

BAB 2. TINJAUAN TEORI

2.1 Sistem Penyaliran Tambang

Dalam kegiatan penambangan terbuka, sistem penyaliran memegang peranan krusial karena fungsinya menjaga agar area kerja tidak terganggu oleh keberadaan air. Apabila air di dalam *pit* tidak tertangani dengan baik, dampaknya dapat berupa penurunan performa unit alat, terhambatnya proses penambangan, hingga meningkatnya risiko genangan (Warsito dkk., 2018). Dua sumber utama air yang perlu dikendalikan pada sistem penyaliran tambang terbuka adalah limpasan permukaan dan air tanah. Limpasan (*runoff*) terbentuk akibat air hujan yang tidak terserap ke dalam tanah, sehingga mengalir di atas permukaan menuju titik dengan ketinggian yang lebih rendah (Pontoh & Sudrajat, 2005). Di sisi lain, air tanah (*groundwater*) merupakan air yang mengisi rongga pori pada batuan atau tanah di bawah permukaan, yang merembes ke area tambang melalui celah-celah batuan, sekaligus berfungsi menjaga ketersediaan air secara alami (Alfan dkk., 2024).

Pengelolaan kedua sumber air tersebut dilakukan melalui penerapan sistem penyaliran tambang yang dirancang secara teknis agar mampu membatasi masuknya air ke dalam area penambangan sekaligus mengeluarkan air yang telah terakumulasi sehingga kegiatan operasional tidak terganggu (Afrizal dkk., 2022). Metode penyaliran tambang secara umum dibedakan menjadi *mine drainage*, yaitu metode pencegahan masuknya air limpasan dan air tanah, serta *mine dewatering*, yaitu metode pengeluaran air melalui kolam penampung, saluran terbuka, serta sistem pemompaan dan pemipaan (Nauli dkk., 2024).

2.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Sistem Penyaliran Tambang Terbuka

Keberadaan sistem penyaliran pada kegiatan tambang terbuka memegang peranan krusial guna memastikan area kerja dalam kondisi aman. Agar rancangan sistem penyaliran dapat berjalan secara efektif, diperlukan pemahaman awal mengenai berbagai faktor yang berpengaruh terhadap kinerja serta tingkat efektivitas sistem tersebut.

2.2.1 Curah Hujan

Curah hujan merupakan salah satu unsur meteorologi yang menggambarkan jumlah air hujan yang jatuh ke permukaan bumi dalam periode waktu tertentu. Pengukuran curah hujan dilakukan menggunakan alat penakar hujan untuk memperoleh besarnya presipitasi yang terjadi pada suatu wilayah. Besarnya curah hujan di setiap daerah dapat bervariasi karena dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain kondisi iklim, topografi, pergantian musim, serta letak geografis wilayah. Oleh sebab itu, diperlukan analisis data curah hujan untuk mengetahui karakteristik distribusinya (Sultan dkk., 2022). Analisis ini mencakup penentuan curah hujan rencana, kala ulang hujan, serta nilai intensitas hujan, yang selanjutnya dijadikan sebagai dasar dalam perhitungan hidrologi, guna memperkirakan debit limpasan.

Tahapan awal untuk menentukan nilai curah hujan rencana yaitu curah hujan maksimum yang diperkirakan terjadi pada suatu periode ulang (Ruhiat, 2022). Ketelitian hasil perhitungan sangat dipengaruhi oleh pemilihan jenis distribusi yang sesuai dengan karakteristik data. Pemilihan distribusi probabilitas tersebut dilakukan melalui evaluasi beberapa parameter statistik, antara lain nilai rata-rata, standar deviasi, koefisien variasi, *skewness*, dan kurtosis (Linsley dkk., 1996). Nilai masing-masing tersebut dihitung menggunakan Persamaan 2.1–2.3 (Fahraini & Rusdiansyah, 2020).

$$Cv = \frac{Sd}{\bar{x}} \quad (2.1)$$

$$Cs = \frac{n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)Sd^3} \quad (2.2)$$

$$Ck = \frac{n^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^4}{(n-1)(n-2)(n-3)Sd^4} \quad (2.3)$$

Keterangan :

Sd = Standar deviasi

Cv = Koefisien variasi

X_i = Curah hujan maksimum (mm/hari)

Cs = Koefisien *skewness*

$\bar{x}$ = Curah hujan rata-rata (mm/hari)

Ck = Koefisien kurtosis

n = Jumlah data

Curah hujan rencana tersebut dapat dihitung menggunakan berbagai jenis distribusi seperti distribusi Normal, Log Normal, Gumbel, dan Log Pearson III. Ketentuan pemilihan jenis distribusi tersebut disajikan secara rinci pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kriteria pemilihan distribusi (Widyasari, 2005).

