

PREDIKSI CURAH HUJAAN MENGGUNAKAN METODE E. J. GUMBEL UNTUK RENCANA SISTEM PENYALIRAN TAMBANG

Rainfall Prediction Using E. J. Gumbel Method for Mine Drainage System Plan

ILHAM R. NURFAJAR*, RACHMADHI PURWANA dan SOEMARNO W. SOELARNO****

Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Universitas Indonesia
Jalan Salemba Raya No 4, Jakarta Pusat, DKI Jakarta, Indonesia

e-mail korespondensi: Ilhamrifki26@gmail.com

* Kontributor Utama, ** Kontributor Anggota

ABSTRAK

Tailing Storage Facility (TSF) adalah salah satu konstruksi terbesar yang melibatkan kolam pengendapan dan merupakan fasilitas penting yang digunakan pada kegiatan pertambangan. Penelitian ini memiliki tujuan untuk merekomendasikan pengelolaan air pada kolam pengendapan secara aman dan ramah lingkungan. Dilakukan analisis curah hujan dengan menggunakan metode E. J. Gumbel dan membuat desain sistem penyaliran tambang. Hasil prediksi menghasilkan curah hujan maksimum sebesar 20,99 mm/hari dan nilai intensitas hujan 7,28 mm/jam. Luas daerah tangkapan hujan adalah 380.355 m² dan total debit air limpasan sebesar 0,64 m³/detik. Air limpasan masuk ke dalam kolam pengendapan dengan volume 2.438 m³/hari. Daya tampung 3 (tiga) kompartemen kolam pengendapan sebesar 4.500 m³ dan luas 500 m².

Kata kunci: air, curah hujan, debit, TSF, kolam pengendapan.

ABSTRACT

The Tailings Storage Facility (TSF) is one of the largest constructions in mining activities involving sediment ponds that is an important and common facility used in mining activities. This study aims to recommend safe and environmentally friendly water management in settling ponds. This research is done by analyzing rainfall using E. J. Gumbel Method and designing a mine drainage system. The prediction results produce a maximum rainfall of 20.99 mm/day and a rain intensity value of 7.28 mm/hour. The catchment area is 380,355 m² and the total runoff water discharge is 0.64 m³/second. Runoff water enters the settling pond with a volume of 2,438 m³/day. The capacity of the 3 (three) compartments of settling ponds is 4,500 m³ and an area of 500 m².

Keywords: water, rainfall, discharge, TSF, sediment pond.

PENDAHULUAN

Industri pertambangan telah menjadi salah satu kegiatan ekonomi yang paling penting di dunia modern (Ma, Schott dan Lodewijks, 2017) mengingat peran pentingnya dalam perkembangan ekonomi dan sosial dari banyak

negara (Ma, Schott dan Lodewijks, 2017; Aldhafeeri, 2018; Hancock, Duque dan Willgoose, 2020; Shavina dan Prokofev, 2020). Kegiatan pertambangan menghasilkan jutaan ton limbah dalam setahun, yang besarnya hampir sama seperti proses geologi pembentukan bumi (Forstner dan Wittmann,

1981). Sebagian dari volume limbah yang dihasilkan sering ditempatkan pada fasilitas penyimpanan *tailing* (*tailings storage facility*, TSF) yang dapat berpotensi mengalami kegagalan jika tidak dilakukan desain yang memadai untuk menjaga stabilitasnya (Kossoff dkk., 2014). Penyebab potensial kegagalan beragam, tergantung pada apakah TSF aktif atau tidak (Rico dkk., 2008).

Kegagalan TSF bukanlah fenomena baru dan banyak peristiwa kegagalan telah terjadi di seluruh dunia. Beberapa kegagalan kritis yaitu Gunung Polley di Kanada (Byrne dkk., 2016), Merriespruit di Afrika Selatan (Van Niekerk dan Viljoen, 2005), tambang Cieneguita di Meksiko, Cerro Negro di Chili (Valenzuela, 2016), Rio Pomba Cataguases di Brasil (Galleno dkk., 2016) dan Bento Rodrigues di Brasil (Segura dkk., 2016), serta masih banyak lagi kegagalan dan risiko yang ditimbulkan oleh fasilitas *tailing* dan potensi kegagalannya yang menjadi kekhawatiran masyarakat sipil dan komunitas investor.

Komisi Internasional untuk Bendungan Besar (*International Commission on Large Dams* - ICOLD) telah memetakan risiko dan penyebab yang mungkin berkontribusi pada kegagalan pengelolaan suatu bendungan (*failure modes*). Dapat dilihat pada Gambar 1 penyebab kegagalan TSF. Hal ini sangat berguna untuk membuat perencanaan jangka panjang pengelolaan TSF bahkan sampai pada tahap pasca operasi pertambangan, misalnya potensi pelupukan, erosi, biointrusi dan lain-lain.

Pengelolaan air yang buruk atau adanya kandungan kontaminan yang tinggi di *tailing* sering dikaitkan dengan kejadian stabilitas yang menyebabkan kegagalan TSF (Owen dkk., 2020). Sistem drainase, kolam sedimentasi, dan pengendalian aliran air merupakan bagian penting dari desain dan operasi TSF yang aman dan berkelanjutan. Pengelolaan air yang efektif juga melibatkan pemantauan kualitas air dan analisis terus menerus untuk memastikan bahwa air yang berasal dari/atau berinteraksi dengan TSF sesuai dengan standar lingkungan yang ditetapkan.

