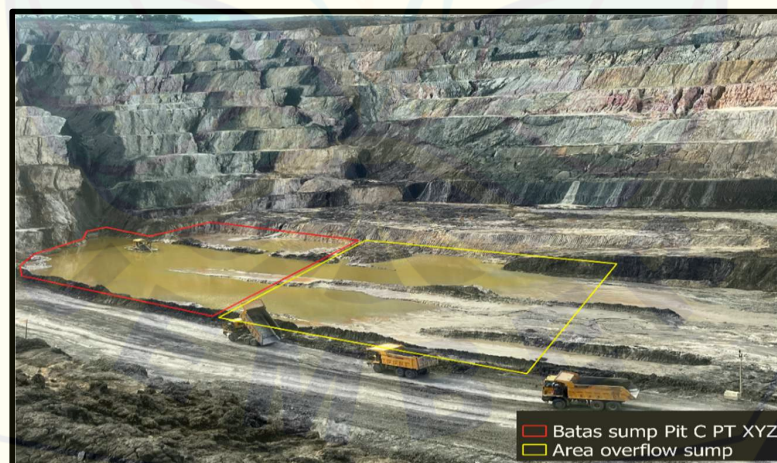


BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Daerah Penambangan di *Pit C PT XYZ*

Lokasi penelitian berada di *Pit C PT XYZ*, yang menerapkan metode penambangan terbuka (*open pit*) untuk kegiatan produksi batubara. Penerapan metode ini menghasilkan geometri tambang berupa jenjang (*bench*) dan dasar *pit* (*bottom pit*) (Lampiran 1). Air yang berasal dari berbagai sumber akan mengalir mengikuti kemiringan lereng menuju *bottom pit* sebelum ditampung pada kolam penampungan sementara (*sump*). *Sump* memiliki fungsi utama sebagai tempat penyimpanan sementara air tambang sebelum dialirkan keluar area penambangan melalui sistem pemompaan. Akan tetapi, hasil pengamatan di lapangan menunjukkan bahwa *sump* yang digunakan saat ini belum dirancang secara optimal. Kapasitas tampungnya masih belum mampu menampung seluruh debit air yang masuk ke dalam *pit*. Di samping itu, kapasitas sistem pemompaan yang tersedia juga belum mencukupi untuk mengeluarkan seluruh volume air yang terakumulasi di dalam *sump*. Kondisi tersebut menyebabkan peningkatan volume air pada saat terjadi hujan dengan intensitas tinggi tidak dapat ditangani secara maksimal. Akibatnya, air meluap dan membentuk genangan pada area penambangan, terutama di lokasi *front loading* batubara. Genangan tersebut berpotensi mengganggu bahkan menghentikan aktivitas pemuatan (*loading*) sehingga produktivitas operasi penambangan di *Pit C PT XYZ* menurun (Gambar 4.1).



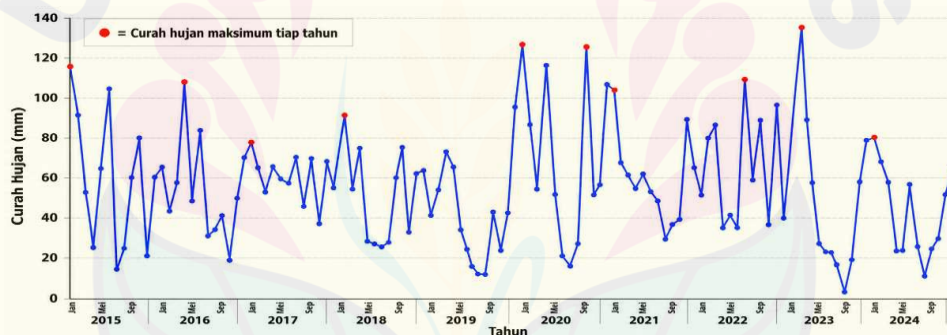
Gambar 4.1 Kondisi area *sump* dan genangan air pada *Pit C PT XYZ*

4.2 Analisis Debit Air Masuk ke *Pit* C PT XYZ

Debit air yang masuk ke area tambang berasal dari dua sumber utama, yaitu air limpasan permukaan (*surface runoff*) dan air tanah (*groundwater*). Kedua komponen tersebut perlu diperhitungkan dalam perencanaan sistem penyaliran. Tujuannya adalah agar air yang masuk ke dalam *pit* dapat dikendalikan sehingga tidak menimbulkan genangan yang mengganggu kegiatan penambangan.

4.2.1 Penentuan Curah Hujan Rencana

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data curah hujan yang diperoleh dari stasiun penakar hujan milik PT XYZ di area *pit* C selama periode 2015–2024 (Lampiran 2). Hasil pengamatan menunjukkan bahwa curah hujan bulanan tertinggi terjadi pada tahun 2020 dengan nilai 838 mm, sedangkan nilai terendah terjadi pada tahun 2024 dengan nilai 511,30 mm. Rata-rata curah hujan bulanan tertinggi terjadi pada bulan Januari, yaitu 82,73 mm, sedangkan rata-rata terendah terjadi pada bulan Agustus dengan nilai 35,06 mm. Distribusi data curah hujan selama periode pengamatan disajikan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Curah hujan Tahun 2015-2024

Dalam analisis hidrologi, data yang digunakan adalah curah hujan maksimum tahunan. Nilai curah hujan maksimum menunjukkan variasi setiap tahunnya. Curah hujan maksimum tertinggi terjadi pada tahun 2023 sebesar 134,60 mm, sedangkan nilai terendah terjadi pada tahun 2017 sebesar 77,50 mm. Sebelum menentukan distribusi frekuensi, dilakukan terlebih dahulu analisis parameter statistik. Parameter yang dihitung meliputi nilai rata-rata, standar deviasi, jumlah data, dan nilai simpangan. Hasil perhitungannya disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Rekapitulasi perhitungan parameter statistik (mm)

Tahun	X_i	$X_i - \bar{x}$	$(X_i - \bar{x})^2$	$(X_i - \bar{x})^3$	$(X_i - \bar{x})^4$
2015	116	11,59	134,3	1.556,86	18.044,0
2016	108	3,59	12,9	46,27	166,1
2017	77,5	-26,91	724,1	-19.486,83	524.390,5
2018	91,3	-13,11	171,9	-2.253,24	29.540,0
2019	97,4	-7,01	49,1	-344,47	2.414,7
2020	126,1	21,69	470,5	10.204,19	221.328,9
2021	104	-0,41	0,2	-0,07	0,0
2022	109,2	4,79	22,9	109,90	526,4
2023	134,6	30,19	911,4	27.516,26	830.715,8
2024	80	-24,41	595,8	-14.544,65	355.035,0
Total	1.044,1		3.093,23	2.804,22	1.982.161,51
Rata-rata ($\bar{x}$)	104,41				