Jenis Distribusi	Syarat
Normal	$C_s = 0$ $C_k = 3$
Log Normal	$C_s = 3C_v$ $C_v > 0$
Gumbel	$C_s \leq 1,14$ $C_k \leq 5,40$
Log Pearson III	$C_s = 0$ $C_k = 4-6$

Distribusi Gumbel merupakan salah satu distribusi yang umum digunakan dalam analisis curah hujan berdasarkan teori distribusi nilai ekstrem (Gautama, 1999). Distribusi ini digunakan untuk menganalisis hujan maksimum tahunan dan perhitungannya mengacu pada Persamaan 2.4 (Rozi dkk., 2022).

$$X_t = \bar{X} + \frac{Sd}{S_n}(Y_t - Y_n) \quad (2.4)$$

Keterangan :

X_t = Curah hujan rencana (mm/hari)	S_n = Deviasi <i>reduced variate</i>
$\bar{X}$ = Curah hujan rata-rata (mm/hari)	Y_t = <i>Reduced variate</i>
Sd = Standar deviasi	Y_n = Rata-rata <i>reduced variate</i>

Parameter lain yang berperan penting dalam analisis curah hujan rencana adalah periode ulang hujan. Periode ulang hujan merupakan selang waktu yang menunjukkan kemungkinan terjadinya suatu kejadian curah hujan dengan nilai tertentu (Widyawati dkk., 2020). Acuan penetapan periode ulang hujan disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Penetapan periode ulang hujan rencana (Alfan dkk., 2024).

Area Kegiatan	Periode Ulang Hujan (Tahun)
Daerah terbuka	0,5
Sarana tambang	2 – 5
Lereng-lereng tambang dan penimbunan	5 – 10
Sumuran utama	10 – 25
Penyaliran keliling tambang	25
Pemindahan aliran sungai	100

Nilai curah hujan rencana digunakan untuk menghitung intensitas curah hujan (I), yaitu besarnya hujan per satuan waktu (mm/jam) yang mencerminkan tingkat kederasan hujan. Intensitas hujan memengaruhi debit limpasan permukaan dan dihitung menggunakan metode Mononobe, yang didasarkan pada waktu konsentrasi aliran (t_c) yang dipengaruhi oleh panjang aliran (L) dan beda elevasi (H). Perhitungan dinyatakan dalam Persamaan 2.5 dan 2.6 (Warsito dkk., 2018).

$$t_c = 0,871 \times \left[\frac{L^3}{H} \right]^{0,385} \quad (2.5)$$

$$I = \frac{X_t}{24} \times \left[\frac{24}{t_c} \right]^{2/3} \quad (2.6)$$

2.2.2 Debit Air Limpasan

Debit air limpasan (Q) merupakan besarnya aliran air permukaan yang masuk ke area penambangan. Debit air limpasan dapat ditentukan setelah diketahui luas daerah tangkapan hujan, intensitas curah hujan, dan koefisien limpasan (Aditya dkk., 2021). Besar debit air limpasan dihitung menggunakan metode Rasional dengan Persamaan 2.7 (Endriantho & Ramli, 2009).

$$Q = 0,278 \times C \times I \times A \quad (2.7)$$

Keterangan :

Q = Debit air limpasan (m^3/detik) I = Intensitas curah hujan (mm/jam)
C = Koefisien limpasan A = Luas daerah tangkapan hujan (km^2)

Besarnya debit air limpasan dipengaruhi oleh luas Daerah Tangkapan Hujan (DTH), intensitas curah hujan, serta karakteristik permukaan lahan yang dinyatakan dalam koefisien limpasan. DTH merupakan wilayah permukaan yang mengalirkan air hujan dari elevasi yang lebih tinggi menuju titik terendah (Khalik dkk., 2020). Luas DTH ditentukan melalui analisis peta topografi untuk mengetahui elevasi, arah aliran, dan batas daerah tangkapan menggunakan metode poligon tertutup (Syarifuddin dkk., 2017). Nilai koefisien limpasan ditentukan berdasarkan kondisi penggunaan lahan dan kemiringan lereng, yaitu kemampuan suatu permukaan dalam mengalirkan air hujan menjadi limpasan permukaan (Norfaeda dkk., 2025). Nilai koefisien pada kemiringan kegunaan lahan dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Koefisien limpasan (Firmansyah dkk., 2025).

