosi dapat dilakukan melalui pengendalian faktor L,

sebagian S, P dan C. Pengendalian faktor-faktor itu digabungkan ke dalam dua macam pengelolaan yakni pengelolaan lahan dan pengelolaan tanaman.

Parameter-parameter yang digunakan dalam perhitungan erosi dengan metode *Universal Soil Loss Equation* (USLE) seperti faktor *erosivitas* (R), faktor *erodibilitas* (K), faktor panjang dan kemiringan lahan (LS), faktor penutupan lahan (C), dan faktor pengelolaan lahan (P) dapat diperoleh dengan ketentuan berikut ini.

1. Faktor *Erosivitas* Hujan (R)

Erosivitas hujan adalah tenaga pendorong yang menyebabkan terkelupas dan terangkutnya partikel-partikel tanah ke tempat yang lebih rendah, hal ini terjadi karena pengaruh jatuhnya butir-butir hujan langsung di atas tanah dan sebagian lagi karena aliran air di atas permukaan tanah. Kemampuan air hujan sebagai penyebab terjadinya erosi adalah bersumber dari laju dan distribusi tetesan air hujan, dimana keduanya mempengaruhi besarnya energi kinetik air hujan. Energi kinetik hujan inilah yang menjadi faktor utama terkelupasnya partikel-partikel tanah dari agregatnya. Menurut Sarief (1985) faktor *erosivitas* hujan ini digunakan untuk menilai kemampuan potensial hujan mengerosikan tanah. Faktor *erosivitas* hujan datanya dapat diperoleh dari stasiun hujan di dalam atau di sekitar lokasi. Faktor *erosivitas* hujan dapat dihitung dengan rumus seperti pada persamaan 3.3. Rumus matematis yang digunakan oleh Lenvain untuk menentukan faktor R tersebut didasarkan pada kajian *erosivitas* hujan dengan menggunakan data curah hujan dari beberapa tempat di Jawa (Asdak, 2010).

$$R = 2,21 \cdot P^{1,36} \quad (3.3)$$

Dengan :

R = Indeks *erosivitas* (MJ.cm/ha.jam)

P = Curah hujan bulanan (cm)

2. Faktor *Erodibilitas* Tanah(K)

Menurut Sarief (1985) faktor *erodibilitas* tanah, dengan kata lain faktor kepekaan erosi tanah, diartikan sebagai mudah-tidaknya tanah tersebut tererosi. Beberapa penelitian telah mendapatkan beberapa metode umum

menghitung besarnya nilai kepekaan erosi tanah, baik secara kuantitatif maupun secara kualitatif, yaitu berdasarkan sifat fisik tanah seperti tekstur, struktur, bahan organik dan permeabilitas. Faktor *erodibilitas* tanah menunjukkan resistensi partikel tanah terhadap pengelupasan dan transportasi partikel-partikel tanah tersebut oleh adanya energi kinetik air hujan. Tekstur tanah sangat berperan terhadap besar-kecilnya *erodibilitas* tanah. Tanah dengan partikel agregat besar resistensinya terhadap daya angkut air larian juga besar karena diperlukan energi yang cukup besar untuk mengangkut partikel-partikel tanah tersebut, sedangkan tanah dengan partikel agregat halus resisten terhadap pengelupasan karena sifat kohesi tanah tersebut juga besar. Partikel debu dan pasir halus kurang resisten dibandingkan dengan partikel agregat besar dan partikel agregat halus, sehingga tanah dengan kandungan debu tinggi mempunyai sifat *erodibilitas* besar. Sifat *erodibilitas* tanah turun secara linier dengan kenaikan unsur organik dalam tanah. Misal pada tanah gambut dengan kandungan unsur organik tinggi mempunyai *erodibilitas* yang tinggi pula, sedangkan jenis tanah dengan kandungan unsur organik rendah, biasanya keras sehingga menjadi lebih resisten (sifat *erodibilitasnya* berkurang) terutama pada keadaan kering. Faktor *erodibilitas* tanah besarnya tergantung pada jenis tanah di lokasi terkait. Besar nilai K dapat diperoleh dengan menggunakan tabel kepekaan tanah sebagai berikut.