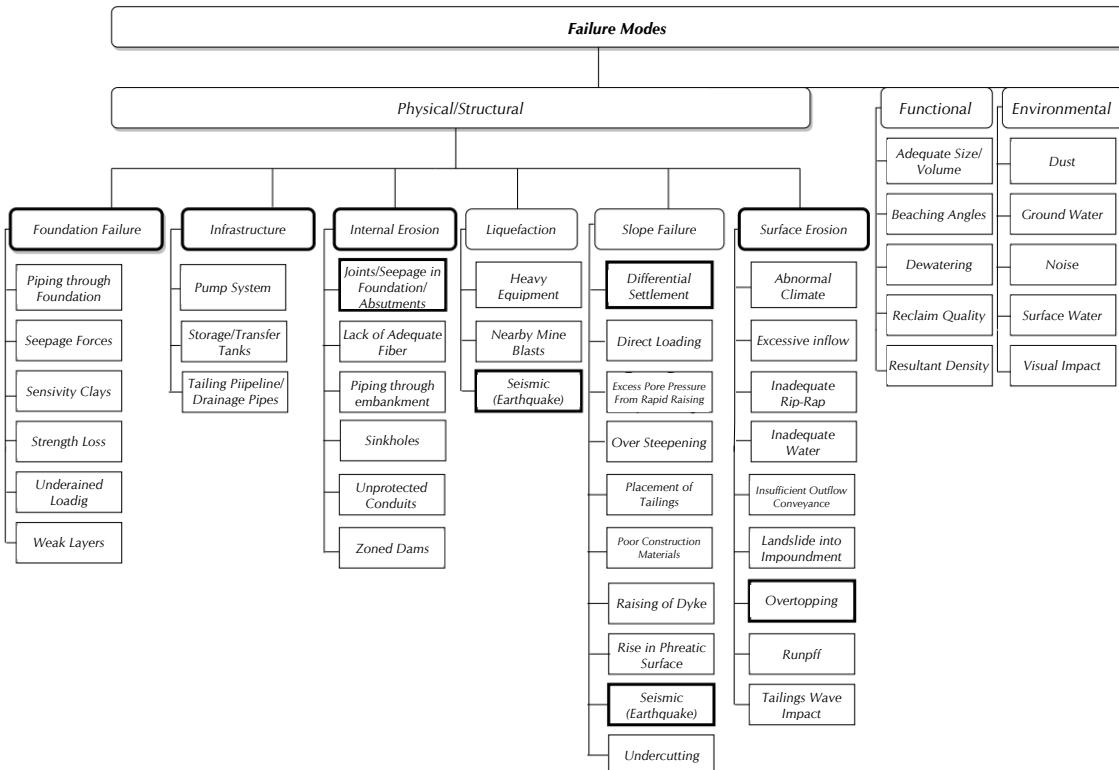
Curah hujan yang berlebihan dapat meningkatkan volume air dalam TSF, meningkatkan tekanan pori, dan mengurangi kestabilan lereng (Blight, 2009). Jika tidak dirancang dengan baik, akumulasi air dapat menyebabkan limpasan yang tidak terkendali, erosi, hingga potensi jebolnya bendungan *tailing*, seperti yang terjadi pada kegagalan TSF di Brumadinho, Brasil, tahun 2019 (Robertson, de Melo, Williams dan Wilson, 2019).

ICOLD melakukan pemetaan penyebab dan dampak kegagalan pengelolaan TSF (*failure mode*) secara empiris yang terdiri dari kegagalan struktural, fungsional, dan lingkungan. Pedoman praktik pengelolaan TSF saat ini berfokus terutama pada pertimbangan penempatan, metode pembuangan *tailing*, penampungan *tailing*, desain dan konstruksi dinding penahan, kontrol rembesan, pengiriman *tailing*, penutupan, dan rehabilitasi (Australian Goverment, 2016).

METODE

Analisis curah hujan digunakan untuk memprediksi kemungkinan hujan di suatu lokasi dan waktu tertentu. Ini melibatkan penggunaan data curah hujan historis untuk membuat prediksi tentang pola hujan di masa depan. Prediksi curah hujan ini sangat penting dalam merencanakan tindakan antisipatif terhadap banjir.

Metode yang beragam dapat digunakan untuk menghitung curah hujan rencana. Ini termasuk distribusi Gumbel, Log Normal 2 Parameter, Log Pearson Type III, Haspers, Normal, Pearson, dan Goodrich (Soewarno, 1995). Setiap metode memiliki pendekatan matematis yang berbeda untuk menggambarkan karakteristik curah hujan di masa depan. Dengan menerapkan metode-metode ini, kita dapat memproyeksikan bagaimana curah hujan di suatu daerah akan berperilaku di masa mendatang. Prediksi ini memberikan dasar kuat dalam memahami potensi banjir rencana dan memungkinkan pengembangan strategi mitigasi yang lebih baik.



Sumber: International Commission on Large Dams (2001)

Gambar 1. Penyebab kegagalan TSF

Dengan merencanakan berdasarkan prediksi curah hujan rencana, kita dapat mengambil langkah-langkah yang lebih baik dalam mengurangi risiko banjir dan mengelola dampaknya. Pemilihan metode yang sesuai tergantung pada karakteristik data curah hujan, tujuan analisis, dan ketersediaan data yang akurat. Setiap metode memiliki asumsi dan batasan tertentu, sehingga penting untuk memahami konteksnya dengan baik sebelum menerapkannya dalam analisis prediksi curah hujan atau debit banjir.

Menurut Soewarno (1995), beberapa cara yang dapat digunakan dalam perhitungan dispersi yaitu menentukan standar deviasi (S_x), koefisien skewness (C_s), koefisien variansi (C_v), dan koefisien kurtosis (C_x). S_x merupakan suatu nilai yang digunakan dalam menentukan persebaran data pada suatu sampel dan melihat seberapa dekat data tersebut dengan nilai rata-rata, dihitung dengan persamaan:

n merupakan jumlah data, X_i merupakan nilai X ke- i dan \bar{x} adalah nilai rata-rata X . Selanjutnya menghitung koefisien *skewness* (C_s), yaitu tingkat ketidaksimetrisan atau kejauhan simetri dari sebuah distribusi dengan persamaan:

n merupakan jumlah data, X_i merupakan nilai X ke- i , \bar{x} adalah nilai rata-rata X dan S_x adalah nilai standar deviasi yang didapatkan sebelumnya. Kemudian menghitung koefisien kurtosis (C_x) yakni derajat atau ukuran tinggi rendahnya puncak suatu distribusi data terhadap distribusi normalnya data dengan menggunakan persamaan berikut:

Menghitung koefisien variansi (C_v) yang merupakan nilai perbandingan antara standar deviasi dengan nilai rata-rata varian distribusi dengan persamaan berikut:

X adalah nilai rata-rata variat, nilai rata-rata variat ke-i, dan n adalah jumlah data. Hasil sebaran data dari perhitungan dispersi selanjutnya dapat digunakan untuk analisis curah hujan rencana, dimana data yang telah dihitung dapat direncanakan berdasarkan tingkat variansi data sehingga memiliki tingkat keyakinan dalam penentuan curah hujan rencana.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Curah Hujan

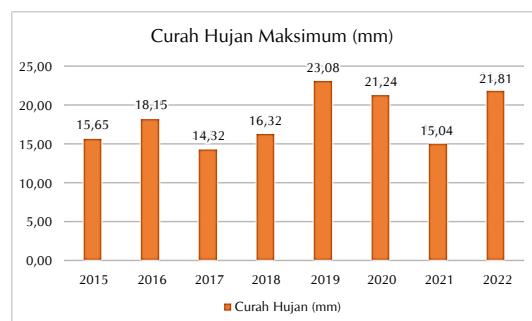
Analisis curah hujan dilakukan dengan menggunakan data curah hujan historis sebagai acuan prediksi. Data curah hujan yang digunakan adalah data 10 tahun terakhir (2013-2022) yang diperoleh dari kegiatan pemantauan yang dilakukan oleh PT X (Tabel 1).

Sebelum melakukan perhitungan prediksi, langkah pertama yang dilakukan adalah validasi menggunakan data curah hujan dari 2013 hingga 2022 sebagai masukan. Tujuannya untuk menghasilkan nilai standar deviasi serta koefisien skewness yang relevan. Validasi ini diperlukan untuk memastikan bahwa metode perhitungan yang diterapkan memiliki dasar kuat dalam memprediksi data masa depan. Dengan mengacu pada data yang telah terjadi dan terukur, nilai-nilai standar deviasi akan memberikan gambaran tentang sebaran variasi curah hujan, sementara koefisien skewness mengindikasikan bentuk distribusi datanya. Proses validasi ini akan memberikan keyakinan bahwa prediksi yang dihasilkan memiliki dasar empiris yang solid.

Tabel 1. Data curah hujan 10 tahun terakhir

Tahun	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agust	Sep	Okt	Nov	Des
	Mm/hari											
2013	25,68	10,37	10,23	10,60	6,60	15,53	13,67	15,86	10,92	31,00	17,95	13,15
2014	13,17	13,55	10,90	23,55	17,23	18,14	13,29	15,73	11,55	11,33	12,74	12,52
2015	11,67	14,14	12,90	7,94	10,47	10,36	9,50	9,91	11,14	15,65	14,42	10,75
2016	14,55	9,88	12,09	12,15	12,15	10,82	12,56	18,15	11,22	14,65	12,31	14,92
2017	14,07	8,44	9,64	6,89	9,70	14,00	9,67	9,83	9,53	10,11	10,76	14,32
2018	9,73	12,31	6,77	4,78	10,44	10,00	10,73	7,93	12,33	12,96	12,54	16,32
2019	22,67	23,08	16,88	16,83	11,33	14,73	12,20	7,08	8,63	11,05	10,00	14,50
2020	16,11	13,46	6,63	9,50	13,75	8,58	21,24	5,53	13,03	9,29	17,63	10,02
2021	8,71	3,00	14,67	8,42	15,04	5,33	6,19	4,17	5,40	4,24	5,35	8,28
2022	11,78	10,09	8,88	10,50	11,11	11,15	9,79	13,88	21,81	15,76	18,11	10,02

Gambar 2 menunjukkan grafik curah hujan maksimum yang terjadi di area penelitian selama 10 tahun terakhir.



Sumber: PT. X (2023)

Gambar 2. Grafik curah hujan maksimum

Hasil perhitungan parameter yang digunakan dalam validasi metode prediksi curah hujan dapat dilihat pada Tabel 2. Dari data hasil perhitungan (Tabel 2), kita dapat melihat nilai standar deviasi (S_x) parameter statistik lebih besar dibandingkan dengan parameter logaritma, berturut turut sebesar 4,48 dan 1,05. Hal tersebut menunjukkan bahwa variasi data curah hujan dalam parameter statistik lebih besar, artinya data memiliki variasi yang lebih signifikan dari nilai rata-rata. Nilai koefisien variansi (Cv) menunjukkan sejauh mana variasi data dari nilai rata-rata. Dalam kasus ini, nilai Cv lebih rendah untuk parameter statistik yaitu sebesar 0,37 dibandingkan dengan parameter logaritma sebesar 0,99. Hal ini menandakan bahwa variasi data dalam parameter statistik lebih konsisten dan lebih dekat dengan rata-rata.

Tabel 2. Rekap perhitungan parameter

No	Dispersi	Parameter statistik	Parameter logaritma
1	Sx	4,48	1,05
2	Cv	0,37	0,99
3	Cs	1,09	1,05
4	Cx	0,05	1,13

Selanjutnya untuk nilai koefisien *skewness* (Cs) menggambarkan bentuk distribusi data. Nilai Cs yang mendekati nol menunjukkan distribusi simetris. Dalam hal ini, kedua nilai Cs untuk Parameter Statistik dan Parameter Logaritma memiliki perbedaan yang kecil dengan masing-masing nilai sebesar 1,09 dan 1,05. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi data cenderung mirip dalam kedua parameter tersebut. Koefisien kurtosis (Cx) mengukur tingkat ekstrem dari distribusi data.

Berdasarkan hasil perbandingan tersebut didapatkan bahwa pemilihan metode analisis yang paling mendekati kondisi rill ialah metode prediksi curah hujan E. J. Gumbel (Tabel 3).

