

SKRIPSI

**ANALISIS LAJU EROSI TERHADAP PENDANGKALAN
SETTLING POND PADA AREA *CLUSTER* RANGKOK
PT KALTIM PRIMA COAL, KALIMANTAN TIMUR**

Disusun dan diajukan oleh:

**MIFTAH HJANNAH
D111 19 1052**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**ANALISIS LAJU EROSI TERHADAP PENDANGKALAN
SETTLING POND PADA AREA CLUSTER RANGKOK
PT KALTIM PRIMA COAL, KALIMANTAN TIMUR**

Disusun dan diajukan oleh

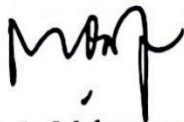
**MIFTAH HUJANNAH
D111191052**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 20 Oktober 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, MT
NIP. 196807181993091001



Asta Arjunoarwan Hatta, ST., MT
NIP. 199511262022043001

Ketua Program Studi,



Dr. Aryanti Virtanti Alas, ST., MT
NIP. 197010052008012026

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;
Nama : Miftah Hujannah
NIM : D111191052
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

ANALISIS LAJU EROSI TERHADAP PENDANGKALAN *SETTLING POND* PADA AREA *CLUSTER* RANGKOK PT KALTIM PRIMA COAL, KALIMANTAN TIMUR

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 20 Oktober 2023

Yang Menyatakan



Miftah Hujannah

ABSTRAK

MIFTAH HUJANNAH. *ANALISIS LAJU EROSI TERHADAP PENDANGKALAN SETTLING POND PADA AREA CLUSTER RANGKOK PT KALTIM PRIMA COAL, KALIMANTAN TIMUR* (dibimbing oleh Muhammad Ramli dan Asta Arjunoarwan Hatta)

Interaksi yang terjadi antara air hujan yang masuk ke dalam area pertambangan dengan udara luar sekitar area pertambangan menyebabkan terjadinya suatu pengikisan tanah. Energi kinetik yang dimiliki oleh air hujan akan mengangkut tanah masuk ke dalam area pertambangan yang disebut sebagai peristiwa erosi. Material hasil erosi berupa lumpur akan menggenangi area pertambangan. Lumpur harus dikeluarkan dari area pertambangan agar tidak mengganggu aktivitas produksi. Oleh karena itu, PT Kaltim Prima Coal membuat sistem penyaliran berbentuk *settling pond* yang digunakan sebagai tempat untuk mengalirkan air dan mengendapkan partikel-partikel yang ikut bersama dengan air. Lumpur dikeluarkan menggunakan pompa, kemudian dialirkan menuju *settling pond*. Semakin tinggi intensitas curah hujan akan membuat debit air limpasan semakin besar dan menyebabkan erosi yang dihasilkan juga besar. Hal tersebut akan menghasilkan produksi lumpur yang semakin banyak, sehingga akan memengaruhi efektivitas dari *settling pond*. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menghitung besar erosi yang terjadi pada *settling pond* dengan tujuan sebagai penentuan pendangkalan kolam yang menjadi acuan pada kegiatan pemeliharaan kolam (*maintenance pond*). Metode yang digunakan untuk menentukan besar erosi pada penelitian ini adalah model prediksi erosi *Modified Universal Soil Loss Equation* (MUSLE). Metode ini menghasilkan laju erosi sebesar 18.990.108,91 m³/tahun untuk *settling pond* Selanting, 36.433,06 m³/tahun untuk *settling pond* Upper Rangkok dan 63.811,46 m³/tahun untuk *settling pond* Rangkok. Berdasarkan hasil erosi tersebut, diketahui bahwa terjadi pendangkalan pada ketiga kolam karena melebihi kapasitas tampungan pada *settling pond*. Maka dari itu, dilakukan penentuan jadwal pengerukan kolam untuk *settling pond* Selanting yang akan dilakukan pada 1 bulan setelah kolam menjadi dangkal dengan durasi pengerukan selama 15 hari, jadwal pengerukan *settling pond* Upper Rangkok adalah 9 bulan setelah kolam menjadi dangkal dengan durasi 11 hari, dan jadwal pengerukan *settling pond* Rangkok adalah 7 bulan setelah kolam menjadi dangkal dengan durasi 17 hari.

Kata Kunci: Erosi, Sedimentasi, *Settling pond*,

ABSTRACT

MIFTAH HUJANNAH. *EROSION ANALYSIS TO ESTIMATE THE RATE OF SETTLING POND SHALLOWING IN THE CLUSTER RANGKOK AREA OF PT KALTIM PRIMA COAL, EAST KALIMANTAN* (supervised by Muhammad Ramli dan Asta Arjunoarwan Hatta)

The interaction between rainwater entering the mining area and the outside air around the mining area causes soil erosion. The kinetic energy possessed by rainwater will transport soil into the mining area, which is known as an erosion event. Material resulting from erosion in the form of mud will inundate the mining area. Mud must be removed from the mining area so that it does not interfere with production activities. Therefore, PT Kaltim Prima Coal created a drainage system in the form of a settling pond, which is used as a place to drain water and settle particles that come with the water. The mud is removed using a pump, then flowed to the settling pond. The higher intensity of rainfall, the greater the runoff will be and cause greater erosion. This will result in more mud production, which will affect the effectiveness of the settling pond. Based on this, this research was carried out to calculate the amount of erosion that occurred in the settling pond with the aim of determining the shallowing of the pond, which is a reference for pond maintenance activities. The method used to determine the amount of erosion in this research is the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) erosion prediction model. This method produces an erosion rate of 18,990,108.91 m³/year for the Selanting pond, 36,433.06 m³/year for the Upper Rangkok pond, and 63,811.46 m³/year for the Rangkok pond. Based on the erosion results, it is known that shallowing occurred in the three ponds due to exceeding the storage capacity of the settling pond. Therefore, a pool dredging schedule for the Selanting pond is determined, which will be carried out 1 month after the pond becomes shallow with a dredging duration of 15 days; the Upper Rangkok pond dredging schedule is 9 months after the pond becomes shallow with a duration of 11 days; and the schedule for dredging the Rangkok pond is 7 months after the pond becomes shallow with a duration of 17 days.

Keywords: Erosion, Sedimentation, Settling Pond

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK.....	iv
<i>ABSTRACT</i>	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN.....	ix
KATA PENGANTAR.....	x
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Ruang Lingkup.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Erosi.....	4
2.2 Faktor-faktor yang memengaruhi Erosi.....	6
2.3 Metode Prediksi Erosi.....	11
2.4 Sedimentasi.....	19
2.5 <i>Settling Pond</i>	22
BAB III METODE PENELITIAN.....	25
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	25
3.2 Teknik Pengumpulan Data.....	26
3.3 Teknik Analisis.....	26
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1 Analisis Hidrologi.....	37
4.2 Analisis Erosi dan Sedimentasi.....	48
4.3 Analisis Pendangkalan <i>Settling Pond</i>	57
4.4 Penentuan Aktivitas <i>Maintenance Pond</i>	62
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	66
5.1 Kesimpulan.....	66
5.2 Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA.....	68
LAMPIRAN.....	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Skema pengaruh faktor erosi.....	7
Gambar 2. Grafik nomogram faktor LS.....	14
Gambar 3. Zona pengendapan bak sedimentasi.....	20
Gambar 4. Grafik <i>trap efficiency</i> Brune.....	21
Gambar 5. <i>Settling pond</i> PT Kaltim Prima Coal.....	23
Gambar 6. Peta lokasi penelitian.....	25
Gambar 7. Penentuan daerah tangkapan hujan	29
Gambar 8. Grafik Brune 1953 estimasi efisiensi pengendapan	34
Gambar 9. Bagan alir penelitian.....	36
Gambar 10. Daerah tangkapan hujan <i>Cluster</i> Rangkok.....	44
Gambar 11. Alur sistem penyaliran DTH <i>Cluster</i> Rangkok.....	55
Gambar 12. Aktivitas <i>maintenance pond</i>	62
Gambar 13. <i>Settling pond</i> (a) Selanting ; (b) Upper Rangkok ; (c) Rangkok.....	63