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.1, diperoleh parameter statistik yang menggambarkan karakteristik data curah hujan maksimum tahunan selama periode 2015–2024. Parameter tersebut kemudian digunakan sebagai dasar untuk menghitung standar deviasi, koefisien variasi, *skewness*, serta kurtosis. Nilai-nilai tersebut selanjutnya dijadikan acuan dalam menentukan jenis distribusi frekuensi yang paling sesuai dengan karakteristik data curah hujan yang dianalisis. Dengan pemilihan distribusi yang tepat, nilai curah hujan rencana yang diperoleh diharapkan mampu merepresentasikan kondisi hujan ekstrem secara lebih akurat sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan sistem penyaliran tambang. Perhitungan masing-masing parameter statistik dilakukan menggunakan Persamaan 2.1–2.3, sebagai berikut:

- a. Standar deviasi (Sd)

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{3.093,23}{9}} = 18,54$$

- b. Koefisien variasi (Cv)

$$Cv = \frac{Sd}{\bar{x}} = \frac{18,54}{104,41} = 0,18$$

- c. Koefisien *skewness* (Cs)

$$Cs = \frac{n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)Sd^3} = \frac{10(2.804,22)}{(9)(8)(18,54)^3} = 0,06$$

- d. Koefisien kurtosis (Ck)

$$Ck = \frac{n^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^4}{(n-1)(n-2)(n-3)Sd^4} = \frac{10^2(1.982.161,51)}{(9)(8)(7)(18,54)^4} = 3,33$$

Berdasarkan hasil perhitungan parameter statistik tersebut, diperoleh nilai S_d sebesar 18,54, C_v sebesar 0,18, C_s sebesar 0,06, C_k sebesar 3,33. Parameter-parameter statistik tersebut digunakan untuk mengevaluasi karakteristik sebaran data curah hujan maksimum tahunan sekaligus menentukan jenis distribusi yang paling sesuai. Distribusi yang dipilih harus mampu merepresentasikan pola penyebaran data curah hujan sehingga nilai curah hujan rencana yang diperoleh dapat menggambarkan peluang terjadinya hujan ekstrem di lokasi penelitian. Selanjutnya, nilai C_v , C_s , dan C_k dibandingkan dengan persyaratan masing-masing distribusi, yaitu Distribusi Normal, Log Normal, Gumbel, dan Log Pearson Tipe III. Hasil evaluasi kesesuaian distribusi disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil analisis penentuan distribusi curah hujan

Jenis Distribusi	Syarat	Hasil	Keterangan
Normal	$C_s = 0$	$C_s = 0,06$	Tidak Memenuhi
	$C_k = 3$	$C_k = 3,33$	Tidak Memenuhi
Log Normal	$C_s = 3C_v$	$C_s = 0,06$	Tidak Memenuhi
	$C_v > 0$	$C_v = 0,18$	Memenuhi
Gumbel	$C_s \leq 1,14$	$C_s = 0,06$	Memenuhi
	$C_k \leq 5,40$	$C_k = 3,33$	Memenuhi
Log Pearson III	$C_s = 0$	$C_s = 0,06$	Tidak Memenuhi
	$C_k > 4-6$	$C_k = 3,33$	Tidak Memenuhi

Berdasarkan hasil evaluasi pada Tabel 4.2, distribusi Gumbel merupakan satu-satunya distribusi yang memenuhi seluruh persyaratan parameter statistik, dengan nilai C_s sebesar 0,06 ($\leq 1,14$) dan C_k sebesar 3,33 ($\leq 5,40$). Perhitungan menggunakan distribusi Gumbel memerlukan parameter *reduced variate* (Y_t), rata-rata *reduced variate* (Y_n), dan standar deviasi *reduced variate* (S_n) (Lampiran 3). Berdasarkan data curah hujan selama 10 tahun diperoleh nilai Y_n sebesar 0,4952 dan S_n sebesar 0,9496. Penentuan periode ulang mengacu pada Tabel 2.2, yaitu menggunakan periode ulang 10 tahun untuk area sumuran utama, sehingga diperoleh nilai Y_t sebesar 2,250. Hal ini sejalan dengan penelitian Noor dkk. (2020), yang melakukan penelitian serupa pada lokasi tambang batubara di Provinsi Kalimantan Selatan, sehingga pemilihan periode ulang tersebut telah sesuai dengan praktik perencanaan sistem penyaliran tambang terbuka pada wilayah dengan karakteristik serupa. Nilai-nilai parameter tersebut selanjutnya disubstitusikan untuk menghitung curah hujan rencana ke dalam Persamaan 2.4.

$$X_t = \bar{X} + \frac{S_d}{S_n}(Y_t - Y_n) = 104,41 + \frac{18,54}{0,9496}(2,250 - 0,4952) = 138,67 \text{ mm}$$

Berdasarkan hasil analisis menggunakan distribusi Gumbel, diperoleh nilai curah hujan rencana sebesar 138,67 mm. Nilai tersebut menggambarkan potensi hujan maksimum yang dapat terjadi di area penambangan *pit C*. Selanjutnya, curah hujan rencana digunakan sebagai dasar untuk menghitung intensitas hujan yang diperlukan dalam penentuan debit air limpasan pada sistem penyaliran tambang.

4.2.2 Debit Air Limpasan

Perhitungan debit air limpasan dilakukan berdasarkan intensitas hujan rencana dan karakteristik daerah tangkapan hujan (DTH) di lokasi penelitian. Nilai intensitas hujan diperoleh melalui perhitungan waktu konsentrasi aliran (tc), yaitu waktu yang dibutuhkan air hujan untuk mengalir dari titik terjauh daerah tangkapan hingga mencapai titik keluaran. Waktu konsentrasi dipengaruhi oleh panjang aliran (L) dan beda elevasi (H). Berdasarkan parameter tersebut, waktu konsentrasi dan intensitas hujan rencana dihitung menggunakan Persamaan 2.5–2.6 sebagai berikut:

a. Waktu konsentrasi (tc)

$$tc = 0,871 \times \left[\frac{L^3}{H} \right]^{0,385} = 0,871 \times \left[\frac{1,42 \text{ km}^3}{0,09 \text{ km}} \right]^{0,385} = 3,27 \text{ jam}$$