Catchment Area

Area tangkapan hujan atau *catchment area* (CA) merupakan suatu wilayah geografis yang terbentuk oleh batas-batas topografi seperti punggung bukit, pegunungan, atau batas alam lainnya. Wilayah ini memiliki karakteristik tertentu yang memungkinkannya berfungsi sebagai area curah hujan (termasuk hujan, salju, dan lain-lain) tertentu tertangkap, disimpan, dan akhirnya mengalir menuju saluran air seperti sungai, anak sungai, dan kemudian ke aliran utama seperti sungai besar, danau atau waduk (Maidment, 1993).

Dalam penetapan wilayah tangkapan hujan digunakan informasi dari peta topografi wilayah eksplorasi pertambangan serta observasi lapangan yang dilakukan secara langsung. Analisis peta topografi diarahkan untuk mengidentifikasi titik paling tinggi yang memiliki kapabilitas mengalirkan air serta memproyeksikan jalur kemungkinan aliran air ketika air memasuki wilayah pertambangan.

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, wilayah tangkapan hujan dibagi menjadi empat bagian yang memainkan peran krusial terhadap wilayah lokasi TSF berada (Tabel 4). Pembagian wilayah ini disusun dengan mempertimbangkan perkiraan jalur aliran air yang diperkirakan akan memasuki area TSF (Lampiran 1).

CA TSF-perairan merupakan area yang digunakan sebagai fasilitas penyimpanan limbah pertambangan berupa kolam. CA pertanian lahan kering-hutan, digunakan untuk kegiatan pertanian di tanah kering, termasuk hutan atau perkebunan. CA sawah-sawah, merupakan area yang digunakan untuk pertanian padi sawah dengan lahan yang diairi secara teratur. Sedangkan CA semak belukar-semak mencakup area dengan vegetasi semak-semak atau semak belukar yang lebih padat daripada lahan kosong. Luas wilayah untuk masing-masing CA terdapat pada Tabel 4.

Dengan melihat perbandingan luasan dari masing-masing area, dapat diidentifikasi seberapa besar proporsi dari masing-masing kategori tata guna lahan dalam wilayah tangkapan hujan. Wilayah tangkapan hujan perairan (CA TSF) memiliki luas yang paling signifikan, diikuti oleh semak belukar (CA semak belukar), pertanian lahan kering (CA pertanian lahan kering), dan yang terkecil adalah sawah (CA Sawah).

Tabel 3. Penetuan metode prediksi curah hujan

No.	Metode	Syarat	Hasil	Keterangan
1	Normal	$Cs \approx 0$ $Cx \sim 3$	$Cs = 1,09$ $Cx = 0,05$	Kurang Memenuhi
2	Log Normal	$Cv \sim 0,06$ $Cs \sim 3Cv + Cv^2 = 1,80$	$Cv = 0,37$ $Cs = 1,05$	Kurang Memenuhi
3	E. J. Gumbel	$Cs \leq 1,14$ $Cx \leq 5,40$	$Cs = 1,09$ $Cx = 0,05$	Memenuhi
4	Log Pearson III	$Cs \neq 0$ $Cv \sim 0,3$	$Cs = 1,09$ $Cv = 0,37$	Kurang Memenuhi

Sumber: Soewarno (1995)

Tabel 4. Luas catchment area

No	Nama	Tata guna lahan	Luas wilayah, A (m ²)
1	CA TSF	Perairan	182.483
2	CA pertanian lahan kering	Hutan, perkebunan	78.696
3	CA sawah	Sawah	1.910
4	CA semak belukar	Semak belukar	117.265
	Total		380.355

Intensitas Curah Hujan

Intensitas curah hujan mengacu pada tingkat kecepatan atau volume hujan yang turun dalam suatu wilayah dalam satu periode waktu tertentu. Teori tentang intensitas curah hujan dan prediksinya melibatkan berbagai faktor meteorologis dan hidrologis yang mempengaruhi pola curah hujan di suatu daerah. Salah satu teori penting yang digunakan untuk memahami intensitas curah hujan adalah Teori Hujan Sebanding (*Proportional Rainfall Theory*) yang dikemukakan oleh Sherman (1932). Teori ini menyatakan bahwa intensitas curah hujan cenderung sebanding dengan durasi curah hujan, sehingga semakin lama durasi hujan, semakin tinggi intensitasnya.

Prediksi intensitas curah hujan sangat penting dalam perencanaan dan rekayasa pertambangan, terutama dalam perancangan infrastruktur seperti saluran drainase, bendungan, dan sistem pengendalian banjir. Prediksi intensitas curah hujan umumnya dilakukan menggunakan model statistik berdasarkan data historis curah hujan yang dikumpulkan dari stasiun meteorologi (Tabel 1).

Hasil analisis data secara statistik dengan menggunakan metode E. J. Gumbel dapat dilihat pada Tabel 5. Nilai yang digunakan dalam perhitungan adalah untuk curah hujan 20 tahun sebesar 7,28 mm/jam.

Tabel 5 membandingkan durasi dan intensitas hujan rencana selama berbagai periode waktu, yaitu 4, 8, 10, dan 20 tahun. Durasi hujan berkisar antara 5 hingga 300 menit. Terdapat peningkatan yang konsisten dalam durasi hujan seiring dengan meningkatnya periode waktu. Hal ini menunjukkan akumulasi data hujan selama periode yang lebih panjang.

Tabel 5. Prediksi intensitas curah hujan

Durasi (menit)	Intensitas hujan (mm/jam)			
	t = 4 Thn	t = 8 Thn	t = 10 Thn	t = 20 Thn
5	31,67	34,55	35,44	38,13
10	16,75	15,43	22,32	24,02
15	15,23	16,61	17,04	18,33
30	9,59	10,46	10,73	11,55
60	6,04	6,59	6,76	7,28
120	3,81	4,15	4,26	4,58
180	2,91	3,17	3,25	3,50
240	2,40	2,62	2,68	2,89
300	2,07	2,25	2,31	2,49

Koefisien Limpasan

Koefisien limpasan juga dikenal sebagai koefisien aliran permukaan atau koefisien limpasan permukaan, mengacu pada angka yang digunakan dalam hidrologi untuk menghitung laju limpasan permukaan yang terjadi pada suatu area tertentu selama periode tertentu. Koefisien limpasan ini memperhitungkan berbagai faktor seperti kondisi tanah, vegetasi, topografi, dan curah hujan.