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Klasifikasi ancaman erosi	6
Tabel 2. Hubungan intensitas hujan dengan diameter median butir hujan	8
Tabel 3. Jenis tanah dan nilai K faktor erodibilitas.....	13
Tabel 4. Nilai <i>length slope</i>	14
Tabel 5. Nilai C faktor vegetasi penutup lahan.....	15
Tabel 6. Nilai P faktor tindakan konservasi lahan	16
Tabel 7. Koefisien limpasan.....	30
Tabel 8. Jenis Tanah dan nilai K faktor erodibilitas	31
Tabel 9. Nilai <i>length slope</i> berdasarkan kemiringan lereng.....	32
Tabel 10. Nilai C faktor vegetasi penutup lahan.....	32
Tabel 11. Nilai P faktor tindakan konservasi lahan	33
Tabel 12. Perbedaan metode prediksi erosi.....	33
Tabel 13. Data curah hujan stasiun Kepodang PT KPC	38
Tabel 14. Variasi reduksi periode ulang	39
Tabel 15. Curah hujan maksimum periode ulang stasiun Kepodang PT KPC	41
Tabel 16. Waktu konsentrasi <i>settling pond</i>	42
Tabel 17. Intensitas curah hujan <i>settling pond</i>	43
Tabel 18. Daerah tangkapan Hujan <i>Cluster</i> Rangkok.....	45
Tabel 19. Koefisien limpasan daerah tangkapan hujan.....	46
Tabel 20. Debit limpasan dan volume limpasan daerah tangkapan hujan	47
Tabel 21. Limpasan permukaan terhadap <i>settling pond</i>	49
Tabel 22. Limpasan permukaan daerah tangkapan hujan <i>Cluster</i> Rangkok.....	50
Tabel 23. Nilai LS daerah tangkapan hujan <i>settling pond</i>	51
Tabel 24. Nilai LS daerah tangkapan hujan <i>Cluster</i> Rangkok.....	51
Tabel 25. Hasil erosi berdasarkan <i>catchment settling pond</i>	54
Tabel 26. Hasil erosi DTH <i>Cluster</i> Rangkok.....	56
Tabel 27. Hasil erosi tambahan pada <i>settling pond</i>	56
Tabel 28. Kapasitas <i>settling pond</i>	58
Tabel 29. Hasil sedimen tertahan dan keluar <i>settling pond</i>	59
Tabel 30. Kadar TSS <i>settling pond</i> DTH <i>Cluster</i> Rangkok.....	60
Tabel 31. Hasil sedimen tertahan <i>settling pond</i> setelah <i>treatment pond</i>	61
Tabel 32. Produktivitas alat <i>maintenance pond</i>	64
Tabel 33. Jadwal <i>maintenance settling pond</i>	65

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A Peta lokasi penelitian.....	72
Lampiran B Daerah tangkapan hujan.....	74
Lampiran C Data curah hujan periode 2013-2022.....	76
Lampiran D Kartu konsultasi tugas akhir	87

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT karena berkat rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Analisis Laju Erosi terhadap Pendangkalan *Settling pond* pada Area *Cluster* Rangkok di PT Kaltim Prima Coal, Kalimantan Timur". Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk menyelesaikan masa studi sarjana pada Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Selain itu, skripsi ini adalah bukti hasil dari penelitian yang telah dilakukan oleh penulis selama penelitian di PT Kaltim Prima Coal.

Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada bapak Tanzilullah selaku *Manager* Departemen *Mining Services*, PT Kaltim Prima Coal yang telah memberikan kesempatan kepada penulis sehingga dapat melakukan kegiatan penelitian di Departemen *Mining Services*. Terima kasih kepada bang Reagen dan bang Rasyad selaku pembimbing lapangan yang telah menyumbangkan waktu, ilmu, pemikiran dan tenaga selama kegiatan penelitian serta terima kasih kepada seluruh karyawan PT KPC yang telah memberikan bimbingan kepada penulis selama pelaksanaan penelitian berlangsung hingga selesai. Ucapan terima kasih juga diberikan kepada dosen Laboratorium Lingkungan Tambang bapak Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, M.T dan bapak Asta Arjunoarwan Hatta, ST., MT selaku dosen pembimbing yang dengan kesabaran dan kerendahan hatinya telah membimbing dan membantu penulis selama pengerjaan skripsi berlangsung. Tidak lupa juga ucapan terima kasih kepada staf departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin yang telah membantu dan mendukung selama proses penyelesaian administrasi berlangsung. Terima kasih untuk keluarga yang selalu memberikan dukungan selama penelitian berlangsung hingga penyelesaian laporan serta teman-teman yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang juga telah mendukung dan membantu penulis selama pelaksanaan penelitian berlangsung hingga penyelesaian laporan.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dan keterbatasan selama penelitian dan dalam penyusunan laporan. Oleh karena itu, kritik dan saran sangat penulis harapkan guna memperbaiki kekurangan dan keterbatasan penulis dalam

penyusunan laporan penelitian ini. Harapan penulis agar laporan penelitian ini dapat berguna dan dapat menjadi acuan pembelajaran bagi pembaca. Semoga laporan penelitian ini dapat bermanfaat dalam dunia akademik di masa depan dan menjadi pembelajaran positif bagi semua pihak.

Gowa, 23 Oktober 2023

Miftah Hujannah

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Interaksi yang terjadi antara air hujan yang masuk ke dalam area pertambangan dengan udara luar sekitar area pertambangan menyebabkan terjadinya suatu pengikisan tanah. Energi kinetik yang dimiliki oleh air hujan akan mengangkut tanah masuk ke dalam area pertambangan yang disebut sebagai peristiwa erosi. Material hasil erosi berupa lumpur akan menggenangi area pertambangan. Lumpur harus dikeluarkan dari area pertambangan agar tidak mengganggu aktivitas produksi. Oleh karena itu, PT Kaltim Prima Coal membuat sistem penyaliran berbentuk *settling pond* yang digunakan sebagai tempat untuk mengalirkan air dan mengendapkan partikel-partikel yang ikut bersama dengan air. Selain itu, *settling pond* juga digunakan sebagai titik penataan (*compliance point*) untuk menurunkan kadar *total suspended solid* dan tingkat keasaman terhadap air yang dihasilkan dari aktivitas penambangan.

Erosi merupakan peristiwa hilangnya atau terkikisnya tanah atau bagian-bagian tanah dari suatu tempat ke tempat lain yang disebabkan oleh adanya aliran air atau angin (Arsyad, 2006). Sumber erosi pada kegiatan pertambangan dapat terjadi pada area penambangan aktif atau *pit* (Pradana dkk, 2021). Upaya yang dilakukan untuk mengeluarkan air dan lumpur tersebut adalah dengan menggunakan pompa dan dialirkan menggunakan pipa menuju *settling pond* agar aktivitas penambangan dapat berjalan dengan baik (Khusairi dkk, 2018). Semakin tinggi intensitas curah hujan akan membuat debit air limpasan semakin besar dan menyebabkan erosi yang dihasilkan juga besar. Hal tersebut akan menghasilkan produksi lumpur yang semakin banyak, sehingga akan memengaruhi efektivitas dari *settling pond*.

Material hasil erosi akan mengalami proses sedimentasi pada *settling pond*. Apabila material hasil erosi yang masuk ke dalam kolam melebihi kapasitas kolam, maka akan menyebabkan terjadinya suatu pendangkalan pada kolam. Hal tersebut mengakibatkan kolam tidak dapat menampung debit air yang masuk (Surahmad dkk, 2021). Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk

menghitung besar erosi yang terjadi pada *settling pond*. Hal tersebut bertujuan sebagai penentuan pendangkalan kolam yang menjadi acuan pada kegiatan pemeliharaan kolam (*maintenance pond*) berupa pengerukan sedimen menggunakan berbagai macam alat berat.

1.2 Rumusan Masalah

Peristiwa erosi dapat membuat tanah akan terkikis bersamaan dengan masuknya air limpasan ke *front* penambangan. Hasil dari peristiwa erosi menyebabkan tertampungnya air dan lumpur pada *pit* penambangan sehingga berpengaruh terhadap target produksi perusahaan. Oleh karena itu, material tersebut harus dikeluarkan dengan menggunakan pompa kemudian dialirkan menuju *settling pond*. Lumpur akan mengalami proses sedimentasi yang menyebabkan pendangkalan pada kolam terjadi lebih cepat. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini berfokus pada beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

1. Luas daerah tangkapan hujan (*catchment area*) pada area *Cluster* Rangkok.
2. Debit limpasan yang masuk ke dalam kolam berdasarkan luas daerah tangkapan hujan (*catchment area*).
3. Faktor erodibilitas tanah (K), *length slope* (LS), vegetasi (C), dan konservasi lahan (P) terhadap peristiwa erosi.
4. Efektivitas *settling pond* untuk menampung sedimen hasil erosi sebelum dan setelah dilakukan perawatan kolam (*treatment pond*).
5. Aktivitas pengerukan sedimen dalam kegiatan *maintenance pond* berdasarkan kapasitas *settling pond*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini terbagi menjadi beberapa bagian sebagai berikut:

1. Menghitung besarnya laju erosi berdasarkan nilai dari faktor erodibilitas tanah (K), *length slope* (LS), vegetasi (C), dan konservasi lahan (P).
2. Menganalisis pendangkalan *settling pond* sebelum dan setelah dilakukan *treatment pond*.
3. Merencanakan aktivitas pengerukan sedimen dalam kegiatan *maintenance pond* berdasarkan kapasitas tampungan *settling pond*.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini membahas tentang besarnya laju erosi yang dihasilkan dari aktivitas penambangan yang mengakibatkan *settling pond* menjadi dangkal. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan kajian tambahan terkait penentuan masalah pendangkalan pada *settling pond* yang diakibatkan oleh laju erosi dari aktivitas pertambangan. Adanya penelitian ini juga dapat memberikan informasi mengenai total tanah yang akan tersedimentasi pada *settling pond*, sehingga dapat digunakan sebagai acuan terkait manajemen dalam aktivitas pengerukan sedimen dalam pemeliharaan kolam (*maintenance pond*) pada *settling pond*.