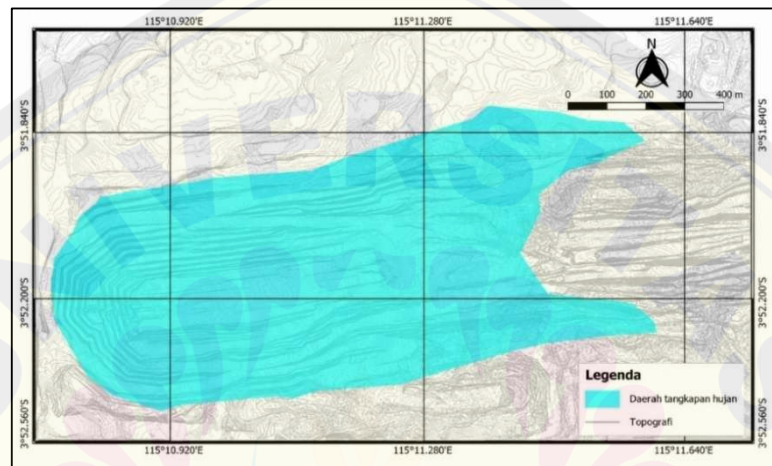
b. Intensitas hujan (I)

$$I = \frac{X_t}{24} \times \left[\frac{24}{tc} \right]^{2/3} = \frac{138,67 \text{ mm}}{24} \times \left[\frac{24}{3,27 \text{ jam}} \right]^{2/3} = 21,82 \text{ mm/jam}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh waktu konsentrasi (tc) sebesar 3,27 jam dan intensitas hujan rencana (I) sebesar 21,82 mm/jam atau 0,36 mm/menit pada area penelitian *pit C*. Menurut klasifikasi intensitas hujan oleh Yuliantini (2014), nilai tersebut termasuk dalam kategori hujan deras karena berada pada rentang 0,25–1,00 mm/menit. Intensitas hujan yang tergolong deras menunjukkan bahwa hujan yang terjadi berpotensi menghasilkan limpasan permukaan yang cukup besar pada daerah tangkapan hujan di *pit C*. Semakin tinggi intensitas hujan, semakin besar pula debit limpasan yang terbentuk dan mengalir menuju area penambangan. Oleh karena itu, nilai intensitas hujan rencana digunakan sebagai

salah satu parameter utama dalam perhitungan debit limpasan.

Perhitungan debit limpasan memerlukan data luas daerah tangkapan hujan (DTH). Batas DTH ditentukan berdasarkan pola kontur topografi sehingga seluruh aliran permukaan di dalam batas tersebut mengarah ke satu titik keluaran. Kondisi topografi juga digunakan sebagai dasar dalam menentukan jenis penutup lahan di area penelitian. Berdasarkan hasil identifikasi, penutup lahan di *pit* C didominasi oleh area penambangan aktif. Luas daerah tangkapan hujan yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Daerah tangkapan hujan *pit* C

Berdasarkan peta daerah tangkapan hujan (Gambar 4.3), luas DTH di *pit* C adalah 93,35 hektar atau 0,9335 km². Luas tersebut memenuhi kriteria penggunaan Metode Rasional karena masih berada di bawah 300 hektar, sesuai dengan penelitian Herison dkk. (2018), perhitungan debit limpasan pada penelitian ini menggunakan Metode Rasional. Perhitungan dilakukan dengan mempertimbangkan tiga parameter utama, yaitu intensitas hujan (*I*) sebesar 21,82 mm/jam, luas daerah tangkapan hujan (*A*) sebesar 0,9335 km², dan koefisien limpasan (*C*) sebesar 0,9 yang mengacu pada klasifikasi kawasan penambangan pada Tabel 2.3. Berdasarkan parameter tersebut, debit air limpasan dihitung menggunakan Persamaan 2.7.

$$\begin{aligned}
 Q &= 0,278 \times C \times I \times A \\
 &= 0,278 \times 0,9 \times 21,82 \text{ mm/jam} \times 0,9335 \text{ km}^2 \\
 &= 5,10 \text{ m}^3/\text{detik}
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa debit air limpasan yang masuk ke area penambangan *pit* C adalah sebesar 5,10 m³/detik atau setara dengan 18.344,57 m³/jam. Nilai tersebut selanjutnya dijadikan dasar perencanaan sistem penyaliran tambang. Perencanaan tersebut mencakup tiga komponen utama, yaitu kolam pengendapan, saluran terbuka, dan sistem pemompaan dan pemipaan .

4.2.3 Debit Air Tanah

Debit air tanah di lokasi penelitian dipengaruhi oleh kondisi geologi dan hidrogeologi setempat. Secara regional, area penelitian termasuk ke dalam Formasi Dahor (TQd) yang tersusun atas batupasir kuarsa, konglomerat, batulempung, dan sisipan lignit. Menurut Wahyono & Wianto (2008). , batupasir dan konglomerat memiliki permeabilitas yang tinggi sehingga berpotensi berperan sebagai akuifer. Kondisi tersebut memungkinkan terjadinya rembesan air tanah yang masuk ke area penambangan dan menambah debit air tambang. Berdasarkan data hasil pengukuran perusahaan, debit air tanah maksimum yang masuk ke area penelitian sebesar 1.400 m³/jam atau setara dengan 0,39 m³/detik. Nilai tersebut selanjutnya digunakan dalam perhitungan total debit air yang mengalir ke *sump*, bersama dengan debit air limpasan.

4.3 Perencanaan *Sump* dan Saluran Terbuka

Perancangan sistem penyaliran tambang mengacu pada hasil analisis total debit air yang masuk ke dalam *pit*. Sistem yang dirancang meliputi *sump* dan saluran terbuka dengan mempertimbangkan kondisi topografi, kapasitas tampung, serta kebutuhan operasional di lapangan. Perencanaan tersebut bertujuan untuk mengendalikan genangan air sehingga aktivitas penambangan tidak terganggu.

4.3.1 Desain *Sump*

Desain *sump* disusun berdasarkan total debit air yang masuk ke dalam *pit*. Debit tersebut terdiri atas debit air limpasan sebesar 18.344,57 m³/jam dan debit air tanah sebesar 1.400 m³/jam, sehingga total debit air yang masuk mencapai 19.744,57 m³/jam. Volume air yang masuk ke *sump* dihitung dengan mengalikan debit total terhadap waktu konsentrasi selama 3,27 jam. Berdasarkan perhitungan

tersebut, volume air yang masuk ke dalam *sump* adalah sebagai berikut:

$$V_{air\ masuk} = Q_{total} \times t = 19.744,57 \text{ m}^3/\text{jam} \times 3,27 \text{ jam} = 64.579,93 \text{ m}^3/\text{hari}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa volume air yang masuk ke dalam *sump* sebesar 64.579,93 m³/hari. Nilai tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan kapasitas *sump*. Perencanaan kapasitas *sump* mengacu pada Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018. Berdasarkan ketentuan tersebut, kapasitas kolam penampungan air tambang harus mampu menampung sedikitnya 1,25 kali volume air tambang pada kondisi curah hujan maksimum selama 84 jam (3,5 hari). Perhitungan volume *sump* rencana ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$V_{r.sump} = 64.579,93 \text{ m}^3/\text{hari} \times 1,25 \times 3,5 \text{ hari} = 282.537,18 \text{ m}^3$$