Kemiringan Lereng (%)	Penutup Lahan	Koefisien Limpasan
< 3%	Sawah, rawa	0,2
	Hutan, perkebunan	0,3
	Area permukiman dengan taman	0,4
3%–15%	Hutan, perkebunan	0,4
	Area permukiman	0,5
	Vegetasi jarang	0,6
	Area pembuangan (disposal area)	0,7
> 15%	Hutan	0,6
	Area permukiman	0,7
	Vegetasi jarang	0,8
	Area pertambangan	0,9

2.2.3 Air tanah

Kondisi litologi serta keadaan geologi pada suatu kawasan sangat memengaruhi kemampuan batuan dalam menyimpan maupun meloloskan air tanah. Air tanah sendiri didefinisikan sebagai bagian dari air bawah permukaan yang mengisi zona jenuh, yakni lapisan di mana seluruh ruang pori dan celah rekahan telah terisi penuh oleh air (Kartini & Rizani, 2024). Secara hidrogeologis, air tanah bergerak dari *recharge area* (daerah air masuk) menuju *discharge area* (daerah air keluar) dan dapat muncul dalam bentuk mata air, rembesan, atau aliran pada sumur (Prawira dkk., 2024). Besarnya air yang terserap dipengaruhi oleh infiltrasi, intensitas dan durasi hujan, serta sifat lapisan tanah atau batuan (Sudinda, 2021). Dalam tambang terbuka, kemunculan air tanah perlu dikelola dengan baik karena berpotensi mengganggu operasional, sehingga pemahaman kondisi hidrogeologi menjadi aspek penting dalam perencanaan sistem penyaliran tambang.

2.3 Kolam Penampungan (*Sump*) dan Saluran Terbuka

Kolam penampungan (*sump*) dan saluran terbuka merupakan komponen utama dalam pengendalian air permukaan dan air tanah di area tambang. Perancangannya harus disesuaikan dengan kondisi topografi, kapasitas aliran, dan debit air masuk untuk mencegah genangan pada area *front* penambangan.

2.3.1 Kolam Penampungan (*Sump*)

Kolam penampungan (*sump*) adalah fasilitas yang berperan menampung sementara air tambang sebelum air tersebut melalui proses pemompaan (Hidayat,

2017). Dimensi *sump* mengacu pada Keputusan Menteri ESDM Nomor 1827 K/30/MEM/2018 mengenai Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik. Ketentuan tersebut mensyaratkan bahwa fasilitas penampungan air tambang minimal harus mencapai 1,25 kali dari volume air tambang pada kondisi curah hujan selama 84 jam (Kasih dkk., 2024). Volume *sump* dihitung dengan mengacu pada Persamaan 2.8 (Adnyano & Bagaskoro, 2020).

$$V_{sump} = \left(\frac{1}{2} (t + b) \times d \times L \right) \quad (2.8)$$

Keterangan :

t = Panjang permukaan *sump* (m) d = Kedalaman *sump* (m)

b = Panjang dasar *sump* (m) L = Lebar permukaan *sump* (m)

2.3.2 Saluran Terbuka

Saluran terbuka memiliki fungsi untuk mengalirkan air menuju lokasi yang telah ditentukan. Penentuan bentuk penampang saluran mempertimbangkan besarnya debit aliran, jenis material penyusun, serta kemudahan dalam pelaksanaan konstruksi. Analisa kapasitas pengaliran dimensi saluran terbuka, digunakan metode Manning dirumuskan pada Persamaan 2.9 (Kurnia, 2018).

$$Q_m = \frac{1}{n} \times A \times R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

Keterangan :

Q_m = Debit pengaliran maksimum (m³/detik) n = Koefisien kekasaran Manning

R = Jari-jari hidrolis (m) A = Luas penampang saluran (m²)

S = Gradien kemiringan saluran (%)

Nilai koefisien kekasaran Manning ditentukan berdasarkan kekasaran dinding saluran terbuka yang dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Koefisien kekasaran manning (Yuliantini, 2014)

Kekasaran Dinding	Nilai Koefisien Manning
Besi tuang dilapis	0,014
Kaca	0,010
Saluran beton	0,013
Bata dilapis mortar	0,015
Pasangan batu disemen	0,025
Saluran tanah bersih	0,022
Saluran tanah	0,030

2.4 Sistem Pemompaan dan Pemipaan

Analisis sistem pemompaan dan pemipaan dilakukan guna memperoleh nilai debit aktual, *head* total, durasi pemompaan, tingkat efisiensi, serta jumlah kebutuhan pompa. Tujuan dari analisis ini adalah untuk menilai sejauh mana kinerja sistem pompa yang dipakai sudah optimal.