1.5 Ruang Lingkup

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei-Juli 2023. Lokasi penelitian berada di area *Cluster* Rangkok PT Kaltim Prima Coal, Provinsi Kalimantan Timur. Penelitian ini berfokus terhadap perhitungan besar erosi dan sedimentasi yang dihasilkan dari aktivitas pertambangan. Perhitungan tersebut dilakukan untuk menentukan banyaknya sedimen yang akan masuk ke dalam kolam pengendapan (*settling pond*). Hal tersebut digunakan sebagai acuan untuk penentuan pendangkalan pada *settling pond*. Setelah besar erosi didapatkan, dilakukan analisis pendangkalan kolam dengan melihat kapasitas *settling pond* terhadap laju erosi yang dihasilkan. Batas akhir penelitian adalah penentuan waktu pengerukan kolam dalam kegiatan pemeliharaan kolam (*maintenance pond*) dengan melihat kapasitas kolam yang sudah tidak mampu menampung sedimen yang masuk.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Erosi

Erosi merupakan kejadian atau peristiwa hilang dan terbawanya tanah atau bagian-bagian tanah dari suatu tempat menuju ke tempat lain oleh media berupa alam. Erosi terjadi karena adanya proses berurutan, yaitu pelepasan (*detachment*), pengangkutan permukaan tanah terutama permukaan air tanah (*transportation*), dan pengendapan (*deposition*) bahan-bahan tanah oleh erosi. Pada peristiwa erosi, tanah atau bagian tanah terkikis dan terangkut, kemudian diendapkan di tempat lain. Proses erosi dapat menyebabkan menurunnya produktivitas dan kesuburan tanah, mengurangi daya dukung tanah terhadap produksi pertanian, serta menurunkan kualitas kehidupan (Lesmana, 2020).

Erosi secara umum terjadi akibat dari beberapa faktor, yakni iklim, karakteristik tanah, vegetasi penutup lahan, dan tata guna lahan. Penyebab utama terjadinya erosi antara lain penggunaan lahan yang tidak tepat dan curah hujan yang tinggi. Erosi permukaan dapat terjadi sebagai akibat dari aliran air dan sudut kemiringan yang merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi erosi air. Oleh karena itu, lereng yang lebih curam menyebabkan erosi yang lebih besar sebagai akibat dari air limpasan yang lebih tinggi dan kecepatan aliran yang lebih cepat (Nigam et al, 2017).

Erosi tanah akibat air yang umumnya dijumpai di daerah tropis diklasifikasikan menjadi beberapa jenis sebagai berikut (Yellishetty et al, 2013).

1. Erosi percikan (*splash erosion*)

Proses terkikisnya partikel-partikel tanah yang disebabkan oleh tenaga kinetik air hujan bebas atau sebagai air lolos. Tenaga kinetik tersebut ditentukan oleh dua hal, yaitu massa dan kecepatan jatuhnya air. Tenaga kinetik bertambah besar tergantung dari diameter air hujan serta jarak antara ujung daun penetes (*driptips*) dan permukaan tanah. Air lolos dari vegetasi dengan ujung penetes lebar memberikan kecepatan air lolos sampai ke permukaan tanah. Arah dan jarak terkikisnya partikel tanah ditentukan oleh kemiringan lereng, kecepatan, dan arah angin. Tanah berlereng menyebabkan kikisan tanah lebih banyak ke

arah tempat yang lebih rendah. Hal ini disebabkan karena sudut datang energi kinetik air hujan akan mendorong partikel tanah tersebut ke tempat yang lebih rendah (Asdak, 2014).

2. Erosi lapisan (*sheet erosion*)

Erosi lapisan atau lempeng merupakan erosi yang terjadi ketika lapisan tipis permukaan tanah di daerah berlereng terkikis oleh kombinasi air hujan dan air limpasan (*runoff*). Tipe erosi ini disebabkan oleh kombinasi air hujan dan air larian yang mengalir ke tempat yang lebih rendah. Berdasarkan sumber tenaga penyebab erosi lempeng, tenaga kinetis air hujan lebih penting karena kecepatan air jatuhnya lebih besar, yaitu antara 0,3-0,6 m/dt (Schwab et. al, 1981).

3. Erosi alur (*rill erosion*)

Pengelupasan yang diikuti dengan pengangkutan partikel-partikel tanah oleh aliran air larian yang terkonsentrasi di dalam saluran-saluran air. Ketika air aliran masuk ke dalam cekungan pembukaan terjadi tanah, kecepatan larian meningkat, dan terjadi *transport* sedimen. Jenis Erosi ini umumnya dijumpai pada lahan-lahan garapan dan dibedakan dari erosi parit dalam hal erosi alur yang dapat diatasi dengan cara pengerjaan atau pencangkulan tanah. Erosi alur terbentuk oleh tanah yang kehilangan daya ikat partikel tanah sejalan dengan meningkatnya kelembaban tanah di tempat tersebut. Kelembaban tanah yang berlebihan pada gilirannya akan menyebabkan tanah longsor. Bersamaan dengan longornya tanah, kecepatan air aliran meningkat dan terkonsentrasi di tempat tersebut (Rose, 1988).

4. Erosi parit (*gully erosion*)

Erosi parit sama dengan erosi alur, tetapi alur yang dibentuk sudah demikian besar, sehingga tidak dapat dihilangkan dengan pengolahan tanah biasa. Biasanya erosi parit yang baru terbentuk berukuran sekitar 40 cm lebarnya dengan kedalaman sekitar 30 cm. Proses pembentukan erosi parit pada kondisi tertentu yaitu perubahan-perubahan geologis atau karena pengaruh aktivitas manusia. Proses pembentukan erosi parit tidak pernah sampai pada tahap akhir. Secara umum, erosi dapat terjadi pada waktu yang berbeda-beda (Asdak, 2014).

5. Erosi tebing sungai (*streambank erosion*)

Pengikisan tanah pada tebing-tebing sungai dan penggerusan dasar sungai oleh aliran air sungai. Dua proses berlangsungnya erosi tebing sungai oleh adanya gerusan aliran sungai dan adanya longsor tanah pada tebing sungai. Semakin cepat laju aliran sungai, semakin besar kemungkinan terjadinya erosi tebing. Erosi tebing sungai dalam bentuk gerusan cepat berubah menjadi tanah longsor ketika permukaan sungai surut sementara pada saat bersamaan tanah tebing sungai telah jenuh. Proses terjadinya erosi tebing juga ditentukan oleh keadaan kelembapan tanah di tebing sungai menjelang terjadinya erosi (Hooke, 1979).

Pemerintah dari *United States Department of Agriculture* telah menetapkan klasifikasi bahaya erosi berdasarkan laju erosi yang dihasilkan dalam satuan ton/ha/tahun. Nilai ancaman erosi yang digunakan untuk klasifikasi hasil dari perhitungan erosi yang mengacu pada ketentuan yang dipublikasikan oleh *United States Department of Agriculture* seperti diperlihatkan pada Tabel 1 (Huda dkk, 2020).