Berdasarkan hasil perhitungan, volume *sump* yang dibutuhkan adalah 282.537,18 m³. Kapasitas tersebut digunakan sebagai acuan dalam perancangan *sump* agar mampu menampung air tambang saat terjadi hujan ekstrem. Rekapitulasi hasil perhitungan disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil volume kapasitas *sump* pit C

Parameter	Nilai
Debit air limpasan (m ³ /jam)	18.344,57
Debit air tanah (m ³ /jam)	1.400,00
Debit total yang masuk <i>sump</i> (m ³ /jam)	19.744,57
Volume air yang masuk <i>sump</i> (m ³)	64.579,93
Volume <i>sump</i> berdasarkan standar Kepmen ESDM	282.537,18

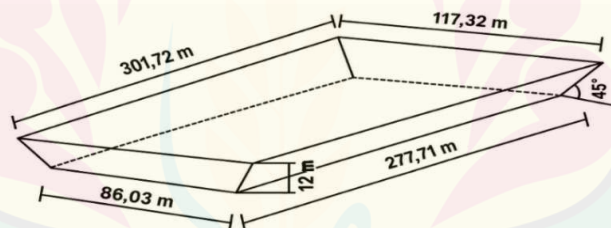
Berdasarkan Tabel 4.3, kapasitas *sump* telah memenuhi standar Kepmen ESDM RI. Kapasitas tersebut juga telah memperhitungkan faktor keamanan terhadap kondisi hujan maksimum. Pendekatan ini berbeda dengan penelitian Adnyano & Bagaskoro, (2020) yang menentukan dimensi *sump* berdasarkan selisih antara volume air masuk dan kapasitas pemompaan. Pada penelitian ini, penentuan kapasitas *sump* lebih difokuskan untuk mengantisipasi akumulasi air akibat durasi hujan yang panjang. Sementara itu, penelitian ini menggunakan pendekatan yang mengacu langsung pada standar regulasi pertambangan

Berdasarkan volume rencana yang telah ditetapkan, *sump* dirancang berbentuk prisma trapesium dengan kemiringan dinding 45°. Pemilihan kemiringan tersebut dimaksudkan untuk mempermudah proses pembuatan dan perawatannya

di lapangan (Sihombing dkk., 2025). Dimensi *sump* yang direncanakan terdiri dari lebar bagian atas sebesar 301,72 m, lebar bagian bawah sebesar 277,77 m, kedalaman sebesar 12 m, dan panjang sebesar 86,03 m. Penentuan ukuran dimensi tersebut didasarkan pada kondisi topografi aktual dasar *pit*, di mana desain *sump* dirancang mengikuti kontur dan batas lahan yang tersedia pada zona akumulasi air terendah. Berdasarkan dimensi yang telah direncanakan, volume *sump* dihitung menggunakan Persamaan 2.8.

$$\begin{aligned} V_{sump} &= \left(\frac{1}{2} (t + b) \times d \times L \right) \\ &= \left(\frac{1}{2} (301,72 \text{ m} + 277,77 \text{ m}) \times 12 \text{ m} \times 86,03 \text{ m} \right) \\ &= 299.110,58 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

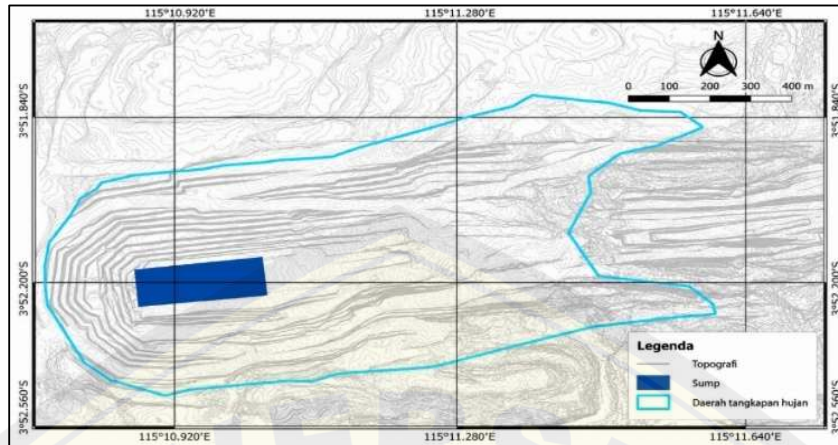
Volume *sump* hasil perancangan sebesar 299.110,58 m³ telah memenuhi standar volume rencana yang ditetapkan. Hal ini menunjukkan bahwa desain *sump* memiliki faktor keamanan yang memadai, sehingga risiko terjadinya limpasan air (*overflow*) yang dapat mengganggu kegiatan operasional. Rekomendasi desain dimensi *sump* dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Dimensi *sump*

Berdasarkan dimensi *sump* yang telah dirancang, posisi *sump* ditempatkan pada elevasi -75 m hingga -87 m di zona *bottom pit*. Posisi tersebut merupakan titik terendah *pit* C yang berfungsi sebagai titik konsentrasi aliran, sehingga seluruh air permukaan dari DTH akan terakumulasi di *sump* sebelum dipompa keluar dari area tambang. Menurut Ardiawan dkk. (2021), penempatan *sump* pada titik terendah area penambangan merupakan syarat utama agar sistem penyaliran bekerja optimal. Namun, penelitian tersebut belum mempertimbangkan elevasi spesifik *sump* sebagai dasar perancangan dimensi, sedangkan pada penelitian ini elevasi *sump* ditentukan berdasarkan kondisi topografi aktual *pit* C sehingga menghasilkan

rancangan yang lebih sesuai dengan kondisi lapangan. Posisi *sump* pada area penelitian disajikan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Posisi *sump* di *pit C*

4.3.2 Desain Saluran Terbuka

Saluran terbuka dirancang untuk mengalirkan air limpasan dari area *front* penambangan menuju *sump*. Penentuan dimensi saluran didasarkan pada kondisi topografi aktual di lokasi penelitian, meliputi beda elevasi, panjang saluran, dan kemiringan dasar saluran, sehingga air dapat mengalir secara gravitasi mengikuti kontur lahan yang ada. Hal ini sejalan dengan Gasali & Ardiansyah (2020), bahwa aliran air secara alami bergerak dari elevasi yang lebih tinggi menuju elevasi yang lebih rendah. Berdasarkan hasil perancangan, saluran terbuka direpresentasikan dalam bentuk penampang melintang (*cross section*) (Lampiran 5). Rekapitulasi dimensi saluran terbuka yang direncanakan disajikan pada Tabel 4.4.