Tabel 2.1 Jenis Tanah dan Nilai Faktor *Erodibilitas* (K)

No	Jenis Tanah	Nilai K
1	<i>Latosol</i> coklat kemerahan dan <i>litosol</i>	0,43
2	<i>Latosol</i> kuning kemerahan dan <i>litosol</i>	0,36
3	Komplek mediteran dan <i>litosol</i>	0,46
4	<i>Latosol</i> kuning dan kemerahan	0,56
5	Grumusol	0,20
6	Aluvial	0,47
7	<i>Regusol</i>	0,40

Sumber : Dinas RLKT, Departemen Kehutanan RI dalam Hardiyatmo, H.,C., (2012)

3. Faktor 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. Dalam menentukan nilai LS digunakan rumus sebagai berikut ini.

1. Untuk kemiringan lahan < 20%

$$LS = \frac{L^{0,5}}{100} \cdot (1,38 + 0,965 S + 0,138 S^2) \quad (3.4)$$

2. Untuk kemiringan lahan > 20%

$$LS = \left(\frac{L}{22,1}\right)^{0,6} \cdot \left(\frac{S}{9}\right)^{1,4} \quad (3.5)$$

Dengan :

LS = Faktor panjang dan kemiringan lereng

L = Panjang lereng (m)

S = Kemiringan lereng dalam %

4. Faktor Tutupan Lahan (C) dan Faktor Pengelolaan Lahan (P)

Besarnya nilai faktor tutupan lahan (C) tergantung pada kerapatan tanaman dan pemeliharaan tanaman. Faktor C menunjukkan keseluruhan pengaruh dari vegetasi, seresah, kondisi permukaan tanah, dan pengelolaan lahan terhadap besarnya tanah yang hilang (erosi). Besarnya nilai faktor pengelolaan lahan (P) tergantung pada aspek konservasi tanah yang dilakukan. Penilaian faktor P di lapangan lebih mudah 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 ditampilkan pada Tabel 3.2.

Tabel 2.2 Faktor Penggunaan Lahan dan Pengelolaan Tanah (CP)

No	Penggunaan Lahan	Faktor CP
1	Pemukiman	0,60
2	Kebun Campuran	0,30
3	Sawah	0,05
4	Tegalan	0,75
5	Perkebunan	0,40
6	Hutan	0,03
7	Padang Rumput	0,07

Sumber : RLKT (Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah) (1986)
dalam Hardiyatmo, H.,C., (2012)

3.5.6. Nisbah Penghantar Sedimen (*Sediment Delivery Ratio / SDR*)

Hasil sedimen tergantung pada besarnya erosi total di DAS dan tergantung pada transpor partikel-partikel tanah yang tererosi tersebut keluar dari daerah tangkapan air DAS. Tidak semua tanah yang tererosi di permukaan daerah tangkapan air akan sampai ke waduk, sebagian akan terdesposisi di cekungan-cekungan permukaan tanah, kaki-kaki lereng dan bentuk penampungan-penampungan sedimen lainnya. Besarnya hasil sedimen bervariasi tergantung karakteristik fisik DAS. Hasil sedimen dari suatu DAS dapat diketahui dengan menghitung nisbah penghantar sedimen (*Sediment Delivery Ratio*). Menurut *SCS National Engineering Handbook* (DPMA, 1984) dalam Asdak, (2010) besarnya perkiraan hasil sedimen dapat dihitung berdasarkan persamaan (3.6).

$$Y = E \cdot (SDR) \cdot Ws \quad (3.6)$$

Dengan:

Y = Hasil sedimen per satuan luas (ton/tahun)

E = Erosi (ton/ha/tahun)

SDR = Nisbah pelepasan sedimen

Ws = Luas daerah tangkapan air (ha)

Perhitungan besarnya *SDR* dianggap penting dalam menentukan hasil sedimen total berdasarkan perhitungan erosi total pada daerah tangkapan air. Variasi angka *SDR* ditentukan oleh faktor-faktor yang mempengaruhi hubungan hasil sedimen dan besar erosi total seperti yang dijelaskan berikut ini.