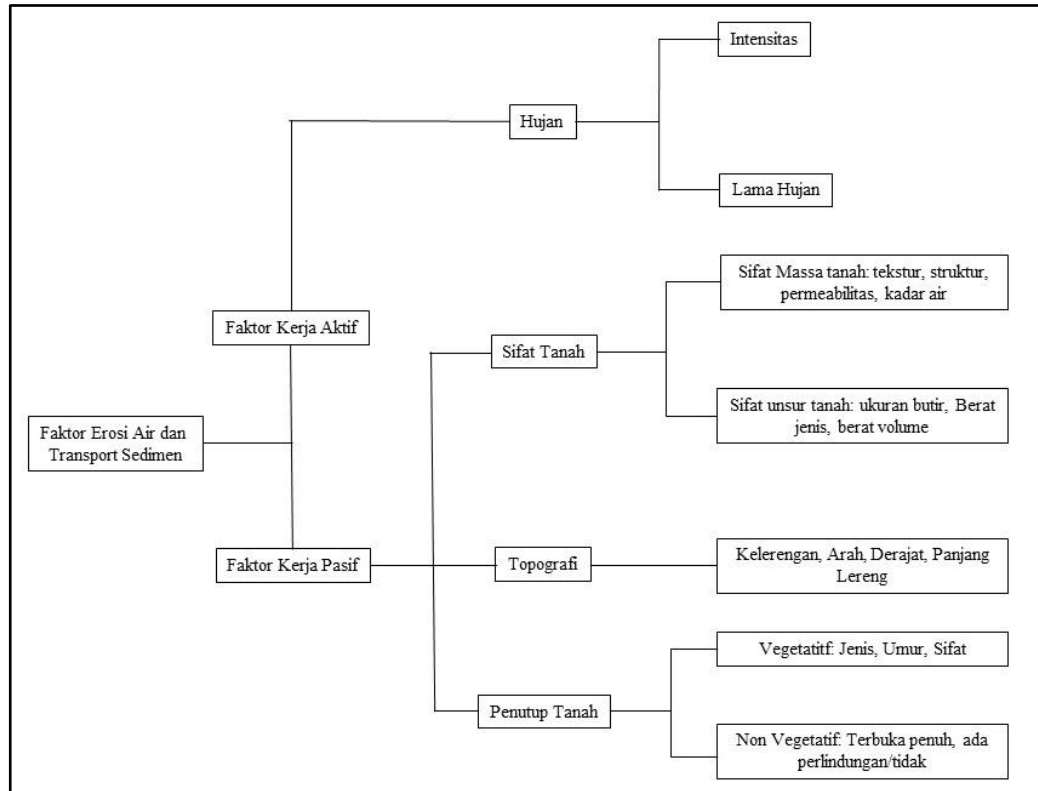
Tabel 1. Klasifikasi ancaman erosi

Kelas Ancaman Erosi	Laju Erosi (ha/ton/thn)	Keterangan
1	<15	Sangat Ringan
2	15-60	Ringan
3	60-180	Sedang
4	180-480	Berat
5	>480	Sangat Berat

Sumber: Meyer and Harmon (1984)

2.2 Faktor-Faktor Yang Memengaruhi Erosi

Berkurangnya lapisan tanah bagian atas bervariasi tergantung pada tipe erosi dan besarnya variabel yang terlibat dalam proses erosi. Empat faktor utama yang dianggap terlibat dalam proses erosi diantaranya adalah iklim, sifat tanah, topografi dan vegetasi penutup tanah. Keempat faktor tersebut dimanfaatkan sebagai dasar untuk menentukan besarnya erosi tanah melalui persamaan erosi umum *Universal Soil Loss Equation* (USLE), *Modified Universal Soil Loss Equation* (MUSLE), dan *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) (Alie, 2015).



Gambar 1. Skema pengaruh faktor erosi (Brooks, et. al. 2003)

2.2.1 Iklim

Pada daerah tropis faktor iklim yang paling besar pengaruhnya terhadap laju erosi adalah hujan. Jumlah dan intensitas hujan di Indonesia umumnya lebih tinggi dibandingkan dengan negara beriklim sedang. Besarnya curah hujan menentukan kekuatan dispersi, daya pengangkutan dan kerusakan terhadap tanah. Intensitas dan besarnya curah hujan menentukan kekuatan dispersi terhadap tanah. Jumlah curah hujan rata-rata yang tinggi tidak menyebabkan erosi jika intensitasnya rendah, demikian pula intensitas hujan yang tinggi tidak akan menyebabkan erosi bila terjadi dalam waktu yang singkat karena tidak tersedianya air dalam jumlah besar untuk menghanyutkan tanah. Sebaliknya jika jumlah dan intensitasnya tinggi akan mengakibatkan erosi yang besar (Baver, 1959).

Proses erosi oleh air merupakan kombinasi dua sub-proses yaitu penghancuran struktur tanah menjadi butir-butir hujan yang menimpa tanah dan perendaman oleh air yang tergenang di permukaan tanah yang mengakibatkan terdispersi karena diikuti pengangkutan butir-butir tanah oleh air yang mengalir di permukaan tanah. Air hujan yang jatuh menimpa tanah terbuka akan menyebabkan

tanah terdispensi. Intensitas air hujan ketika melebihi kapasitas infiltrasi tanah akan mengalir di atas permukaan tanah. Jumlah air yang mengalir di permukaan tanah akan semakin besar dengan semakin curam dan panjangnya lereng permukaan tanah. Tumbuhan yang hidup di atas permukaan tanah dapat memperbaiki kemampuan tanah untuk menyerap air dan memperkecil kekuatan perusak butir-butir hujan yang jatuh dan daya dispersi serta daya angkut aliran permukaan (Kehnko and Bertrand, 1959).

Tabel 2. Hubungan intensitas hujan dengan diameter median butir hujan

No.	Intensitas Hujan (mm/jam)	Diameter Butir Hujan (mm)
1	0,25	0,75-1,00
2	1,25	1,00-1,25
3	2,50	1,25-1,50
4	12,50	1,75-2,00
5	25,00	2,00-2,25
6	50,00	2,25-2,50
7	100,00	2,75-3,00
8	150,00	3,00-3,25

Sumber: Arsyad (2006)

Pengaruh iklim terhadap erosi dapat bersifat langsung atau tidak langsung. Pengaruh langsung adalah melalui tenaga kinetik air hujan. Terutama intensitas dan diameter butiran air hujan. Hujan yang bersifat intensif dan berlangsung dalam waktu pendek, menghasilkan erosi lebih besar dari pada hujan dengan intensitas lebih kecil dengan waktu yang berlangsung lebih lama. Pengaruh iklim tidak langsung ditentukan melalui pengaruhnya terhadap pertumbuhan tanaman atau vegetasi (Arsyad, 2006).

2.2.2 Topografi

Topografi diartikan sebagai tinggi rendahnya permukaan bumi yang menyebabkan terjadi perbedaan lereng. Kemiringan dan panjang lereng adalah dua unsur topografi yang paling berpengaruh terhadap aliran permukaan dan erosi. Kecepatan limpasan yang besar ditentukan oleh kemiringan lereng yang tidak terputus dan panjang serta terkonsentrasi pada saluran-saluran yang mempunyai potensi besar

untuk terjadinya erosi alur dan parit (Suripin, 2004).

- a. Kemiringan lereng, akan meningkatkan timbulnya erosi. Percikan butir air hujan pada lahan datar melemparkan partikel-partikel tanah ke udara secara acak. Partikel tanah pada lahan miring lebih banyak terlempar ke arah bawah. Peningkatan kemiringan lereng mengakibatkan semakin besarnya proporsi lemparan partikel tanah.
- b. Sudut lereng, menentukan keseimbangan antara limpasan permukaan dengan infiltrasi. Sudut lereng yang semakin besar berakibat pada dominasi jumlah limpasan permukaan terhadap infiltrasi. Wilayah dengan limpasan permukaan besar dan kecepatan aliran permukaan tinggi memiliki ancaman erosi yang besar. Semakin curam lereng, maka akan memperbesar jumlah aliran permukaan, kecepatan aliran permukaan dan energi angkut aliran permukaan. Sudut lereng dinyatakan dalam derajat atau persen (Sartohadi, 2013).
- c. Panjang lereng, dihitung mulai dari titik pangkal terjadinya aliran permukaan sampai suatu titik dimana air masuk ke dalam saluran atau sungai. Air mengalir di permukaan tanah akan berkumpul di ujung lereng, sehingga lebih banyak air yang mengalir dan semakin besar kecepatannya di bagian bawah lereng daripada bagian atas lereng. Akibatnya tanah bagian bawah lereng lebih banyak mengalami erosi yang lebih besar dibandingkan tanah bagian atas. Lereng yang semakin panjang cenderung semakin banyak air terakumulasi, sehingga aliran permukaan menjadi lebih tinggi kedalamannya.
- d. Konfigurasi lereng, lereng permukaan tanah dapat berbentuk cembung (konveks) atau cekung (konkaf). Pengamatan secara umum menunjukkan bahwa erosi lembar lebih besar pada permukaan cembung dari pada permukaan cekung, sedangkan pada permukaan cekung cenderung terjadi erosi alur atau erosi parit. Posisi lereng pada suatu kawasan berpengaruh terhadap jumlah hujan dan jumlah air yang diterima. Wilayah yang terletak di dasar cekungan mungkin memiliki curah hujan yang rendah dari pada wilayah sekitar yang memiliki elevasi lebih tinggi.
- e. Keseragaman lereng dan arah lereng, lereng tidak akan selalu memiliki keseragaman kemiringan, dimana lereng curam diselingi dalam jarak pendek

oleh lereng-lereng yang lebih datar. Pengaruh tidak langsung dari ketidakteragaman kemiringan lereng adalah lebih sulit untuk dilakukan bercocok tanam tanaman semusim dari pada lereng yang seraga. Arah hadap lereng merupakan faktor yang penting. Arah hadap lereng pada wilayah lintang tinggi menentukan intensitas penyinaran matahari.