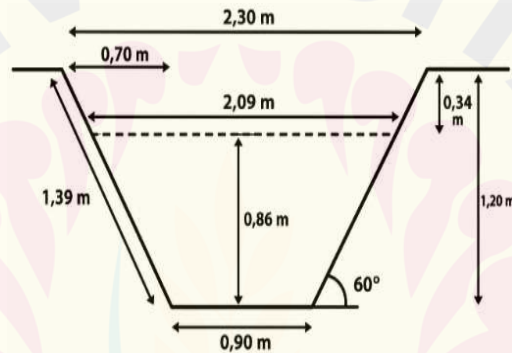
Tabel 4.4 Dimensi saluran terbuka

Parameter	Nilai
Beda elevasi (m)	20,00
Panjang saluran (m)	558,44
Panjang sisi saluran (m)	1,39
Kedalaman saluran (m)	1,20
Lebar dasar saluran (m)	0,90
Lebar permukaan saluran (m)	2,09
Kedalaman aliran (m)	0,86
Tinggi jagaan (m)	0,34
Jari-jari hidrolik (m)	0,43
Gradien kemiringan saluran	0,04
Luas Penampang saluran (m ²)	1,29
Koefisien kekasaran manning	0,02

Berdasarkan Tabel 4.4, diperoleh luas penampang saluran sebesar $1,29 \text{ m}^2$, jari-jari hidrolis $0,43 \text{ m}$, dan gradien kemiringan saluran $0,04$ (Lampiran 4). Perencanaan saluran menggunakan koefisien kekasaran Manning (n) sebesar $0,02$ yang mengacu pada saluran tanah bersih berdasarkan Tabel 2.4. Selanjutnya, kapasitas debit saluran terbuka dihitung menggunakan Persamaan 2.9.

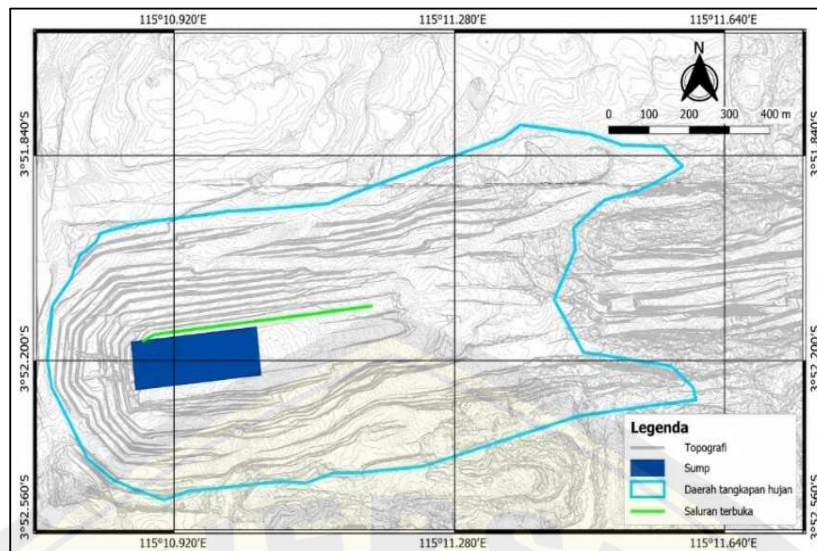
$$Q_m = \frac{1}{n} \times A \times R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{0,02} \times 1,29 \text{ m}^2 \times (0,43 \text{ m})^{\frac{2}{3}} \times 0,04^{\frac{1}{2}} = 6,31 \text{ m}^3/\text{detik}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, kapasitas debit saluran terbuka sebesar $6,31 \text{ m}^3/\text{detik}$ lebih besar dibandingkan dengan debit air limpasan yang masuk ke dalam *pit* sebesar $5,10 \text{ m}^3/\text{detik}$. Hal ini menunjukkan bahwa saluran yang direncanakan mampu mengalirkan air secara optimal tanpa menyebabkan genangan di *pit*. Desain rekomendasi bentuk saluran terbuka dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Dimensi saluran terbuka

Saluran dirancang dengan penampang trapesium dan kemiringan lereng 60° . Kemiringan ini dipilih untuk menjaga kestabilan dinding saluran dan mengurangi potensi longsor pada material yang relatif lepas (Dhaifullah & Rachmanto, 2024). Dimensi saluran terdiri atas lebar dasar $0,90 \text{ m}$, lebar atas $2,09 \text{ m}$, panjang sisi miring $1,39 \text{ m}$, dan kedalaman $1,20 \text{ m}$. Kedalaman aliran direncanakan $0,86 \text{ m}$ dengan *freeboard* $0,34 \text{ m}$. Nilai *freeboard* tersebut telah melebihi standar minimum $0,30 \text{ m}$ untuk debit kurang dari $10 \text{ m}^3/\text{detik}$ berdasarkan pedoman USBR. Dengan demikian, saluran memiliki faktor keamanan yang memadai. Hasil ini melengkapi penelitian Meliane dkk. (2021) yang hanya membahas bentuk penampang trapesium tanpa mempertimbangkan kebutuhan *freeboard* sebagai faktor keamanan. Jalur saluran terbuka ditunjukkan pada Gambar 4.7.

Gambar 4.7 Jalur saluran terbuka *pit C*

Analisis hidraulika saluran juga dilakukan menggunakan bilangan Froude (Lampiran 5). Berdasarkan hasil perhitungan, dengan debit $6,31 \text{ m}^3/\text{detik}$, luas penampang $1,29 \text{ m}^2$, dan kedalaman aliran $0,86 \text{ m}$, diperoleh kecepatan aliran rata-rata $4,90 \text{ m/detik}$ serta bilangan Froude sebesar $1,69$. Nilai $Fr > 1$ menunjukkan bahwa aliran termasuk aliran superkritik. Menurut Chow (1989), kondisi tersebut terjadi ketika gaya inersia lebih dominan dibandingkan gaya gravitasi sehingga aliran bergerak dengan kecepatan tinggi. Berdasarkan klasifikasi Yusuf & Gurawan (2013), nilai $Fr = 1,69$ termasuk kategori loncatan berombak (*undular jump*). Kondisi ini ditandai oleh gelombang kecil pada permukaan aliran dengan kehilangan energi yang relatif rendah. Karakteristik tersebut sesuai dengan saluran penyaliran tambang yang memiliki kemiringan dasar cukup curam.

4.4 Sistem Pemipaan dan Pemompaan

Sistem pemipaan dan pemompaan merupakan komponen penting dalam proses pengeluaran air yang terakumulasi di dalam *sump* pada *pit C*. Sistem ini berfungsi untuk memindahkan air dari *sump* menuju area pembuangan sehingga genangan air di area penambangan dapat diminimalkan dan aktivitas operasional tambang dapat berjalan secara optimal. Pada penelitian ini, jenis pompa yang digunakan adalah pompa DND 200-5HX dan pipa HDPE.