2.4.1 Kebutuhan Pompa dan Pipa

Pompa dan pipa merupakan elemen penting dalam merancang sistem pemompaan pada area tambang, yang berfungsi mengalirkan air dari *sump* menuju titik pembuangan dengan aman dan efisien. Perhitungan kebutuhan pompa dilakukan dengan membandingkan total debit air yang mengalir masuk ke *sump* terhadap debit pemompaan aktual, yang kemudian disesuaikan dengan jumlah pompa *eksisting* (Sularso dkk., 1987). Kebutuhan jumlah pompa dihitung menggunakan Persamaan 2.10.

$$\text{Kebutuhan pompa} = \frac{\text{Debit total air}}{\text{Debit pompa} \times \text{Waktu operasional pompa}} \quad (2.10)$$

2.4.2 Head Loss Total Pompa

Head loss total pompa merupakan gabungan antara *head* statis dengan seluruh kehilangan energi yang terjadi di sepanjang sistem pemipaan, mencakup kerugian akibat gesekan, belokan pipa, katup, maupun sambungan. Nilai ini menjadi acuan dalam menentukan pilihan pompa sekaligus mengevaluasi kinerjanya. Perhitungan *head loss* total pompa mengikuti Persamaan 2.11 (Sularso dkk., 1987).

$$H_t = (h_2 - h_1) + \left[\lambda \left(\frac{L_{\text{keluar}}}{D_{\text{keluar}}} + \frac{L_{\text{hisap}}}{D_{\text{hisa}}} \right) + f_v + 1 \right] \frac{v^2}{2g} \quad (2.11)$$

Keterangan :

H_t = Head total pompa (m)	v = Kecepatan aliran pipa (m/detik)
h_2 = Elevasi pipa keluar (m)	g = Gaya gravitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$)
h_1 = Elevasi pipa masuk (m)	L = Panjang pipa (m)
f_v = Koefisien kerugian katup	D = Diameter pipa (m)
λ = Koefisien gesek	

2.4.3 Water Balance

Water Balance (Q_{ac}) menggambarkan kondisi keseimbangan antara debit air yang masuk ke area tambang (Q_{in}) dengan debit air yang dikeluarkan (Q_{out}) melalui sistem. Kondisi *sump* dinyatakan aman apabila tidak terjadi genangan pada area *front* kerja, sedangkan kondisi tidak aman menunjukkan adanya genangan (Rosdiana dkk., 2025). Hubungan tersebut dinyatakan dalam Persamaan 2.12.

$$Q_{ac} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.12)$$

2.5 Biaya Pemompaan dan Pemipaan

Biaya pemompaan dan pemipaan merupakan komponen penting dalam perencanaan sistem penyaliran tambang karena berkaitan langsung dengan kebutuhan operasional dan efisiensi sistem. Perhitungan biaya pemompaan diawali dengan menentukan konsumsi bahan bakar (*fuel consumption*) pompa, yang dipengaruhi oleh *power absorb* dan *power engine*. Besarnya *power absorb* dihitung *head loss* total (H_t), debit pompa (Q), *specific gravity* (S_g) fluida, serta efisiensi pompa. Selanjutnya, nilai *fuel consumption* dihitung berdasarkan besarnya *power absorb* dan *power engine*. Perhitungan *power absorb* dan *fuel consumption* dapat dilakukan menggunakan Persamaan 2.13 dan 2.14 (Maryenti & Murad, 2019).

$$Power\ Absorb = \frac{H_t \times Q \times S_g}{367 \times \text{Efisiensi}} \quad (2.13)$$

$$Fuel\ Consumption = \frac{Power\ absorb \times Power\ engine}{1000 \times 0,83} \quad (2.14)$$

Perhitungan biaya pemipaan juga perlu dilakukan dengan mempertimbangkan panjang pipa dan harga pipa per meter. Secara keseluruhan, biaya pemompaan dan pemipaan ditentukan berdasarkan debit air yang dipompa, harga bahan bakar, waktu pemompaan, serta kebutuhan material pipa dengan Persamaan 2.15 dan 2.16 (Maryenti & Murad, 2019).

$$\text{Biaya Pemompaan} = Fuel\ consumption \times \text{Harga solar} \quad (2.15)$$

$$\text{Biaya Pemipaan} = \text{Panjang pipa} \times \text{Harga per meter} \quad (2.16)$$