1. Sumber sedimen dari tebing sungai atau dari erosi lahan akan memberikan hasil volume dan kecepatan yang berbeda. Erosi tebing sungai sering tidak mencapai sungai karena terdesposisi pada tempat-tempat antara berlangsungnya erosi dan sungai sebagai alat transpor sedimen.
2. Sejumlah besar sedimen yang dihasilkan dari proses erosi yang terjadi di tempat yang jauh dari alat transpor sedimen akan memberikan *SDR* yang lebih kecil daripada jumlah sedimen yang lebih sedikit tetapi dihasilkan dari tempat yang lebih dekat dari alat transpor sedimen. Ketika jumlah sedimen yang tersedia lebih besar daripada kapasitas sistem transpor sedimen yang ada, maka akan meningkatkan laju desposisi sedimen dan menurunkan nisbah pelepasan sedimen.
3. DAS dengan kerapatan drainase tinggi dan dengan bentuk sungai yang relatif lurus mempunyai gradien permukaan sungai besar umumnya mempunyai *SDR* besar pula.
4. Tekstur sedimen akan menentukan dimana sedimen terdesposisi di dalam dan/atau di luar sistem transpor sedimen. Material yang besar biasanya berasal dari tebing sungai dan yang lebih halus berasal dari erosi permukaan.
5. Sedimen terdesposisi di kaki-kaki bukit, di cekungan-cekungan DAS atau di sepanjang sungai akan menurunkan angka *SDR*.
6. Karakteristik fisik DAS yang paling menentukan besarnya *SDR* adalah luas DAS dan topografinya.

Besarnya harga *SDR* tergantung daripada luas daerah pengaliran sungai, kemiringan dan faktor-faktor lain yang mempengaruhi erosi daerah pengaliran sungai dan pengangkutan sedimen di alur sungai. Nilai *SDR* dapat ditentukan berdasarkan data pada Tabel 3.3.

Tabel 2.3 Nilai SDR

Luas DPS (km ²)	SDR (%)
0,1	53
0,5	39
1,0	35
5,0	27
10,0	24
50,0	15
100,0	13
200,0	11
500,0	8,5
26000,0	4,9

Sumber: DPMA, 1982 (bahan dari Tabel USLE, *Past, Present and Future SSSA Special Publication Number 8, 1318-1979*) dalam Suwarno (1991)

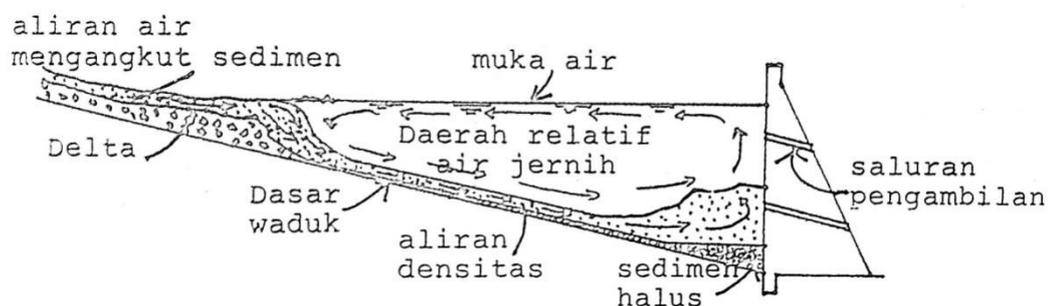
3.6. Sedimentasi

Sedimentasi adalah hasil proses erosi, baik berupa erosi permukaan, erosi parit, atau jenis erosi tanah lainnya. Sedimentasi umumnya mengendap di bagian bawah kaki bukit, di daerah genangan banjir, di saluran air, sungai, dan waduk. Hasil sedimentasi (*sediment yield*) adalah besarnya sedimen yang berasal dari erosi yang terjadi di daerah tangkapan air yang diukur pada periode waktu dan tempat tertentu. Hasil sedimen biasanya diperoleh dari pengukuran sedimen terlarut dalam sungai (*suspended sediment*) atau dengan pengukuran langsung di dalam waduk.