Pentingnya koefisien limpasan adalah untuk memahami bagaimana air hujan yang jatuh di permukaan tanah akan berperilaku. Daripada meresap ke dalam tanah, air ini mungkin mengalir di atas permukaan dan menjadi limpasan permukaan. Koefisien limpasan membantu dalam mengukur seberapa cepat air akan mengalir ke sungai atau saluran air setelah hujan.

Nilai koefisien yang digunakan mempertimbangkan kemiringan lahan dengan standar yang telah ditetapkan oleh Fetter (1994), klasifikasinya dapat dilihat pada Tabel 6.

Koefisien limpasan umumnya digunakan dalam model hidrologi untuk memprediksi aliran permukaan, banjir, dan perubahan aliran air dalam berbagai skenario. Nilai koefisien limpasan bervariasi berdasarkan jenis tanah, vegetasi, curah hujan, topografi, dan faktor lingkungan lainnya. Dalam pengambilan keputusan terkait pengelolaan air, pemahaman yang akurat tentang koefisien limpasan sangat penting untuk merencanakan dan merespon perubahan hidrologi dalam suatu daerah.

Tabel 6. Nilai koefisien limpasan

Kemiringan lahan	Tutupan jenis lahan	C
< 3 % (datar)	Sawah, rawa	0,2
	Hutan, perkebunan	0,3
	Perumahan	0,4
3 % - 15 % (sedang)	Hutan, perkebunan	0,4
	Perumahan	0,5
	Semak-semak agak jarang	0,6
> 15 % (curam)	Lahan terbuka	0,7
	Hutan	0,6
	Perumahan	0,7
> 15 % (curam)	Semak-semak agak jarang	0,8
	Lahan terbuka daerah tambang	0,9-1

Sumber: Chow (1985) dalam Gautama (1993)

Debit Limpasan

Metode rasional digunakan untuk mengestimasi debit air limpasan (Q) dengan mempertimbangkan berbagai parameter seperti intensitas curah hujan (I), koefisien limpasan permukaan (C), dan luas area tangkapan hujan (A) dengan rumus sebagai berikut:

Dalam konteks ini, perlu ditekankan bahwa debit limpasan air hujan yang memasuki CA TSF adalah $1.327 \text{ m}^3/\text{hari}$ (Tabel 7). Namun, penting untuk diketahui bahwa sumber daya air tidak hanya terbatas pada daerah tangkapan hujan ini. Oleh karena itu, debit yang berasal dari wilayah tangkapan lainnya dialihkan melalui *differential channel* untuk memastikan penanganan yang tepat dan efisien.

Total debit yang perlu dipertimbangkan adalah hasil penjumlahan dari debit limpasan air hujan dari CA TSF dan debit yang telah melalui

proses pengolahan. *Catchment area* yang digunakan adalah CA TSF, sehingga apabila dijumlahkan dengan air sisa pengolahan maka total debit air yang dikelola diperkirakan sebesar $2.438 \text{ m}^3/\text{hari}$ (Tabel 7).

Kolam Pengendapan

Kolam pengendapan pada kegiatan pertambangan adalah infrastruktur yang dirancang untuk mengelola air limbah yang dihasilkan selama proses penambangan. Fungsi utamanya adalah untuk mengendapkan partikel-partikel padat yang terbawa oleh air limbah sebelum air tersebut dibuang atau dilepaskan kembali ke lingkungan. Kolam pengendapan juga merupakan struktur buatan yang berfungsi sebagai tempat pengendapan dan pemisahan material padat dari air limbah yang berasal dari berbagai aktivitas pertambangan. Tujuan utama dari kolam pengendapan adalah mengurangi muatan partikel padat dalam air limbah sehingga air yang dikeluarkan ke lingkungan memiliki kualitas yang lebih baik.

Air limbah yang mengalir ke kolam pengendapan akan mengalami proses pengendapan. Partikel-partikel padat yang terlarut atau terdispersi dalam air akan mengendap ke dasar kolam karena adanya gaya gravitasi. Proses ini memungkinkan partikel-partikel padat, seperti lumpur dan sedimen, terpisah dari air. Seiring waktu, partikel-partikel tersebut akan membentuk lapisan lumpur di dasar kolam.

Kolam pengendapan tersebut akan memiliki desain khusus, biasanya memiliki area yang luas, serta kompartemen atau sekat untuk mengalirkan air secara perlahan agar partikel-padat memiliki kesempatan untuk mengendap. Bentuk kolam dapat beragam, seperti rektaangular atau circular, tergantung pada kebutuhan dan kondisi lokasi.

Tabel 7. Prediksi debit

Wilayah tangkapan (CA)	Kemiringan lahan (C)	Intensitas curah hujan, I (m/jam)	Luas area tangkapan hujan, A (m ²)	Debit air limpasan, Q (m ³ /hari)
CA TSF	1		182.483	1.327
CA Pertanian Lahan Kering	0,6		78.696	318
CA Sawah	0,8	0,01	1.910,77	111
CA Semak Belukar	0,8		117.265	682
Total			380.355	2.438