2.2.3 Tanah

Tanah merupakan faktor penting yang menentukan besarnya erosi yang terjadi. Faktor tanah yang berpengaruh antara lain adalah ketahanan tanah terhadap daya rusak dari luar baik oleh pukulan air hujan maupun limpasan permukaan. dan kemampuan tanah untuk menyerap air hujan melalui perkolasi dan infiltrasi (Utomo, 1989). Penentuan erodibilitas tanah dibagi menjadi empat jenis. Hal tersebut sebagai syarat penentu mudah tidaknya tanah tererosi (Asdak, 2014).

- a. Tekstur tanah, biasanya berkaitan dengan ukuran dan porsi partikel tanah dan akan membentuk tipe tanah tertentu. Tiga unsur utama adalah pasir (*sand*), debu (*silt*), dan liat (*clay*). Tanah terbentuk oleh kombinasi ketiga unsur tersebut di atas. 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 pada jenis tanah ini adalah rendah.
- 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 tampung air tanah, dan kesuburan tanah. Kumpulan unsur organik di atas 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 dengan menyerap air tanah. Struktur tanah granuler dan lepas mempunyai kemampuan besar dalam meloloskan air larian sehingga menurunkan laju aliran 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. Kepekaan tanah terhadap erosi berbeda-beda tergantung sifat fisika dan kimia tanah.

2.2.4 Vegetasi

Pengaruh vegetasi terhadap laju erosi adalah vegetasi mampu menangkap atau intersepsi air hujan, sehingga energi kinetik dari air hujan tidak langsung menghantam permukaan tanah. Pengaruh intersepsi air hujan oleh tumbuhan pada erosi melalui dua cara yaitu memotong secara langsung air hujan sehingga tidak langsung jatuh ke permukaan tanah dan memberikan kesempatan penguapan secara langsung dari dedaunan dan dahan, sehingga dapat meminimalkan pengaruh negatif pada stuktur tanah.

Tanaman penutup mengurangi energi aliran, meningkatkan kekasaran sehingga mengurangi kecepatan aliran permukaan dan selanjutnya memotong aliran permukaan untuk melepas dan memotong aliran permukaan untuk melepas dan mengangkut partikel sedimen. Perakaran tanaman meningkatkan stabilitas tanah dengan meningkatkan kekuatan tanah, granulitas dan porositas. Aktivitas biologi yang berkaitan dengan pertumbuhan tanaman memberikan dampak positif pada porositas tanah. Tanaman mendorong transpirasi air sehingga lapisan tanah atas lebih kering dan memadatkan lapisan dibawahnya (Suripin, 2004).

2.3 Metode Prediksi Erosi

Menurut Wischmeir (1972) dan Wischmeir (1978), erosi tanah dapat dimodelkan dengan memasukkan faktor-faktor iklim, kondisi tanah, topografi lahan serta perilaku manusia pada lahan tersebut. Memprediksi laju erosi pada permukaan lahan, telah dikembangkan beberapa model oleh beberapa peneliti terdahulu. Model-model yang ada kebanyakan bersifat empiris (parametrik) yang dikembangkan berdasarkan proses hidrologi dan fisis yang terjadi selama peristiwa erosi dan pengangkutannya dari DAS ke titik yang ditinjau. Walaupun terjadi perkembangan, tetapi parameter yang digunakan hampir sama (Sutapa, 2010).

2.3.1 Metode prediksi USLE

Suatu model parametrik untuk memprediksi erosi dari suatu bidang tanah telah dikenal dengan Universal Soil Loss Equation (USLE). Metode USLE paling umum digunakan untuk memperkirakan jumlah erosi riil tahunan. Metode USLE dapat digunakan untuk memprediksi rata-rata erosi dalam jangka waktu yang panjang dari suatu area usaha tani dengan sistem pertanaman dan pengelolaan lahan tertentu. Metode ini juga bermanfaat untuk tanah tempat bangunan dan penggunaan *non-pertanian*, tetapi metode ini tidak dapat memprediksi pengendapan dan tidak memperhitungkan hasil sedimen dari erosi parit, tebing sungai, dan dasar sungai. Perkiraan besarnya erosi tersebut dibatasi oleh faktor-faktor topografi, vegetasi maupun meteorologi (Mihi, et. al. 2020).

Sampai saat ini USLE masih dianggap rumus yang paling mendekati kenyataan, sehingga lebih banyak digunakan dari pada rumus lainnya. Persamaan kehilangan tanah tersebut dapat dituliskan sebagai berikut (Alie, 2015).

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

dimana,

A = erosi yang terjadi (ton/ha/tahun),

R = erosivitas hujan (kj/ha/tahun),

K = erodibilitas tanah,

LS = kemiringan dan panjang lereng (m dan %),

CP = faktor penutup lahan dan tindakan konservasi,

a. Faktor erosivitas hujan (R)

Persamaan USLE menetapkan bahwa nilai R yang merupakan daya perusak hujan (erosivitas hujan) tahunan dapat dihitung dari data curah hujan yang didapat dari stasiun curah hujan. Erosivitas hujan merupakan perkalian antara energi hujan total (E) dan intensitas hujan maksimum 30 menit (I_{30}). Kedua faktor tersebut, E dan I_{30} selanjutnya dapat ditulis sebagai EI_{30} .

$$R_m = 2,21R_i^{1,36} \quad (2)$$

dimana,

R_m = erosivitas hujan bulanan,

R_i = curah hujan bulanan (cm),

b. Faktor erodibilitas tanah (K)

Faktor erodibilitas tanah atau faktor kepekaan erosi tanah merupakan daya tahan tanah baik terhadap penglepasan maupun pengangkutan, terutama tergantung pada sifat-sifat tanah, seperti tekstur, stabilitas agregat, kekuatan geser, kapasitas infiltrasi, kandungan bahan organik dan kimiawi. Nilai faktor erodibilitas tanah ditentukan untuk tiap satuan lahan kemudian dicocokkan dengan tabel klasifikasi nilai tanah (Nigam et al, 2017). Perhitungan nilai erodibilitas tanah dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 3 sebagai berikut (Ezzaouini et al, 2020).

$$K = \frac{2,731 M 1,14 (10-4) (12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3)}{100} \quad (3)$$

dimana,

M = parameter ukuran butir,

a = persentase bahan organik (% c x 1,724),

b = kode struktur tanah yang digunakan dalam klasifikasi tanah,

c = kode permeabilitas tanah,

Tabel 3. Jenis tanah dan nilai K faktor erodibilitas

No.	Jenis Tanah	Nilai K
1.	Latosol coklat kemerahan dan litosol	0.43
2.	Latosol kuning kemerahan dan litosol	0.36
3.	Komplek mediteran dan litosol	0.46
4.	Latosol kuning kemerahan	0.56
5.	Grumusol	0.20
6.	Alluvial	0.47
7.	Regosol	0.40
8.	Latosol	0.31

Sumber: Kironoto (2000)

c. Faktor panjang dan kemiringan lereng (LS)

Pengaruh medan terhadap erosi diwakili oleh faktor panjang lereng yang mencerminkan fakta bahwa hasil erosi berbanding lurus terhadap sudut lereng dan panjang lereng yang curam. Semakin curam suatu lereng, maka erosi yang dihasilkan juga semakin besar. Panjang lereng merupakan jarak rata-rata yang