4.4.1 Sistem Pemipaan

Sistem pemipaan berfungsi sebagai media penyaluran air dari *sump* menuju area pembuangan selanjutnya. Pemilihan jenis pipa didasarkan pada karakteristik material yang mampu mengakomodasi kondisi area tambang pada *pit C*. Jenis pipa yang digunakan adalah pipa non-logam berupa *HDPE*, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.8.



Sumber: ragam pipa.com

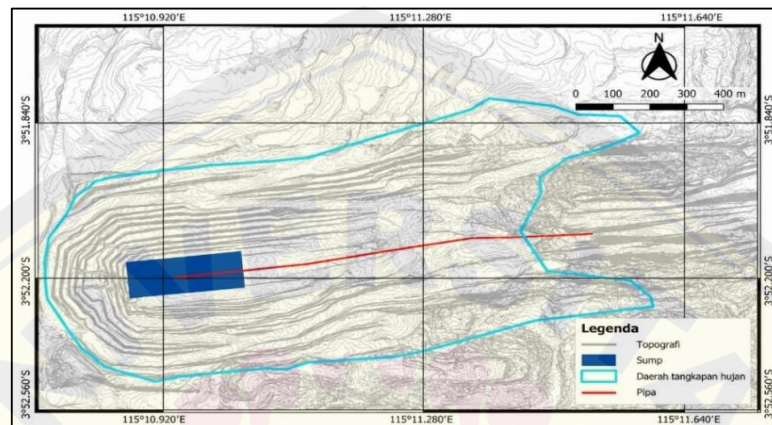
Gambar 4.8 (a) Pipa HDPE (b) Pipa HDPE di *pit C*

Pemilihan spesifikasi pipa didasarkan pada pipa *eksisting* yang terdapat di area *pit C*, yaitu pipa HDPE tipe PN 10 SDR 17 dengan diameter 10 inci. Pipa ini dipilih karena memiliki ketahanan terhadap tekanan internal, serta kondisi lingkungan tambang yang abrasif. Menurut penelitian Wibowo dkk. (2018) yang menyebutkan bahwa pipa HDPE juga unggul dalam kemudahan penyambungan dan pemeliharaan, tahan terhadap tekanan, serta bebas dari korosi. Jenis katup hisap pada pipa yang digunakan pada area penelitian adalah katup hisap bersaringan dengan nilai koefisien katup hisap sebesar 1,78 (Lampiran 6). Spesifikasi parameter aliran pada sistem pemipaan *pit C* disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Spesifikasi pipa	
Spesifikasi	Nilai
Diameter (m)	0,254
Ketebalan (m)	0,0148
Koefisien katup hisap	1,78
Luas penampang (m ²)	0,0381
Panjang pipa keluar (m)	1.117,90
Panjang pipa isap (m)	6
Koefisien gesek	0,02
Kecepatan aliran pipa (m)	3,84

Sistem pemipaan pada *pit C* dirancang untuk mengalirkan air dari *sump* menuju titik pembuangan dengan mempertimbangkan panjang pipa, diameter, dan

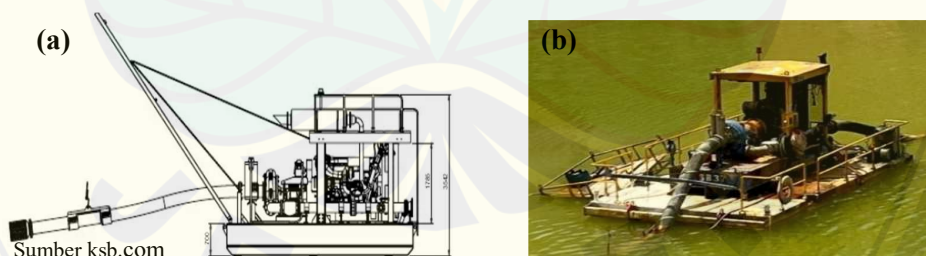
tekanan aliran yang sesuai dengan debit air yang harus dipompa. Panjang pipa keluar yang dibutuhkan untuk mengalirkan air dari *sump* menuju titik pembuangan adalah sebesar 1.117,90 m, sedangkan panjang pipa isap sebesar 6 m. *Cross section* sistem pemipaan pit C (Lampiran 5). Pipa tersebut dipasang dari posisi tengah *sump* menuju titik pembuangan, yaitu dari *temporary sump* menuju *main sump* sehingga keluar dari area *pit C*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Jalur sistem pemipaan *pit C*

4.4.2 Sistem Pemompaan

Sistem pemompaan berfungsi sebagai komponen utama dalam mengeluarkan air yang terakumulasi di dalam *sump* menuju area pembuangan. Pemilihan jenis pompa didasarkan pada kebutuhan debit dan *head loss* total yang telah dihitung sebelumnya. Jenis pompa yang digunakan pada penelitian ini adalah pompa DND 200-5HX berdasarkan pompa *eksisting* di *pit C*, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 (a) Pompa DND 200-5HX (b) Pompa DND 200-5HX di *pit C*

Berdasarkan debit aktual pompa di lapangan sebesar 700 m³/jam dan diameter pipa sebesar 0,254 m, dihitung parameter koefisien gesek serta kecepatan aliran

dalam pipa. Kedua parameter tersebut selanjutnya digunakan dalam perhitungan *head loss* pompa. Perhitungan parameter tersebut adalah sebagai berikut:

a. Koefisien gesek

$$\lambda = 0,02 + \frac{0,0005}{D} = 0,02 + \frac{0,0005}{0,254} = 0,02$$

b. Kecepatan aliran pipa

$$v = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{700}{\frac{3,14}{4} (0,254)^2} = 3,84 \text{ m/detik}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai koefisien gesek sebesar 0,02 dan kecepatan aliran dalam pipa sebesar 3,84 m/detik. Nilai tersebut digunakan dalam perhitungan *head loss* total pompa (H_t), yang meliputi seluruh kerugian energi pada pipa. Pada penelitian ini, air dipompa dari elevasi -75 m menuju elevasi -69 m, sehingga selisih elevasi turut memengaruhi besarnya *head loss* total. Perhitungan H_t dihitung menggunakan Persamaan 2.11.

$$\begin{aligned} H_t &= (h_2 - h_1) + \left[\lambda \left(\frac{L_{\text{keluar}}}{D_{\text{keluar}}} + \frac{L_{\text{hisap}}}{D_{\text{hisap}}} \right) + f_v + 1 \right] \frac{v^2}{2g} \\ &= (-69 - (-75)) + \left[0,02 \left(\frac{1117,90 \text{ m}}{0,254 \text{ m}} + \frac{6 \text{ m}}{0,0254 \text{ m}} \right) + 1,78 + 1 \right] \frac{3,84^2}{2(9,8)} \\ &= 81,3 \text{ m} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa *head loss* total yang harus diatasi oleh pompa adalah sebesar 81,3 m. Pompa yang digunakan harus memiliki *total dynamic head* (TDH) sebesar *head loss* total agar mampu mengalirkan air dari dalam *sump* menuju titik pembuangan. Pemilihan spesifikasi pompa ini didasarkan pada kemampuannya dalam mengatasi *head loss* akibat panjang pipa, gesekan, belokan, dan katup pada sistem pemipaan di *pit* C, sehingga air tambang dapat dikeluarkan dari dalam *sump*. Spesifikasi pompa yang digunakan disajikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Spesifikasi pompa