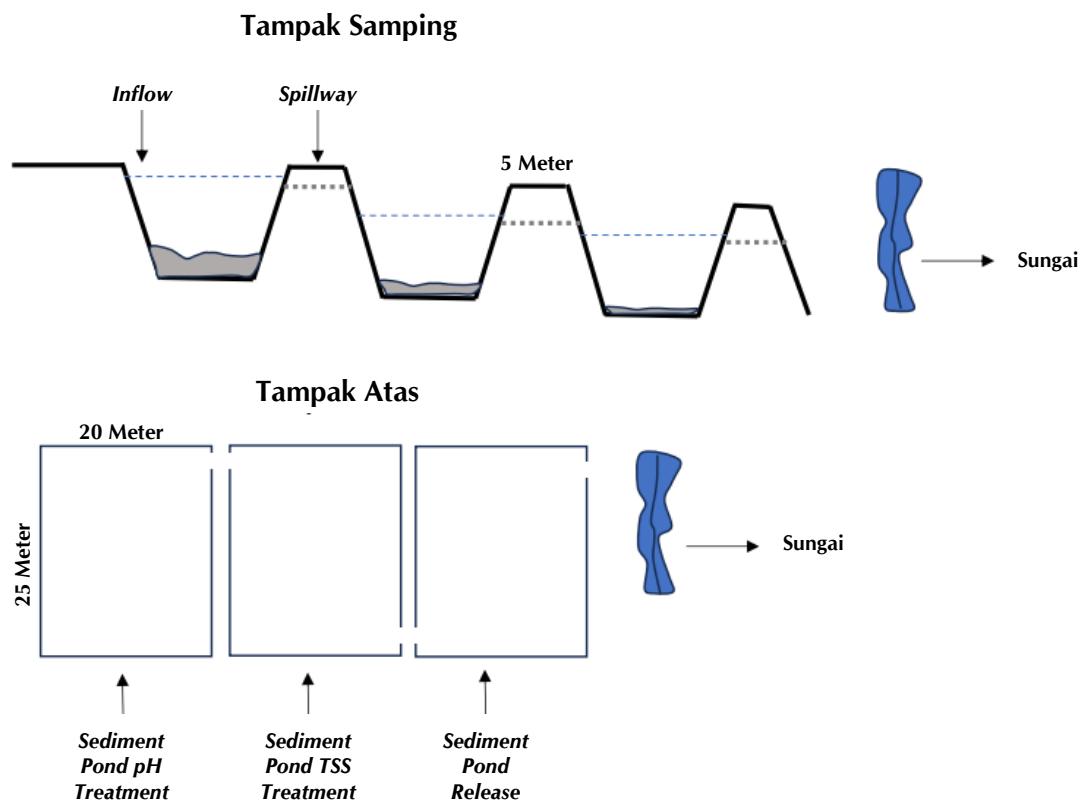
Kolam pengendapan yang direkomendasikan untuk dibangun dibagi ke dalam 3 (tiga) kompartemen dengan kapasitas 1500 m^3 per kompartemen (Gambar 3). Dimensi yang diusulkan meliputi panjang 20 m, lebar 25 meter dan kedalaman 3 meter. Rekomendasi dimensi ini berdasarkan perhitungan debit air yang harus ditangani TSF. Membagi kolam pengendapan menjadi tiga kompartemen juga merupakan bagian dari upaya pengelolaan lingkungan. Kompartemen pertama dapat digunakan sebagai kolam pH treatment, kompartemen kedua digunakan sebagai total suspended solid (TSS) treatment dan kompartemen terakhir digunakan sebagai kolam penaatan. Sehingga diharapkan air yang dilepaskan telah sesuai dengan baku mutu yang telah ditetapkan.

Lumpur endapan yang terbentuk di dasar kolam perlu dikelola, lumpur ini dikeruk dan ditempatkan kembali di TSF untuk menghindari kontaminasi lingkungan. Alat penggerukan yang

dapat digunakan adalah excavator PC-200 dan alat pengangkutan *dumptruck* index 24.

Kolam pengendapan berperan dalam menjaga kualitas air dengan mengurangi muatan partikel padat dan material pencemar lainnya yang terkandung dalam air limbah. Dengan demikian, kolam pengendapan berkontribusi pada pengelolaan lingkungan yang lebih berkelanjutan dan pemulihian lingkungan setelah aktivitas pertambangan.

Laju pengendapan (V_s) dihitung berdasarkan rumus Stokes dengan asumsi jenis material yang mengalir menuju kolam adalah partikel pasir halus dengan ukuran butir (D_s) sebesar 0,125 mm berdasarkan skala Wentworth, dengan nilai density padatan (ρ_s) berdasarkan Widodo *dkk.* (2020) sebesar 1.448 Kg/m^3 dan berat jenis air (ρ) yang membawa partikel pasir halus sebesar $996,65\text{ Kg/m}^3$ pada suhu 25°C . Berdasarkan Potter *dkk.* (2012), nilai viskositas air (μ) pada suhu 25°C yaitu sebesar $0,00089\text{ Kg/m.s}$ dan gravitasi sebesar $9,8\text{ m/s}^2$.



Gambar 3. Desain kolam pengendapan

Tabel 8. Rekomendasi kolam pengendapan

Keterangan	Nilai
Intensitas curah hujan (mm/jam)	15,45
Air limpasan (m ³ /hari)	1.327
Air pengolahan (m ³ /hari)	1.111
Total volume air masuk TSF (m ³ /hari)	2.438
Pompa tipe MF420EXHV (m ³ /jam)	634
Jam kerja pompa/hari	10
Jumlah pompa	1
Total kemampuan pompa	6.340
Volume rencana kolam	1.500
Pengendapan (m ³)	
Laju pengendapan (m/d)	0,004
Debit sediment pond discharge (m ³ /detik)	0,017
Dimensi kolam pengendapan (m ³)	20 x 25 x 3
Total volume air masuk TSF (m ³ /hari)	2.438
Kapasitas kolam pengendapan (m ³)	4.500

$$V_s = \frac{g D s^2 (\rho_s - \rho)}{18 \mu} \dots \dots \dots (6)$$

$$= \frac{9,8 \frac{m}{s^2} \times \left(\frac{0,125}{1000} m\right)^2 \left(1448 \frac{Kg}{m^3} - 996,65 \frac{Kg}{m^3}\right)}{18 (0,00089 Kg/m.s)}$$