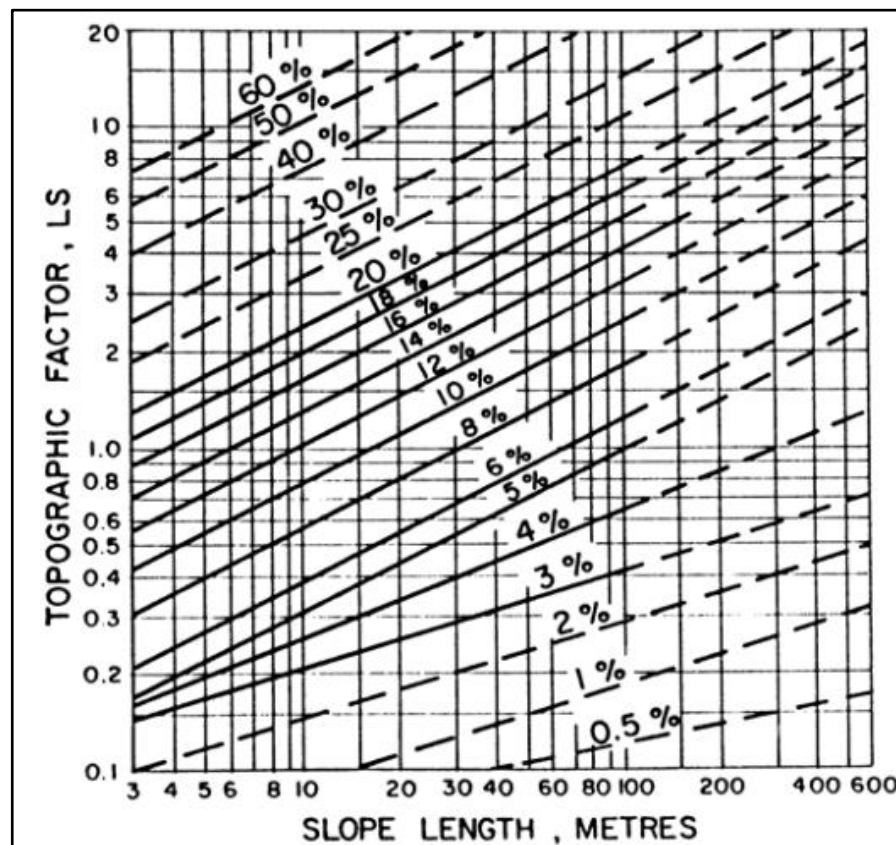
ditempuh limpasan sebelum mencapai saluran drainase. Secara umum, faktor *length slope* memberikan gambaran apakah suatu lokasi tertentu yang terkena curah hujan memiliki energi untuk transportasi sedimen. (Bamutaze et al, 2021). Faktor kemiringan dan panjang lereng dapat ditentukan dengan tabel 4 berikut (Saputra dan Jaji, 2022):

Tabel 4. Nilai *length slope*

Kelas Lereng	Kemiringan	Nilai LS
I	0% - 8%	0,40
II	8% - 15%	1,40
III	15% - 25%	3,10
IV	25% - 45%	6,80
V	>45%	9,50

Sumber: Saputra dan Jaji (2022)

Nilai Kemiringan dan panjang lereng (LS) dapat juga ditentukan berdasarkan grafik nomogram pada Gambar 2. Secara umum, nilai dari faktor kemiringan dan panjang lereng didapatkan berdasarkan data aktual atau topografi suatu daerah.



Gambar 2. Grafik nomogram faktor LS (wischmeier and smith, 1978)

d. Faktor penggunaan lahan (C dan P)

Faktor koefisien vegetasi atau tanaman (C) dan pengelolaan lahan (P) mengacu pada hasil karakteristik satuan lahan suatu lokasi. Faktor penutupan revegetasi merupakan faktor yang menunjukkan keseluruhan pengaruh dari faktor vegetasi, kondisi permukaan tanah, dan pengelolaan lahan terhadap besarnya tanah yang hilang (erosi). Faktor ini mencerminkan pengaruh praktik penanaman dan pengelolaan terhadap laju erosi tanah dan pilihan pengelolaan terhadap taktik konservasi (Renard et al, 1997).

Faktor tindakan konservasi (P) adalah nisbah antara tanah tererosi rata-rata dari lahan yang mendapat perlakuan konservasi tertentu terhadap tanah tererosi rata-rata dari lahan yang diolah tanpa tindakan konservasi dengan catatan faktor-faktor penyebab erosi yang lain diasumsikan tidak berubah. Faktor P menunjukkan proporsi kehilangan tanah yang dikurangi dengan penerapan langkah-langkah seperti pembuatan kontur atau pengupasan oleh pengguna lahan (Nigam et al, 2017).

Tabel 5. Nilai C faktor vegetasi penutup lahan

No.	Tata Guna Lahan	Nilai C
1.	Savana dan Praire	0,01
2.	Rawa	0,01
3.	Semak/Belukar	0,3
4.	Pertanian Lahan Kering Campuran	0,19
5.	Pertanian Lahan Kering	0,28
6.	Kebun – Pekarangan	0,2
7.	Kebun Campuran Kerapatan Sedang	0,2
8.	Hutan Produksi Tebang Pilih	0,2
9.	Hutan Tidak Terganggu	0,01
10.	Hutan Alam Seresah Bayak	0,001
11.	Hutan Alam Seresah Sedikit	0,005
12.	Sawah Irigasi	0,02
13.	Tegalan Tidak Spesifik	0,7
14.	Tanah Terbuka Untuk Tanaman	1
15.	Tubuh Air	0,001

Sumber: Saputra dan Jaji (2022)

Tabel 6. Nilai P faktor tindakan konservasi lahan

No.	Tindakan Konservasi Tanah	Nilai P
1.	Teras Bangku	
	- konstruksi baik	0,04
	- Konstruksi sedang	0,15
	- Konstruksi kurang baik	0,35
	- Teras tradisional baik	0,40
2.	Strip tanaman rumput (padang rumput)	0,40
3.	Pengolahan tanah dan penanaman menurut garis kontur	
	- Kemiringan 0 - 8 %	0,50
	- Kemiringan 9 - 20 %	0,75
	- Kemiringan > 20 %	0,90
4.	Tanpa tindakan konservasi	1,00

Sumber: Sutapa (2010)

2.3.2 Metode prediksi RUSLE

Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) adalah model erosi yang dirancang untuk memprediksi erosi tahunan rata-rata dalam kurun waktu yang panjang terbawa oleh air limpasan dari kemiringan lereng lahan tertentu dalam sistem penanaman dan pengelolaan tertentu serta dari luas area. Metode RUSLE mengalami penyempurnaan faktor, akan tetapi masih mengacu pada metode USLE. Metode RUSLE menggabungkan beberapa faktor penyebab erosi untuk memprediksi kehilangan tanah dari erosi lembar dan alur yang disebabkan oleh aliran permukaan dan hujan. Hasil prediksi erosi dapat membantu perencanaan teknik konservasi (Hanafi dan Dany, 2021).

Metode RUSLE mampu menghitung kehilangan tanah pada daerah dengan aliran permukaan yang signifikan dan tidak dirancang untuk daerah yang tidak terjadi aliran permukaan. Persamaan RUSLE dinyatakan sebagai berikut (Renard et al, 1997):

$$EA = Ri . K . L . S . C . P \quad (4)$$

dimana,

EA = erosi (ton/ha/tahun),

Ri = faktor erosivitas hujan dan aliran permukaan,

- K = faktor erodibilitas tanah,
 LS = faktor panjang-kemiringan lereng,
 C = faktor tanaman penutup lahan,
 P = faktor tindakan konservasi.

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \cdot 10(1.5 \log D \left(\frac{P_i^2}{P} \right) - 0.08188) \quad (5)$$

dimana,

- R = faktor erosivitas hujan (MJ.mm/ha/jam/tahun)
 Pi = curah huna bulanan (mm),
 P = curah hujan tahunan (mm),

2.3.3 Metode MUSLE

Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) merupakan pengembangan dari persamaan USLE dan dapat menduga laju erosi dan sedimentasi dengan cukup baik. MUSLE mendasarkan *rainfall-runoff* sebagai basis persamaan. MUSLE tidak menggunakan faktor energi hujan sebagai penyebab terjadinya erosi, melainkan menggunakan faktor limpasan permukaan. Oleh sebab itu, MUSLE tidak memerlukan faktor *Sediment Delivery Ratio* (SDR) karena faktor limpasan permukaan mewakili energi yang digunakan untuk penghancuran dan pengangkutan sedimen. Kelebihan dari metode ini yaitu mudah dikelola, digunakan secara luas di seluruh dunia, relatif sederhana, serta parameter masukan yang diperlukan relatif sedikit dibandingkan dengan model lainnya (Sihaloho dkk, 2020).