Spesifikasi	Nilai
Maksimum kecepatan pemompaan (RPM)	1.200
Head maksimum (m)	81,3
Debit pompa (m ³ /jam)	790
Efisiensi maksimum (%)	77

Berdasarkan Tabel 4.6, nilai debit pompa yang didapat adalah 790 m³/jam,

dengan efisiensi pompa mencapai 77% dan kecepatan maksimum 1.200 RPM, sebagaimana ditunjukkan pada grafik performa pompa (Lampiran 6). Penetapan kecepatan 1.200 RPM ini disesuaikan dengan kondisi *existing*, dengan mempertimbangkan pula stabilitas dan efisiensi kerja sistem pemompaan. Angka debit pompa tersebut selanjutnya dipakai sebagai dasar perhitungan jumlah pompa yang dibutuhkan pada area *pit* C, guna memastikan air yang masuk ke *sump* dapat dikeluarkan secara efektif. Menurut Nauli dkk. (2024), penentuan jumlah kebutuhan pompa didasarkan pada perbandingan antara total debit air yang masuk ke *sump* dengan kapasitas debit aktual pompa selama waktu operasional yang ada, sehingga seluruh air yang berada di area tambang dapat dikeluarkan secara optimal. Jumlah kebutuhan pompa tersebut dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.10.

$$\begin{aligned}\text{Kebutuhan pompa} &= \frac{\text{Debit total air}}{\text{Debit pompa} \times \text{Waktu operasional pompa}} \\ &= \frac{64.579,93 \text{ m}^3/\text{hari}}{790 \text{ m}^3/\text{jam} \times 20 \text{ jam}} \\ &= 4,09 \approx 4 \text{ unit pompa}\end{aligned}$$

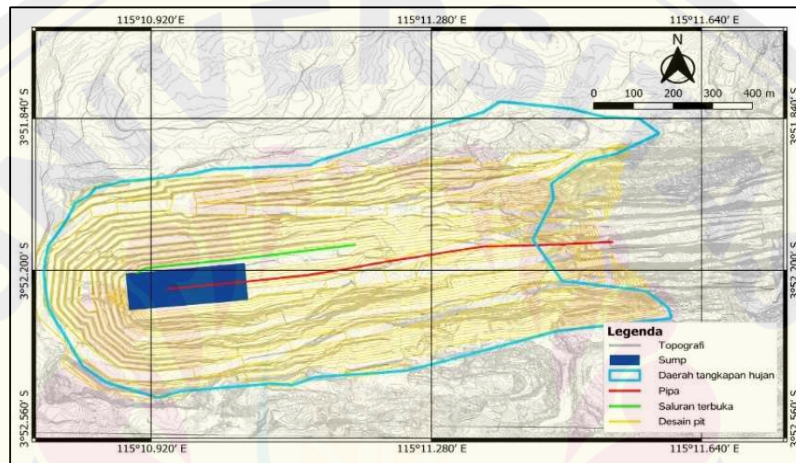
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kebutuhan jumlah pompa adalah sebesar 4 unit yang beroperasi selama 20 jam per hari. Jumlah tersebut dinilai mencukupi untuk mengeluarkan seluruh debit air yang masuk ke dalam *sump* dengan lama pengeringan selama 1,02 hari. Rincian hasil perhitungan tersebut sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Kapasitas pompa DND 200-5HX

Parameter	Nilai
Debit pompa (m ³ /jam)	790
Jumlah pompa	4
Jam kerja pompa (jam)	20
Kapasitas pompa (m ³ /jam)	3.160
Kapasitas pompa (m ³ /hari)	63.200
Lama pengeringan (hari)	1,02

Berdasarkan Tabel 4.7, total kapasitas pemompaan yang dihasilkan oleh 4 unit pompa adalah 63.200 m³/hari. Kapasitas ini lebih besar dibandingkan dengan total debit air yang masuk ke dalam *sump*, sehingga sistem pemompaan yang direncanakan dinilai mampu mengendalikan air tambang secara efektif. Meskipun

terdapat selisih antara debit air masuk dan keluar, kapasitas *sump* yang dirancang tetap mampu menampung akumulasi air tersebut. *Sump* ditempatkan pada elevasi terendah area penambangan agar air dapat mengalir secara gravitasi dan terkumpul secara optimal. Perencanaan ini disesuaikan dengan kondisi aktual lapangan, sejalan dengan William dkk. (2024), bahwa desain sistem penyaliran tambang perlu mempertimbangkan kondisi topografi guna meningkatkan efektivitas pengeringan. Saluran terbuka dibuat di dekat *front* penambangan untuk mengarahkan debit limpasan menuju *sump* sehingga genangan pada area kerja dapat diminimalkan. Selanjutnya, air dipompa keluar melalui sistem pemipaan yang jalurnya ditentukan berdasarkan kondisi topografi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.11 Peta sistem penyaliran terbuka *pit C*

4.4.3 Water Balance

Water Balance bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem pemompaan dalam menangani volume air yang masuk ke area tambang. Perhitungan ini membandingkan total debit air masuk dengan debit pemompaan, dihitung menggunakan Persamaan 2.12.

$$\begin{aligned}
 Q_{ac} &= Q_{in} - Q_{out} \\
 &= 64.579,93 \text{ m}^3/\text{hari} - 63.200 \text{ m}^3/\text{hari} \\
 &= 1.379,93 \text{ m}^3/\text{hari}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai *water balance* sebesar 1.379,93 m³/hari, yang menunjukkan bahwa Q_{in} masih lebih besar dibandingkan dengan Q_{out} . Kondisi tersebut mengindikasikan adanya potensi akumulasi air di

dalam *sump*. Namun demikian, akumulasi air harian tersebut hanya memanfaatkan sekitar 8,33% dari sisa kapasitas *sump*. Kapasitas *sump* yang dirancang sebesar 299.110,58 m³ juga telah melebihi volume rencana minimum sebesar 282.537,18 m³, sehingga selisih kapasitas sebesar 16.573,40 m³ masih mampu mengakomodasi akumulasi air harian tanpa menyebabkan *overflow* maupun genangan. Dengan demikian, sistem penyaliran yang dirancang masih berada dalam kondisi aman untuk mengendalikan kelebihan air yang masuk ke dalam *sump*. Hasil ini sejalan dengan Rosdiana dkk. (2025) yang menyatakan bahwa *water balance* positif masih dapat dikategorikan aman selama kapasitas *sump* mampu menampung akumulasi air tanpa menyebabkan genangan pada area *front* penambangan.