$$= 0,004 \text{ m/s}$$

Debit padatan (Q_s) yang terkandung dalam lumpur pada kolam pengendapan (Prodjosumarto, 1994) dapat dihitung dengan membagi debit aliran yang masuk ke kolam pengendapan (Q_{air}) dengan %TSS (1250 mg/L = 13%), sebagai berikut:

$$Q_s = Q_{air} \times \% \text{TSS} \dots \dots \dots (7)$$

$$= (0,03 \text{ m}^3/\text{detik}) \times 13\%$$

$$= 0,0039 \text{ m}^3/\text{detik}$$

Waktu yang dibutuhkan oleh partikel untuk mengendap (t_v) dihitung dengan membagi kedalaman kolam (h) dengan laju pengendapan (V_s), sebagai berikut:

$$t_v = h / V_s \dots \dots \dots (8)$$

$$= 3 \text{ m} / 0,004 \frac{m}{s}$$

$$= 750 \text{ detik} = 12,5 \text{ menit}$$

Selanjutnya dihitung kecepatan mendatar partikel (V_h) dengan membagi debit aliran yang masuk ke kolam pengendapan (Q_{air}) yang sebelumnya diketahui dari Tabel 7 dengan luas permukaan saluran (A). perhitungan kecepatan mendatar sebagai berikut:

$$V_h = Q_{air} / A \dots \dots \dots (9)$$

$$= 1,7 \frac{m^3}{menit} / 0,5 \text{ m}^2$$

$$= 3,5 \text{ m/menit}$$

Kemudian waktu yang dibutuhkan partikel untuk keluar dari kolam pengendapan (t_h) dengan kecepatan mendatar (V_h) dan panjang kolam pengendapan (P) adalah:

$$t_h = P / V_h \dots \dots \dots (10)$$

$$= 20 \text{ m} / 3,5 \frac{m}{menit}$$

$$= 6 \text{ menit}$$

Untuk mengetahui persentase pengendapan (%) yang terjadi maka dapat dihitung dengan menggunakan rumus: waktu yang dibutuhkan partikel untuk keluar dari kolam pengendapan (t_h) dibagi dengan penjumlahan waktu yang dibutuhkan partikel untuk keluar dari kolam pengendapan (t_h) dan waktu pengendapan (t_v), sebagai berikut:

$$\% \text{ pengendapan} = \left(\frac{t_h}{t_h + t_v} \right) \times 100\% \dots \dots \dots (11)$$

$$= \left(\frac{6 \text{ menit}}{6 \text{ menit} + 12,5 \text{ menit}} \right) \times 100\%$$

$$= 32\%$$

Percentase pengendapan akan berada di bawah 50% jika waktu pengendapan lebih besar dari waktu yang dibutuhkan partikel untuk keluar dari kolam pengendapan. Selanjutnya adalah menghitung volume pengendapan dengan menggunakan rumus berikut:

$$V_{\text{padatan}} = Q_s \times \% \text{ pengendapan} \dots \dots \dots (12)$$

$$= 324 \text{ m}^3/\text{hari} \times 32\%$$

$$= 103 \text{ m}^3/\text{hari}$$

(Q_s) merupakan debit padatan yang berpotensi masuk ke TSF dengan satuan waktu tertentu. Setelah mengetahui volume pengendapan, selanjutnya adalah menghitung waktu pengeringan dengan cara sebagai berikut (Suripin, 2004):

$$\text{Waktu pengeringan} = V_{\text{Kolam Pengendapan}} / V_{\text{Padatan}} \dots \dots \dots (13)$$

$$= 4500 \text{ m}^3 / 03 \text{ m}^3/\text{hari}$$

$$= 44 \text{ hari}$$

Penelitian terus menerus dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas kolam pengendapan. Inovasi dalam teknologi pengolahan air limbah juga mempengaruhi perkembangan desain dan operasi kolam

pengendapan untuk mencapai tujuan lingkungan yang lebih baik.

Secara keseluruhan, kolam pengendapan adalah elemen penting dalam sistem pengelolaan air limbah di sektor pertambangan. Fungsinya yang mendasar dalam memisahkan partikel-padat dari air limbah membantu menjaga integritas lingkungan dan berkontribusi pada prinsip-prinsip pertambangan yang bertanggung jawab secara lingkungan. Tabel 7 memperlihatkan rekap dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Rencana sistem penyaliran tambang yang dikembangkan dalam penelitian ini mempertimbangkan prediksi curah hujan ekstrem, estimasi debit limpasan, dan kapasitas pengendapan dengan menggunakan metode E. J. Gumbel yang bertujuan untuk menjamin keberlanjutan operasi tambang dan perlindungan lingkungan. Debit air limpasan sebesar 2.438 m³/hari yang direncanakan masuk ke dalam TSF dialirkan ke kolam pengendapan untuk menurunkan beban sedimen sebelum dialirkan ke badan air penerima.

Desain kolam pengendapan dengan total kapasitas 4.500 m³, terbagi dalam tiga kompartemen masing-masing 1.500 m³, telah disesuaikan untuk menampung debit harian sekaligus memberikan ruang cadangan menghadapi variasi curah hujan. Selain itu, dari hasil pengamatan diperoleh laju pengendapan sebesar 0,004 m/s menunjukkan bahwa setiap harinya kolam akan terisi sedimen sebanyak 103 m³, sehingga pengeringan wajib dilakukan setiap 44 hari untuk menjaga kapasitas efektif dan efisiensi proses pengendapan.