Pada metode prediksi erosi dengan MUSLE, besarnya sedimen yang terjadi sudah menggambarkan erosi yang terjadi. Persamaan yang digunakan dalam metode MUSLE dilihat pada Persamaan 6 (Krisnayanti dkk, 2018).

$$SY = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (6)$$

dimana,

- SY = *sedimen yield* (hasil sedimen) (ton/tahun),
 R = limpasan permukaan (*runoff*),
 K = faktor erodibilitas tanah,
 LS = faktor panjang dan kemiringan lahan.
 C = faktor penutupan tanah oleh tanaman,

P = faktor praktek konservasi tanah.

Perhitungan aliran limpasan permukaan (*runoff*) dilakukan dengan menggunakan rumus pada Persamaan 7 (Sihaloho dkk, 2020).

$$R = a(V_q \cdot Q_p)^b \quad (7)$$

dimana,

R = indeks erosivitas limpasan permukaan (m^3),

V_q = volume limpasan permukaan (m^3),

Q_p = debit puncak (m^3/s),

a dan b = koefisien yang besarnya 11,8 (a) dan 0,56 (b) (Williams, 1977).

a. Volume Aliran (V_q)

Volume aliran permukaan merupakan banyaknya jumlah air yang megalirdapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 8.

$$V_q = Q \times 60 \times T_c \quad (8)$$

dimana,

Q = debit limpasan ($m^3/detik$),

T_c = waktu konsentrasi (jam).

b. Debit Puncak (Q_p)

Debit puncak atau debit limpasan merupakan air hujan yang tidak dapat ditahan oleh tanah, vegetasi atau cekungan dan akhirnya mengalir langsung ke sungai atau laut. Perhitungan debit puncak dihitung dengan menggunakan metode Rasional. Metode rasional adalah metode yang digunakan untuk memperkirakan debit puncak (*peak discharge*). Latar belakang metode rasional adalah jika curah hujan dengan intensitas (I) terjadi secara terus-menerus, maka laju limpasan langsung akan bertambah sampai mencapai waktu konsentrasi (t_c). Persamaan matematik metode Rasional adalah sebagai berikut (Yusuf dkk, 2021).

$$Q_p = 0,278 \times C \times I \times A \quad (9)$$

dimana,

Q_p = debit banjir puncak ($m^3/detik$),

C = koefisien limpasan,

I = intensitas curah hujan selama waktu kosentrasi (mm/jam),

A = luas daerah aliran sungai (km^2).

2.4 Sedimentasi

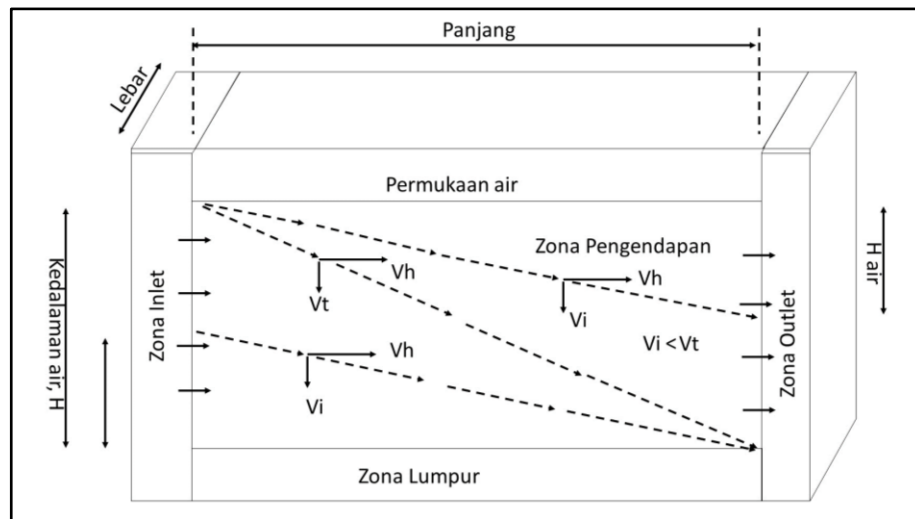
Sedimentasi adalah peristiwa pengendapan material hasil pengikisan tanah oleh air maupun angin pada suatu cekungan. Material hasil pengikisan tanah disebut sebagai sedimen yang telah diangkut oleh adanya tenaga air atau angin. Pada saat pengikisan terjadi, air membawa tanah mengalir ke sungai, danau, dan akhirnya sampai di laut. Apabila kekuatan pengangkutannya berkurang atau habis, tanah diendapkan di daerah aliran air. Proses sedimentasi berperan penting dalam berbagai proses industri, misalnya pada proses pemurnian air limbah, pengolahan air sungai, pengendapan partikel padatan pada bahan makanan cair, pengendapan kristal dari larutan induk, penyisihan pasir, *slime* atau lanau pada pengolahan air limbah (Hambali, 2016).

Pada umumnya proses sedimentasi dilakukan setelah proses koagulasi dan flokulasi. Tujuannya adalah untuk memperbesar partikel padatan agar menjadi lebih berat dan dapat tenggelam dalam waktu lebih singkat. Ukuran dan bentuk partikel mempengaruhi rasio permukaan terhadap volume partikel sedangkan konsentrasi partikel memengaruhi pemilihan tipe bak sedimentasi. Suatu partikel yang mengendap dalam air karena adanya gaya gravitasi akan mengalami percepatan sampai gaya dari tahanan dapat mengimbangi gaya gravitasi. Setelah terjadi kesetimbangan partikel akan terus mengendap pada kecepatan konstan yang dikenal sebagai kecepatan akhir atau kecepatan pengendapan bebas (Rumbino dan Kezia, 2020).

Laju pengendapan lumpur berbeda-beda satu sama lainnya, demikian pula tinggi relatif berbagai zona pengendapannya. Cara untuk menentukan karakteristik pengendapannya secara teliti, setiap lumpur harus diperiksa dengan melakukan eksperimen terhadap masing-masing sedimen. Agar proses pengendapan partikel dalam suatu kolam pengendapan efektif, maka dibagi menjadi beberapa zona yang memungkinkan pergerakan aliran dan terjadinya proses pemisahan partikel dari larutannya (Rumbino dan Kezia, 2020).

- a. Zona *inlet*, dimana air didistribusikan sepanjang bagian yang menyilang.
- b. Zona pengendapan, dimana partikel tersuspensi diendapkan dan air berada dalam keadaan diam.
- c. Zona lumpur, dimana partikel yang mengendap dikumpulkan.

- d. Zona *outlet*, adalah bagian untuk menyalurkan air yang sudah tidak lagi mengandung partikel yang dapat diendapkan keluar dari tangki aliran.



Gambar 3. Zona pengendapan bak sedimentasi (Rumbino dan Kezia, 2020).

Pada proses sedimentasi, terdapat berbagai macam persamaan yang dapat digunakan untuk menentukan laju pengendapan, diantaranya persamaan Stokes-Newton Law. Jika sebuah partikel turun didalam fluida karena gaya gravitasi, maka kecepatan pengendapan akan tercapai apabila jumlah dari gaya aksi (*drag force*) dan gaya apung (*buoyancy*) sebanding dengan gaya gravitasi benda atau kecepatan berbanding lurus dengan ukuran partikel, dimana jika diameter partikel kecil, maka kecepatan pengendapan juga kecil. Kecepatan pengendapan menurut Persamaan Stokes-Newton Law dinyatakan dalam Persamaan 10 (Rumbino dan Kezia, 2020).

$$V_s = \frac{g (\rho_s - \rho_a) r^2}{18\pi} \quad (10)$$

dimana,

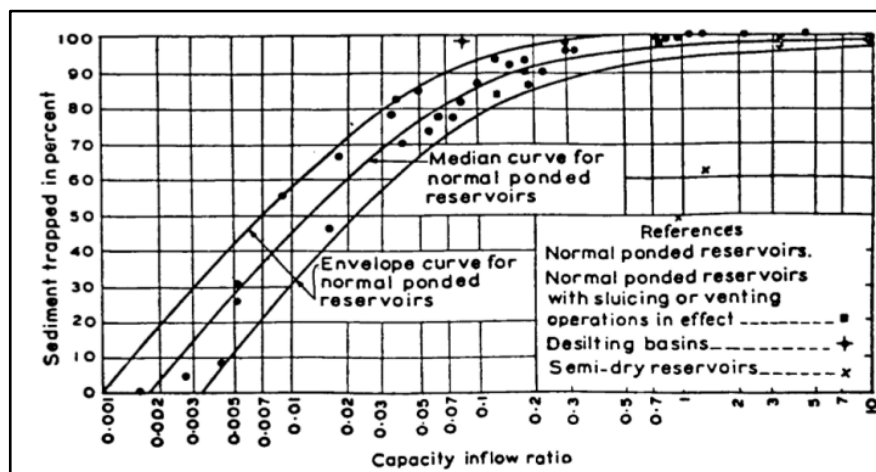
- V = Kecepatan pengendapan (km/s),
- g = Percepatan gravitasi 9,8 (m/s²),
- ρ_s = Massa jenis padatan (kg/m³),
- ρ_a = Massa jenis fluida (kg/m³),
- π = Viskositas fluida (kg/m.s),
- r = Jari-jari partikel padatan (m).