Bahan sedimen yang diangkut dapat berupa lumpur tersuspensi (*suspended sediment*) maupun butiran tanah, pasir, kerikil atau benda padat lainnya sebagai benda terangkut sepanjang dasar sungai (*bed load*). Menurut Soewarno (1991) muatan sedimen melayang dapat dibedakan menjadi tiga keadaan seperti berikut ini.

1. Apabila tenaga gravitasi sedimen lebih besar dari pada tenaga turbulensi aliran, maka partikel sedimen akan mengendap dan akan terjadi pendangkalan (*agradasi*) pada dasar sungai.
2. Apabila tenaga gravitasi partikel sedimen sama dengan tenaga turbulensi aliran, maka akan terjadi keadaan seimbang (*equilibrium*) dan partikel sedimen tersebut tetap konstan terbawa aliran sungai ke arah hilir.
3. Apabila tenaga gravitasi partikel sedimen lebih kecil dari pada tenaga turbulensi aliran, maka dasar sungai terkikis dan akan terjadi penggerusan (*degradasi*) pada dasar sungai.

Muatan dasar yang selalu bergerak menyebabkan permukaan dasar sungai mengalami kenaikan dan penurunan dasar sungai. Muatan melayang tidak berpengaruh pada kenaikan dan penurunan dasar sungai tetapi dapat mengendap di dasar waduk maupun muara sungai. Deposisi sedimen akan secara otomatis mengurangi kapasitas penyimpanan air pada waduk dan jika proses tersebut berlangsung terus menerus, maka akan menyebabkan waduk terisi penuh dengan sedimen dan menjadi tidak bermanfaat lagi. Semakin banyak lumpur yang mengendap di waduk makin berkurang volumennya, maka makin memperpendek umur waduk (Soedibyo, 1993). Gambar Skema endapan sedimen pada waduk disajikan pada Gambar 3.5 berikut ini.



Gambar 2.3 Skema Endapan Sedimen pada Waduk

(Sumber: Sudjarwadi, 1988)

Sedimentasi waduk dihitung dengan membandingkan hasil pengukuran terbaru dengan hasil pengukuran periode sebelumnya atau pada saat waduk

dibangun. Berdasarkan hasil pengukuran tampungan waduk yang telah dilakukan dari beberapa pengukuran terdahulu dapat dikaji laju pengendapan pada waduk sampai dengan saat ini. Berdasarkan hasil pengukuran tersebut dapat dilihat bahwa sejak mulai beroperasi hingga sekarang telah terjadi perubahan volume tampungan. Besarnya laju sedimentasi waduk yang dihitung berdasarkan besarnya volume endapan tersebut dibagi kurun waktunya sehingga diperoleh besaran dalam meter kubik per tahun seperti pada persamaan (3.7).

$$S_r = \frac{V_s}{t} \quad (3.7)$$

Dengan :

S_r = Laju pengendapan per tahun (juta m³/ tahun)

V_s = Volume sedimen rata-rata yang mengendap (juta m³)

t = Tahun pengukuran (tahun)

3.7. ArcGIS

ArcGIS adalah salah satu *software* yang dikembangkan oleh ESRI (*Environment Science & Research Institue*) yang merupakan kompilasi fungsi-fungsi dari berbagai macam *software* GIS yang berbeda seperti GIS *desktop*, *server*, dan GIS berbasis web. ArcGIS dirilis oleh ESRI pada tahun 2000. Produk utama dari ArcGIS adalah ArcGIS *desktop*, dimana ArcGIS *desktop* merupakan *software* GIS *professional* yang komprehensif dan dikelompokkan atas tiga komponen yaitu, ArcView (komponen yang fokus ke penggunaan data yang komprehensif, pemetaan dan analisis), ArcEditor (lebih fokus ke arah *editing* data spasial) dan ArcInfo (lebih lengkap dengan menyajikan fungsi-fungsi GIS termasuk untuk keperluan analisis *geoprosesing*).

ArcGIS *desktop* memiliki lima tingkat lisensi yaitu ArcView, ArcMap, ArcEditor, Arcinfo dan ArcCatalog.