Dengan demikian, perencanaan hidrologi berbasis prediksi ekstrem dan pengelolaan rutin kolam pengendapan merupakan elemen krusial dalam sistem penyaliran tambang yang berkelanjutan. Hal ini tidak hanya mendukung kelancaran operasi tambang, tetapi juga berperan penting dalam mengurangi potensi pencemaran air dan kerusakan lingkungan di sekitar lokasi tambang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan penghargaan yang tulus kepada seluruh anggota karyawan PT X atas kesediaan yang diberikan dalam memberikan izin untuk menjalankan penelitian ini, serta kerjasama dalam menyediakan data yang menjadikan jalannya penelitian ini lancar. Ekspresi rasa terima kasih juga disampaikan kepada Prof. Dr. dr. Rachmadhi Purwana, SKM. dan Dr. Ir. S. Witoro Soelarno, IPM atas arahan serta bimbingan yang teliti dan penuh kesabaran yang telah diberikan kepada penulis dalam proses penelitian ini.

DAFTAR ISI

Aldhafeeri, Z. (2018) *Reactivity of cemented paste backfill*. University of Ottawa.

Australian Goverment (2016) *Tailings management: Leading practice sustainable development program for the mining industry*. Canberra.

Blight, G.E. (2009) *Geotechnical engineering for mine waste storage facilities*. London: CRC Press. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1201/9780203859407>.

Byrne, P., Hudson-Edwards, K.A., Macklin, M.G., Brewer, P., Bird, G. dan Williams, R. (2016) "The long-term environmental impacts of the Mount Polley mine tailings spill, British Columbia, Canada," in *Applied Geochemistry*, hal. 64–74. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1130/abs/2016AM-278498>.

Fetter, C.W. (1994) *Applied hydrogeology*. 3 ed. New Jersey: Prentice-Hall.

Forstner, U. dan Wittmann, G.T. (1981) *Metal Pollution in Aquatic Environment*. 2 ed. Berlin: Springer-Verlag.

Galleno, M., Oliveira, S., Kerbauy, M.T. dan Kerbauy, M. (2016) "Environmental vulnerability and technological risks in collapse and break of dams in Brazil: Lessons from Mariana (MG) disaster," in *Proceedings of the 15th Conference of the Global Spatial Data Infrastructure (GSDI) Association*, hal. 539–546.

Gautama, R.S. (1993) *Pengantar penirisan tambang*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Hancock, G.R., Duque, J.F.M. dan Willgoose, G.R. (2020) "Mining rehabilitation – Using geomorphology to engineer ecologically sustainable landscapes for highly disturbed lands," *Ecological Engineering*, 155(15), hal. 105836. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105836>.

International Commission on Large Dams (2001) *Tailings dams: risk of dangerous occurrences: lessons learnt from practical experiences, Bulletin (International Commission on Large Dams)*. Paris: Commission Internationale des Grand Barrages.

Kossoff, D., Dubbin, W.E., Alfredsson, M., Edwards, S.J., Macklin, M.G. dan Hudson-Edwards, K.A. (2014) "Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation," *Applied Geochemistry*, 51, hal. 229–245. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>.

Ma, W., Schott, D. dan Lodewijks, G. (2017) "A new procedure for deep sea mining tailings disposal," *Minerals*, 7(4), hal. 47. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/min7040047>.

Maidment, D.R. (1993) *Handbook of hydrology*. 1 ed. Washington DC: McGraw Hill.

Van Niekerk, H.J. dan Viljoen, M.J. (2005) "Causes and consequences of the Merriespruit and other tailings-dam failures," *Land Degradation & Development*, 16(2), hal. 201–212. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1002/ldr.681>.

Owen, J.R., Kemp, D., Lèbre, É., Svobodova, K. dan Pérez Murillo, G. (2020) "Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 42, hal. 101361. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101361>.

Potter, M.C., Wiggert, D.C., Ramadan, B.H. dan Shih, T.I.-P. (2012) *Mechanics of fluids*. 4 ed. Stamford: Cengage Learning.

Prodjosumarto, P. (1994) *Teknik pengendalian pencemaran air*. Jakarta: Pradnya Paramita.

PT. X (2023) *Data monitoring tahunan perusahaan. Sumatera Utara*.

Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A.R., Díez-Herrero, A. dan Pereira, H.G. (2008) "Reported tailings dam failures," *Journal of Hazardous Materials*, 152(2), hal. 846–852. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.050>.

Robertson, P.K., de Melo, L., Williams, D.J. dan Wilson, G.W. (2019) *Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão Dam I, Commissioned by Vale*.

Segura, F.R., Nunes, E.A., Paniz, F.P., Paulelli, A.C.C., Rodrigues, G.B., Braga, G.Ú.L., dos Reis Pedreira Filho, W., Barbosa, F., Cerchiaro, G., Silva, F.F. dan Batista, B.L. (2016) "Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil)," *Environmental Pollution*, 218, hal. 813–825. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.005>.

Shavina, E. dan Prokofev, V. (2020) "Implementation of environmental principles of sustainable development in the mining region," *E3S Web of Conferences*. Diedit oleh S. Vöth, M. Cehlář, J. Janocko, M. Straka, D. Nuray, D. Szurgacz, M. Petrova, Y. Tan, dan A. Abay, 174, hal. 02014. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017402014>.

Sherman, L.K. (1932) "Streamflow from rainfall by the unit graph method," *Engineering News-Record*, hal. 5001–5005.

Soewarno (1995) *Hidrologi: Aplikasi metode statistik untuk analisa data*. Jilid 1. Bandung: Nova Bandung.

Suripin (2004) *Sistem drainase perkotaan yang berkelanjutan*. Yogyakarta: Andi Offset.

Valenzuela, L. (2016) "Design, construction, operation and the effect of fines content and permeability on the seismic performance of tailings sand dams in Chile," *Obras y Proyectos*, (19), hal. 6–22. Tersedia pada: <https://doi.org/10.4067/S0718-28132016000100001>.

Widodo, A., Utama, W., Purwanto, M.S. dan Fajar, M.H.M. (2020) "Analisis parameter fisis lempung dalam penentuan daya dukung tanah (Studi kasus: Kecamatan Manyar, Kabupaten Gresik)," *Jurnal Geosaintek*, 6(2), hal. 61–70. Tersedia pada: <https://doi.org/10.12962/j25023659.v6i2.5445>.

Lampiran 1. Peta catchment area