Perhitungan sedimen terendapan pada aktivitas sedimentasi juga dibutuhkan untuk mengetahui umur dan fungsi dari suatu kolam. Usia guna kolam adalah masa manfaat waduk dalam menjalankan fungsinya, sampai terisi penuh oleh sedimen,

sehingga memengaruhi kapasitas kolam. Semakin bertambah umur kolam, maka semakin berkurang kapasitas tampungan kolam, yang kemudian akan mengganggu pelaksanaan operasional kolam. Apabila sedimen yang masuk lebih besar dibandingkan pada kapasitas tampungan kolam, maka masa manfaat kolam tersebut akan pendek. Oleh karena itu, perencanaan kolam haruslah meliputi pertimbangan tentang kemungkinan sedimen tertahan dan laju pengendapan untuk menetapkan apakah masa manfaat dari kolam yang direncanakan cukup untuk menjamin pembangunannya.

Pengendapan sedimen dapat dilakukan dengan berbagai macam metode. Salah satunya dengan menggunakan efisiensi tangkapan sedimen (*trap efficiency*). *Trap efficiency* didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah sedimen yang mengendap di kolam dengan total angkutan sedimen yang masuk ke dalam kolam. Dalam menggunakan metode ini, dapat diperkirakan besarnya *trap efficiency* secara empiris yang didasarkan pada pengukuran endapan sedimen di beberapa kolam besar. Besarnya *trap efficiency* tergantung dari perbandingan antara kapasitas tampung kolam dan jumlah air yang masuk ke kolam dalam setahun (Brune, 1953).

Perhitungan dalam menentukan besarnya *trap efficiency*, terlebih dahulu ditentukan perbandingan antara kapasitas tampungan dengan *inflow* aliran tahunan. Setelah diperoleh, maka besarnya *trap efficiency* dapat dicari dengan menggunakan grafik Brune, 1953, hubungan antara *ratio of reservoir capacity to annual inflow* (sumbu x) dengan *sediment trapped percent* (sumbu y). Nilai *trap efficiency* akan berkurang sejalan dengan operasional kolam karena kapasitas kolam akan terus berkurang akibat sedimen (Utomo dan Prisca, 2021).



Gambar 4. Grafik *trap efficiency* Brune (Brune, 1953)

Besarnya nilai efisiensi (*trap efficiency*) juga dapat dilakukan dengan cara membagi sedimen yang mengendap dengan volume sedimen yang masuk, sebagaimana disajikan pada Persamaan 11 (Utomo dan Prisca, 2021).

$$TE_{\text{obs}} = \frac{D_s}{V_s} \times 100\% \quad (11)$$

dimana,

TE_{obs} = efisiensi tangkapan (*trap efficiency*) terukur (%),

D_s = sedimen total yang mengendap di waduk (m^3),

V = sedimen total yang masuk ke waduk (m^3).

Menurut Loebis (1993), terdapat beberapa jenis sedimen hasil erosi pada suatu DAS yang kemudian sebagian akan mengendap di dalam kolam berupa:

- a. *Wash load* adalah angkutan partikel halus yang berupa lempung dan debu, yang terbawa oleh aliran air sungai. Partikel ini akan terbawa aliran sampai ke laut, atau dapat juga mengendap pada aliran yang tenang atau pada air yang tergenang. Sumber utama dari *wash load* adalah hasil pelapukan lapisan atas batuan atau tanah di dalam daerah aliran sungai. Hasil pelapukan itu akan terbawa oleh aliran permukaan atau angin ke dalam sungai di dalam DAS tersebut.
- b. *Suspended load* atau sedimen layang dengan butiran yang lebih kasar, kira-kira beberapa per seratus sampai dengan beberapa per puluhan millimeter, yang diangkut dalam keadaan melayang ke dalam waduk sebagian besar akan terendap di bagian hilir kolam waduk bersama dengan sebagian kecil *wash load*.
- c. *Bed load* atau sedimen dasar dengan besar butiran yang lebih kasar dari sedimen layang, menggelincir dan berguling (*translating and rolling*) pada dasar sungai. Hampir semua sedimen akan mengendap di kolam waduk bagian hulu serta pada dasar alur sungai pemasok air waduk.

2.5 *Settling Pond*

Sistem penambangan terbuka menyebabkan beberapa dampak lingkungan seperti hilangnya bentang alam, tanah, vegetasi, dan fauna, serta berpengaruh terhadap kualitas air. Pada saat hujan, air limpasan hujan akan bereaksi dengan batuan yang

dilaluinya juga akan mengangkat partikel hasil erosi maupun lapukan batuan. Akibatnya kualitas air tambang akan berubah baik secara fisik misalnya keasaman dan konsentrasi kandungan padatan tersuspensi maupun secara kimiawi yang ditandai dengan meningkatnya konsentrasi unsur-unsur tertentu, misalnya logam. Sarana untuk mengendalikan kualitas air pada area penambangn yaitu dengan membuat kolam pengendap atau *settling pond* (Shen et al., 2019).

Peraturan pertambangan menetapkan syarat penyelesaian tindakan khusus untuk mengelola dan mengendalikan sedimen, sehingga mencegah pencemaran air oleh sedimen. Setelah aktivitas penambangan berakhir, perusahaan diharuskan memulihkan area yang ditambang sehingga stabilitas yang diinginkan akan mendukung ekosistem atau penggunaan lahan baru. Selain itu, langkah-langkah sedimentasi dan hidrologi harus dilakukan untuk mengurangi beban sedimen dari limpasan yang berasal dari tambang terbuka aktif. Uni Eropa menyarankan pengurangan emisi partikel tersuspensi dengan klarifikasi dalam tangki, koagulasi dan flokulasi, flotasi udara, filtrasi membran atau sedimentasi di kolam. Teknik ini berguna untuk lingkungan dengan konsentrasi sedimen tersuspensi yang rendah. Berdasarkan dari berbagai penelitian, hanya kolam pengendapan dengan pemeliharaan berkelanjutan yang dapat digunakan untuk memastikan produksi air bersih di area erosivitas tinggi seperti area tambang aktif (Garbarino et al., 2018).



Gambar 5. *Settling pond* PT Kaltim Prima Coal

Settling pond atau kolam sedimentasi merupakan struktur sementara yang digunakan untuk menahan air limpasan permukaan dan menjebak sebagian sedimen

secara gravitasi sebelum dibuang ke badan air. *Settling pond* juga dapat mengurangi debit air puncak dari tambang. *Settling pond* dianggap sebagai tindakan pengendalian erosi pasif dengan sedikit proses pemeliharaan. Waktu tertentu dibutuhkan untuk terjadinya sedimentasi, setelah itu diasumsikan bahwa air sedimen rendah dialirkan dari kolam. Proses koagulasi atau flokulasi ditambahkan ketika kolam pengendapan memiliki efisiensi yang rendah. Tidak terdapat spesifikasi yang jelas mengenai kapan dan seberapa sering sedimen yang terperangkap di kolam harus dikosongkan. Ketika bahan kimia atau logam ditambahkan ke dalam kolam maka dapat digunakan sebagai perawatan tambahan, seperti vegetasi lahan basah berakar atau silo dosis kapur untuk mempertahankan partikel tertentu (Rice et al., 2016).

Area tambang aktif dan bagian dari area yang dipulihkan mengelola erosi air limpasan dengan menggunakan *settling pond*. Kolam tersebut menahan banyak sedimen selama hujan. Kolam yang dekat dengan *inlet* menahan material yang lebih kasar dan kolam terjauh menyimpan sedimen berbutir halus. Kolam hilir yang lebih rendah berbentuk berliku-liku untuk mengurangi kecepatan air dan untuk mendorong sedimentasi. Pelepasan air dipantau oleh stasiun hidrometrik atau pintu air. Formasi geologis yang dieksploitasi oleh tambang tidak membentuk akuifer. Terdapat beberapa lapisan permeabel yang setelah dipotong oleh *pit* tambang, merembeskan air ke bagian dalam tambang kemudian dialirkan oleh saluran terbuka (*open channel*) (Zapico et al., 2021).