4.5 Estimasi Biaya Sistem Pemipaan dan Pemompaan

Penelitian ini menyertakan estimasi biaya sebagai bagian dari perencanaan sistem penyaliran tambang di *Pit C PT XYZ*. Berdasarkan hasil perencanaan sistem pemipaan dan pemompaan yang telah dilakukan, pipa yang digunakan adalah pipa HDPE tipe PN 10 SDR 17 dengan diameter nominal 10 inci sepanjang 1.117,90 m, sedangkan pompa yang digunakan adalah pompa DND 200-5HX sebanyak 4 unit dengan waktu operasional 20 jam per hari. Perhitungan estimasi biaya pemompaan diawali dengan menentukan daya yang diserap oleh pompa (*power absorb*). Nilai *specific gravity* (*Sg*) yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 1 kg/m³ karena fluida yang dipompakan berupa air. Perhitungan *power absorb* dihitung menggunakan Persamaan 2.13.

$$\begin{aligned} \text{Power absorb} &= \frac{H_t \times Q \times Sg}{367 \times \text{Efisiensi}} \\ &= \frac{81,3 \text{ m} \times 790 \text{ m}^3/\text{jam} \times 1 \text{ kg/m}^3}{367 \times 0,77} \\ &= 227,29 \text{ kW} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai *power absorb* sebesar 227,29 Kw, nilai tersebut selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam penentuan daya penggerak pompa yang sesuai. Nilai *power engine* yang digunakan menggunakan mesin penggerak tipe Volvo Penta TAD1643VE-B sebesar 565 kW (Lampiran 6). Mesin

ini dipilih karena memiliki daya yang lebih besar dibandingkan *power absorb*. Hal ini bertujuan untuk memberikan cadangan tenaga guna mengantisipasi peningkatan beban kerja akibat perubahan debit air dan kehilangan energi pada sistem perpipaan. Nilai *power absorb* dan *power engine* tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung konsumsi bahan bakar (*fuel consumption*) per unit pompa. Perhitungan *fuel consumption* dilakukan menggunakan Persamaan 2.14.

$$\begin{aligned} \text{Fuel Consumption} &= \frac{\text{Power absorb} \times \text{Power engine}}{1000 \times 0,83} \\ &= \frac{227,29 \text{ kW} \times 565 \text{ kW}}{1000 \times 0,83} \\ &= 119,13 \text{ liter/jam} \end{aligned}$$

Fuel consumption satu unit pompa adalah sebesar 119,13 liter/jam, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar perhitungan estimasi biaya operasional sistem pemompaan. Bahan bakar yang digunakan adalah Biosolar Industri (B40) dengan harga Rp22.600,00/liter yang berlaku pada periode penelitian Maret 2025 untuk Wilayah 2 (Kalimantan). Pemilihan jenis bahan bakar ini didasarkan pada pertimbangan teknis dan ekonomis, karena solar tersebut memiliki stabilitas pembakaran tinggi dan sesuai untuk mesin diesel berkapasitas besar yang beroperasi secara kontinu pada sistem penyaliran tambang. Rekapitulasi estimasi biaya pipa dan pompa disajikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Estimasi biaya pemipaan dan pemompaan

Parameter	Nilai
Panjang pipa (m)	1.117,90
Jumlah pompa	4
Jam kerja pompa (jam)	20
Debit Pompa (m ³ /jam)	790
Harga Pipa (m)	725.940,00
<i>Power engine</i> (kW)	565
<i>Power absorb</i> (kW)	227,29
<i>Fuel consumption</i> (liter/jam)	119,13
Harga solar (Rp/liter)	22.600,00

Berdasarkan Tabel 4.8, nilai parameter yang diperoleh digunakan untuk mengetahui besarnya biaya operasional pemompaan serta biaya pengadaan pipa pada sistem penyaliran di area *pit* C. Estimasi pemompaan yang diperhitungkan berdasarkan biaya *fuel consumption* yang dikeluarkan pompa selama satu hari.

Estimasi biaya pemompaan dan pemipaan dihitung menggunakan Persamaan 2.15-2.16 sebagai berikut:

- a. Total konsumsi bahan bakar

$$\begin{aligned} \text{Fuel total} &= \text{Fuel consumption} \times \text{Jumlah pompa} \times \text{Jam kerja pompa} \\ &= 119,13 \text{ liter/jam} \times 4 \times 20 \text{ jam} = 9.530,66 \text{ liter/hari} \end{aligned}$$

- b. Biaya pemompaan

$$\begin{aligned} \text{Biaya Pemompaan} &= \text{Fuel total} \times \text{Harga solar} \\ &= 9.530,66 \text{ liter/hari} \times \text{Rp}22.600,00 = \text{Rp}215.392.958,04 \end{aligned}$$

- c. Biaya pemipaan

$$\begin{aligned} \text{Biaya Pemipaan} &= \text{Panjang pipa} \times \text{Harga per meter} \\ &= 1.117,90 \text{ m} \times \text{Rp}725.940,00 = \text{Rp}811.529.777,88 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, total konsumsi bahan bakar untuk pengoperasian 4 unit pompa selama 20 jam per hari sebesar 9.530,66 liter/hari, sehingga diperoleh biaya operasional pemompaan sebesar Rp215.392.958,04. Selain itu, biaya investasi instalasi pipa di *pit C* mencapai Rp811.529.777,88 berdasarkan panjang pipa dan harga per meter. Estimasi biaya ini dihitung pada kondisi operasi ideal dengan asumsi harga bahan bakar konstan dan pompa bekerja pada kapasitas maksimum. Dalam kondisi aktual, biaya dapat berubah akibat fluktuasi harga bahan bakar, efisiensi pompa, *head loss*, dan *maintenance* alat.

Menurut Rahmi dkk. (2025), optimalisasi sistem pemompaan diperlukan untuk mempercepat pengeringan *sump* agar aktivitas penambangan tidak terganggu oleh genangan air. Sejalan dengan penelitian tersebut, biaya operasional pada penelitian ini dinilai masih sesuai dengan kebutuhan perusahaan karena sistem pemompaan dirancang untuk mencapai waktu pengeringan 1,02 hari guna mencegah *overflow* pada *sump* dan menjaga kelancaran aktivitas penambangan di *pit C*, sehingga produksi tetap terjaga dan potensi *downtime* dapat diminimalkan. Namun, biaya tersebut masih dapat dioptimalkan melalui peningkatan efisiensi sistem pemompaan, seperti pengurangan *head loss*, pengaturan jam operasional yang lebih efektif, serta *maintenance* pompa secara berkala untuk menekan konsumsi bahan bakar dan meningkatkan kinerja pompa.